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

CARACTERIZACIÓN DE LAS PROPIEDADES MINERALÓGICAS Y FISICOQUÍMICAS DE DOS FORMACIONES GEOLÓGICAS Tv Y Qp DISTRIBUIDAS EN LA ZONA 16 DE COORDENADAS N14°36´31.87", W90°27´40.85" Y N14°38´00.86", W90°27´43.82" DE LA CIUDAD DE GUATEMALA

Inga. Paola Judith Pérez Urquizú
Asesorado por MSc. Inga. Linda Silvia Alexandra Sandoval Fernández

Guatemala, septiembre de 2023

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA

FACULTAD DE INGENIERÍA

CARACTERIZACIÓN DE LAS PROPIEDADES MINERALÓGICAS Y FISICOQUÍMICAS DE DOS FORMACIONES GEOLÓGICAS Tv Y Qp DISTRIBUIDAS EN LA ZONA 16 DE COORDENADAS N14°36´31.87", W90°27´40.85" Y N14°38´00.86", W90°27´43.82" DE LA CIUDAD DE GUATEMALA

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

INGA. PAOLA JUDITH PÉREZ URQUIZÚ
ASESORADO POR MSC. INGA. LINDA SILVIA ALEXANDRA SANDOVAL FERNÁNDEZ

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

MAESTRA EN CIENCIAS EN INGENIERÍA GEOTÉCNICA

GUATEMALA, SEPTIEMBRE DE 2023

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA

FACULTAD DE INGENIERÍA

NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO a.i.	Ing. José Francisco Gómez Rivera
VOCAL II	Ing. Mario Renato Escobedo Martínez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Ing. Kevin Vladimir Cruz Lorente
VOCAL V	Br. Fernando José Paz González
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

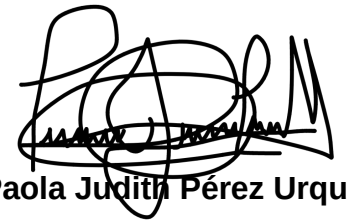
DECANO a.i.	Ing. José Francisco Gómez Rivera
EXAMINADORA	Mtra. Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
EXAMINADOR	Mtro. Ing. Armando Fuentes Roca
EXAMINADOR	Mtro. Ing. Sergio Antonio Castellanos López
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

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:

CARACTERIZACIÓN DE LAS PROPIEDADES MINERALÓGICAS Y FISICOQUÍMICAS DE DOS FORMACIONES GEOLÓGICAS Tv Y Qp DISTRIBUIDAS EN LA ZONA 16 DE COORDENADAS N14°36´31.87", W90°27´40.85" Y N14°38´00.86", W90°27´43.82" DE LA CIUDAD DE GUATEMALA

Tema que me fuera asignado por la Dirección de Escuela de Estudios de Postgrado con fecha 17 de junio de 2022.



Inga. Paola Judith Pérez Urquizú

Decanato
Facultad de Ingeniería
24189101- 24189102
secretariadecanato@ingenieria.usac.edu.gt

LNG.DECANATO.OI.634.2023

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 Estudios de Posgrado, al Trabajo de Graduación titulado: **CARACTERIZACIÓN DE LAS PROPIEDADES MINERALÓGICAS Y FISICOQUÍMICAS DE DOS FORMACIONES GEOLÓGICAS Tv Y Qp DISTRIBUIDAS EN LA ZONA 16 DE COORDENADAS N14°36´31.87", W90°27´40.85" Y N14°38´00.86", W90°27´43.82" DE LA CIUDAD DE GUATEMALA,** presentado por: **Inga. Paola Judith Pérez Urquizú,** que pertenece al programa de Maestría en ciencias en Ingeniería geotécnica después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
DECANO a.i.
Facultad de Ingeniería

Ing. José Francisco Gómez Rivera

Decano a.i.

Guatemala, septiembre de 2023

JFGR/gaoc

Guatemala, septiembre de 2023

LNG.EEP.OI.634.2023

En mi calidad de Directora 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 del asesor, verificar la aprobación del Coordinador de Maestría y la aprobación del Área de Lingüística al trabajo de graduación titulado:

"CARACTERIZACIÓN DE LAS PROPIEDADES MINERALÓGICAS Y FISICOQUÍMICAS DE DOS FORMACIONES GEOLÓGICAS Tv Y Qp DISTRIBUIDAS EN LA ZONA 16 DE COORDENADAS N14°36 □31.87", W90°27 □40.85" Y N14°38 □00.86", W90°27 □43.82" DE LA CIUDAD DE GUATEMALA"

presentado por **Inga. Paola Judith Pérez Urquizú** correspondiente al programa de **Maestría en ciencias en Ingeniería geotécnica** ; apruebo y autorizo el mismo.

Atentamente,

"Id y Enseñad a Todos"

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA · FACULTAD DE INGENIERÍA · DIRECCIÓN · ESCUELA DE POSTGRADO ·

Mtra. Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
Directora
Escuela de Estudios de Postgrado
Facultad de Ingeniería

Guatemala, 31 de mayo de 2023

M.A. Ing. Edgar Dario Alvarez Coti
Director
Escuela de Estudios de Postgrado
Presente

Estimado M.A. Ing. Alvarez Coti

Por este medio informo a usted, que he revisado y aprobado el **INFORME FINAL y ARTÍCULO CIENTÍFICO** titulado: **CARACTERIZACIÓN DE LAS PROPIEDADES MINERALÓGICAS Y FISICOQUÍMICAS DE DOS FORMACIONES GEOLÓGICAS TV Y QP DISTRIBUIDAS EN LA ZONA 16 DE COORDENADAS N14°36´31.87", W90°27´40.85" Y N14°38´00.86", W90°27´43.82" DE LA CIUDAD DE GUATEMALA** del estudiante **Paola Judith Perez Urquizu** quien se identifica con número de carné **200819706** del programa de Maestria En Ingenieria Geotecnica.

Con base en la evaluación realizada hago constar que he evaluado la calidad, validez, pertinencia y coherencia de los resultados obtenidos en el trabajo presentado y según lo establecido en el ***Normativo de Tesis y Trabajos de Graduación aprobado por Junta Directiva de la Facultad de Ingeniería Punto Sexto inciso 6.10 del Acta 04-2014 de sesión celebrada el 04 de febrero de 2014.*** Por lo cual el trabajo evaluado cuenta con mi aprobación.

Agradeciendo su atención y deseándole éxitos en sus actividades profesionales me suscribo.

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS
ESCUELA DE POSTGRADO
FACULTAD DE INGENIERIA
DE GUATEMALA

Msc. Ing. Armando Fuentes Roca
Coordinador
Maestria En Ingenieria Geotecnica
Escuela de Estudios de Postgrado

Guatemala, 31 de mayo de 2023

M.A. Ing. Edgar Dario Alvarez Coti
Director
Escuela de Estudios de Postgrados
Presente

Estimado M.A. Ing. Alvarez Coti

Por este medio informo a usted, que he revisado y aprobado el Trabajo de Graduación y el Artículo Científico: **"CARACTERIZACIÓN DE LAS PROPIEDADES MINERALÓGICAS Y FISICOQUÍMICAS DE DOS FORMACIONES GEOLÓGICAS TV Y QP DISTRIBUIDAS EN LA ZONA 16 DE COORDENADAS N14°36´31.87", W90°27´40.85" Y N14°38´00.86", W90°27´43.82" DE LA CIUDAD DE GUATEMALA"** del estudiante **Paola Judith Perez Urquizu** del programa de **Maestria En Ingenieria Geotecnica** identificado(a) con número de carné 200819706.

Agradeciendo su atención y deseándole éxitos en sus actividades profesionales me suscribo.

Linda S. Alexandra Sandoval Fernández
Ingeniera Civil
Colegiado: 13792

Mtra. Inga. Linda Silvia Alexandra Sandoval Fernadez
Colegiado No. 13792
Asesora de Tesis

ACTO QUE DEDICO A:

Dios Por ser mi respaldo y mentor espiritual en momentos cruciales de la vida y bendecirme con sabiduría para enfrentar las adversidades siendo mejor persona cada día de mi vida.

Mis padres Ricardo Pérez Meckler y Julia Catalina Urquizú Silva (q. e. p. d.) por ser mis ejemplos de vida y modelos a seguir. A ti mami amada, aunque no estás físicamente presente, tus enseñanzas siguen guiándome; espero estés celebrando en el cielo este logro.

Mi esposo Luis Fernando Berducido Arana mi compañero de vida; por tu paciencia, credibilidad, apoyo y amor por siempre. Te amo y te admiro.

Mi hija Alison Catalina Berducido Pérez el mejor regalo de Dios, mi vitalidad, mi todo! A tus dos añitos de vida te dedico este logro y espero sea uno de muchos en tu compañía y apoyo. Te amo hija preciosa, mi niña bonita.

AGRADECIMIENTOS A:

Dios	Por iluminar siempre mi camino, aumentar mi fé y fortaleza para alcanzar esta meta.
Universidad de San Carlos de Guatemala	Por ser mi casa de estudios y centro de mi formación académica.
Mi familia	Por su comprensión, amor y paciencia.
Mis amigos	José Istupe y Álvaro Guillermo; por su amistad y apoyo. Por compartir sus conocimientos en la realización de los distintos ensayos de laboratorio.
Mi asesora	Linda Sandoval, por su asesoría y apoyo.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE FIGURAS VII
LISTA DE SÍMBOLOS XI
GLOSARIO XV
RESUMEN XIX
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA XXI
OBJETIVOS XXIII
HIPÓTESIS XXV
RESUMEN DEL MARCO METODOLÓGICO XXVII
INTRODUCCIÓN XXXI

1. EL SUELO 1
1.1. Generalidades del suelo 1
1.1.1. El intemperismo 2
1.1.1.1. Intemperismo mecánico 2
1.1.1.2. Intemperismo químico 2
1.2. Textura del suelo 2
1.3. Estructura del suelo 3
1.4. Tipos de suelos 3
1.5. Clasificación de los suelos 5
1.5.1. Sistema AASHTO 5
1.5.2. Sistema unificado 7
1.6. Las rocas 17
1.6.1. Clasificación de rocas según su origen 17
1.6.1.1. Rocas ígneas 18
1.6.1.2. Rocas sedimentarias 18

1.6.1.3. Rocas metamórficas....18
1.6.2. Minerales formadores de rocas....19
1.6.2.1. Grupo I de minerales....19
1.6.2.2. Grupo II de minerales....20
1.6.2.3. Grupo III de minerales....20
1.7. Definición de la arcilla....23
1.7.1. Movimiento de las arcillas....24
1.7.2. Principal formación mineralógica de la arcilla....24
1.7.2.1. Formación caolinita....25
1.7.2.2. Formación Illita....25
1.7.2.3. Formación montmorillonita....25
1.7.3. Clasificación de las arcillas....26
1.7.3.1. Arcillas según su origen....26
1.7.3.2. Arcillas según su uso....28
1.7.4. Propiedades mecánicas....29
1.7.4.1. Plasticidad de arcillas....29
1.7.4.2. Contracción de arcillas....29
1.7.4.3. Densidad de arcillas....30
1.7.5. Propiedades físicas....30
1.7.5.1. Color de arcillas....30
1.7.5.2. Tamaño de la partícula....30
1.7.5.3. Porosidad de arcillas....31
1.7.6. Propiedades químicas....31
1.7.6.1. Alcalinidad de arcillas....32
1.7.6.2. Estabilidad química....32
1.7.6.3. Grado de acidez....33
1.8. Ensayos de laboratorio....34
1.8.1. Distribución granulométrica AASHTO T087-86 T088-00, ASTM D2421-98 D422-02....34

1.8.2. Límites de Atterberg AASHTO T090-00 ASTM D424-54 36
1.8.3. Gravedad específica AASHTO T100-6 ASTM D854-07 38
1.8.4. Corte directo AASHTO T236-03 ASTM D3080-0339
1.8.5. Consolidación AASHTO T216-07 ASTM D2435-03..... ..40
1.9. Estabilización de suelos arcillosos 42

2. FORMACIONES GEOLÓGICAS 45
2.1. Constitución geológica de Guatemala 45
2.1.1. Bloque Maya 46
2.1.2. Bloque Chortís 46
2.2. Geología regional 47
2.2.1. Geología I 48
2.2.2. Geología Qv 49
2.2.3. Geología Qa 49
2.2.4. Geología KTsb 49
2.2.5. Geología Pi 49
2.2.6. Geología Pzm 49
2.3. Geología local 50
2.3.1. Geología Qp 51
2.3.2. Geología Tv 52
2.3.3. Geología Ksd 53
2.4. Ubicación de muestras 54
2.4.1. Muestra M_1, unidad Tv 55
2.4.2. Muestra M_2, unidad Qp 56

3. DESARROLLO EXPERIMENTAL 57

3.1. Ensayos de laboratorio químico 57
3.1.1. Ensayos químicos muestra M_1, unidad Tv 57
3.1.1.1. Determinación de pH 57
3.1.1.2. Difracción de rayos X 58
3.1.1.3. Fluorescencia de rayos X 58
3.1.1.4. Reactividad potencial álcali-carbonato 59
3.1.2. Ensayos químicos muestra M2, unidad Qp 60
3.1.2.1. Determinación de pH 60
3.1.2.2. Difracción de rayos X 60
3.1.2.3. Fluorescencia de rayos X 61
3.1.2.4. Reactividad potencial álcali-carbonato 61
3.2. Ensayo de laboratorio de suelos 62
3.2.1. Ensayo físico–mecánico muestra M1 unidad Tv 62
3.2.1.1. Granulometría 62
3.2.1.2. Límites de Atterberg 65
3.2.1.2.1. Límite líquido 65
3.2.1.2.2. Límite plástico 68
3.2.1.2.3. Índice de plasticidad 69
3.2.1.3. Gravedad específica 70
3.2.1.4. Consolidación 72
3.2.1.5. Corte directo 79
3.2.2. Ensayo físico–mecánico muestra M2, unidad Qp 82
3.2.2.1. Granulometría 82
3.2.2.2. Límites de Atterberg 84
3.2.2.2.1. Límite líquido 84
3.2.2.2.2. Límite plástico 87
3.2.2.2.3. Índice de plasticidad 88

3.2.2.3. Gravedad específica 89
3.2.2.4. Consolidación 91
3.2.2.5. Corte directo 99

4. PRESENTACIÓN E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS.....103
4.1. Presentación de resultados 103
4.2. Interpretación de resultados 105
4.2.1. Interpretación de resultados Tv.....105
4.2.2. Interpretación de resultados Qp 106
4.3. Comparación de resultados 107
4.4. Correlación de variables obtenidas.....111
4.4.1. Arcillas contenidas según geología 111
4.4.2. Minerales contenidos según geología 112
4.4.3. Plasticidad según geología 113
4.4.4. Corte directo según fluorescencia rayos x.....114
4.4.5. Consolidación según fluorescencia rayos x.....115
4.5. Propuesta de mejoramiento de suelos arcillosos 117
4.5.1. Contenido de humedad 117
4.5.2. Retiro y/o cambio de suelo.....118
4.5.3. Incorporación de aditivos 118

CONCLUSIONES.....121
RECOMENDACIONES.....123
REFERENCIAS 125
APÉNDICES.....131
ANEXOS 135

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURAS

Figura 1. Suelos granulares generalmente utilizados en geotécnica 4
Figura 2. Suelos cohesivos generalmente utilizados en geotécnica 4
Figura 3. Gráfica de plasticidad 9
Figura 4. Diagrama de flujo: clasificar suelos de grano grueso 12
Figura 5. Diagrama de flujo: clasificar suelos de grano grueso 13
Figura 6. Diagrama de flujo: clasificar suelos de grano fino 14
Figura 7. Diagrama de flujo: clasificar suelos de grano fino 15
Figura 8. Diagrama de flujo: clasificar suelos orgánicos de grano fino 16
Figura 9. Diagrama de flujo: clasificar suelos orgánicos de grano fino 17
Figura 10. Ciclo de las rocas 19
Figura 11. Estructura de los grupos de minerales de las arcillas.....26
Figura 12. Tamaño según su formación mineralógica.....31
Figura 13. Curva granulométrica de un suelo de grano grueso.....35
Figura 14. Composición mineralógica en la plasticidad.....37
Figura 15. Configuración del ensayo de corte directo 39
Figura 16. Principios de consolidación.....41
Figura 17. Configuración del ensayo de consolidación 42
Figura 18. Mapa geológico simplificado de Guatemala y su entorno 46
Figura 19. Geología regional del departamento de Guatemala.....48
Figura 20. Geología local de la Ciudad de Guatemala 50
Figura 21. Localización de geología Qp.....51
Figura 22. Localización de geología Tv.....52
Figura 23. Localización de geología Ksd 53

Figura 24. Delimitación geográfica de zona 16 capitalina 54
Figura 25. Muestras extraídas en zona 16 ciudad capital 55
Figura 26. Curva granulométrica, Tv 64
Figura 27. Gráfica límite líquido, Tv 67
Figura 28. Curva de compresibilidad, Tv 78
Figura 29. Envolvente de falla, Tv 80
Figura 30. Curva granulométrica, Qp 83
Figura 31. Gráfica límite líquido, Qp.....86
Figura 32. Curva de compresibilidad, Qp 98
Figura 33. Envolvente de falla, Qp 100
Figura 34. Zonificación de geologías en estudio 110
Figura 35. Arcillas según geología 111
Figura 36. Minerales contenidos según geología 112
Figura 37. Índice de plasticidad según geología 113
Figura 38. Cohesión según óxidos predominantes 114
Figura 39. Ángulo de fricción según óxidos predominantes 115
Figura 40. Compresión según óxidos predominantes 116
Figura 41. Expansión según óxidos predominantes.....116

TABLAS

Tabla 1. Sistema de clasificación de suelos AASHTO 6
Tabla 2. Símbolos de identificación sistema unificado 8
Tabla 3. Práctica para clasificación de suelos 10
Tabla 4. Nomenclatura en la clasificación de suelos.....11
Tabla 5. Minerales comunes del grupo I 20
Tabla 6. Minerales comunes del grupo II 22
Tabla 7. Minerales comunes del grupo III 23
Tabla 8. Clasificación de arcillas por su origen 27

Tabla 9. Clasificación de arcillas por su uso 28
Tabla 10. pH de un suelo 33
Tabla 11. Límites según sistema de clasificación 36
Tabla 12. Gravedad específica de los suelos 38
Tabla 13. Difracción rayos X, Tv 58
Tabla 14. Fluorescencia RX, Tv 59
Tabla 15. Difracción RX, Qp 60
Tabla 16. Fluorescencia RX, Qp 61
Tabla 17. Granulometría, Tv 63
Tabla 18. Límite líquido, Tv 65
Tabla 19. Límite plástico, Tv 68
Tabla 20. Índice plasticidad, Tv 69
Tabla 21. Gravedad específica, Tv 70
Tabla 22. Datos para consolidación, Tv 72
Tabla 23. Valores calculados consolidación, Tv 76
Tabla 24. Parámetros curva de compresibilidad, Tv 77
Tabla 25. Coeficientes consolidación, Tv 79
Tabla 26. Corte directo, Tv 81
Tabla 27. Granulometría, Qp 82
Tabla 28. Límite líquido, Qp 85
Tabla 29. Límite plástico, Qp 87
Tabla 30. Índice plasticidad, Qp 89
Tabla 31. Gravedad específica, Qp 89
Tabla 32. Datos para consolidación, Qp 91
Tabla 33. Valores calculados consolidación, Qp 96
Tabla 34. Parámetros curva de compresibilidad, Qp 96
Tabla 35. Coeficientes consolidación, Qp 99
Tabla 36. Parámetros corte directo, Qp 101
Tabla 37. Resultados ensayos de laboratorios, Tv 103

Tabla 38. Resultados ensayos de laboratorios, Qp.....104
Tabla 39. Comparación resultados químico-mineralógicos.....108
Tabla 40. Comparación resultados físico-mecánicos.....109

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
H	Alta plasticidad
Al	Aluminio
C	Arcilla
CH	Arcilla de alta compresibilidad
CL	Arcilla de baja compresibilidad
OL	Arcilla orgánica entre limo orgánico
A	Área transversal
S	Arena
SC	Arena arcillosa
SW	Arena bien graduada
SM	Arena limosa
SP	Arena mal graduada
L	Baja plasticidad
W	Bien graduado
Pv	Carga vertical
C_c	Coeficiente de curvatura
C_u	Coeficiente de uniformidad
D_{10}	Diámetro con 10 % de granos finos
D_{30}	Diámetro con 30 % de granos finos
D_{60}	Diámetro con 60 % de granos finos
σ_n	Esfuerzo normal
pH	Grado de acidez
°	Grados

G	Grava
GC	Grava arcillosa
GW	Grava bien graduada
GM	Grava limosa
GP	Grava mal graduada
G_s	Gravedad específica
H	Hidrógeno
Fe	Hierro
IP	Índice de plasticidad
LL	Límite líquido
LP	Límite plástico
M	Limo
MH	Limo de alta compresibilidad
ML	Limo de baja compresibilidad
O	Limos orgánicos y arcilla
Mg	Magnesio
P	Mal graduado
máx.	Máximo
≥	Mayor o igual que
>	Mayor que
≤	Menor o igual que
<	Menor que
mm	Milímetro
mín.	Mínimo
´	Minutos
M_1	Muestra 1
M_2	Muestra 2
núm.	Número

O	Oxígeno
%	Porcentaje
in.	Pulgadas en idioma inglés
”	Segundos
Si	Sílice
Δσ	Sobrecarga
I	Tipo de geología
Ksd	Tipo de geología
KTsd	Tipo de geología
Pi	Tipo de geología
Pzm	Tipo de geología
Qa	Tipo de geología
Qp	Tipo de geología
Qv	Tipo de geología
Tv	Tipo de geología
PT	Turba
Pt	Turba y suelos altamente orgánicos

GLOSARIO

Arcilla Considerado como suelo fino granular que generalmente puede presentar un comportamiento plástico, según sus características dentro de un intervalo de contenido de humedad y considerable resistencia al corte secado al aire.

Asentamiento Descenso vertical de la superficie del terreno, debido a la consolidación o fallas del suelo. Hundimiento gradual de una estructura.

Birrefringencia Propiedad asociada con la anisotropía de las fuerzas de unión entre los átomos que forman un cristal. Medida entre la refracción máxima y la refracción mínima.

Caracterización Determinación de los atributos o características peculiares de alguien o algo, de modo que, claramente se distinga del resto o de los demás.

Composición Finalidad de constituir algo. Acto de fusionar o reunir varias cosas y disponerlas en cierto orden para obtener una. Del suelo, es una capa que se ha ido formando con el paso del tiempo; la integran minerales, materia orgánica, organismos vegetales y animales, aire y agua.

Consolidación Proceso en el que un material reduce sus índices de vacío cuando se somete a cargas durante un período de tiempo.

Estabilización Tratamiento químico, físico o mecánico diseñado para mantener o aumentar la estabilidad de una masa de suelo o en la mayoría de los casos para mejorar de alguna manera sus propiedades geotécnicas.

Estructura Configuración espacial de todos los rasgos del suelo o de la roca tal como se manifiesta en cada unidad de material desde la red cristalina hasta los rasgos a mayor escala en los estudios de campo.

Exfoliación Propiedad de un mineral en partirse según las direcciones que sean de su preferencia.

Falla de corte Deformación y rotura en la corteza terrestre a lo largo de un desplazamiento de bloques.

Formación Extensión de suelo de considerable dimensión para ser cartografiada, caracterizada por su origen e historia geológica.

Geología Estudio de las rocas situadas cerca de la superficie terrestre. Estudia el origen, formación y evolución de los materiales que componen la Tierra; los materiales que la componen y su estructura.

Maclas	Asociaciones de varios cristales de un mismo mineral que presentan relaciones cristalográficas entre ellos. Es la agrupación simétrica de cristales idénticos.
Meteorización	Como consecuencia de la exposición a la atmósfera de un material, se desintegra y se descompone debido a la acción de sustancias químicas, cambios de temperatura y la presencia de agua.
Mineralogía	Ciencia dedicada al estudio específico de la composición, de la forma, de la estructura y de las propiedades de los minerales contenidos en el suelo.
Refracción	Cambio que experimenta una onda de luz en su dirección y en su velocidad al pasar de un estado líquido o estado gaseoso. Indica cuánto se desvía la trayectoria de la luz al entrar en un material.
Qp	Período cuaternario. Rocas intermedias presentan, características de rellenos y cubiertas gruesas de cenizas pómez de origen diverso.
Tv	Período terciario. Rocas que afloran en las partes altas de la cordillera, formando una faja que sobreyace discordantemente sobre formaciones paleozoicas. Se encuentran constituidas de piroclastos andesíticos con intercalaciones de lava.

RESUMEN

El suelo arcilloso es abundante en el ecosistema y en gran parte son productos de la meteorización; según el punto de vista mineralógico engloba a un grupo de filosilicatos en su mayor parte, cuyas propiedades físico – químicas dependen de su estructura y de su tamaño de grano; y desde el punto de vista petrográfico es la descomposición de los minerales y rocas cuando entran en contacto con la atmósfera.

Actualmente, cualquier tipo de edificación requiere de un suelo adecuado a la capacidad de carga al que sea diseñado y construido. Debido a la diversidad de geología en Guatemala los suelos pueden variar de un lugar a otro y a su vez se pueden encontrar suelos inestables, tal como las arcillas que son un grupo diverso de minerales de grano fino. Ante ello se presenta la investigación que tiene como prioridad la caracterización de las propiedades mineralógicas y fisicoquímicas de dos formaciones geológicas (Tv y Qp) distribuidas en la zona 16 capitalina.

Para llevar a cabo este tipo de estudio experimental se necesitará de una planificación en la que se indagará información existente y el alcance que tiene en las propiedades mineralógicas de las arcillas; luego se identificará en mapas geológicos las formaciones de interés y se reconocerán en campo para ser analizadas en laboratorio y de acuerdo con los datos obtenidos en los ensayos de laboratorio se realizará el análisis correlacional de las arcillas, de las formaciones geológicas y de los minerales contenidos en ellas; por último se presentarán los porcentajes de minerales que conforman al suelo arcilloso y se

establecerá comparación de éstos para emitir resultados y proponer posibles soluciones de estabilización en este tipo de suelo.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La ciudad de Guatemala se ha visto influenciada por el aumento en las construcciones de uso residencial y comercial. Las obras geotécnicas dependen de las formaciones y estructuras geológicas para su debida ejecución. Estas formaciones y estructuras varían de un lugar a otro y pueden encontrarse en grandes y pequeñas cantidades en los mantos de los suelos, entre ellos las arcillas.

Las arcillas pueden considerarse como suelos formados en la mayor parte de la corteza terrestre y por tanto es el tipo de mayor influencia en las obras civiles debido a sus propiedades mecánicas, esto por clasificarse como un material crítico y cohesivo el cual puede provocar asentamientos. La formación mineralógica en los suelos arcillosos identifica diferentes características físicas, a ello se suman las impurezas que contiene el suelo arcilloso estableciendo parámetros que determinan su diseño en las cimentaciones superficiales y la carencia de conocimiento en las composiciones mineralógicas con su efecto en las técnicas de estabilización son los posibles causantes del problema. Esto puede cambiar al punto de vista favorable, técnicamente, estableciendo un tratamiento correcto para su estabilización e identificando dos grupos de arcillas basándose en el estudio mineralógico junto con las propiedades físico - químicas.

Ante las posibles causas, es importante determinar técnicas adecuadas para la estabilización del material arcilloso según las características físicas y propiedades mecánicas, para que el criterio técnico y con enfoque en la consolidación de suelos sea el más apropiado evitando así resultados poco esperados.

Sin embargo, se observa e indaga que hay pocos estudios de las arcillas enfocadas al contenido de sus minerales. Por ello, surge la necesidad de investigar la caracterización de las propiedades mineralógicas de las formaciones geológicas identificadas como Tv y QP en zona 16 de la ciudad de Guatemala y como consecuencia las siguientes interrogantes:

- ¿Cuáles son los minerales de las arcillas procedentes de las formaciones geológicas en estudio?,

Asimismo, se formulan las preguntas secundarias:

- ¿Qué tipo de arcillas según su contenido de minerales se localizan en la zona?,

- ¿Por qué afectan las arcillas en las fallas de las cimentaciones en las obras civiles?,

- ¿Por qué es importante determinar el tratamiento adecuado para la estabilización según las caracterizaciones de las arcillas?

OBJETIVOS

General

Caracterizar las propiedades mineralógicas, físicas y mecánicas de las arcillas de dos formaciones geológicas para la determinación de soluciones aplicables a los suelos arcillosos con fines de estabilización.

Específicos

1. Identificar el tipo de minerales contenidos en las arcillas procedentes de las formaciones geológicas en el lugar de estudio para la consolidación de suelos.

2. Determinar el tipo de arcillas según su contenido de minerales para la elaboración de un mapa de la geología local.

3. Diferenciar el tipo de suelo arcilloso según su contenido de impurezas localizadas en el área de estudio para la recomendación del diseño de cimentaciones superficiales.

4. Establecer técnicas y criterios geotécnicos para la estabilización de los suelos arcillosos en las cimentaciones superficiales de obras civiles.

HIPÓTESIS

Las arcillas de las formaciones geológicas Tv y Qp identificadas y ubicadas en la zona 16 de la ciudad de Guatemala en el sector delimitado se consideran susceptibles a fallar, debido a la composición mineralógica que establece su caracterización, y genera influencia sobre las propiedades geotécnicas de los suelos al ser sometidos a esfuerzos cortantes.

RESUMEN DEL MARCO METODOLÓGICO

La investigación será de enfoque cuantitativo, de alcance correlacional, diseño experimental y de temporalidad transversal.

Para realizar el diseño de investigación experimental de caracterizar las propiedades mineralógicas y físico – químicas de dos formaciones geológicas distribuidas en zona 16 de la ciudad capital, se desarrollará el siguiente proceso:

- Etapa 1: recolección de la información

Se planteará la idea de investigación experimental a la Coordinación Académica de la Escuela de Estudios de Postgrado de la Facultad de Ingeniería, se analizará el problema observado y se aprobará la idea de investigación para la redacción de protocolo.

Se indagará sobre la información existente de las propiedades mineralógicas de las arcillas, es decir, antecedentes en relación con la cantidad de los minerales que conforman a las geologías que serán identificadas, caracterizadas, ensayadas en laboratorio y analizadas.

- Etapa 2: diseño experimental

Se revisará información en la constitución geológica de Guatemala; se definirá la representación de las rocas en sus diferentes edades luego se identificará el bloque tectónico y la diversidad de las formaciones que conforman el departamento de Guatemala, seguido de esto se localizará la zona de estudio

según el tipo de formación identificada (Tv y Qp) y por último serán ubicados los puntos de las muestras para ensayarlas en laboratorio y su posterior análisis.

Se realizarán dos visitas de campo para corroborar la información documentada; se posicionará en el lugar de estudio y a través de un teléfono móvil se tomará lectura de las coordenadas geográficas proporcionadas por la aplicación mapa coordenadas.

Se seleccionarán dos muestras, de aproximadamente cuarenta libras cada una (40 lb), se extraerán cuidadosamente para no afectar sus características ni propiedades en estado natural, se identificarán con etiquetas por su formación geológica y sus coordenadas geográficas.

Para realizar la caracterización mineralógica de las arcillas en estudio, se enviarán muestras de suelo al laboratorio del Centro de Investigación y Desarrollo de Cementos Progreso quienes tienen un procedimiento propio para emitir esa caracterización y los datos emitidos serán tomados como base para los siguientes análisis que correspondan.

Los ensayos mecánicos de laboratorio de suelos: granulometría, gravedad específica, límites de Atterberg, se realizarán dentro de las instalaciones de la constructora A.C.G. Los ensayos de corte directo y consolidación se realizarán con el apoyo de la empresa IDEA. Las muestras serán sometidas a un proceso de manipulación humana y controlada en laboratorio en cumplimiento con los parámetros que establecen las normas técnicas: AASHTO, ASTM, entre otras.

- Etapa 3: presentación de resultados

Se presentarán en tablas numéricas los datos obtenidos de los ensayos tanto de caracterización química como de las propiedades mecánicas, estos resultados se compararán y analizarán estadísticamente.

- Etapa 4: análisis de resultados

Se hará uso de la estadística descriptiva e inferencial para poder identificar los valores y cantidades de los elementos que conforman al suelo arcilloso y se establecerá comparación de las variables, es decir, las formaciones geológicas, arcillas y los minerales. Esto permitirá la emisión de conclusiones y recomendaciones en la estabilización de suelos arcillosos según su formación geológica.

Se redactará el informe final y con base a ello se redactará un artículo científico, luego se expondrá ante la terna evaluadora para ser analizada, validada y publicada.

INTRODUCCIÓN

La práctica, desarrollo e investigación de la geotécnica han contribuido a que la geología y la ingeniería civil se complementen y alcancen una gran variedad de metas u objetivos, estableciendo que cada obra constituye un problema diferente y en consecuencia su propia solución. Es en el tema del comportamiento de los suelos que surge la importancia del reconocimiento de las patologías de las estructuras y que muchas de ellas son atribuidas a problemas de asentamientos del suelo, y que en realidad se debe al hinchamiento, es decir, a los movimientos asociados con las fases de sequía y rehidratación de este.

Ahora bien, partiendo de la composición de la arcilla se asocia con sus propiedades mecánicas que su respuesta al comportamiento de fuerzas ejercidas por obras geotécnicas u obras civiles a las que puede ser sometida, varía según el grupo geológico al que pertenece y esto hace posible una referencia de esta investigación sobre la incidencia de la formación geológica de la roca. Tal es el caso de determinar la presencia de varios elementos que permiten la conformación y estructuración de las arcillas, deduciendo que se parte del conocimiento del contenido de esos minerales en el material arcilloso. También, se indica que además de las propiedades químicas y mineralógicas de estos materiales, hay algunas propiedades físicas que influyen o contribuyen a los cambios volumétricos.

En el presente documento se caracterizan las propiedades mineralógicas, físicas y mecánicas de las arcillas de dos formaciones geológicas para determinar soluciones aplicables a los suelos arcillosos con fines de estabilización. Los capítulos que se abordan son los siguientes:

En el capítulo uno se describen las generalidades del suelo: textura, estructura, tipos, clasificaciones; a su vez los componentes que conforman las rocas; se incluye la clasificación de las arcillas según el interés geotécnico y la teoría de los ensayos de laboratorio a realizar.

El capítulo dos, abarca una recopilación teórica de la constitución geológica de Guatemala como la geología regional y local para proceder a la ubicación de las zonas y puntos de estudio.

La tercera parte del documento determina el desarrollo experimental; en él se describen los ensayos de laboratorio a los que se someten las muestras de suelo según la geología identificada.

El capítulo cuatro, abarca la presentación de los resultados obtenidos en los ensayos, su análisis, su interpretación respectiva y su propuesta de mejora.

1. EL SUELO

1.1. Generalidades del suelo

> La materia prima de las cuales se forman los suelos se conoce como rocas ígneas, sedimentarias y metamórficas agregado a la contribución de restos fósiles animales y plantas, estas rocas se forman a través de un proceso conocido como el ciclo de las rocas, este ciclo inicia con el magma, que en esencia es una masa de rocas fundida que se encuentra en las capas más profundas de la Tierra a muy elevada temperatura y presión. Con el paso del tiempo el magma se enfría y se solidifica a través de un proceso conocido como cristalización, el proceso de enfriamiento ocurre en capas superiores al lugar donde estaba originalmente, y generalmente este alcanza la superficie a través de erupciones volcánicas, una vez el magma se enfrió se denomina roca ígnea. (Belart, 2008, p. 25)

La mecánica de las rocas, hidrogeología, geología estructural y la mecánica de los suelos se complementan con los conocimientos que aportan. Y como lo indica Das (2015) “la mayoría de los suelos que cubren la tierra están formados por el intemperismo de varias rocas. Hay dos tipos generales de intemperismo, intemperismo mecánico y intemperismo químico” (p. 64).

1.1.1. El intemperismo

Como lo define Duque (2003) “es la alteración de los materiales rocosos expuestos al aire, a la humedad y al efecto de la materia orgánica. Por ello se generaliza que los procesos de desintegración y mecánicos interactúan entre sí” (p. 207). Para lograr una meteorización.

1.1.1.1. Intemperismo mecánico

Se refiere al proceso que sufren las rocas al descomponerse en piezas cada vez más pequeñas ocasionadas por las fuerzas físicas, una vez no se vea afectada en su composición química.

1.1.1.2. Intemperismo químico

Consiste en la descomposición química de los minerales contenidos en las rocas.

1.2. Textura del suelo

> Describe la proporción de las partículas minerales presentes en el suelo en función de su tamaño. Las principales clases de partículas, según la clasificación de la FAO: arcilla (<0.002 mm), limo (0.002 – 0.63 mm) y arena (0.063 – 2.0 mm). El rango de tamaños para cada clase puede variar en los diferentes países. Las partículas grandes de arena pueden a su vez dividirse en gruesas, medias y finas. (Gardi, 2014, p. 14)

1.3. Estructura del suelo

Según Gardi (2014):

> Se refiere al arreglo o disposición física de las partículas del suelo (también llamadas agregados) y el espacio entre ellas. La estructura del suelo tiene una gran influencia en el movimiento del agua, aire y también en el crecimiento de las raíces. Ello depende de factores tales como el material parental, la mineralogía, la actividad biológica, las condiciones ambientales, la gestión del suelo y la cantidad de arcilla y materia orgánica. (p. 14)

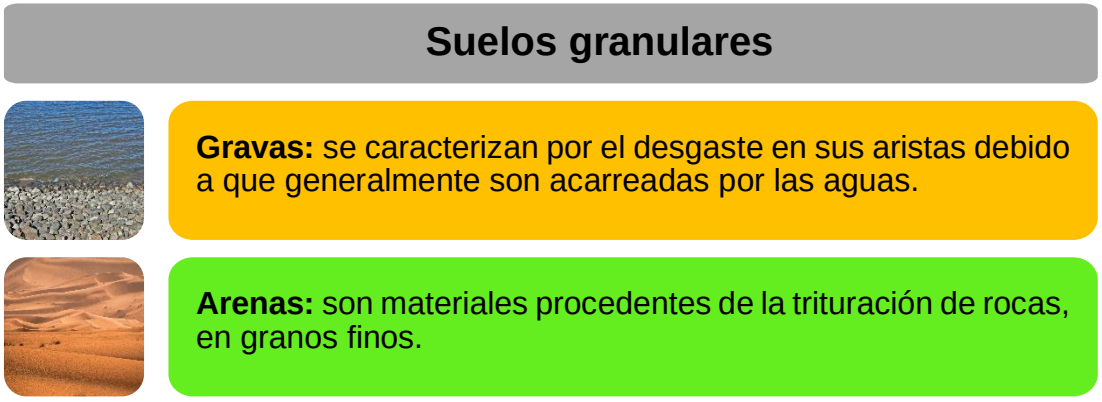
1.4. Tipos de suelos

Su clasificación depende de los elementos que lo conforman y de su origen. Como indican Calvo y Durán (2013) “Si el producto del intemperismo o meteorización de las rocas se mantiene en el lugar donde se formó, ocasiona un suelo residual en caso contrario genera un suelo no transportado” (p. 12).

Otro grupo se enfoca en “suelos orgánicos, la cantidad de materia orgánica es tan alta con relación a la cantidad de suelo inorgánico que provoca que la cantidad de propiedades de los minerales sean eliminadas en su totalidad” (Calvo y Durán, 2013, p. 12).

Figura 1.

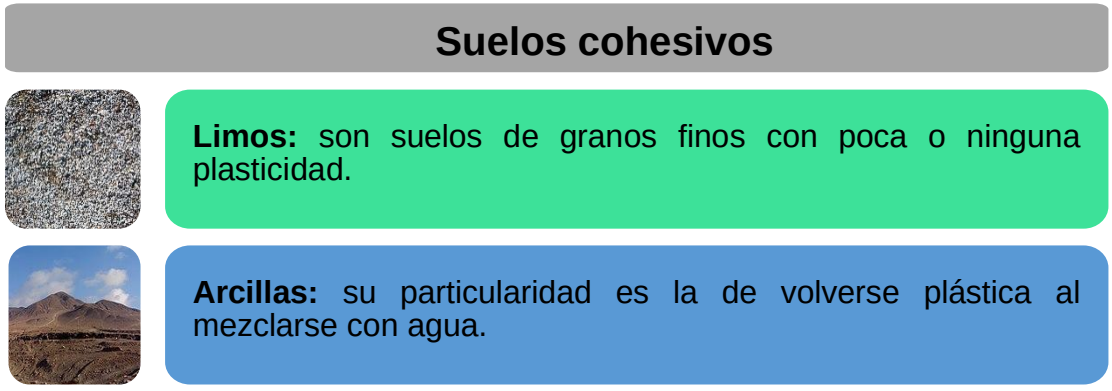
Suelos granulares generalmente utilizados en geotécnica



Nota. Conceptos de Suelos granulares. Elaboración propia, realizado en Power Point.

Figura 2.

Suelos cohesivos generalmente utilizados en geotécnica



Nota. Conceptos de suelos cohesivos. Elaboración propia, realizado en Power Point.

1.5. Clasificación de los suelos

> Las primeras clasificaciones de suelos se basaban en características individuales como la textura (limosa, arcillosa o arenosa) o el material parental (material aluvial o gravas). A finales de 1880, el geólogo ruso Dokucháyev, hoy en día considerado el padre de las ciencias del suelo, fue el primero en proponer una clasificación más científica basada en la combinación de las características del suelo y su formación. Este enfoque, conocido como el principio genético, sigue sirviendo de guía para muchas clasificaciones nacionales de suelos. (Gardi, 2014, p. 40)

Los suelos se dividen en grupos y éstos a su vez en una clasificación de subgrupos según la distribución granulométrica, límite líquido y límite plástico. Actualmente se utilizan dos, el sistema de la American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) y el Unified Soil Classification System (ASTM).

1.5.1. Sistema AASHTO

Fue propuesto originalmente para el Comité del Consejo de Investigación sobre Clasificación de Materiales para Subrasantes y Tipo Granular en 1945.

> Este sistema se emplea principalmente para determinar la clasificación de las capas que conforman el pavimento de una carretera. Los suelos los clasifica en ocho grupos principales, con nomenclatura A seguido por guion y el número arábigo que corresponde del uno al ocho, tal y como

sigue: A- 1 a A-8, se basa en la granulometría, límite líquido y límite plástico. (Das, 2011, p. 18)

Los suelos de grano grueso los identifica en los grupos A-1, A-2 y A-3; los suelos de grano fino los denomina A-4, A-5, A-6 y A-7 y por último sin ignorar su importancia el grupo A-8 corresponde a la turba, el fango y otros suelos con alto contenido de material orgánico. (Das, 2011, p. 18)

En la clasificación del grupo A-7 que integra a los materiales de limo y arcilla, existen dos condicionantes: “si el índice de plasticidad es menor o igual al valor resultante del límite líquido menos treinta, es decir, LL-30, la clasificación es determinada como A-7-5; si el índice de plasticidad es mayor al valor resultante del límite líquido menos treinta, es decir, LL-30, la clasificación es A-7-6” (Das, 2011, p. 18).

En el cuadro que sigue se presentan las clasificaciones generales de los materiales granulares y los materiales de limo y arcilla.

Tabla 1.

Sistema de clasificación de suelos AASHTO

	Materiales granulares						
Clasificación general	**(35 % o menos de la muestra total pasa la malla núm. 200)**						
	A-1			**A-2**			
Clasificación de grupo	**A-1-a**	**A-1-b**	**A-3**	**A-2-4**	**A-2-5**	**A-2-6**	**A-2-7**
Análisis por mallas (% que pasa)							
Malla núm. 10	50 máx						
Malla núm. 40	30 máx	50 máx	51 mín				
Malla núm. 200	15 máx	25 máx	10 máx	35 máx	35 máx	35 máx	35 máx

Continuación de la tabla 1.

	Materiales granulares						
Clasificación general	**(35 % o menos de la muestra total pasa la malla núm. 200)**						
	A-1		**A-2**				
Clasificación de grupo	**A-1-a**	**A-1-b**	**A-3**	**A-2-4**	**A-2-5**	**A-2-6**	**A-2-7**
Para la fracción que pasa							
Malla núm. 40							
Límite Líquido (LL)				40 máx	41 mín	40 máx	41 mín
Índice de Plasticidad (IP)	6 máx		No plástico	10 máx	10 máx	11 mín	11 mín
Tipo usual de material	Fragmentos de roca, grava y arena		Arena fina	Grava y arena limosa o arcillosa			
Clasificación de la capa	Excelente a buena						
	Materiales de limo y arcilla						
Clasificación general	**(más de 35 % de la muestra total pasa la malla núm. 200)**						

Clasificación de grupo	**A-4**	**A-5**	**A-6**	**A-7**
				A-7-5[a]
				A-7-5[b]
Análisis por mallas (% que pasa)				
Malla núm. 10				
Malla núm. 40				
Malla núm. 200	36 mín	36 mín	36 mín	36 mín
Para la fracción que pasa				
Malla núm. 40				
Límite Líquido (LL)	40 máx	41 mín	40 máx	41 mín
Índice de Plasticidad (IP)	10 máx	10 máx	11 mín	11 mín
Tipo usual de material	Principalmente suelos limosos		Principalmente suelos arcillosos	
Clasificación subrasante	Regular a malo			

[a] Si IP ≤ LL - 30, la clasificación es A-7-5.

[b] Si IP > LL - 30, la clasificación es A-7-6.

Nota. Sistema de clasificación de los suelos de la AASHTO. Obtenido de B. Das. (2011). *Fundamentos de ingeniería de cimentaciones*. (p. 18). Cengage Learning.

1.5.2. Sistema unificado

Fue propuesto originalmente por “Casagrande en el año de 1942 y después adoptó la Oficina de Reclamación de los Estados Unidos y el Cuerpo de

Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos; prácticamente este sistema se emplea en todo trabajo geotécnico" (Das, 2011, p. 19).

A continuación, se muestran los símbolos utilizados en el sistema unificado para la identificación del grupo de suelos al que pertenece.

Tabla 2.

Símbolos de identificación sistema unificado

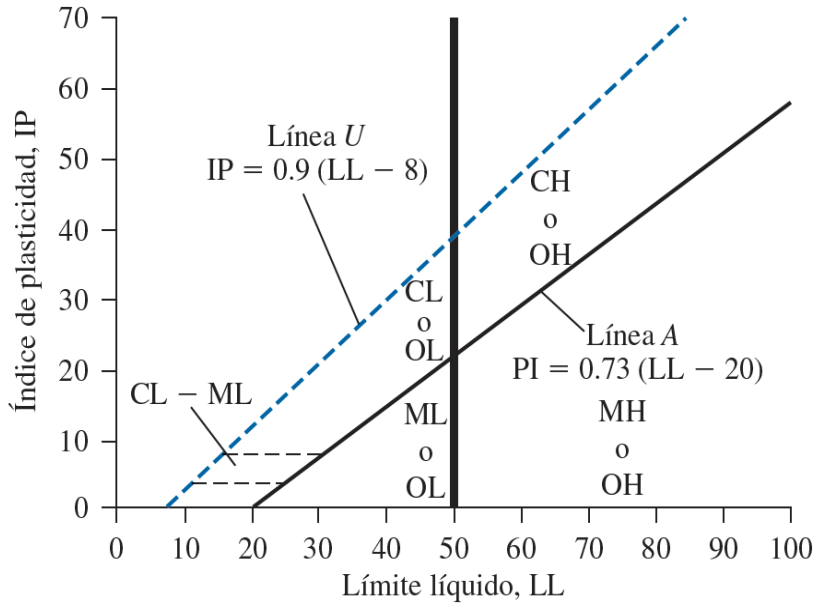
Símbolo	G	S	M	C	O	Pt	H	L	W	P
Descripción	Grava	Arena	Limo	Arcilla	Limos orgánicos y arcilla	Turba y suelos altamente orgánicos	Alta plasticidad	Baja plasticidad	Bien graduado	Mal graduado

Nota. Símbolos utilizados en el sistema unificado. Obtenido de B. Das. (2011). *Fundamentos de ingeniería de cimentaciones*. (p. 19). Cengage Learning.

En la ilustración siguiente se observa en el eje de las abscisas los valores que puede alcanzar el límite líquido de la muestra de suelo en estudio; por otra parte, en el sentido de las ordenadas se aprecian los valores del índice de plasticidad. La línea A establece por debajo de ella, una zona en la que se puede identificar, según las características del suelo los símbolos de grupo al que pertenece, es decir, ML, OL, MH, OH dependiendo del valor del límite líquido obtenido en los ensayos de laboratorio. La región establecida entre la línea A y la línea U está representada por el grupo de símbolos: CL o OL, CH o OH, CL – ML. Por último, la línea punteada representa la línea U la cual establece el valor del índice de plasticidad según el límite líquido obtenido.

Figura 3.

Gráfica de plasticidad



Nota. Gráfica de plasticidad. Obtenido de B. Das. (2011). *Fundamentos de ingeniería de cimentaciones*. (p. 20). Cengage Learning.

El cumplimiento de lo que dicta la norma ASTM D2487-98 para determinar los símbolos de grupo para varios tipos de suelos, se observa en la configuración siguiente. En consecuencia, la nomenclatura utilizada para la clasificación de suelos con fines ingenieriles.

Seguido, se encuentran las figuras correspondientes a los diagramas de flujo para clasificar suelos de grano grueso, de grano fino y de contenido orgánico en los de grano fino.

Tabla 3.

Práctica para clasificación de suelos

					Clasificación del suelo	
	Criterios para asignar símbolos y nombres de grupo utilizando pruebas de laboratorio[a]				Símbolo de grupo	Nombre del grupo
Suelos de grano grueso	Gravas	Gravas limpias	$C_u \geq 4$ y $1 \leq C_c \leq 3$[e]		GW	Grava bien graduada
Más de 50 % retenido en la	Más de 50 % de la fracción	Menos de 5% finos[c]	$C_u < 4$ y/o $1 > C_c > 3$[e]		GP	Grava mal graduada[f]
malla núm. 200	gruesa retenida en la	Gravas con finos	Los finos se clasifican como ML o MH		GM	Grava limosa[f, g, h]
	malla núm. 4	Más de 12 % finos[c]	Los finos se clasifican como CL o CH		GC	Grava arcillosa[f, g, h]
	Arenas	Arenas limpias	$C_u \geq 6$ y $1 \leq C_c \leq 3$[e]		SW	Arena bien graduada[i]
	50 % o más de la fracción	Menos de 5 % finos[d]	$C_u < 6$ y/o $1 > C_c > 3$[e]		SP	Arena mal graduada[i]
	gruesa pasa la malla núm. 4	Arena con finos	Los finos se clasifican como ML o MH		SM	Arena limosa[g, h, i]
		Más de 12 % finos[d]	Los finos se clasifican como CL o CH		SC	Arena arcillosa[g, h, i]
Suelos de grano fino	Limos y arcillas	Inorgánicos	IP > 7 y se encuentra en o arriba de la línea "A"[j]		CL	Arcilla de baja compresibilidad[k, l, m]
50 % o más pasa la malla	Límite líquido menor que 50		IP < 4 o se encuentra debajo de la línea "A"[j]		ML	Limo de baja compresibilidad[k, l, m]
núm. 200		Orgánicos	Límite líquido - secado en horno	<0.75	OL	Arcilla orgánica[k, l, m, n]
			Límite líquido - no secado			Limo orgánico[k, l, m, o]
	Limos y arcillas	Inorgánicos	IP se encuentra en o arriba de la línea A		CH	Arcilla de alta compresibilidad[k, l, m, n]
	Límite líquido 50 o mayor		IP se encuentra debajo de la línea A		MH	Limo de alta compresibilidad[k, l, m, n]
		Orgánicos	Límite líquido - secado en horno	<0.75	OH	Arcilla orgánica[k, l, m, p]
			Límite líquido - no secado			Limo orgánico[k, l, m, q]
Suelos altamente orgánicos		Principalmente materia orgánica, de color oscuro y olor orgánico			PT	Turba

Nota. Procedimiento para determinar símbolos de grupo para varios tipos de suelos. Obtenido de B. Das. (2011). *Fundamentos de ingeniería de cimentaciones*. (p. 21). Cengage Learning.

Tabla 4.

Nomenclatura en la clasificación de suelos

Superíndice	Descripción del superíndice
[a]	Con base en el material que pasa la malla de 75 mm (3 in).
[b]	Si la muestra de campo contenía cantos rodados o piedra bola, o ambos, agregue con cantos rodados o piedra bola, o ambos al nombre del grupo.
[c]	Gravas con 5 a 12 % de finos requieren símbolos dobles: grava bien graduada con limo, GW-GM; grava bien graduada con arcilla, GW-GC; grava mal graduada con limo, GP-GM; grava mal graduada con arcilla, GP-GC.
[d]	Arenas con 5 a 12 % de finos requieren símbolos dobles: arena bien graduada con limo SW-SM; arena bien graduada con arcilla SW-SC; arena mal graduada con limo SP-SM; arena mal graduada con arcilla SP-SC.
[e]	$C_u = D_{60}/D_{10}$ (Ecuación 1) $C_c = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} \, x \, D_{60}}$ (Ecuación 2)
[f]	Si el suelo contiene ≥ 15 % de arena, agregue con arena al nombre del grupo.
[g]	Si los finos se clasifican como CL-ML, utilice el símbolo doble GC-GM o SC-SM.
[h]	Si los finos son orgánicos, agregue con finos orgánicos al nombre de grupo.
[i]	Si el suelo contiene ≥ 15 % de grava, agregue con grava al nombre del grupo.
[j]	Si los límites de Atterberg se encuentran en el área sombreada, el suelo es una arcilla limosa, CL-ML.
[k]	Si el suelo contiene 15 a 29 % más la malla núm. 200, agregue con arena o con grava, lo que predomine.
[l]	Si el suelo contiene ≥ 30 % más la malla núm. 200, predominantemente arena, agregue arenoso al nombre del grupo.
[m]	Si el suelo contiene ≥ 30 % más la malla núm. 200, predominantemente grava, agregue gravoso al nombre del grupo.
[n]	Si IP ≥ 4 y se encuentra en o arriba de la línea A.
[o]	Si IP < 4 o se encuentra debajo de la línea A.
[p]	Si IP se encuentra en o arriba de la línea A.

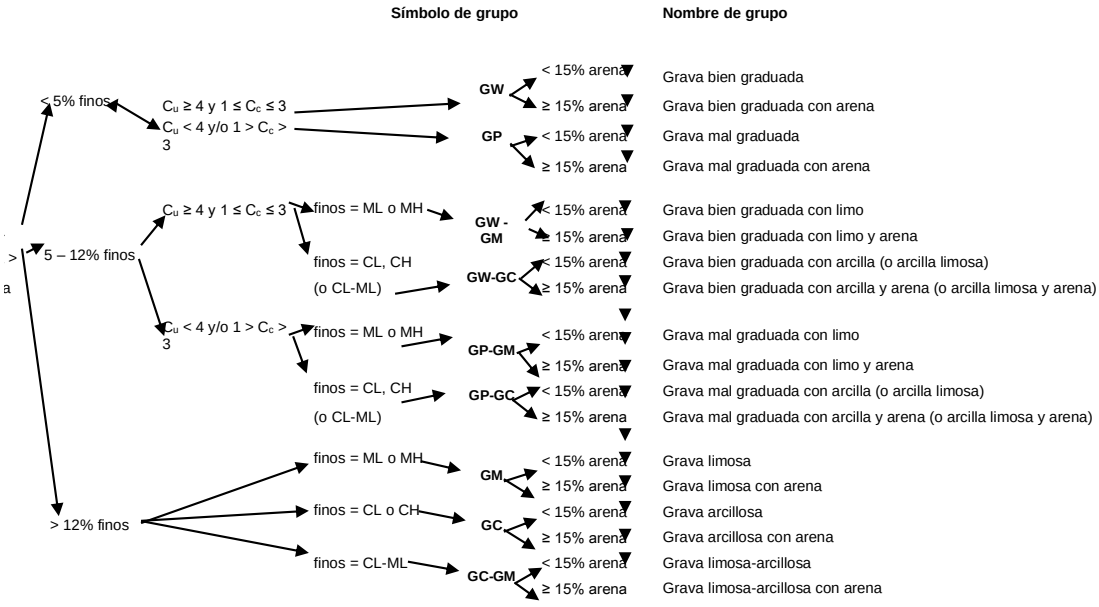
Continuación de la tabla 4.

Superíndice	Descripción del superíndice
q	Si IP se encuentra debajo de la línea A.

Nota. Nomenclatura utilizada en la Práctica para Clasificación de Suelos. Obtenido de B. Das. (2011). *Fundamentos de ingeniería de cimentaciones*. (p. 21). Cengage Learning.

Figura 4.

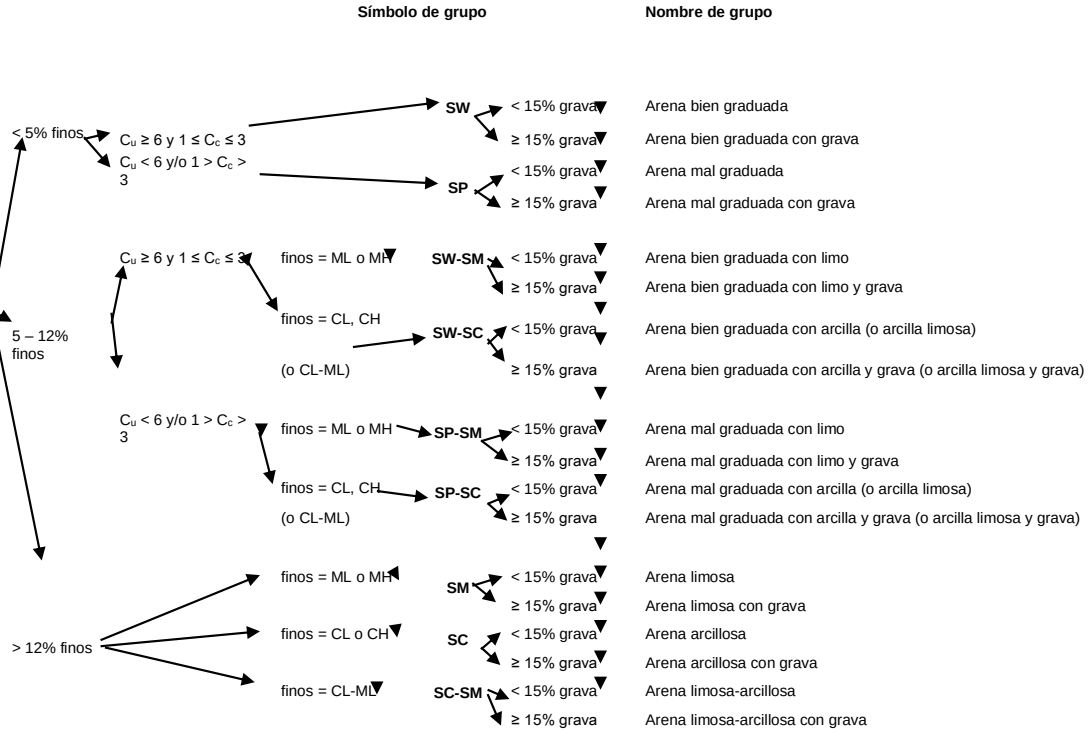
Diagrama de flujo: clasificar suelos de grano grueso



Nota. Diagrama de flujo para clasificar suelos de grano grueso (más de 50 % retenido en la malla núm. 200 según ASTM 2009). Obtenido de B. Das. (2011). *Fundamentos de ingeniería de cimentaciones*. (p. 22). Cengage Learning.

Figura 5.

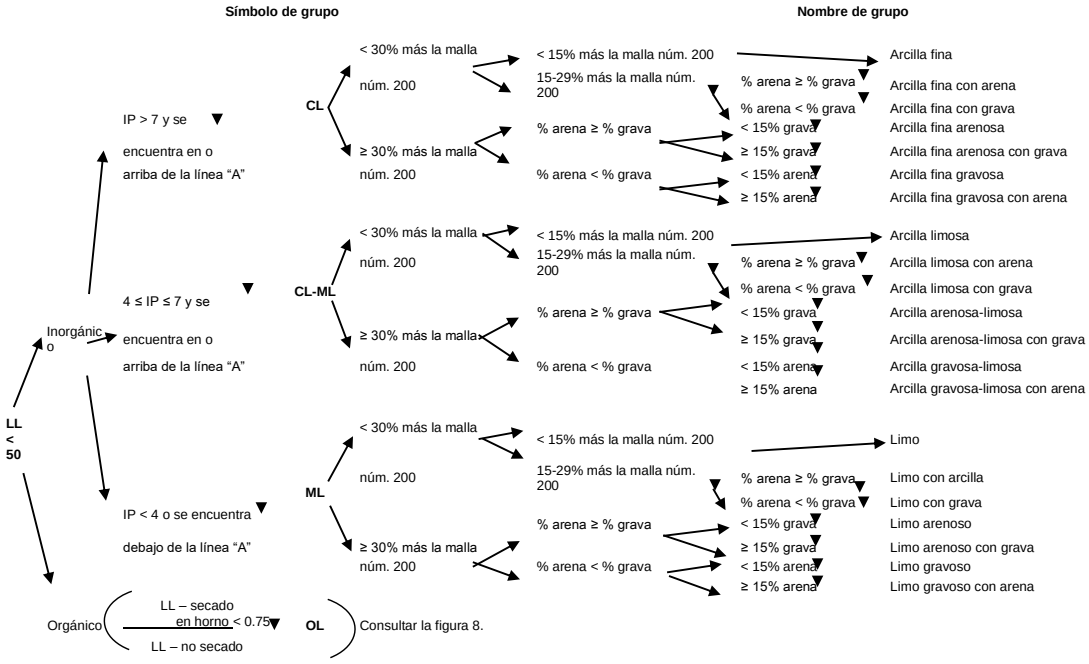
Diagrama de flujo: clasificar suelos de grano grueso



Nota. Diagrama de flujo para clasificar suelos de grano grueso (más de 50 % retenido en la malla núm. 200 según ASTM 2009). Obtenido de B. Das. (2011). *Fundamentos de ingeniería de cimentaciones*. (p. 22). Cengage Learning.

Figura 6.

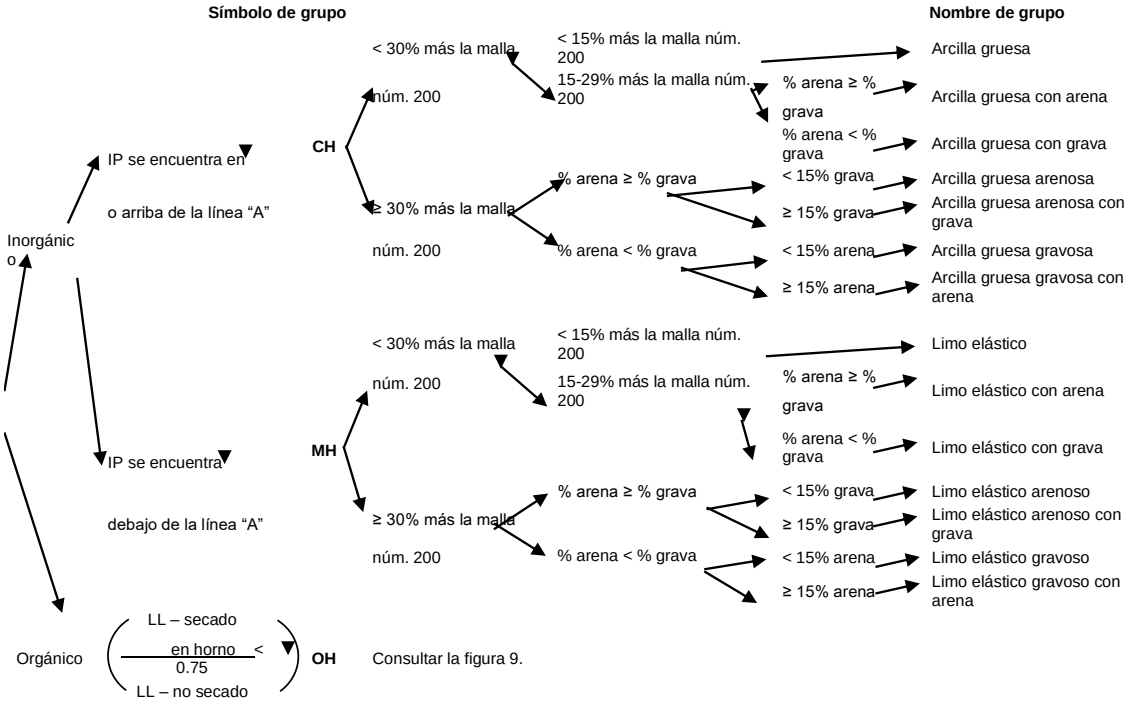
Diagrama de flujo: clasificar suelos de grano fino



Nota. Diagrama de flujo para clasificar suelos de grano fino (50 % o más pasa la malla núm. 200 según ASTM 2009). Obtenido de B. Das. (2011). *Fundamentos de ingeniería de cimentaciones*. (p. 23). Cengage Learning.

Figura 7.

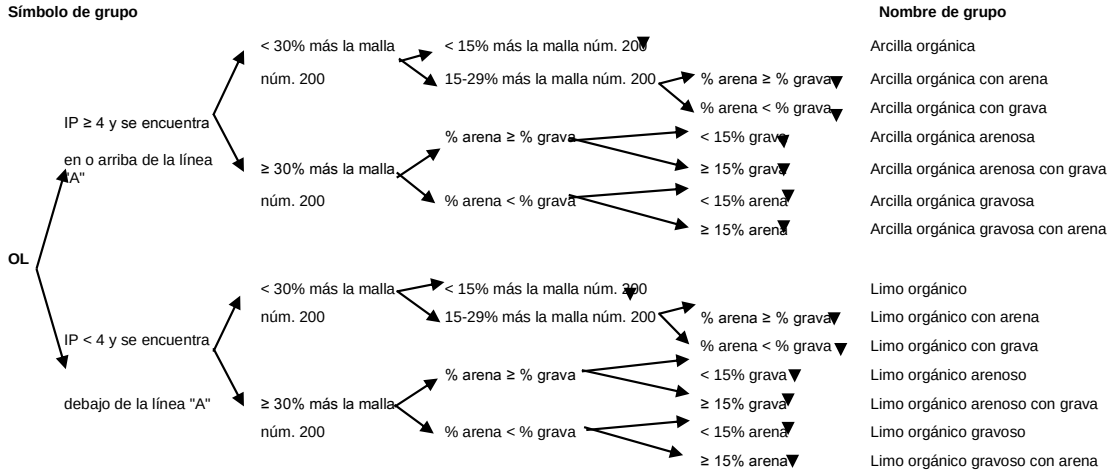
Diagrama de flujo: clasificar suelos de grano fino



Nota. Diagrama de flujo para clasificar suelos de grano fino (50 % o más pasa la malla núm. 200 según ASTM 2009). Obtenido de B. Das. (2011). *Fundamentos de ingeniería de cimentaciones*. (p. 23). Cengage Learning.

Figura 8.

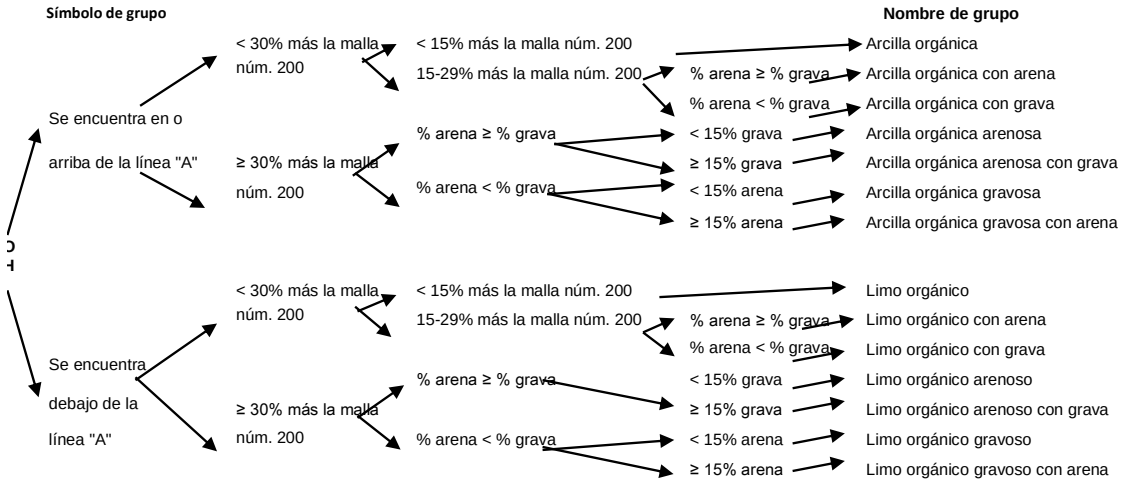
Diagrama de flujo: clasificar suelos orgánicos de grano fino



Nota. Diagrama de flujo para clasificar suelos orgánicos de grano fino (50 % o más pasa la malla núm. 200 según ASTM 2009). Obtenido de B. Das. (2011). *Fundamentos de ingeniería de cimentaciones*. (p. 24). Cengage Learning.

Figura 9.

Diagrama de flujo: clasificar suelos orgánicos de grano fino



Nota. Diagrama de flujo para clasificar suelos orgánicos de grano fino (50 % o más pasa la malla núm. 200 según ASTM 2009). Obtenido de B. Das. (2011). *Fundamentos de ingeniería de cimentaciones*. (p. 24). Cengage Learning.

1.6. Las rocas

Acevedo (2016) comenta que “la roca es un agregado natural de granos minerales unidos por grandes y permanentes fuerzas de cohesión” (p. 4). Y también se debe enfatizar que el suelo por otra parte se considera como un agregado con o sin componentes orgánicos pudiendo separarse a través de medios mecánicos.

1.6.1. Clasificación de rocas según su origen

Las rocas se pueden identificar según características físicas, factores que las forman y tal es el caso en esta investigación que se centra en su origen, como sigue.

1.6.1.1. Rocas ígneas

Tarbuck (2005) señala que “las rocas ígneas forman la mayor parte de la corteza terrestre” (p. 22). Y éstas se forman cuando se va enfriando y solidificando una roca fundida. Una de las características que identifican a este tipo de rocas es estar parcialmente cubierta por una delgada capa de las rocas sedimentarias.

1.6.1.2. Rocas sedimentarias

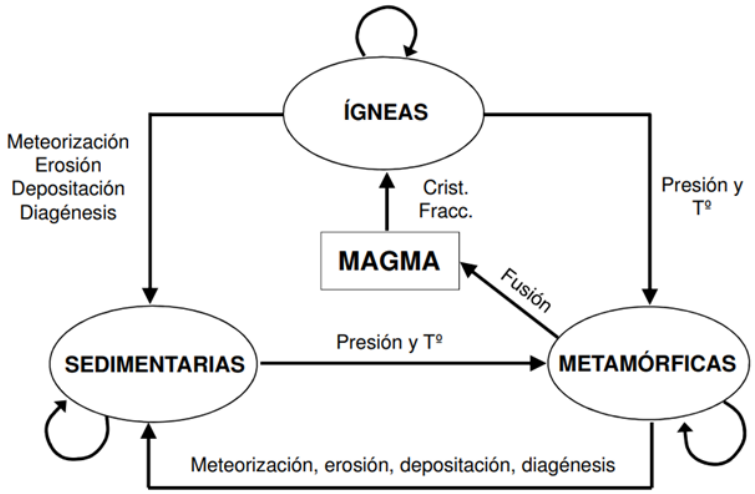
Loor (2018) comenta que “generalmente están formadas por elementos que se disponen en desorden, son poco coherentes, algunas son cristalinas, pero más blandas que las ígneas, son estratificadas y con presencia de calcita y arcilla” (p. 20).

1.6.1.3. Rocas metamórficas

Orozco (2014) las define como “aquellas que han sido sometidas a cambios de presión y temperatura, generalmente en profundidades relativamente grandes con respecto a la superficie, y que en estado sólido han tenido cambios en la mineralogía” (p. 6). Además, como respuesta a los diferentes cambios físicos y químicos que conllevan los cambios de presión y temperatura.

Figura 10.

Ciclo de las rocas



Nota. Ciclo de las rocas. Obtenido de H. Fraga, M. Polare & M. Antola (2017). *Rocas ígneas. Departamento de Ciencias Geológicas Prof. Dra. Pierina Pasotti*. (p. 2).

1.6.2. Minerales formadores de rocas

Se muestran los minerales que aportan elementos para formar las rocas, como sigue.

1.6.2.1. Grupo I de minerales

Está integrado por cuarzo, feldespatos y feldespatoides. Éstos se conocen por otra denominación minerales félsicos, tienen en común que son transparentes y con bajo índice de refracción. Por lo general se hacen presentes en la gran variedad de rocas ígneas.

1.6.2.2. Grupo II de minerales

Integrado por piroxenos, anfíboles y micas. Es un grupo al que pertenecen la mayoría de los minerales que se caracterizan por los ferromagnesianos y éstos contribuyen a la formación de las rocas ígneas y metamórficas.

1.6.2.3. Grupo III de minerales

Integrado por olivino, es un mineral que abunda en el manto terrestre.

A continuación, se identifican las composiciones químicas de los grupos formadores de rocas: del grupo I, del grupo II y del grupo III.

Tabla 5.

Minerales comunes del grupo I

Grupo I	Mineral y abreviatura		Fórmula	Simetría	Color	Índice de refracción	Birrefringencia	Maclas
Cuarzo (Qz)	Cuarzo (Qz)		SiO_2	Qz α: Trigonal	Transparente	1.514 - 1.526	0.01 Amarillo pálido de primer orden	No
				Qz β: Hexagonal		1.518 - 1.530		
Feldespatos alcalinos (Afs)	Feldespato potásico (Kfs)	Ortosa (Or)	----	Monoclínica	Transparente	1.55 - 1.54	0.005 muy baja	Carlsbad
		Microclina (Mi)	K [Si_3 O_8 Al]	Triclínica	Transparente	1.52 - 1.522 (K)	0.007 gris de primer orden	Albita-periclina
	Sanidina (Sa)		Or: Ab = 1:0 a 6:4	Monoclínica	Transparente	1.52 - 1.539 (Na)	0.007 gris de primer orden	Carlsbad
	Anortoclasa (Anor)		Or: Ab = 6:4 a 9:1	Monoclínica (triclínica a baja T)	Transparente	1.514 - 1.533	0.007 gris de primer orden	Albita-periclina (baja T)

Continuación de la tabla 5.

Grupo I	Mineral y abreviatura	Fórmula	Simetría	Color	Índice de refracción	Birrefringencia	Maclas
Plagioclasas (Pl)	Albita (Ab)	Na $[Si_3 O_8 Al]^{(+)}$ An_{0-10} (++)	Triclínica	Transparente	1.527 - 1.538 (Na)	0.010-0.013 De gris (Ab) a amarillo pálido en la An	Albita-periclina Carlsbad
	Oligoclasa	An_{10-30}	Tríclínica	Transparente	1.527 - 1.538 (Na)	0.010-0.013 De gris (Ab) a amarillo pálido en la An	Albita-periclina Carlsbad
	Andesina	An_{30-50}	Triclínica	Transparente	1.527 - 1.538 (Na)		
	Labradorita	An_{50-70}	Triclínica	Transparente	1.577 - 1.590 (Ca)		
	Bitownita	An_{70-90}	Triclínica	Transparente	1.577 - 1.590 (Ca)		
	Anortita (An)	Ca $[Si_2 O_8 Al_2]$ An_{90-100}	Triclínica	Transparente	1.577 - 1.590 (Ca)	0.010-0.013 De gris (Ab) a amarillo pálido en la An	Albita-periclina Carlsbad
Feldespatoides (Foid)	Leucita (Lc)	K $[Si_2 O_6 Al]$	Cúbica a tetragonal (baja T)	Transparente	1.51	Muy baja Gris oscuro	Maclas finas (lamelas)
	Nefelina (Ne)	(Na, K) $[SiO_4$ Al]	Hexagonal	Transparente	1.53 - 1.54	0.005 gris de primer orden	No

(T) La fórmula es de la fase pura Ab. El mineral Ab se define en el rango de 0 % a 10 % de An. De igual modo, se denomina An a la Pl que tiene más del 90 % de la fase pura An.

(++) Aunque las plagioclasas pueden contener una pequeña fracción de Or, su composición se expresa como la fracción de An sobre el total de Ab + An recalculado a 100, ya sea en forma de moles o de porcentaje en peso. Esta fracción se muestra como un subíndice en el acrónimo de An para indicar que la Pl contiene un porcentaje de An.

Nota. Minerales formadores del grupo I. Obtenido de A. Castro. (2015). *Petrografía de rocas Ígneas y* Metamórficas. (p. 35). Ediciones Paraninfo.

Tabla 6.

Minerales comunes del grupo II

Grupo II	Mineral y abreviatura	Fórmula	Simetría	Color	Índice de refracción	Birrefringencia	Maclas
Ortopiroxenos (Opx)	Enstatita (En) y Ferrosilita (Fs)	Si_2O_6 (Mg, Fe^{2+})$_2$	Rómbica	Incoloros a débilmente coloreados (pleocroísmo rosa a verde)	Alto > 1.650 hasta 1.8	0.007 - 0.020	Doble exfoliación (110) a 87° Exfoliación fina (010) Maclas (100) en Cpx frecuentes
Clinopiroxenos (Cpx)	Diópsido-Hedembergita (Di-Hb)	Ca (Mg, Fe^{2+},) [Si_2O_6]	Monoclínica	Di: incoloro Hb: verde a marrón	Alto > 1.650 hasta 1.8	0.024 - 0.031	Doble exfoliación (110) a 87° Exfoliación fina (010) Maclas (100) en Cpx frecuentes
	Augita (Aug)	(Ca, Mg, Fe^{2+}, Fe^{3+}, Ti, Al)$_2$ [Si, Al_2O_6]	Monoclínica	Verde pálido a marrón	Alto > 1.650 hasta 1.8	0.018 - 0.033	
	Pigeonita (Pgt)	(Ca, Mg, Fe^{2+}) (Mg, Fe^{2+}) [Si_2O_6]	Monoclínica	Amarillo claro a verde	Alto > 1.650 hasta 1.8	0.023 - 0.029	
	Onfacita (Omp)	(Ca, Na) (Fe^{3+}, Fe^{2+}, Mg, Al) [Si_2O_6]	Monoclínica	Ligero pleocroísmo de incoloro a verde claro	Alto > 1.650 hasta 1.8	0.012 - 0.028	
	Jadeita (Jd)	Al Na [Si_2O_6]	Monoclínica	Pleocroísmo de verde amarillento a verde esmeralda	Alto > 1.650 hasta 1.8	0.06 - 0.021	
	Egirina (Aeg)	Fe^{3+} Na [Si_2O_6]	Monoclínica	Pleocroísmo de verde a amarillo	Alto > 1.650 hasta 1.8	0.040 - 0.060	
	Wollastonita (Wo)	Ca_2 [Si_2O_6]	Monoclínica	Incoloro	Alto > 1.650 hasta 1.8	0.013 - 0.014	

Las propiedades ópticas varían dentro de cada serie según la composición de la solución sólida correspondiente. El color y la birrefringencia se incrementan con el contenido de Fe de cada serie. Los valores aportados son sólo indicativos de composiciones promedio.

Nota. Minerales formadores del grupo II. Obtenido de A. Castro. (2015). *Petrografía de rocas Ígneas y* Metamórficas. (p. 42). Ediciones Paraninfo.

Tabla 7.

Minerales comunes del grupo III

Grupo III	Mineral y abreviatura	Fórmula	Simetría	Color	Índice de refracción	Birrefringencia	Maclas
Silicato	Olivino (Ol)	(Mg, Fe)2, SiO_4	Hexagonal	Amarillento a verde oliva o gris, pardo	1.635 - 1.879	0.01 Amarillo pálido de primer orden	Raro y generalmente poco desarrollado

Nota. Minerales formadores del grupo III. Obtenido de A. Castro. (2015). *Petrografía de rocas Ígneas y* Metamórficas. (p. 45). Ediciones Paraninfo.

1.7. Definición de la arcilla

Tarbuck & Lutgens (2010) expone que:

> El término arcilla se utiliza para describir la variedad de minerales complejos que contienen una estructura laminar. La arcilla está conformada por minerales de grano muy fino y sólo puede estudiarse con microscopio. La meteorización química de silicatos es quien genera la mayoría de los minerales arcillosos. Es por ello, que estos minerales constituyen un gran porcentaje del suelo. (p. 98)

El término arcilla puede tener varios significados, tal y como indica Gardi (2014) “una clase textural que contiene más del 40 % de partículas arcillosas, menos del 45 % de arenas y menos del 40 % de limos” (p. 24).

1.7.1. Movimiento de las arcillas

Según Gardi (2014)

> Un proceso común en la formación del suelo es el movimiento de las partículas de arcilla o translocación de un horizonte a otro. Lo que implica la iluviación o transferencia mecánica, por efecto del agua de percolación, de las partículas de la superficie del suelo. Además, estas son redepositadas en las capas más profundas del suelo, sobre otras partículas o en las cavidades y poros del suelo. (p. 25)

1.7.2. Principal formación mineralógica de la arcilla

Bravo y Lopez (2021) sostiene que “la arcilla se divide en tres grandes grupos de minerales, las cuales son: la caolinita, illita y la montmorillonita. Estos minerales tienen estructuras octaédricas y tetraédricas” (p. 20). Estos suelos según su mineralogía que los caracteriza son cristales microscópicos los cuales se encuentran agrupados con simetría de tipo hexagonal.

Menciona González (2002) que “la composición mineralógica de las arcillas es la que mayor influencia ejerce sobre las propiedades geotécnicas como la plasticidad, resistencia, compresibilidad, cambio de volumen” (p. 93)**.**

1.7.2.1. Formación caolinita

Según Escobar (2002)

> Este es el primer grupo de minerales de arcilla, también el principal grupo que tiene una baja capacidad de intercambio 10 – 12 me (miliequivalentes) cada 100 gramos. Además, tiene dos capas de cationes, la cual tiene un nombre de las arcillas 1:1 (capa tetraédrica más capa octaédrica de alúmina hidratada). (p. 7)

Lo define como un mineral que “tiene una carga eléctrica neutra, esto genera que su estructura no sea expansiva, ya que no permite que el agua pase por sus retículas. Se considera a este tipo de arcilla de moderada plasticidad, permeabilidad alta y fricción interna alta” (Escobar, 2002, p. 7).

1.7.2.2. Formación Illita

“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” (Pérez y Toledo, 1987, p. 41).

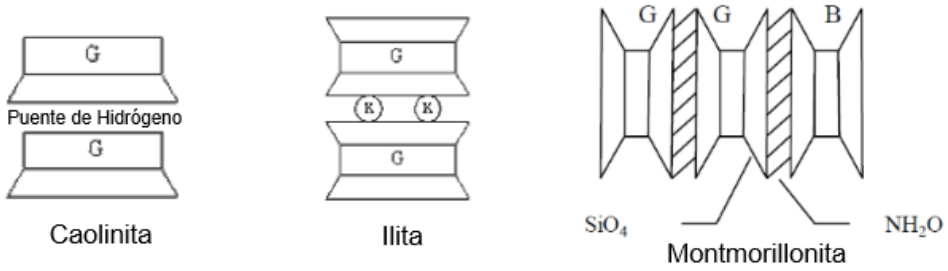
1.7.2.3. Formación montmorillonita

Tal como lo menciona Duque (2002) “estos minerales tienen una alta expansividad por poseer una capacidad de intercambio de 120 me/100gr. Son conocidas como arcillas 2:1 debido a que tienen dos láminas de sílice y en su interior una brucita o gisita” (p. 11). Debido a que estructuralmente este mineral

cuenta con una unión muy débil en sus moléculas, permite que el agua ingrese con facilidad y ocasione el hinchamiento del suelo y al secarse, la contracción.

Figura 11.

Estructura de los grupos de minerales de las arcillas



Nota. Diagramas en la estructura de los minerales contenidos en arcillas. Obtenido de B. Bravo y H. Lopez (2021). *Mejoramiento de las propiedades mecánicas de suelos arcillosos empleando valvas de molusco y vidrio en la ciudad de Talara, Piura*. [Tesis de pregrado, Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas]. (p. 21-22). Archivo digital. http://hdl.handle.net/10757/654603

1.7.3. Clasificación de las arcillas

Se establecen dos divisiones: por su uso y por su origen.

1.7.3.1. Arcillas según su origen

En este grupo Pérez y Toledo (1987) relaciona que “los estudios mineralógicos han clasificado las arcillas en base a datos de estructura y composición en cinco grupos” (p. 13).

En el esquema siguiente se aprecia la clasificación de las arcillas según su origen, esto se desarrolla con varias columnas nombradas grupo (al que pertenece), composición química (los elementos que la conforman) y ocurrencia (a su descripción directa en que se manifiesta).

Tabla 8.

Clasificación de arcillas por su origen

	Grupo	Composición química	Origen	Ocurrencia
A		**Caolín**		
1	Caolinita	$Al_2Si_2O_5\ (OH)_4$	HM	Arcillas de china, bajo mantos de carbón, roca encajante, suelos.
2	Dickita	$Al_2Si_2O_5\ (OH)_4$	H	Roca encajante
3	Nacrita	$Al_2Si_2O_5\ (OH)_4$	H	Roca encajante
4	Anauxita	$Al_2Si_2O_5\ (OH)_4$	M	Suelos
5	Halloysita	$Al_2Si_2O_5\ (OH)_4$	H, M	Suelos
6	Endelita	$Al_2Si_2O_5\ (OH)_4 + 2H_2O$	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	$Fe^{\prime\prime\prime}\ Si_{22}\ Al_2\ O_{60}\ (HO)_{12}\ Na_2$, Ca	H	Venas o vetas
3	Saponita	$Mg_{18}\ Si_{19}\ Al_2\ O_{60}\ (HO)_{12}\ Na_2$, Ca	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	Ilita	$(OH)_4\ K_2\ (Si_6\ Al_2)\ Al_4\ O_{20}$	M	Suelos, arcillas marinas, bajo mantos de carbón
D		**Attapulgita - Sepiolita**		
1	Attapulgita - Sepiolita	$Mg_5Si_8O_{20}(OH_2)_4\ 4H_2O$	M	Tierras de batan
2	Sepiolita	$Mg_5Si_8O_{20}(OH_2)_4\ nH_2O$	---	---
E		**Alófana**		
1	Alófana	$Al + SiO_2 + H_2O$	M	Arcillas, suelos

Nota. Arcillas por su origen. Obtenido de E. Pérez y N. Toledo (1987). *Estudio sobre las arcillas de Panimaquito Purulha B.V.* [Tesis de pregrado, Universidad de Guatemala]. (p. 3). Archivo digital. https://catalogosiidca.csuca.org/Record/USAC.499701

1.7.3.2. Arcillas según su uso

La arcilla actualmente se utiliza principalmente en la elaboración de productos cerámicos; también los no cerámicos que son de más interés geotécnico.

Tabla 9.

Clasificación de arcillas por 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**	**Aplicaciones**	**Tipos de arcilla principal**
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 subbentonita.
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.

Nota. Arcillas por su origen. Obtenido de E. Pérez y N. Toledo (1987). *Estudio sobre las arcillas de Panimaquito Purulha B.V.* [Tesis de pregrado, Universidad de Guatemala]. (p. 3). Archivo digital. https://catalogosiidca.csuca.org/Record/USAC.499701

1.7.4. Propiedades mecánicas

Dentro de ellas se encuentra la plasticidad, según Ramos (2002) “es producto, reiteradamente, de su morfología laminar, tamaño de partícula extremadamente pequeño o elevada área superficial y alta capacidad de hinchamiento” (p. 88).

También Chupina (2006) menciona que “son las que se emplean como materiales de ingeniería debido a su resistencia mecánica, dureza, resistencia al calor y a la corrosión elevada” (p. 4). En síntesis, estas se refieren cuando el material es sometido a cargas de deformación y destrucción: fragilidad y elasticidad; entre otras también se mencionan a la contracción y densidad.

1.7.4.1. Plasticidad de arcillas

Una arcilla se considera plástica cuando más agua absorbe y por lo tanto aumenta su volumen, aun así se debe evitar saturar para que su humedad sea óptima y no convertirla en una masa pegajosa. En conclusión, es la capacidad de un cuerpo que al ser manipulado y ser sometido a la deformación no alcanza el nivel de ruptura y conserva su estado original.

1.7.4.2. Contracción de arcillas

Es una propiedad en relación directa con la plasticidad, esto porque cuando la arcilla se mezcla con agua, conlleva a un contacto continuo y directo con el aire lo que genera pérdida de agua y en consecuencia disminución de su volumen.

1.7.4.3. Densidad de arcillas

En relación con la porosidad siendo el principal y común factor: arcilla cocida. Es una propiedad que permite identificar a una arcilla como porosa o densa según la temperatura de cocción.

1.7.5. Propiedades físicas

Las arcillas cuando sufren alteraciones en su composición tienden, por lo general, a cambiar sus características físicas y es en ese momento que la geotecnia inicia su función en los diagnósticos, ensayos, análisis e interpretación para la emisión de posibles soluciones técnicas.

1.7.5.1. Color de arcillas

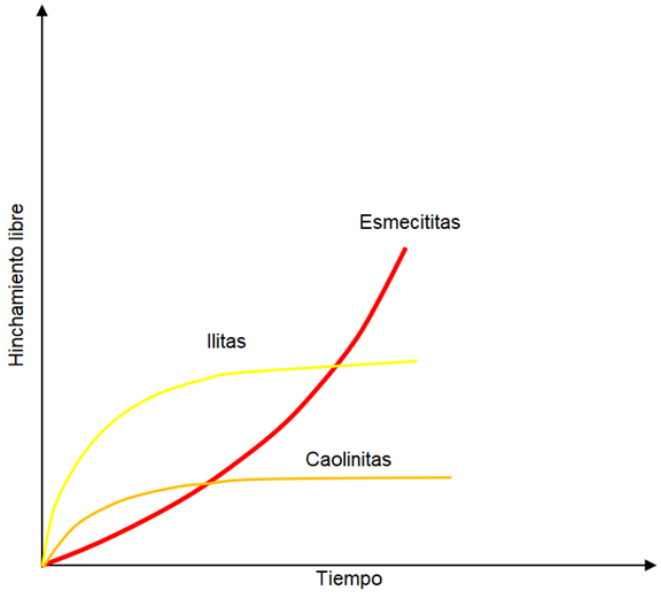
Este prevalece según el grado de oxidación al que ha sido expuesto el material, debido a los diferentes procesos de degradación. El color oscuro con cierta tonalidad verdosa indica que ha sido formado en medios reductores; las tonalidades rojizas para medios de oxidación; los colores amarillos son indicativos de medios anaeróbicos y, por último**,** pero no menos importante, los grises o negros que determinan la presencia de la materia orgánica.

1.7.5.2. Tamaño de la partícula

Se pueden diferenciar unas de otras debido al contenido de agua y plasticidad. Se identifican con grano fino y en su estado seco generan alta resistencia; sin embargo, también tienden a producir grietas y por lo tanto su tamaño disminuye. Debido a la formación mineralógica el tamaño de la partícula se ve influenciado, tal y como se muestra en la siguiente ilustración.

Figura 12.

Tamaño según su formación mineralógica



Nota. Tamaño de la partícula de suelo según su formación geológica. Obtenido de L. González (2002). *Ingeniería Geológica*. (p. 24). Pearson Educación.

1.7.5.3. Porosidad de arcillas

Es una característica que principalmente depende del resultado del proceso de cocción, el grado de su porosidad es variable debido al tipo de arcilla que se analice.

1.7.6. Propiedades químicas

“El discernimiento relacionado a la estructura de un material de construcción, 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, p. 142).

Entre los elementos químicos que predominan en la conformación de las arcillas se pueden mencionar a:

- Átomos de silicio, Si
- Aluminio, Al
- Hierro, Fe
- Magnesio, Mg
- Hidrógeno, H
- Oxígeno, O

Estas propiedades se resumen en la capacidad que tienen los suelos para tolerar transformaciones químicas, es decir la alcalinidad, estabilidad y grado de acidez.

1.7.6.1. Alcalinidad de arcillas

Se manifiesta en suelos arcillosos que permite la elevación del grado de acidez, provoca estructura pobre y densa, con lenta permeabilidad y por tanto la capacidad de infiltración es baja. Esto se debe a la presencia de carbonato de sodio y su reacción ante la disolución en agua.

1.7.6.2. Estabilidad química

La estabilidad química se analiza desde dos puntos: el termodinámico y el de reactividad. El primero se enfoca en el equilibrio que alcanza un sistema con todos los factores que lo rodean y aun así permanece sin alteraciones, es decir, estable en su forma o en su estado; el segundo hace énfasis en lo difícil que

resulta para que una sustancia emita un tipo de respuesta o una reacción con otras.

1.7.6.3. Grado de acidez

Se representa a través de la simbología pH lo que significa potencial de Hidrógeno e indica la concentración de los iones de éste en diferentes sustancias. Para su determinación se utiliza la ecuación 3, como sigue:

$$pH = -\log_{10} (H^+) \qquad \text{(Ecuación 3)}$$

Los valores del pH pueden variar en cada suelo y se muestran a continuación.

Tabla 10.

pH de un suelo

Tipo de suelo	Valores de pH
Suelos muy ácidos	4.5 ≤ pH ≤ 5.5
Suelos ácidos	5.6 ≤ pH ≤ 6.5
Suelos neutros	6.6 ≤ pH ≤ 7.5
Suelos alcalinos	7.6 ≥ pH ≥ 8.5

Nota. Tipos de suelo y sus valores de pH. Obtenido de E. Troug. (1951). *pH de un suelo*. (https://www.tecnicoagricola.es/ph-de-un-suelo/), consultado el 28 de febrero de 2023.De dominio público.

1.8. Ensayos de laboratorio

Para identificar las propiedades mecánicas y características físicas de las dos formaciones geológicas (Tv y Qp) de la arcilla en estudio, se mencionan y describen los ensayos realizados.

1.8.1. Distribución granulométrica AASHTO T087-86 T088-00, ASTM D2421-98 D422-02

Hernández (2008) menciona que “las partículas producidas por la meteorización mecánica rara vez son de diámetro inferior a 0.001 mm y generalmente, son mucho mayores. Para clasificar por tamaño de partículas gruesas, el procedimiento más expedito es el del tamizado” (p. 73).

Según Das (2011):

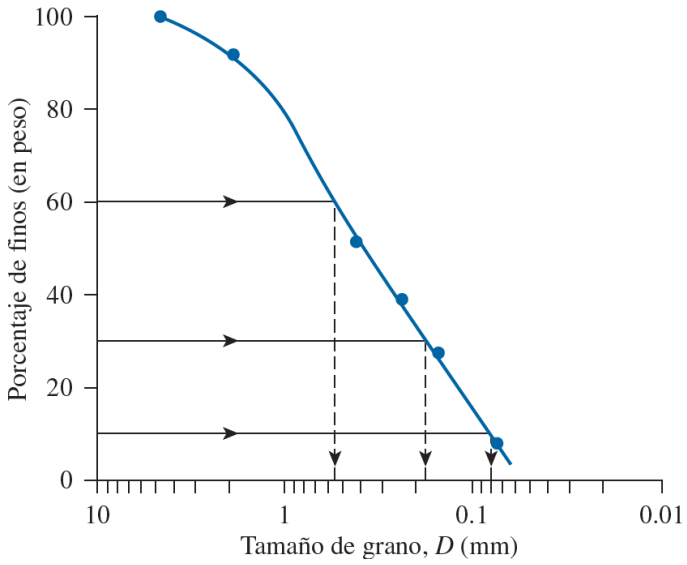
> El ensayo granulométrico con mallas se efectúa tomando una cantidad medida de suelo seco bien pulverizado y haciéndolo pasar a través de un apilo de mallas con aberturas cada vez más pequeñas que dispone de una charola en su parte inferior. Para ello se mide la cantidad de suelo retenido en cada malla y se determina el porcentaje acumulado del suelo que pasa a través de cada una. A este porcentaje se le refiere por lo general como porcentaje de finos. (p. 2)

La gráfica se obtiene trazando en papel semilogarítmico el porcentaje de finos en cada malla, determinado por un análisis de tamizado. En las abscisas se indican los diámetros según el tamaño del grano, su unidad de medida

corresponde a los milímetros y en las ordenadas se indican los porcentajes de los finos medidos en peso. La ilustración que a continuación se presenta ejemplifica la curva de distribución granulométrica de un suelo con granos gruesos.

Figura 13.

Curva granulométrica de un suelo de grano grueso



Nota. Curva de la distribución granulométrica de un suelo de grano grueso obtenida en un análisis con mallas. Obtenido de B. Das. (2011). *Fundamentos de ingeniería de cimentaciones*. (p. 3).. CENGAGE Learning.

Existen recomendaciones para los tamaños de los suelos y así proceder a la separación; las sugerencias son emitidas por las organizaciones de la American Association of State Highway and Transportation Official (AASHTO) y del Unified Soil Classification (Corps of Engineers, departamento of the Army y Bureau of Reclamation) Unificado.

En la tabulación siguiente se muestran los límites de los tamaños recomendados según cada sistema de clasificación.

Tabla 11.

Límites según sistema de clasificación

Sistema de clasificación	Tamaño del grano
Unificado	Grava: 75 mm a 4.75 mm
	Arena: 4.75 mm a 0.075 mm
	Limo y arcilla (finos): < 0.075 mm
AASHTO	Grava: 75 mm a 2 mm
	Arena: 2 mm a 0.05 mm
	Limo: 0.05 mm a 0.002 mm
	Arcilla: < 0.002 mm

Nota. Límites del tamaño de suelos separados. Obtenido de B. Das. (2011). *Fundamentos de ingeniería de cimentaciones*. (p. 5). CENGAGE Learning.

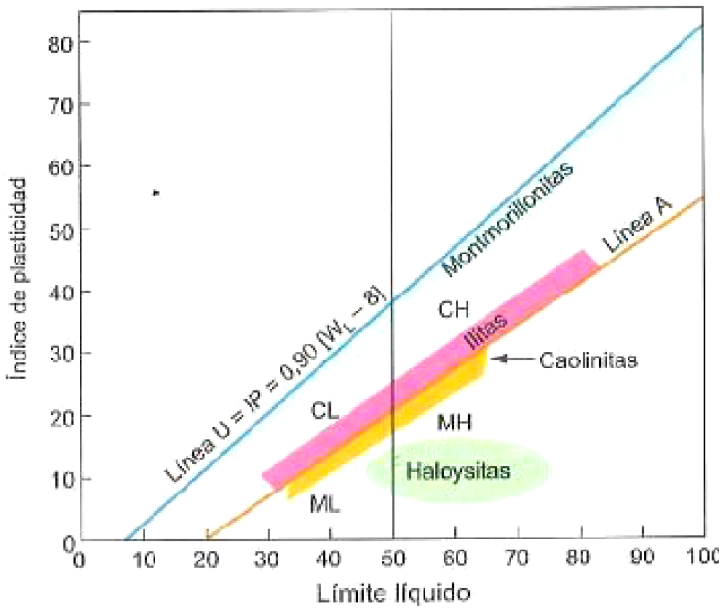
1.8.2. Límites de Atterberg AASHTO T090-00 ASTM D424-54

Basado en la propiedad más notable de las arcillas y la adquieren al ser mezcladas con agua, es decir, la plasticidad; sin embargo, su formación mineralógica influye en el índice de plasticidad.

Según sea el tipo de mineral contenido en las muestras de suelo, así se relaciona con el índice de plasticidad y el límite líquido lo que genera influencia para su estudio.

Figura 14.

Composición mineralógica en la plasticidad



Nota. Gráfica de la composición de los minerales influenciando en la plasticidad. Obtenido de L. González (2002). *Ingeniería Geológica*. (p. 94). Pearson Educación.

Das (2011) hace referencia a que

> Los límites de Atterberg se pueden considerar como propiedades que aportan valores para los índices de los suelos. Por lo que, estos índices son estados de consistencia de la masa de suelo en estudio. Ante ello, se tiene límite de contracción (LC) es una colindancia entre el estado sólido y semisólido; el límite plástico (LP) es la frontera para identificar el estado semisólido y plástico; el límite líquido (LL) define el punto cuando se encuentra entre el estado plástico y semilíquido. (p. 16).

1.8.3. Gravedad específica AASHTO T100-6 ASTM D854-07

Hernández (2008) indica que:

> Es una relación entre el peso unitario de la masa de suelo y el peso unitario del agua destilada en grados Celsius. Por lo que es un valor directamente influenciado por la relación de vacíos que presenta la muestra de suelo en estudio. Debido a eso, su utilidad es importante para aproximar el valor del peso unitario, con estos valores se procede a graficar la recta que indica la saturación máxima en el ensayo Proctor. (p. 141)

Es necesario conocer la gravedad específica y los rangos que representa para algunos suelos, como lo indica la tabulación siguiente.

Tabla 12.

Gravedad específica de los suelos

Tipo de suelo	Gs
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

Nota. Tipos de suelos y sus valores de gravedad específica. Obtenido de J. Bowles. (1981). *Manual de Laboratorio de Suelos en Ingeniería Civil*. (p. 64). McGraw-Hill.

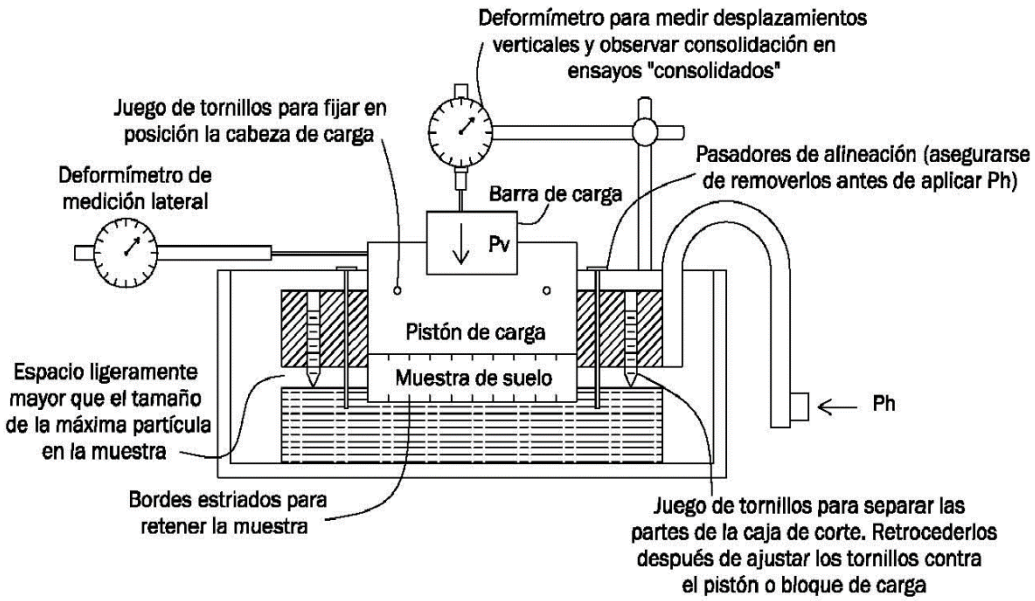
1.8.4. Corte directo AASHTO T236-03 ASTM D3080-03

Hernández (2008) refiere al corte directo como “la ocurrencia de una falla a través de un plano de localización determinado” (p. 274) esto lo explica un esfuerzo normal debido a una carga Pv que aplicada externamente genera una tensión normal (σn = Pv / A).

La resistencia al corte de cualquier tipo de suelo es, en términos de esfuerzo efectivo, la resultante de la resistencia no drenada o de la cohesión aparente más el producto del esfuerzo normal efectivo en el plano de corte y del ángulo de fricción por esfuerzo efectivo.

Figura 15.

Configuración del ensayo de corte directo



Nota. Detalle de la configuración para ensayo de corte directo. Obtenido de J. Bowles. (1981). *Manual de Laboratorio de Suelos en Ingeniería Civil*. (p. 177) McGraw-Hill.

1.8.5. Consolidación AASHTO T216-07 ASTM D2435-03

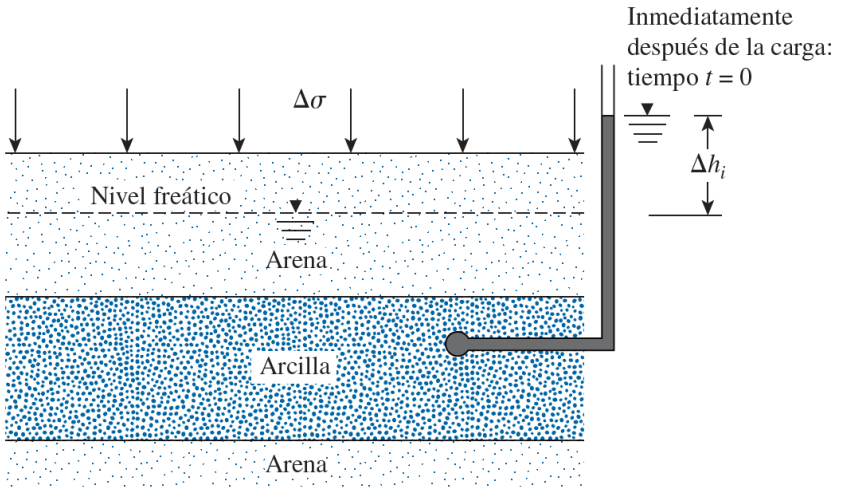
Según Das (2011)

> En el campo cuando el esfuerzo sobre una capa de arcilla saturada se incrementa, por ejemplo, por la construcción de una cimentación, la presión de poro del agua en la arcilla aumentará. Esto, dado que la permeabilidad hidráulica de las arcillas es muy pequeña, se requiere de determinado tiempo para que se disipe el exceso de presión de poro del agua y que el aumento en el esfuerzo se transfiera al armazón sólido. (p. 32)

En la siguiente ilustración se muestra que $\Delta\sigma$ es una sobrecarga en la superficie del terreno sobre un área demasiado grande, lo cual ocasiona que el incremento en el esfuerzo total en cualquier profundidad de la capa de arcilla sea igual a $\Delta\sigma$.

Figura 16.

Principios de consolidación



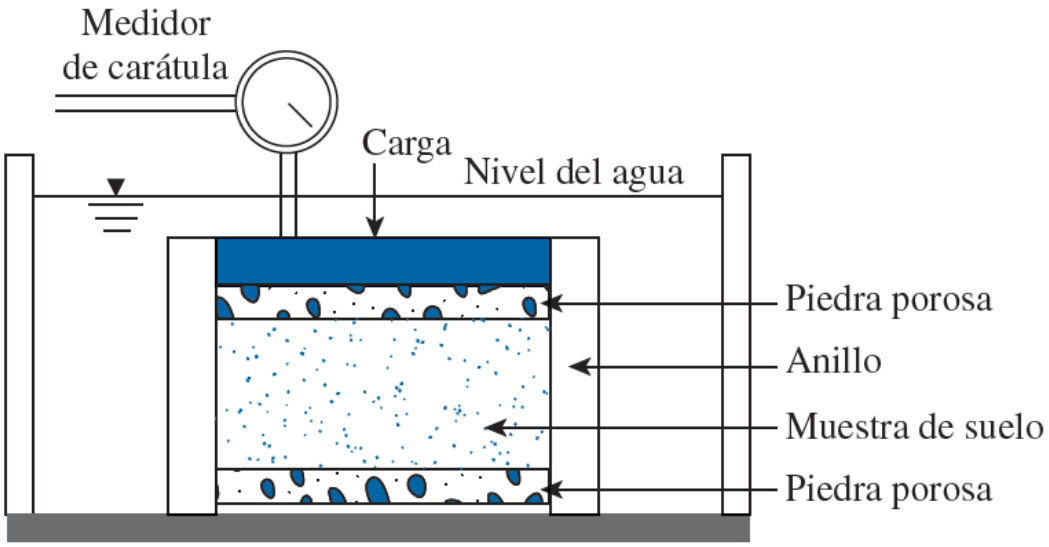
Nota. Sobrecarga en la superficie del terreno sobre un área muy grande. Obtenido de B. Das. (2011). *Fundamentos de ingeniería de cimentaciones*. (p. 32). Cengage Learning.

Sin embargo, Hernández (2008) indica se pueden realizar “pruebas de laboratorio con muestras de arcilla saturada sin alterarla” (p. 301). Así pues, Das (2011) complementa “con la guía y aplicación de la norma ASTM D-2435 para determinar el asentamiento por consolidación generado por cargas que van en aumento” (p. 32). Para este ensayo las muestras que se analizan suelen ser de 63.5 mm de diámetro y 25.4 mm de altura.

La figura que sigue representa el diagrama para la realización del ensayo de consolidación en suelos arcillosos.

Figura 17.

Configuración del ensayo de consolidación



Nota. Diagrama esquemático de la configuración de la prueba de consolidación. Obtenido de B. Das. (2011). *Fundamentos de ingeniería de cimentaciones*. (p. 33). Cengage Learning.

1.9. Estabilización de suelos arcillosos

El proceso de mezclar materiales con cualquier tipo de suelo es con el fin de mejorar sus propiedades, alcanzar una estabilización mecánica; también se logra la estabilización física o química a través de aditivos añadidos a la mezcla.

Debido a que el suelo se utiliza como un apoyo para las cimentaciones ya sea de una edificación o de un pavimento, debe contar con las características físicas y propiedades mecánicas para soportarlo. En el caso de las arcillas que tienen la capacidad de modificar su volumen al tener contacto con el agua generando grietas a simple vista, se ve la necesidad de estabilizarlas.

Bauzá (2006) refiere soluciones para proceder ante la presencia de materiales arcillosos, y estas son:

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

- 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

- La modificación de la tipología estructural que impide a dichos minerales arcillosos actuar de forma natural y así afectar las obras civiles. (p. 28)

Estas acciones repercuten económicamente en el proyecto elevando sus costos, por ello es importante realizar estudios de prefactibilidad del proyecto y evitar efectos adversos.

2. FORMACIONES GEOLÓGICAS

La historia de la formación geológica de Guatemala comenzó a partir del Jurásico, hace unos 140 millones de años, cuando los bloques Maya y Chortis se independizaron de Pangea. Casi al final del Cretácico, el movimiento de la placa del Caribe hacia el este con respecto a la placa norteamericana produjo un choque frontal entre terrenos con corteza continental en el límite entre ambas placas, que tuvo su influencia en los bloques Chortis y Maya, formándose el Cinturón plegado de Petén. Posteriormente, desde hace unos 35 millones de años (Oligoceno Inferior), el desplazamiento del bloque Chortis al sur y este, a lo largo del límite septentrional de la placa del Caribe, llegó a poner en contacto los bloques Chortis y Maya, y últimamente, dio lugar a la geografía actual de Guatemala. (Cano, 2006, p. 1).

2.1. Constitución geológica de Guatemala

Guatemala se representa con rocas de muy diversas edades, que abarcan desde la era Paleozoica (y quizás más antiguas) hasta el presente. Desde el punto de vista estructural se pueden clasificar dos bloques tectonoestratigráficos:

2.1.1. Bloque Maya

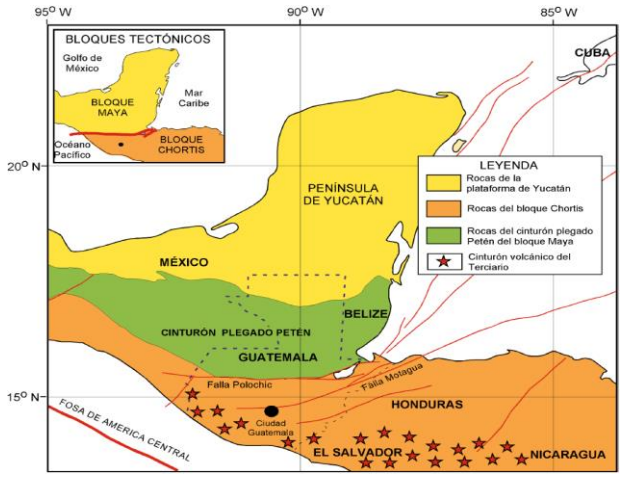
Este se destaca por su contenido de rocas metamórficas, reconocido con el Grupo Chuacús; lo conforman las rocas sedimentarias de Yucatán, parte continental del sur de la Placa Norteamericana, Belice, el Cinturón Plegado de Petén y sureste de México.

2.1.2. Bloque Chortís

En este bloque se distinguen también las rocas metamórficas, secuencias volcánicas y sedimentarias, rocas intrusivas. El período que contempla en la mayor parte a este bloque es el Terciario. La figura que continúa representa los bloques tectónicos mencionados y parte de la historia de la formación de Guatemala.

Figura 18.

Mapa geológico simplificado de Guatemala y su entorno



Nota. Mapa geológico de Guatemala y su entorno. Obtenido de E. Cano. (2006). Biodiversidad de Guatemala*.* Universidad del Valle de Guatemala*, I,* p. 2.

Debido a que las placas tectónicas de Guatemala han estado en constante interacción junto con la actividad volcánica, causan la formación y generan cambios en la geología local, así como, la formación de minerales como la arcilla, objetivo de esta investigación.

Las muestras de suelo arcilloso extraídas en la zona 16 de la ciudad capital se sitúan sobre el bloque Chortí, más adelante se explican en detalle, es decir, en la sección 2.3.1 y 2.3.2.

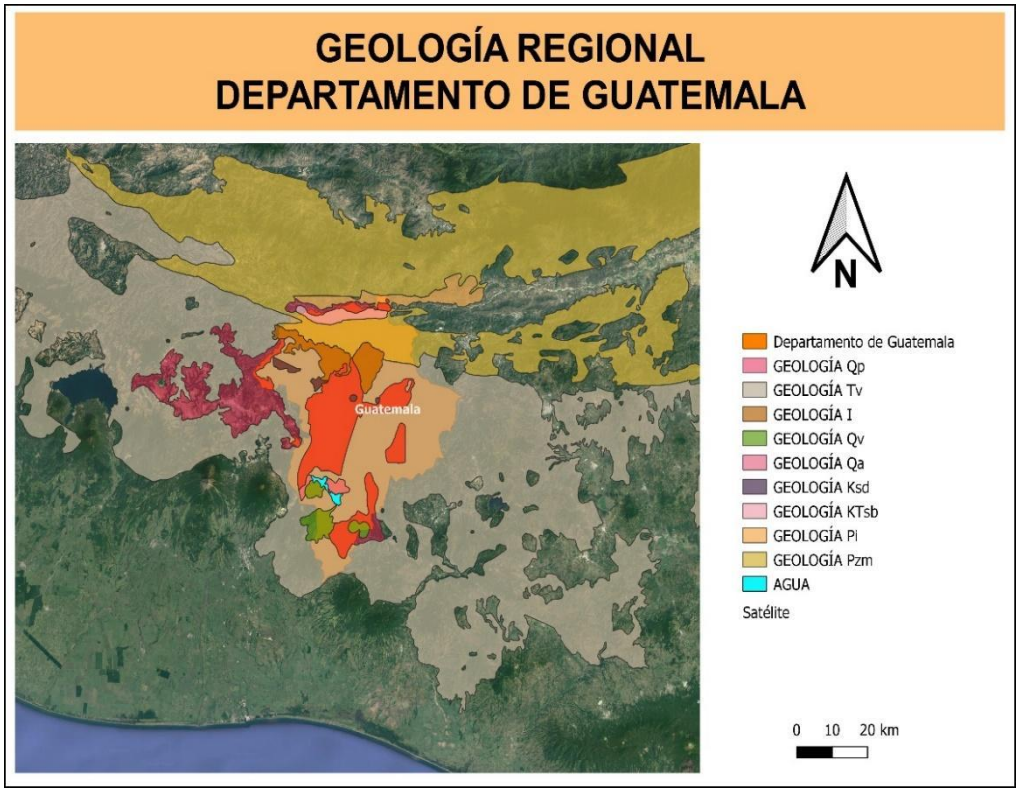
2.2. Geología regional

Guatemala en su división política está conformado por diecisiete municipios: Ciudad de Guatemala (3,015,081 habitantes), Mixco (517,505 habitantes), Villa Nueva (483,897 habitantes), San Juan Sacatepéquez (284,798 habitantes), Villa Canales (167,779 habitantes), Amatitlán (152,296 habitantes), San Miguel Petapa (150,513 habitantes), Chinautla (124,365 habitantes), San José Pinula (89,636 habitantes), Santa Catarina Pinula (87,362 habitantes), Palencia (74,839 habitantes), San Pedro Ayampuc (67,946 habitantes), Fraijanes (63,721 habitantes), San Pedro Sacatepéquez (56,545 habitantes), San Raymundo (38,891 habitantes), Chuarrancho (17,057 habitantes) y San José del Golfo (8,456 habitantes) (División política del departamento de Guatemala, 2022).

El departamento de Guatemala cuenta con geología diversa, como se presenta en la figura de abajo, que indica en su leyenda los tipos de geología a la que pertenece. La geología de tipo Qp, Tv y Ksd se definen en la sección 2.3.

Figura 19.

Geología regional del departamento de Guatemala



Nota. Geología regional del departamento de Guatemala. Elaboración propia, realizado en QGIS.

2.2.1. Geología I

Con características de rocas plutónicas sin dividir, incluye granitos y dioritas. Conformada por rocas ígneas y metamórficas; del período terciario. Se localiza en ciertos sectores de los municipios San Juan Sacatepéquez, San Raymundo, Chinautla, San Pedro Ayampuc, San Martín Jilotepeque y parte norte de la ciudad de Guatemala.

2.2.2. Geología Qv

Con características de rocas volcánicas, incluye coladas de lava, material lahárico, tobas y edificios volcánicos. Rocas ígneas y metamórficas; del período cuaternario. Se encuentra en ciertos sectores de los municipios de Amatitlán, San Vicente Pacaya, Barberena, Villa Canales y Fraijanes.

2.2.3. Geología Qa

Conformada por rocas sedimentarias y del período de aluviones cuaternarios.

2.2.4. Geología KTsb

Con formación subinal (capas rojas, predominantemente terciarias). Rocas sedimentarias y del período cretácico – eoceno.

2.2.5. Geología Pi

Con características de rocas ultrabásicas de edad desconocida. Predominantemente serpentinas. En parte pre – Mestrichitiano en edad. Las rocas que la conforman son las ígneas y metamórficas; del período terciario.

2.2.6. Geología Pzm

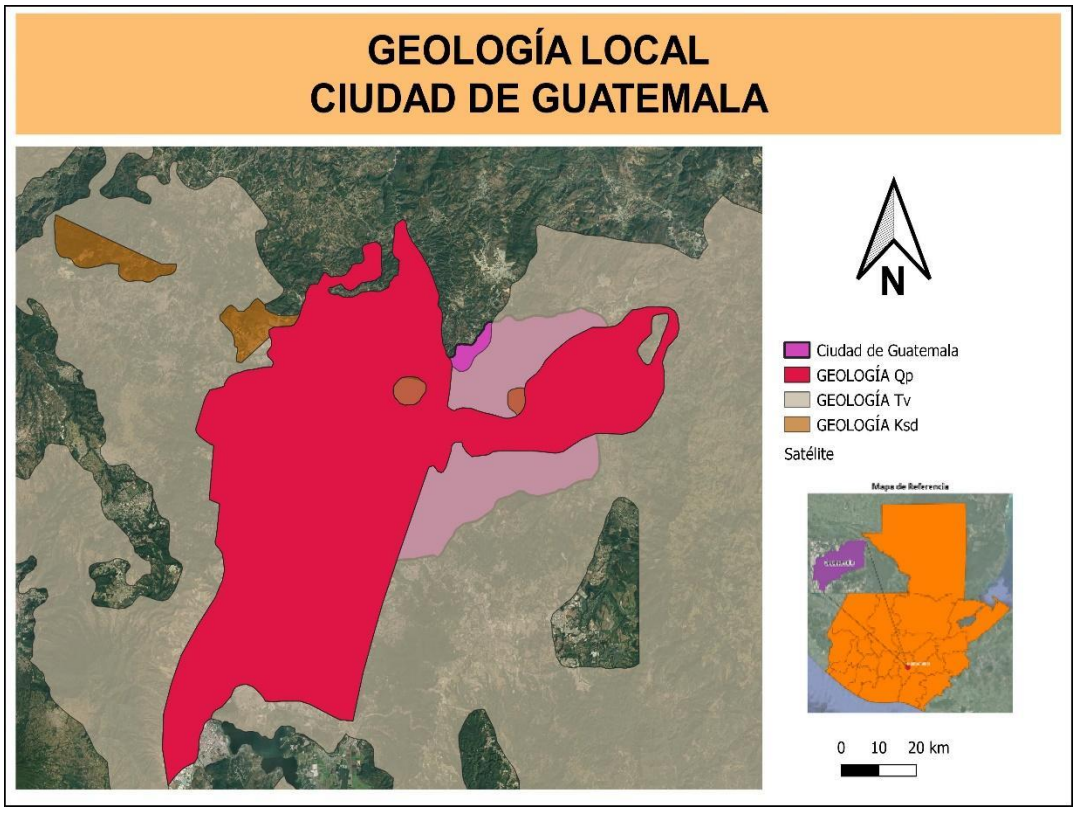
Con características de rocas metamórficas sin dividir. Filitas, esquistos, cloríticos y granatiferos, esquistos y gneises de cuarzo – mica – feldespato, mármol y migmatitas. De rocas ígneas y metamórficas; del período paleozoico.

2.3. Geología local

El municipio de Guatemala tiene un área aproximada de 215.03241304700 kilómetros cuadrados. Colinda con los municipios de Mixco, Chinautla, San Pedro Ayampuc, Palencia, San José Pinula, Santa Catarina Pinula, Villa Canales, Petapa y Villa Nueva. La figura que a continuación se presenta, muestra la diversidad geológica capitalina.

Figura 20.

Geología local de la Ciudad de Guatemala



Nota. Geología local de la ciudad de Guatemala. Elaboración propia, realizado en QGIS.

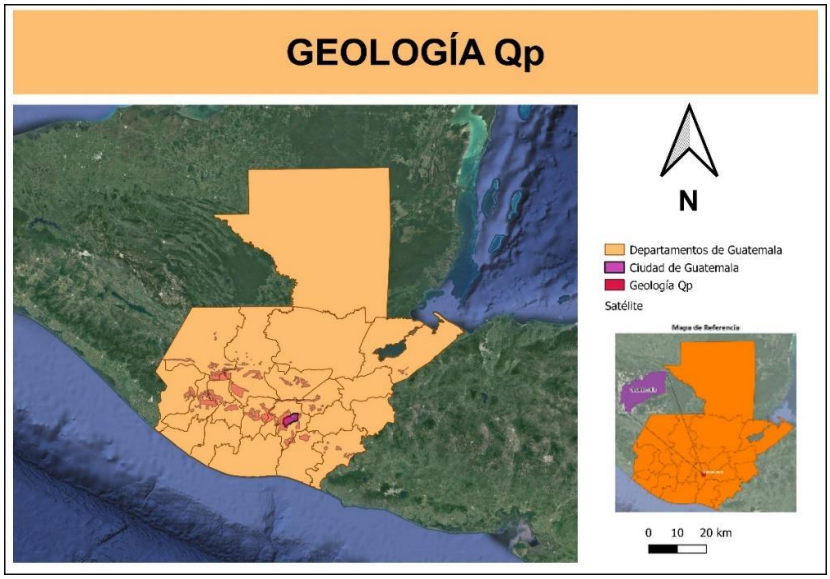
2.3.1. Geología Qp

Características de rellenos y cubiertas gruesas de cenizas pómez de origen diverso; rocas ígneas y metamórficas del período cuaternario. Pérez (2000) menciona que “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 las rocas intermedias presentes” (p. 39).

Chupina (2015) indica “son piroclásticos cuaternarios. Compuesta principalmente por pómez, lapilli y flujos de ceniza acumulados en los valles del altiplano, rellenando depresiones tectónicas. En el valle de Guatemala se reporta un espesor que alcanza más de 250 metros” (p. 24).

Figura 21.

Localización de geología Qp



Nota. Geología tipo Qp. Elaboración propia, realizado en QGIS.

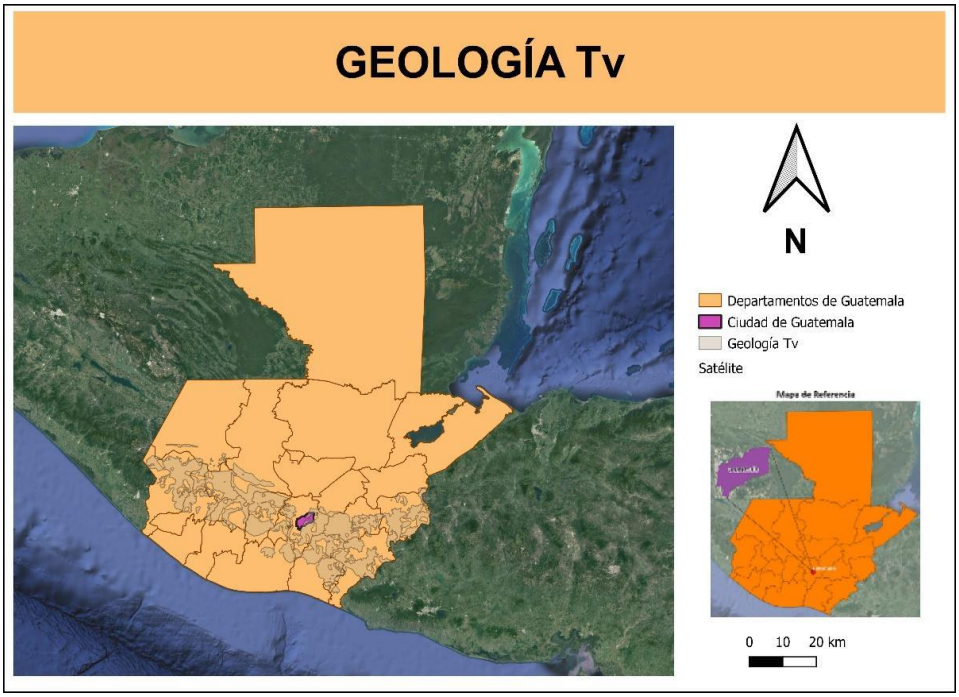
2.3.2. Geología Tv

Chupina (2015) indica que:

Son depósitos que incluyen lavas y tobas del Terciario Superior con espesores de cientos de metros. Muy importante en el altiplano volcánico con rendimientos que varían entre 4000 y 8000 pm en El Ojo de Agua al sur de Ciudad de Guatemala. Refiere también que, los acuíferos están constituidos por andesitas con alto grado de fracturamiento. (p. 24)

Figura 22.

Localización de geología Tv



Nota. Geología tipo Tv. Elaboración propia, realizado en QGIS.

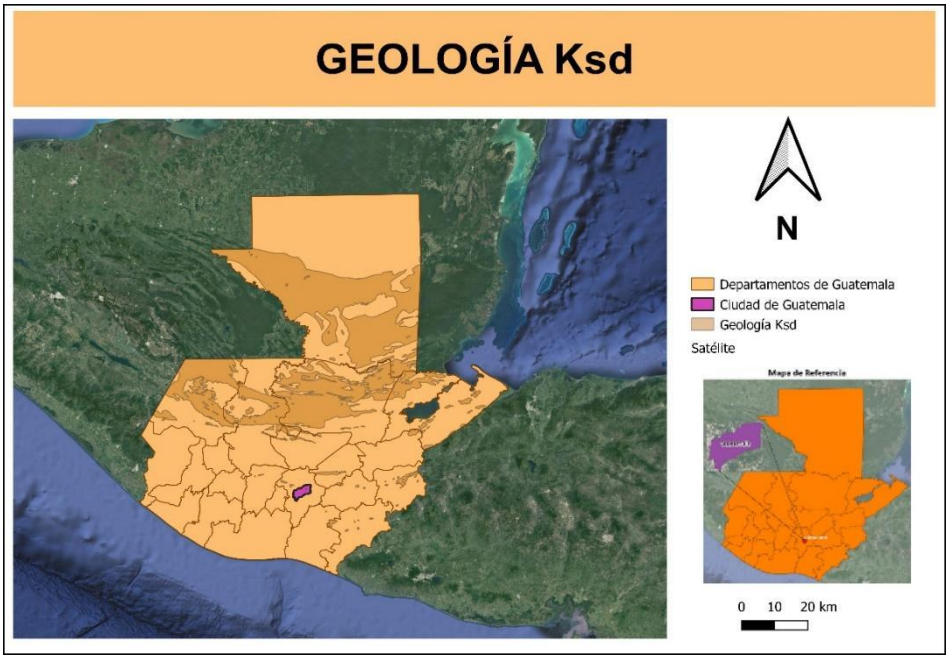
2.3.3. Geología Ksd

Chupina (2015) define que “son nombradas Calizas y dolomitas cretácicas. Unidad que considera los depósitos carbonatados con desarrollo de paisaje kárstico distribuidos en la parte central del país. La composición litológica varía de calizas arrecifales, dolomitas, brechas calcáreas y conglomerados calcáreos” (p. 25).

Características: carbonatos neocomianos – camapanianos, incluye Cobán, Ixcoy, Campur, Sierra Madre y Grupo Yojoa. Rocas sedimentarias y del cretácico.

Figura 23.

Localización de geología Ksd



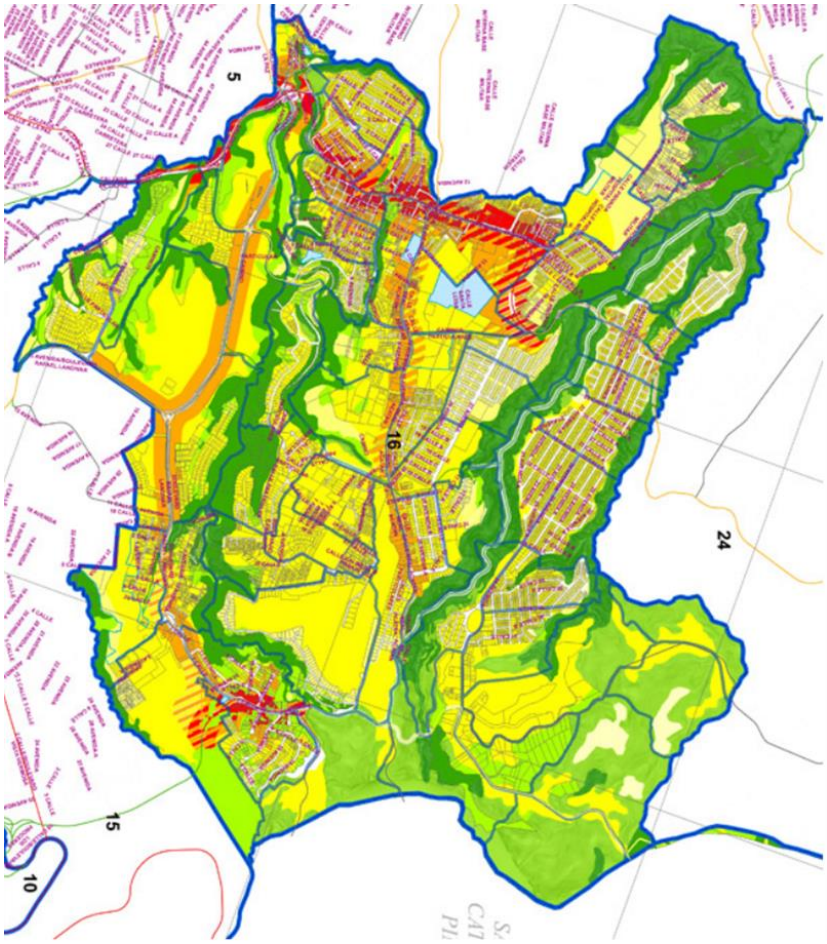
Nota. Geología tipo Ksd. Elaboración propia, realizado en QGIS.

2.4. Ubicación de muestras

Las muestras extraídas son identificadas en sus formaciones a través de la geología local. Seguido, se ubica la zona 16 capitalina a través del portal web de la Municipalidad de Guatemala.

Figura 24.

Delimitación geográfica de zona 16 capitalina



Nota. Plan de Ordenamiento Territorial, Dirección de Planificación Urbana. (2023). *Portal Web de la Municipalidad de Guatemala*. (https://www.muniguate.com/), consultado el 28 de febrero de 2023. De dominio publico.

Figura 25.

Muestras extraídas en zona 16 ciudad capital

Nota. Geologías de estudio: Tv y Qp. Elaboración propia, realizado en QGIS.

2.4.1. Muestra M_1, unidad Tv

La muestra M_1 fue tomada en las coordenadas geográficas N 14°36´31.8744” W 90°27´40.8492”, o bien convertidas a coordenadas UTM WGS84 773492.6 Este, 1616593.2 Norte. Se localiza en la lotificación residencial Hacienda Real.

2.4.2. Muestra M_2, unidad Qp

La muestra M_2 fue tomada en las coordenadas geográficas N 14°38´00.8556” W 90°27´43.8192”, o bien convertidas a coordenadas UTM WGS84 773373 Este, 1619328.2 Norte. Se localiza en Senderos Apartamentos.

3. DESARROLLO EXPERIMENTAL

Para caracterizar las propiedades mineralógicas, físicas y mecánicas de las arcillas de las formaciones geológicas Tv y Qp se ensayan en laboratorio las muestras, se obtienen datos y éstos son utilizados para los respectivos cálculos.

3.1. Ensayos de laboratorio químico

En este apartado del documento las muestras M_1, unidad Tv y M_2, unidad Qp se someten a ensayos químicos - mineralógicos.

3.1.1. Ensayos químicos muestra M_1, unidad Tv

Las pruebas realizadas a la muestra M_1 permiten la determinación del grado de acidez, identificación de la fase mineral, óxidos generales y la reactividad que tiene este tipo de suelo arcilloso.

3.1.1.1. Determinación de pH

El valor del grado de acidez de la geología Tv indica la concentración de iones de hidrógeno que contiene, siendo este de 7.32 a una temperatura de 22.3°C. Según los valores establecidos en el pH de un suelo, el resultado del ensayo para la muestra M_1 corresponde a un suelo neutro.

3.1.1.2. Difracción de rayos X

La técnica analítica difracción de rayos X permite la cuantificación de las fases minerales y la concentración de ellas en porcentajes. La fase característica de la geología Tv es la moscovita, indica que la mayor presencia corresponde al grupo de silicatos.

Tabla 13.

Difracción rayos X, Tv

Fase Mineral Tv	Concentración en porcentaje
Cristobalita	0.10
Anortita sódica	28.20
Zeolita	3.90
Moscovita	55.50
Cuarzo	9.60
Magnetita	2.70

Nota. Difracción RX geología Tv. Elaboración propia, realizado en Word.

3.1.1.3. Fluorescencia de rayos X

La composición química como porcentaje de la muestra M_1 se establece mediante la fluorescencia de rayos x e identifica que la mayor presencia es de óxido de silicio con un porcentaje aproximado de 41 %.

Tabla 14.

Fluorescencia RX, Tv

Muestra de suelo Tv	
Nomenclatura	**Porcentaje**
Óxido de aluminio, Al_2O_3	23.2516
Óxido de calcio, CaO	1.6214
Óxido de cromo, Cr_2O_3	0.0243
Óxido de hierro, Fe_2O_3	8.0193
Óxido de potasio, K_2O	0.4499
Óxido de magnesio, MgO	0.3879
Óxido de manganeso, MnO	0.1959
Óxido de sodio, Na_2O	0.9630
Óxido de fósforo, P_2O_5	0.0308
Óxido de azufre, SO_3	0.0061
Óxido de silicio, SiO_2	40.9648
Óxido de titanio, TiO_2	0.8714

Nota. Fluorescencia RX de geología Tv. Elaboración propia, realizado en Word.

3.1.1.4. Reactividad potencial álcali-carbonato

Se determina a través de la espectrometría de fluorescencia rayos x; del porcentaje que indica el óxido de aluminio, la relación entre el óxido de calcio y óxido magnésico. El valor resultante de la reactividad para el suelo Tv muestra que es potencialmente reactivo tal como lo indica el informe de CEMPRO en el apartado de anexos.

3.1.2. Ensayos químicos muestra M_2, unidad Qp

Las pruebas realizadas a la muestra M_2 permiten la determinación del grado de acidez, identificación de la fase mineral, óxidos generales y la reactividad que tiene este tipo de suelo arcilloso.

3.1.2.1. Determinación de pH

El valor del grado de acidez de la geología Qp indica la concentración de iones de hidrógeno que contiene, siendo este de 7.02 a una temperatura de 24 °C. Según los valores establecidos en el pH de un suelo, el resultado del ensayo para la muestra M_2 corresponde a un suelo neutro.

3.1.2.2. Difracción de rayos X

La técnica analítica difracción de rayos X permite la cuantificación de las fases minerales y la concentración de ellas en porcentajes. La muestra de geología Qp identifica cinco fases minerales y su mayor concentración en Anortoclasa y ésta corresponde al grupo de feldespatos.

Tabla 15.

Difracción RX, Qp

Fase mineral Qp	Concentración en porcentaje
Anortita sódica	21.50
Cuarzo	13.30
Magnetita	13.20
Zeolita	2.00
Anortoclasa	50.00

Nota. Difracción RX geología Qp. Elaboración propia, realizado en Word.

3.1.2.3. Fluorescencia de rayos X

La composición química como porcentaje de la muestra M_2 se establece mediante la fluorescencia de rayos x e identifica que la mayor presencia es de óxido de silicio con porcentaje aproximado de 46.

Tabla 16.

Fluorescencia RX, Qp

Muestra de suelo Qp	
Nomenclatura	**Porcentaje**
Óxido de aluminio, Al_2O_3	23.9537
Óxido de calcio, CaO	2.1487
Óxido de cromo, Cr_2O_3	0.0334
Óxido de hierro, Fe_2O_3	8.7387
Óxido de potasio, K_2O	0.6530
Óxido de magnesio, MgO	0.4758
Óxido de manganeso, MnO	0.2169
Óxido de sodio, Na_2O	2.1471
Óxido de fósforo, P_2O_5	0.0000
Óxido de azufre, SO_3	0.0171
Óxido de Silicio, SiO_2	45.9402
Óxido de titanio, TiO_2	1.0760

Nota. Fluorescencia RX de geología Qp. Elaboración propia, realizado en Word.

3.1.2.4. Reactividad potencial álcali-carbonato

Se determina a través de la espectrometría de fluorescencia rayos x, del porcentaje que indica el óxido de aluminio, la relación entre el óxido de calcio y óxido magnésico. El valor resultante de la reactividad para el suelo Qp muestra

que es potencialmente reactivo tal como lo indica el informe de CEMPRO en el apartado de anexos.

3.2. Ensayo de laboratorio de suelos

Una vez las muestras de suelo arcilloso M_1, unidad Tv y M_2, unidad Qp sean identificadas en su composición y estructura mineralógica se procede a evaluar las propiedades físicas y mecánicas a través de ensayos de suelos.

3.2.1. Ensayo físico–mecánico muestra M_1 unidad Tv

Las pruebas realizadas a la muestra M_1 permiten la determinación de la granulometría, plasticidad, resistencia bajo efectos de cargas combinadas, gravedad específica del material y consolidación de este tipo de suelo.

3.2.1.1. Granulometría

El suelo Tv en su preparación al ensayo de granulometría proporciona datos de los pesos, como sigue:

- Peso del material: 1,340.90 g
- Peso del material lavado y secado: 323.60 g

Seguido, se realiza el tamizado y proporciona datos de las cantidades de material que atraviesa cada tamiz y por tanto se ejecuta el cálculo del porcentaje de la masa retenida.

Tabla 17.

Granulometría, Tv

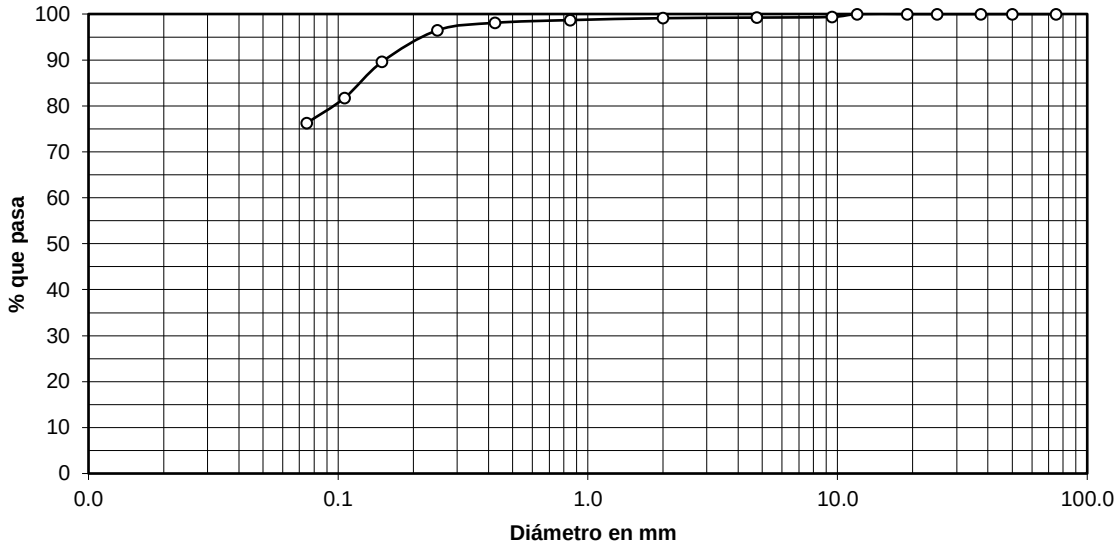
Tamiz	Abertura (mm)	Peso neto (g)	Por ciento (%)
		317.60	100.00
3"	75	317.60	100.00
2"	50	317.60	100.00
1 1/2"	37	317.60	100.00
1"	25	317.60	100.00
3/4"	19	317.60	100.00
1/2"	12.5	317.60	99.37
3/8"	9.5	309.10	99.22
4	4.75	307.20	99.10
8	2.36	305.50	98.68
16	1.18	299.90	98.08
30	0.6	291.90	96.47
50	0.3	270.30	89.61
100	0.15	178.30	81.74
200	0.075	1023.30	76.31

Nota. Datos ensayo de granulometría, geología Tv. Elaboración propia, realizado en Word.

La curva de granulometría obtenida de la geología Tv muestra a un material fino, sin aportar información en los diámetros y por tanto sin coeficientes de uniformidad ni de graduación.

Figura 26.

Curva granulométrica, Tv



Nota. Curva granulométrica, geología Tv. Elaboración propia, realizado en Excel.

Ante ello, se calculan los porcentajes de granos como sigue:

- Iteración 1, gravas Tv:
    - % gravas = % del tamiz 3” - % del tamiz 4
    - % gravas = 100 % - 99.10 %
    - % gravas = 0.90 %
- Iteración 2, finos Tv:
    - % finos = % del tamiz 200
    - % finos = 76.31 %

- Iteración 3, arenas Tv:

    - % arenas = 100 - % de gravas - % de finos
    - % arenas = 100 – 0.90 % - 76.31 %
    - % arenas = 22.79 %

    En síntesis, Tv posee 0.9 % gravas, 76.3 % finos y 22.8 % arenas.

3.2.1.2. Límites de Atterberg

Permiten caracterizar el comportamiento del suelo fino e identificar los estados de consistencia de la muestra de suelo Tv.

3.2.1.2.1. Límite líquido

Una vez finalizado el ensayo se tabulan los datos obtenidos y se procesan cálculos.

Tabla 18.

Límite líquido, Tv

	Límite líquido Tv		
Golpes	39	28	12
Tarro	9	10	11
PBH (g)	29.51	28.86	29.74
PBS (g)	23.96	23.30	23.66
Tara (g)	12.27	12.29	12.09
DIF (g)	5.55	5.56	6.08
PNS (g)	11.69	11.01	11.57

Continuación de la tabla 18.

		Límite líquido Tv	
Humedad	47.48	50.50	52.55
Promedio		50.18	

Nota. Datos del ensayo límite líquido, geología Tv. Elaboración propia, realizado en Word.

Los cálculos se ejecutan a través de restas aritméticas, relacionales y promedios indicados en las iteraciones siguientes:

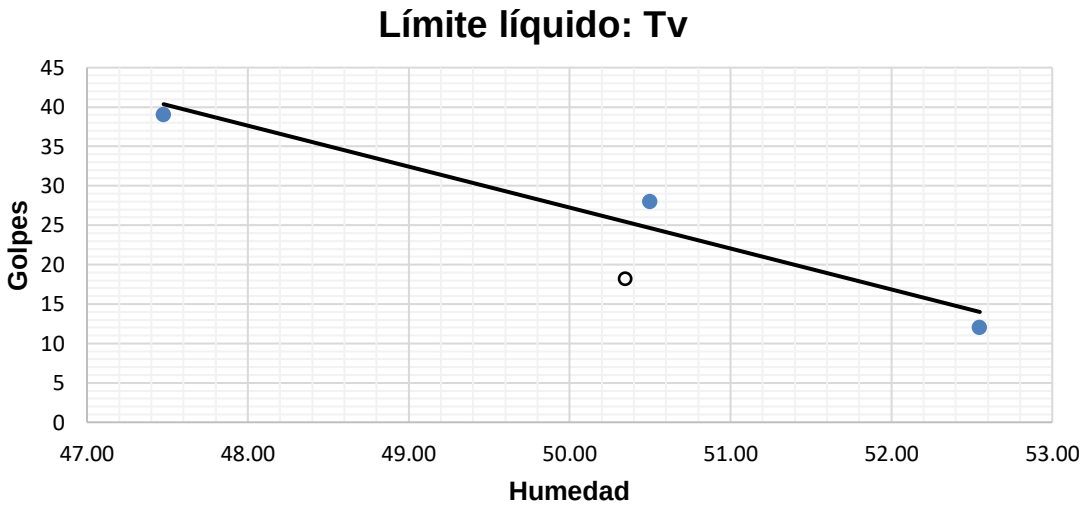
- Iteración 1, Dif_{39} Tv:
  - Dif_{39} = PBH – PBS
  - Dif_{39} = 29.51 g – 23.96 g
  - Dif_{39} = 5.55 g
- Iteración 2, PNS_{39} Tv:
  - PNS_{39} = PBS - TARA
  - PNS_{39} = 23.96 g – 12.27 g
  - PNS_{39} = 11.69 g
- Iteración 3, $humedad_{39}$ Tv:
  - $Humedad_{39}$ = (Dif / PNS) * 100
  - $Humedad_{39}$ = (5.55 g / 11.69 g) * 100
  - $Humedad_{39}$ = 47.48 %
- Iteración 4, humedad promedio Tv:

- $Humedad_{prom} = (H_{39} + H_{28} + H_{12}) / 3$
- $Humedad_{prom} = (47.48\ \% + 50.50\ \% + 52.55\ \%) / 3$
- $Humedad_{prom} = 50.18\ \%$

Una vez calculados estos datos, se procede a graficar la cantidad de golpes versus porcentaje de humedad.

Figura 27.

Gráfica límite líquido, Tv



Nota. Determinación de Límite Líquido, geología Tv. Elaboración propia, realizado en Excel.

El valor del límite líquido de la geología Tv se identifica en la gráfica cuando el número de golpes corresponde a 25. Esto es, que el límite líquido que representa el suelo Tv corresponde a 50.42 % de humedad.

3.2.1.2.2. Límite plástico

Una vez finalizado el ensayo se tabulan los datos obtenidos y se procesan cálculos.

Tabla 19.

Límite plástico, Tv

Límite plástico Tv			
Tarro	T-9	T-10	T-11
PBH (g)	13.88	14.64	14.00
PBS (g)	12.43	12.94	12.48
Tara (g)	6.96	6.82	6.87
DIF (g)	1.45	1.70	1.52
PNS (g)	5.47	6.12	5.61
Humedad (%)	26.51	27.78	27.09
Promedio		27.13	

Nota. Datos de ensayo Límite Plástico, geología Tv. Elaboración propia, realizado en Word.

Los cálculos se ejecutan a través de restas aritméticas, relacionales y promedios indicados en las iteraciones siguientes:

- Iteración 1, Dif_{T-9} Tv:
    - Dif_{T-9} = PBH – PBS
    - Dif_{T-9} = 13.88 g – 12.43 g
    - Dif_{T-9} = 1.45 g

- Iteración 2, PNS_{T-9} Tv:

- PNS_{T-9} = PBS - TARA
- PNS_{T-9} = 12.43 g – 6.96 g
- PNS_{T-9} = 5.47 g

- Iteración 3, $humedad_{t-9}$ Tv:

  - $Humedad_{T-9}$ = (Dif / PNS) * 100
  - $Humedad_{T-9}$ = (1.45 g / 5.47 g) * 100
  - $Humedad_{T-9}$ = 26.51 %

- Iteración 4, humedad promedio Tv:

  - $Humedad_{prom}$ = (H_{T-9} + H_{T-10} +H_{T-11}) / 3
  - $Humedad_{prom}$ = (26.51 % + 22.78 % + 27.09 %) / 3
  - $Humedad_{prom}$ = 27.13 %

El límite plástico de la geología Tv se identifica con el valor promedio de la humedad, es decir, 27.1 %.

3.2.1.2.3. Índice de plasticidad

Das (2011) determina que “el valor del índice de plasticidad del suelo resulta de la diferencia entre el límite líquido (LL) y límite plástico (LP)” (p. 18).

Tabla 20.

Índice plasticidad, Tv

	Plasticidad Tv
LL (%)	50.42

Continuación de la tabla 20.

Plasticidad Tv	
LP (%)	27.13
IP (%)	23.29

Nota. Índice de plasticidad, geología Tv. Elaboración propia, realizado en Word.

Por tanto, el valor de la plasticidad que caracteriza a la geología Tv corresponde a 23.3 %.

3.2.1.3. Gravedad específica

En este ensayo se obtienen datos de los diferentes pesos de la muestra de suelo Tv.

Tabla 21.

Gravedad específica, Tv

Densidad de fino Tv		
Pesos	**Lectura 1**	**Lectura 2**
Matraz seco y vacío (g)	171.00	171.00
Matraz + agua (g)	668.20	668.20
Matraz + material (g)	504.10	506.10
Matraz + material + agua (g)	847.30	844.70
Peso material seco (g)	291.80	293.60
Gs	2.59	2.51
Gs promedio	2.55	

Nota. Densidad específica, geología Tv. Elaboración propia, realizado en Word.

La ecuación de gravedad específica con sus respectivas nomenclaturas se presenta a continuación:

$$G_s = \frac{Ws}{Wmw + Ws - Wmsw} \qquad \text{(Ecuación 4)}$$

Donde:

G_s = gravedad específica
W_s = peso del material seco
W_{mw} = peso del matraz + agua
W_{msw} = peso del matraz + material + agua

Aplicando las iteraciones correspondientes queda como sigue:

- Iteración 1, densidad Tv:

$$G_{s1} = \frac{291.80}{668.20 + 291.80 - 847.30} = 2.59$$

- Iteración 2, densidad Tv:

$$G_{s2} = \frac{293.60}{668.20 + 293.60 - 844.70} = 2.51$$

Seguido se calcula el promedio de las dos lecturas y se obtiene que la gravedad específica de la geología Tv corresponde a 2.550.

3.2.1.4. Consolidación

Una vez finalizado el ensayo del suelo Tv se tabulan los datos generales obtenidos.

Tabla 22.

Datos para consolidación, Tv

Datos generales Consolidación Tv	
Diámetro (Plg)	2.50
Área (Plg^2)	4.91
h_o (cm)	2.54
PNH_o (g)	120.93
G_S	2.55
PBH_o (g)	192.74
PBS_o (g)	158.54
$Tara_o$ (g)	71.81
PBH_f (g)	165.24
PBS_f (g)	132.69
$Tara_f$ (g)	47.16

Nota. Datos generales para consolidación, geología Tv. Elaboración propia, realizado en Word.

Obtenidos los datos generales, se ejecutan cálculos indicados en las iteraciones siguientes:

- Iteración 1, Dif_o Tv:
    - $Dif_o = PBH_o – PBS_o$
    - $Dif_o = 192.74\ g – 158.54\ g$
    - $Dif_o = 34.20\ g$

- Iteración 2, PNH_o Tv:

    - $PNH_o = PBH_o – Tara_o$
    - $PNH_o = 192.74\ g – 71.81\ g$
    - $PNH_o = 120.93\ g$

- Iteración 3, Dif_f Tv:

    - $Dif_f = PBH_f – PBS_f$
    - $Dif_f = 165.24\ g – 132.69\ g$
    - $Dif_f = 32.55\ g$

- Iteración 4, PNH_f Tv:

    - $PNH_f = PBH_f – Tara_f$
    - $PNH_f = 165.24\ g – 47.16\ g$
    - $PNH_f = 118.08\ g$

- Iteración 5, PNS_f Tv:

    - $PNS_f = PBS_f – Tara_f$
    - $PNS_f = 132.69\ g – 47.16\ g$
    - $PNS_f = 85.53\ g$

- Iteración 6, PNS_o Tv:

    - $PNS_o = PNS_f = 85.53\ g$

- Iteración 7, humedad$_o$ Tv:

    - Humedad$_o$ = (Dif$_o$ / PNS$_o$) * 100
    - Humedad$_o$ = (34.20 g / 85.53 g) * 100
    - Humedad$_o$ = 39.99 %

- Iteración 8, humedad$_f$ Tv:

    - Humedad$_f$ = (Dif$_f$ / PNS$_f$) * 100
    - Humedad$_f$ = (32.55 g / 85.53 g) * 100
    - Humedad$_f$ = 38.06 %

- Iteración 9, humedad promedio Tv:

    - Humedad$_{prom}$ = (H_o + H_f) / 2
    - Humedad$_{prom}$ = (39.99 % + 38.06 %) / 2
    - Humedad$_{prom}$ = 39.02 %

- Iteración 10, volumen Tv:

    - Vol = Área (plg^2) * 2.54^2 (cm^2) * h_o (cm)
    - Vol = 4.91 plg^2 * (2.54 cm)^2 * 2.54 cm
    - Vol = 80.44 cm^3

Para determinar el valor de las densidades específicas se utilizan las ecuaciones 5 y 6.

$$\gamma = \frac{PNH\ inicial\ (g)}{Vol\ (cm3)} \qquad \text{(Ecuación 5)}$$

$$\gamma_{dTv} = \frac{\gamma}{(100 + \%Hprom)} * 100 \quad \text{(Ecuación 6)}$$

Donde:

γ = densidad específica húmeda (g/cm^3)
P = peso neto húmedo inicial (g)
Vol = volumen (cm^3)
γ_{dTv} = densidad específica seca (g/cm^3)
%H_{prom} = humedad promedio

Aplicando las iteraciones correspondientes queda como sigue:

- Iteración 1, densidad específica húmeda Tv:

$$\gamma_{Tv} = \frac{120.93\ g}{80.44\ cm3} = 1.503\ g/cm^3$$

- Iteración 2, densidad específica seca Tv:

$$\gamma_{dTv} = \frac{1.503\ g/cm3}{(100 + 39.02)} * 100 = 1.081\ g/cm^3$$

Ante ello, se calcula el valor de la altura a través de la ecuación 7, como sigue:

$$h_{sTv} = \frac{\gamma_{dTv} * h\ inicial}{\gamma * Gs} \quad \text{(Ecuación 7)}$$

- Iteración 1, altura Tv:

$$h_{sTv} = \frac{1.081\frac{g}{cm3} * 2.54\ cm}{1.503\frac{g}{cm3} * 2.55} = 0.716 \text{ cm}$$

Por tanto, se procede a tabular los valores calculados.

Tabla 23.

Valores calculados consolidación, Tv

Valores calculados consolidación Tv			
DIF_o	34.20	**DIF_f**	32.55
PNH_o	120.93	**PNH_f**	118.08
PNS_o	85.53	**PNS_f**	85.53
% H_o	39.99	**% H_f**	38.06
% H_{prom}		39.02	
Vol (cm^3)		80.44	
γ (g/cm^3)		1.503	
γ_d (g/cm^3)		1.081	
h_s (cm)		0.716	

Nota. Valores calculados para consolidación, geología Tv. Elaboración propia, realizado en Word.

Seguido, se tabulan las presiones, deformaciones, espesores, relación de vacíos y con ello se elabora curva de compresibilidad.

Debido a los cálculos extensos y repetitivos, se indican las operaciones aritméticas utilizadas para la determinación de cada parámetro.

- Presión$_n$ (kg/cm^2) = ((carga$_n$ *11.2) / (1000)) / área (cm^2)
- Lectura$_n$ = es un valor adimensional tomado directo del ensayo
- Deformación$_n$ (dh) = lectura$_n$ * 0.01
- Espesor$_n$ (h) = (h_o * 10) – deformación$_n$

- $e_n = ((espesor_n) / (h_s * 10)) – 1$
- $Deformación_n$ (%) = $(lectura_n / (h_o * 10))$

Tabla 24.

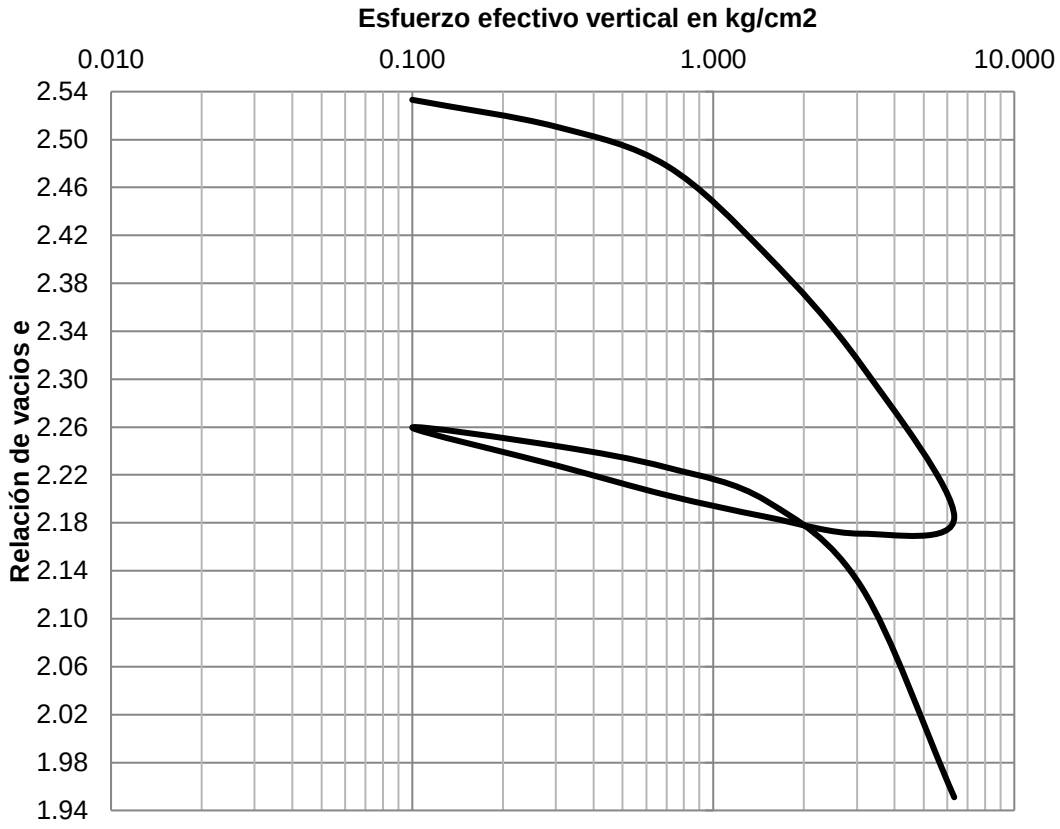
Parámetros curva de compresibilidad, Tv

Presión (kg/cm$^{2)}$	Lectura	Deformación (dh)	Espesor (h)	e	Deform (%)
0.100	8.52	0.0852	25.315	2.5332	0.34
0.302	24.65	0.2465	25.154	2.5106	0.97
0.703	48.10	0.4810	24.919	2.4779	1.89
1.505	101.25	1.0125	24.388	2.4037	3.99
3.108	167.25	1.6725	23.728	2.3116	6.58
6.316	258.00	2.5800	22.820	2.1850	10.16
3.108	268.00	2.6800	22.720	2.1710	10.55
1.505	258.00	2.5800	22.820	2.1850	10.16
0.703	245.00	2.4500	22.950	2.2031	9.65
0.302	227.20	2.2720	23.128	2.2279	8.94
0.100	204.50	2.0450	23.355	2.2596	8.05
0.302	215.58	2.1558	23.244	2.2442	8.49
0.703	228.45	2.2845	23.116	2.2262	8.99
1.505	248.54	2.4854	22.915	2.1982	9.79
3.108	300.00	3.0000	22.400	2.1263	11.81
6.316	425.65	4.2565	21.144	1.9510	16.76

Nota. Valores calculados para curva de compresibilidad, geología Tv. Elaboración propia, realizado en Word.

Figura 28.

Curva de compresibilidad, Tv



Nota. Curva de compresibilidad según parámetros calculados, geología Tv. Elaboración propia, realizado en Excel.

En consecuencia, se procede al cálculo del índice de compresión Cc, del índice de expansión Cs y del coeficiente de consolidación Cv. Las ecuaciones 8 y 9 son utilizadas para Cc y Cs.

$$Cc = \frac{e_{2.4037} - e_{2.3116}}{(\frac{P_{3.108}}{P_{1.505}})} \qquad \text{(Ecuación 8)}$$

$$CS = \frac{e_{2.2279-}\ e_{2.2031}}{(\frac{P_{0.703}}{P_{0.302}})} \quad \text{(Ecuación 9)}$$

$$Cc = \frac{e_{2.4037-}\ e_{2.3116}}{(\frac{3.108}{1.505})} = 0.2923$$

$$Cs = \frac{e_{2.2279-}\ e_{2.2031}}{(\frac{0.703}{0.302})} = 0.0677$$

Los coeficientes de Cv están definidos a través del método de Taylor.

Tabla 25.

Coeficientes consolidación, Tv

Coeficientes consolidación Tv		
CV (m2/S)	**0.027 (kg/cm2)**	7.59856E-07
	0.081 (kg/cm2)	2.84946E-07
	0.188 (kg/cm2)	9.91116E-08
	0.403 (kg/cm2)	4.55913E-07
	0.833 (kg/cm2)	7.59856E-07
	1.692 (kg/cm2)	1.30261E-06

Nota. Coeficientes de consolidación, geología Tv. Elaboración propia, realizado en Word.

El esfuerzo resultante del ensayo de consolidación corresponde a σ'p (kg/cm2) = 0.73.

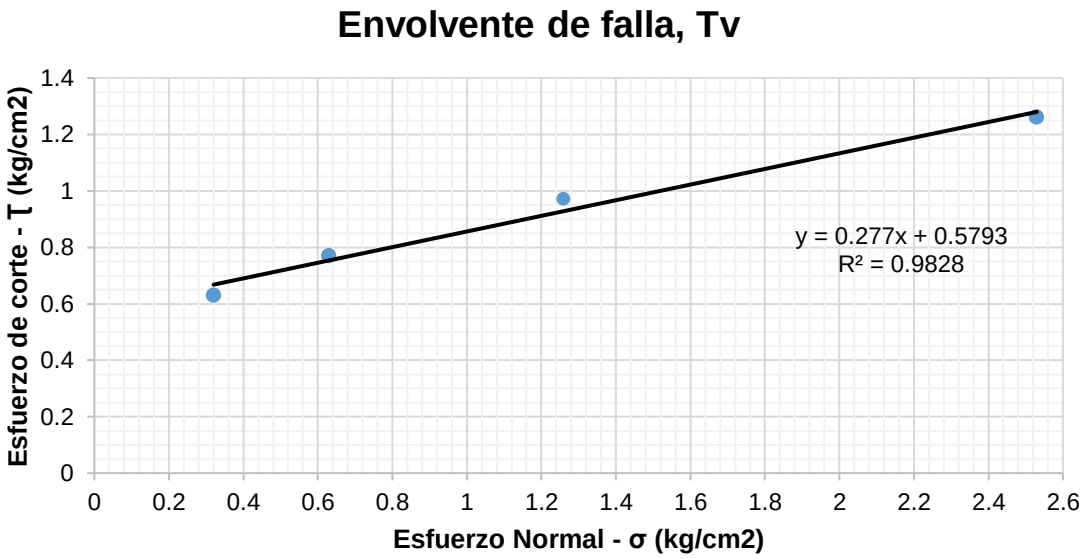
3.2.1.5. Corte directo

El tipo de ensayo realizado al suelo Tv corresponde al No Consolidado, No Drenado con probeta remoldeada.

Hernández (2008) menciona que “la envolvente de falla se obtiene a través de los círculos de Mohr, que representa gráficamente los esfuerzos desviadores para cada presión de confinamiento” (p.226). De ello se determina la cohesión y el ángulo de fricción interna.

Figura 29.

Envolvente de falla, Tv



Nota. Determinación de cohesión y ángulo de fricción interna, geología Tv. Elaboración propia, realizado en Excel.

Gráficamente se determina que la cohesión para Tv es de 0.58 kg/cm^2 y se multiplica por 9.84 que equivale a Ton/m^2, por tanto, C= 5.77 Ton/m^2.

Para determinar el ángulo de fricción interna Tv se utiliza trigonometría, siendo de ayuda la ecuación 6.

$$\emptyset = tan^{-1}\frac{Y}{X} \qquad \text{(Ecuación 6)}$$

Donde:

$\emptyset$ = Ángulo de fricción interna (°)

Y = Diferencia entre esfuerzos de corte (kg/cm^2)

X = Diferencia entre esfuerzos normales (kg/cm^2)

$$\emptyset = tan^{-1}\frac{0.632}{2.280}$$

$$\emptyset = tan^{-1}(0.27719)$$

$$\emptyset = 15.493\,°$$

Tabla 26.

Corte directo, Tv

Corte directo, Tv				
Probeta	**1**	**2**	**3**	**4**
Esfuerzo normal (kg/cm^2)	0.32	0.63	1.26	2.53
Esfuerzo de corte (kg/cm^2)	0.63	0.77	0.97	1.26
Densidad seca (T/m^3)	0.99	0.99	0.99	0.99
Densidad húmeda (T/m^3)	1.47	1.47	1.47	1.47
Humedad (%H)	48.61	48.61	48.61	48.61

Nota. Parámetros de corte directo, geología Tv. Elaboración propia, realizado en Word vers

3.2.2. Ensayo físico–mecánico muestra M_2, unidad Qp

Las pruebas realizadas a la muestra M_2 permiten la determinación de la granulometría, plasticidad, resistencia bajo efectos de cargas combinadas, gravedad específica del material y consolidación de este tipo de suelo.

3.2.2.1. Granulometría

El suelo Qp en su preparación al ensayo de granulometría proporciona datos de los pesos, como sigue:

- Peso del material: 1,295.50 g
- Peso del material lavado y secado: 427.50 g

Seguido, se realiza el tamizado y proporciona datos de las cantidades de material que atraviesa cada tamiz y por tanto se ejecuta el cálculo del porcentaje de la masa retenida.

Tabla 27.

Granulometría, Qp

Tamiz	Abertura (mm)	Peso neto (g)	Por ciento (%)
		419.90	100.00
3"	75	419.90	100.00
2"	50	419.90	100.00
1 1/2"	37	419.90	100.00
1"	25	419.90	100.00
3/4"	19	419.90	100.00
1/2"	12.5	419.90	100.00

Continuación de la tabla 27.

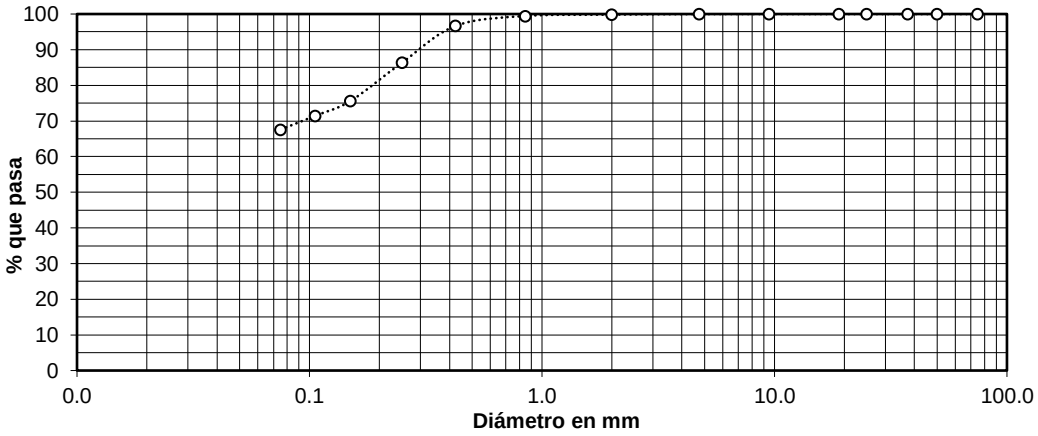
Tamiz	Abertura (mm)	Peso neto (g)	Por ciento (%)
3/8"	9.5	419.90	100.00
4	4.75	419.80	99.99
8	2.36	417.80	99.84
16	1.18	412.80	99.45
30	0.6	376.80	96.67
50	0.3	243.20	86.36
100	0.15	103.70	75.59
200	0.075	875.60	67.59

Nota. Datos ensayo de granulometría, geología Qp. Elaboración propia, realizado en Word.

La curva de granulometría obtenida de la geología Qp muestra a un material fino, sin aportar información en los diámetros y por tanto sin coeficientes de uniformidad ni de graduación.

Figura 30.

Curva granulométrica, Qp



Nota. Curva granulométrica, geología Qp. Elaboración propia, realizado en Excel.

Ante ello, se calculan los porcentajes de gravas, arenas y finos, tal y como indican las iteraciones siguientes:

- Iteración 1, gravas Qp:

    - % gravas = % del tamiz 3” - % del tamiz 4
    - % gravas = 100 % - 99.99 % = 0.01 %

- Iteración 2, finos Qp:

    - % finos = % del tamiz 200 = 67.59 %

- Iteración 3, arenas Qp:

    - % arenas = 100 - % de gravas - % de finos
    - % arenas = 100 – 0.01 % - 67.59 %
    - % arenas = 32.40 %

En síntesis, Qp cuenta con 0.0 % gravas, 67.6 % finos y 32.4 % arenas.

3.2.2.2. Límites de Atterberg

Permiten caracterizar el comportamiento del suelo fino e identificar los estados de consistencia de la muestra de suelo Qp.

3.2.2.2.1. Límite líquido

Una vez finalizado el ensayo se tabulan los datos obtenidos y se procesan cálculos.

Tabla 28.

Límite líquido, Qp

Límite líquido Qp			
Golpes	30	23	12
Tarro	6	7	8
PBH (g)	31.46	31.83	28.83
PBS (g)	26.36	26.20	23.73
Tara (g)	12.80	12.52	12.62
DIF (g)	5.10	5.63	5.10
PNS (g)	13.56	13.68	11.11
Humedad	37.61	41.15	45.90
Promedio		41.56	

Nota. Datos ensayo LL, geología Qp. Elaboración propia, realizado en Microsoft Word 2010.

Los cálculos se ejecutan a través de restas aritméticas, relacionales y promedios indicados en las iteraciones siguientes:

- Iteración 1, Dif_{30} Qp:
    - Dif_{30} = PBH – PBS
    - Dif_{30} = 31.46 g – 26.36 g
    - Dif_{30} = 5.10 g
- Iteración 2, PNS_{30} Qp:
    - PNS_{30} = PBS - TARA
    - PNS_{30} = 26.36 g – 12.80 g
    - PNS_{30} = 13.56 g

- Iteración 3, humedad$_{30}$ Qp:

    - Humedad$_{30}$ = (Dif / PNS) * 100
    - Humedad$_{30}$ = (5.10 g / 13.56 g) * 100
    - Humedad$_{30}$ = 37.61 %

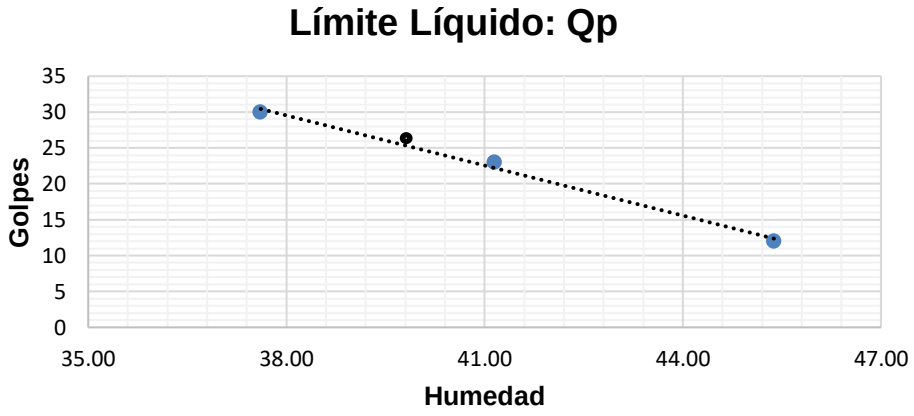
- Iteración 4, humedad promedio Qp:

    - Humedad$_{prom}$ = (H_{30} + H_{23} +H_{12}) / 3
    - Humedad$_{prom}$ = (37.61 % + 41.15 % + 45.90 %) / 3
    - Humedad$_{prom}$ = 41.56 %

Una vez calculados estos datos, se procede a graficar la cantidad de golpes versus porcentaje de humedad.

Figura 31.

Gráfica límite líquido, Qp



Nota. Determinación de Límite Líquido, geología Qp. Elaboración propia, realizado en Excel.

El valor del límite líquido de la geología Qp se identifica en la gráfica cuando el número de golpes corresponde a 25. Esto es, que el límite líquido que representa el suelo Qp corresponde a 40 % de humedad.

3.2.2.2.2. Límite plástico

Una vez finalizado el ensayo del suelo Qp se tabulan los datos obtenidos y se procesan cálculos.

Tabla 29.

Límite plástico, Qp

	Límite plástico Qp		
Tarro	T-6	T-7	T-8
PBH (g)	13.94	12.90	13.11
PBS (g)	12.60	11.76	11.94
Tara (g)	7.09	7.09	7.14
DIF (g)	1.34	1.14	1.17
PNS (g)	5.51	4.67	4.80
Humedad (%)	24.32	24.41	24.38
Promedio		24.37	

Nota. Datos de ensayo Límite Plástico, geología Qp. Elaboración propia, realizado en Word.

Los cálculos se ejecutan a través de restas aritméticas, relaciones y promedios indicados en las iteraciones siguientes:

- Iteración 1, Dif_{T-6} Qp:
  - Dif_{T-6} = PBH – PBS
  - Dif_{T-6} = 13.94 g – 12.60 g

- Dif_{T-6} = 1.34 g

- Iteración 2, PNS_{T-6} Qp:

  - PNS_{T-6} = PBS - TARA
  - PNS_{T-6} = 12.60 g – 7.09 g
  - PNS_{T-6} = 5.51 g

- Iteración 3, $humedad_{t-6}$ Qp:

  - $Humedad_{T-6}$ = (Dif / PNS) * 100
  - $Humedad_{T-6}$ = (1.34 g / 5.51 g) * 100
  - $Humedad_{T-6}$ = 24.32 %

- Iteración 4, humedad promedio Qp:

  - $Humedad_{prom}$ = (H_{T-6} + H_{T-7} +H_{T-8}) / 3
  - $Humedad_{prom}$ = (24.32 % + 24.41 % + 24.38 %) / 3
  - $Humedad_{prom}$ = 24.37 %

El límite plástico de la geología Qp se identifica con el valor promedio de la humedad, es decir, 24.4 %.

3.2.2.2.3. Índice de plasticidad

Das (2011) determina que “el valor del índice de plasticidad del suelo resulta de la diferencia entre el límite líquido (LL) y límite plástico (LP)” (p. 18).

Tabla 30.

Índice plasticidad, Qp

Plasticidad Qp	
LL (%)	40.00
LP (%)	24.37
IP (%)	15.63

Nota. Índice de plasticidad, geología Qp. Elaboración propia, realizado en Microsoft Word versión 2010.

Por tanto, el valor de la plasticidad que caracteriza a la geología Qp corresponde a 15.6 %.

3.2.2.3. Gravedad específica

En este ensayo se obtienen datos de los diferentes pesos de la muestra de suelo Qp.

Tabla 31.

Gravedad específica, Qp

Densidad de fino Qp		
Pesos	**Lectura 1**	**Lectura 2**
Matraz seco y vacío (g)	171.00	171.00
Matraz + agua (g)	668.20	668.20
Matraz + material (g)	507.20	510.80
Matraz + material + agua (g)	864.20	868.20
Peso material seco (g)	310.30	319.90

Continuación de la tabla 31.

Densidad de fino Qp		
Pesos	**Lectura 1**	**Lectura 2**
Gs	2.71	2.67
Gs promedio	2.69	

Nota. Densidad específica, geología Qp. Elaboración propia, realizado en Word.

La ecuación de gravedad específica con sus respectivas nomenclaturas se presenta a continuación:

$$G_s = \frac{Ws}{Wmw + Ws - Wmsw} \quad \text{(Ecuación 4)}$$

Donde:

G_s = gravedad específica
W_s = peso del material seco
W_{mw} = peso del matraz + agua
W_{msw} = peso del matraz + material + agua

Aplicando las iteraciones correspondientes queda como sigue:

- Iteración 1, densidad Qp:

$$G_{s1} = \frac{Ws}{Wmw + Ws - Wmsw}$$

$$G_{s1} = \frac{310.30}{668.20 + 310.30 - 864.20}$$

$$G_{s1} = 2.71$$

- Iteración 2, densidad Qp:

$$G_{s2} = \frac{Ws}{Wmw + Ws - Wmsw}$$

$$G_{s2} = \frac{319.90}{668.20 + 319.90 - 868.20}$$

$$G_{s2} = 2.67$$

Seguido, se calcula el promedio de las dos lecturas y se obtiene que la gravedad específica de la geología Qp corresponde a 2.690.

3.2.2.4. Consolidación

Una vez finalizado el ensayo del suelo Qp se tabulan los datos generales obtenidos.

Tabla 32.

Datos para consolidación, Qp

Datos generales consolidación Qp	
Diámetro (Plg)	2.50
Área (Plg^2)	4.91
h_o (cm)	2.54
PNH_o (g)	57.01
G_S	2.69

Continuación de la tabla 32.

Datos generales consolidación Qp	
PBH_o (g)	98.52
PBS_o (g)	82.19
$Tara_o$ (g)	41.51
PBH_f (g)	112.21
PBS_f (g)	91.82
$Tara_f$ (g)	41.38

Nota. Datos generales para consolidación, geología Qp. Elaboración propia, realizado en Word.

Obtenidos los datos generales, se ejecutan cálculos indicados en las iteraciones siguientes:

- Iteración 1, Dif_o Qp:
    - $Dif_o = PBH_o – PBS_o$
    - $Dif_o = 98.52\ g – 82.19\ g$
    - $Dif_o = 16.33\ g$

- Iteración 2, PNH_o Qp:
    - $PNH_o = PBH_o – Tara_o$
    - $PNH_o = 98.52\ g – 41.51\ g$
    - $PNH_o = 57.01\ g$

- Iteración 3, Dif_f Qp:
    - $Dif_f = PBH_f – PBS_f$
    - $Dif_f = 112.21\ g – 91.82\ g$

- Dif_f = 20.39 g

- Iteración 4, PNH_f Qp:

  - $PNH_f = PBH_f – Tara_f$
  - PNH_f = 112.21 g – 41.38 g
  - PNH_f = 70.83 g

- Iteración 5, PNS_f Qp:

  - $PNS_f = PBS_f – Tara_f$
  - PNS_f = 91.82 g – 41.38 g
  - PNS_f = 50.44 g

- Iteración 6, PNS_o Qp:

  - $PNS_o = PBS_o – Tara_o$
  - PNS_o = 82.19 g – 41.51 g
  - PNS_o = 40.68 g

- Iteración 7, $humedad_o$ Qp:

  - $Humedad_o = (Dif_o / PNS_o) * 100$
  - $Humedad_o$ = (16.33 g / 40.68 g) * 100
  - $Humedad_o$ = 40.14 %

- Iteración 8, $humedad_f$ Qp:

  - $Humedad_f = (Dif_f / PNS_f) * 100$

- $Humedad_f$ = (20.39 g / 50.44 g) * 100
- $Humedad_f$ = 40.42 %

- Iteración 9, humedad promedio Qp:

  - $Humedad_{prom} = (H_o + H_f) / 2$
  - $Humedad_{prom}$ = (40.14 % + 40.42 %) / 2
  - $Humedad_{prom}$ = 40.28 %

- Iteración 10, volumen Qp:

  - Vol = área (plg^2) * 2.54^2 (cm^2) * h_o (cm)
  - Vol = 4.91 plg^2 * $(2.54\ cm)^2$ * 2.54 cm
  - Vol = 80.44 cm^3

Para determinar el valor de las densidades específicas se utilizan las ecuaciones 5 y 6.

$$\gamma = \frac{PNH\ inicial\ (g)}{Vol\ (cm3)} \qquad \text{(Ecuación 5)}$$

$$\gamma_{dQp} = \frac{\gamma}{(100 + \%Hprom)} * 100 \qquad \text{(Ecuación 6)}$$

Donde:

γ = densidad específica húmeda (g/cm^3)
P = peso neto húmedo inicial (g)
Vol = volumen (cm^3)
γ_{dQp} = densidad específica seca (g/cm^3)

$\%H_{prom}$ = humedad promedio

Aplicando las iteraciones correspondientes queda como sigue:

- Iteración 1, densidad específica húmeda Qp:

$$\gamma_{Qp} = \frac{111.28\ g}{80.44\ cm3} = 1.383\ g/cm^3$$

- Iteración 2, densidad específica seca Qp:

$$\gamma_{dQp} = \frac{1.383\ g/cm3}{(100 + 40.28)} * 100 = 0.986\ g/cm^3$$

Ante ello, se calcula el valor de la altura a través de la ecuación 7, como sigue:

$$h_{sQp} = \frac{\gamma_{dQp} * h\ inicial}{\gamma * Gs} \qquad \text{(Ecuación 7)}$$

- Iteración 1, altura Qp:

$$h_{sQp} = \frac{0.986\ \frac{g}{cm3} * 2.54\ cm}{1.383\ \frac{g}{cm3} * 2.69} = 0.673\ cm$$

Por tanto, se procede a tabular los valores calculados.

Tabla 33.

Valores calculados consolidación, Qp

Valores calculados Qp			
PBH_o (g)	98.52	**PBH_f (g)**	112.21
PBS_o (g)	82.19	**PBS_f (g)**	91.82
$Tara_o$ (g)	41.51	**$Tara_f$ (g)**	41.38
DIF_o	16.33	**DIF_f**	20.39
PNH_o	57.01	**PNH_f**	70.83
PNS_o	40.68	**PNS_f**	50.44
% H_o	40.14	**% H_f**	40.42
% H_{prom}		40.28	
Vol (cm^3)		80.44	
γ (g/cm^3)		1.383	
$γ_d$ (g/cm^3)		0.986	
h_s (cm)		0.673	

Nota. Valores calculados para consolidación, geología Qp. Elaboración propia, realizado en Word.

Seguido, se tabulan las presiones, deformaciones, espesores, relación de vacíos y con ello se elabora curva de compresibilidad.

Tabla 34.

Parámetros curva de compresibilidad, Qp

Presión (kg/cm^2)	Lectura	Deformación (dh)	Espesor (h)	e	Deform (%)
0.100	6.38	0.0638	25.336	2.76	0.25
0.302	43.94	0.4394	24.961	2.71	1.73
0.703	100.56	1.0056	24.394	2.62	3.96
1.505	169.39	1.6939	23.706	2.52	6.67
3.108	249.11	2.4911	22.909	2.40	9.81

Continuación de la tabla 34.

Presión (kg/cm^2)	Lectura	Deformación (dh)	Espesor (h)	e	Deform (%)
1.505	265.70	2.6570	22.743	2.38	10.46
0.703	260.80	2.6080	22.792	2.39	10.27
0.302	251.80	2.5180	22.882	2.40	9.91
0.100	243.90	2.4390	22.961	2.41	9.60
0.302	242.90	2.4290	22.971	2.41	9.56
0.703	248.50	2.4850	22.915	2.40	9.78
1.505	253.61	2.5361	22.864	2.40	9.98
3.108	268.68	2.6868	22.713	2.37	10.58
6.316	328.06	3.2806	22.119	2.29	12.92
12.732	431.72	4.3172	21.083	2.13	17.00
25.563	541.60	5.4160	19.984	1.97	21.32
12.732	513.00	5.1300	20.270	2.01	20.20
6.316	478.00	4.7800	20.620	2.06	18.82
3.108	458.00	4.5800	20.820	2.09	18.03
1.505	440.20	4.4020	20.998	2.12	17.33
0.703	421.20	4.2120	21.188	2.15	16.58
0.302	404.00	4.0400	21.360	2.17	15.91
0.100	388.80	3.8880	21.512	2.20	15.31

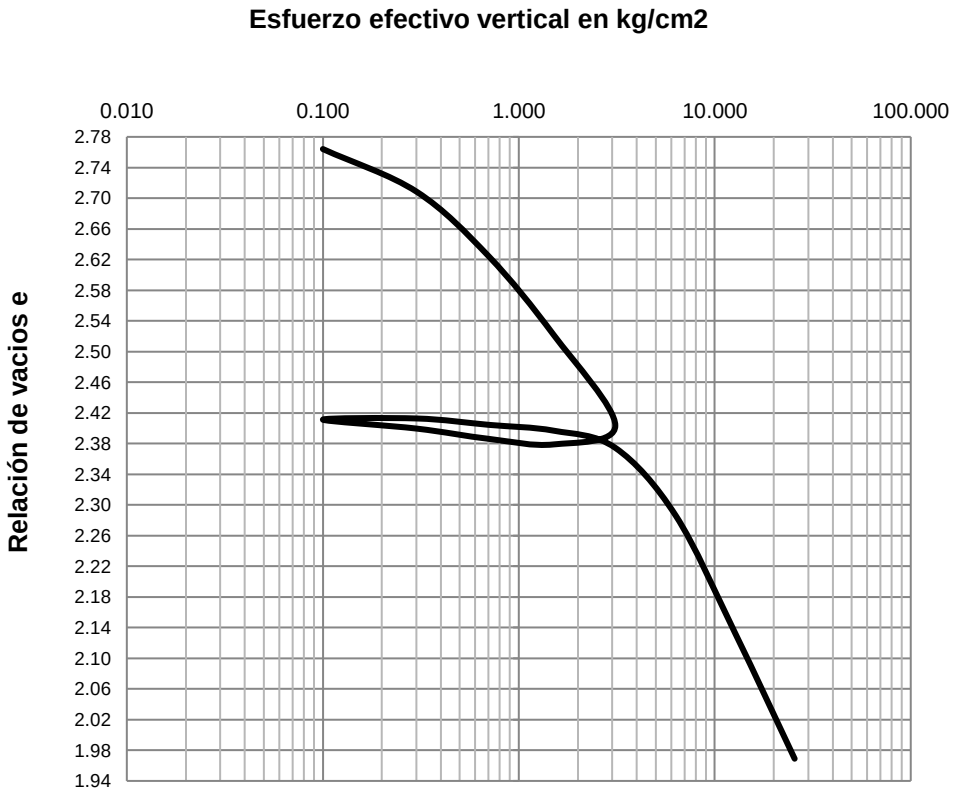
Nota. Valores calculados para curva de compresibilidad, geología Qp. Elaboración propia, realizado en Word.

Debido a los cálculos extensos y repetitivos, se indican las operaciones aritméticas utilizadas para la determinación de cada parámetro.

- Presión$_n$ (kg/cm^2) = ((carga$_n$ *11.2) / (1000)) / área (cm^2)
- Lectura$_n$ = es un valor adimensional tomado directo del ensayo
- Deformación$_n$ (dh) = lectura$_n$ * 0.01
- Espesor$_n$ (h) = (h_o * 10) – deformación$_n$
- e_n = ((espesor$_n$) / (h_s * 10)) – 1
- Deformación$_n$ (%) = (lectura$_n$ / (h_o * 10))

Figura 32.

Curva de compresibilidad, Qp



Nota. Curva de compresibilidad según parámetros calculados, geología Qp. Elaboración propia, realizado en Excel.

En consecuencia, se procede al cálculo del índice de compresión Cc = 0.481, del índice de expansión Cs = 0.0346 y del coeficiente de consolidación Cv. Los coeficientes de Cv están definidos a través del método de Taylor.

Tabla 35.

Coeficientes consolidación, Qp

Coeficientes consolidación Qp		
CV (m2/S)	**0.027 (kg/cm^2)**	1.26643E-06
	0.081 (kg/cm^2)	5.69892E-07
	0.188 (kg/cm^2)	2.74647E-07
	0.403 (kg/cm^2)	3.25652E-07
	0.833 (kg/cm^2)	3.25652E-07
	1.692 (kg/cm^2)	5.99886E-07
	3.410 (kg/cm^2)	1.98223E-07
	6.847 (kg/cm^2)	1.49475E-09

Nota. Coeficientes de consolidación, geología Qp. Elaboración propia, realizado en Word.

El esfuerzo resultante del ensayo de consolidación Qp corresponde a σ'p (kg/cm^2) = 0.80.

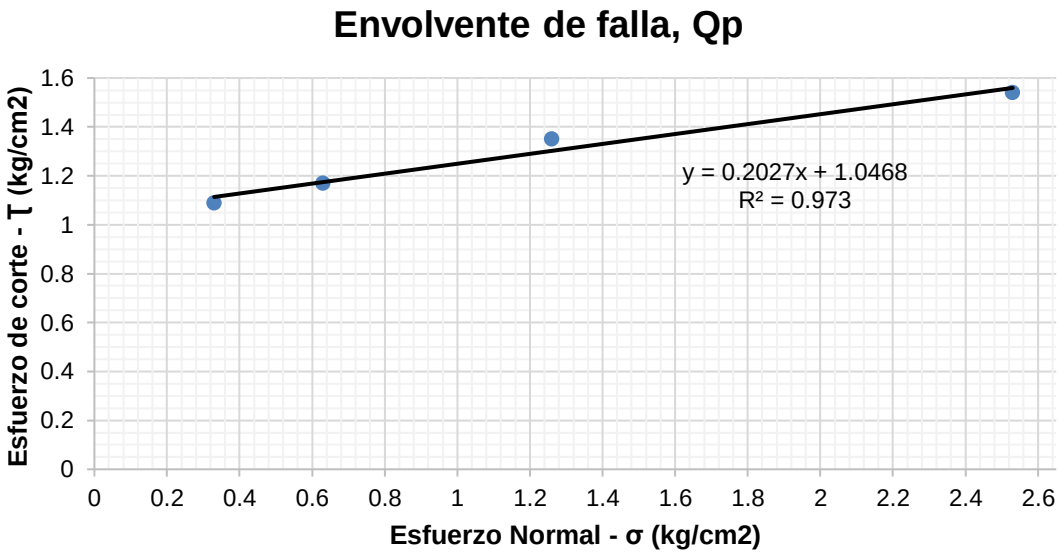
3.2.2.5. Corte directo

El tipo de ensayo realizado al suelo Qp corresponde al no consolidado, No Drenado con probeta remoldeada.

Hernández (2008) menciona que “la envolvente de falla se obtiene a través de los círculos de Mohr, que representa gráficamente los esfuerzos desviadores para cada presión de confinamiento” (p.226). De ello se determina la cohesión y el ángulo de fricción interna.

Figura 33.

Envolvente de falla, Qp



Nota. Determinación de cohesión y ángulo de fricción interna, geología Qp. Elaboración propia, realizado en Excel.

Gráficamente se determina que la cohesión para Qp es de 1.066 kg/cm^2 y se multiplica por 9.84 que equivale a Ton/m^2, por tanto, C= 10.49 Ton/m^2.

Para determinar el ángulo de fricción interna Qp se utiliza trigonometría, siendo de ayuda la ecuación 6.

$$\emptyset = tan^{-1}\frac{Y}{X} \qquad \text{(Ecuación 6)}$$

Donde:

∅ = Ángulo de fricción interna (°)

Y = Diferencia entre esfuerzos de corte (kg/cm^2)

X = Diferencia entre esfuerzos normales (kg/cm^2)

$$\emptyset = tan^{-1}\frac{0.460}{2.280}$$

$$\emptyset = tan^{-1}(0.2017)$$

$$\emptyset = 11.40\ °$$

Tabla 36.

Parámetros corte directo, Qp

Corte directo, Qp				
Probeta	**1**	**2**	**3**	**4**
Esfuerzo Normal (kg/cm^2)	0.33	0.63	1.26	2.53
Esfuerzo de Corte (kg/cm^2)	1.09	1.17	1.35	1.54
Densidad Seca (T/m^3)	0.99	0.99	0.99	0.99
Densidad Húmeda (T/m^3)	1.38	1.38	1.38	1.38
Humedad (%H)	38.38	38.38	38.38	38.38

Nota. Parámetros de corte directo, geología Qp. Elaboración propia, realizado en Word.

4. PRESENTACIÓN E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

Se presentan las muestras M_1 y M_2 de suelo arcilloso indicando lo observado en los ensayos a los que fueron sometidas.

4.1. Presentación de resultados

Se exhiben resultados de ensayos químico-mineralógicos y físico – mecánicos realizados a la muestra M_1, unidad Tv.

Tabla 37.

Resultados ensayos de laboratorios, Tv

Resultados geología Tv		
Identificación Tv	**Nombre de la muestra**	Muestra M1, unidad Tv
	Ubicación geográfica	N 14°36´31.8744” W 90°27´40.8492”
Ensayos químicos	**Grado de acidez**	7.32, suelo neutro
	Mayor presencia de fase mineral	Moscovita, grupo de silicatos
	Concentración de la fase mineral	55.50 %
	Mayor presencia de óxido	Óxido de silicio, SiO_2
	Concentración del óxido	40.96 %
	Reactividad	Potencialmente reactivo
Ensayos físico - mecánicos	**Descripción del material**	Arcilla de alta compresibilidad
	Clasificación granulométrica	CH, A-7-6
	Gravas	0.9 %
	Finos	76.3 %

Continuación de la tabla 37.

Resultados geología Tv		
	Arenas	22.8 %
	Límite líquido	50.4 %
	Límite plástico	27.1 %
	Índice de plasticidad	23.3 %
	Gravedad específica	2.55
	Coeficiente de expansión	0.0677
	Coeficiente de compresión	0.2923
	σ'p	0.73 kg/cm^2
	Cohesión	5.77 Ton/m^2
	Ángulo de fricción interna	15.49 °

Nota. Resultados de ensayos de laboratorio, geología Tv. Elaboración propia, realizado en Word.

Seguido, se indican resultados de ensayos químico-mineralógicos y físico – mecánicos realizados a la muestra M_2, unidad Qp.

Tabla 38.

Resultados ensayos de laboratorios, Qp

Resultados geología Qp		
Identificación Qp	**Nombre de la muestra**	Muestra M2, unidad Qp
	Ubicación geográfica	N 14°38´00.8556” W 90°27´43.8192”
Ensayos químicos	**Grado de acidez**	7.02, suelo neutro
	Mayor presencia de fase mineral	Anortoclasa, grupo de feldespatos
	Concentración de la fase mineral	50.00 %
	Mayor presencia de óxido	Óxido de silicio, SiO_2
	Concentración del óxido	45.94 %
	Reactividad	Potencialmente reactivo

Continuación de la tabla 38.

Resultados geología Qp		
Ensayos físico - mecánicos	**Descripción del material**	Arcilla de baja compresibilidad
	Clasificación granulométrica	CL, A-6
	Gravas	0.0 %
	Finos	67.6 %
	Arenas	32.4 %
	Límite líquido	40.0 %
	Límite plástico	24.4 %
	Índice de plasticidad	15.6 %
	Gravedad específica	2.69
	Coeficiente de expansión	0.0346
	Coeficiente de compresión	0.481
	σ'p	0.80 kg/cm^2
	Cohesión	10.63 Ton/m^2
	Ángulo de fricción interna	11.40 °

Nota. Resultados de ensayos de laboratorio, geología Qp. Elaboración propia, realizado en Word.

4.2. Interpretación de resultados

Una vez identificados los resultados de las pruebas realizadas a cada muestra de suelo, estos se interpretan en enfoques geotécnicos.

4.2.1. Interpretación de resultados Tv

La muestra M_1 se localiza dentro de la lotificación Hacienda Real de la zona 16 capitalina, con enfoque en construcción de vivienda unifamiliar. Su formación geológica corresponde a la unidad Tv y de período Terciario.

De la interpretación química y siguiendo el orden de los ensayos realizados se determina que el suelo Tv se clasifica como neutro debido a su pH; a través de la difracción de rayos x y de la composición química se identifica la Moscovita (especie más común de las micas) con mayor concentración, se clasifica por los minerales formadores de roca en el grupo III y según su origen en el grupo de las Illitas. La fluorescencia de rayos x indica que el óxido de Silicio existe en mayor concentración respecto a los óxidos generales. La espectrometría de fluorescencia de rayos x indica que es altamente reactivo.

De los ensayos físico-mecánicos se describe a una arcilla con arena color café claro; debido a la formación mineralógica de Illitas la partícula en contacto con el agua tiene un aumento en el tiempo inicial y según transcurra éste se mantiene estable lo que puede generar poca consolidación. La granulometría identifica a una arcilla alta, es decir, con alta compresibilidad de clasificación CH, con índice de plasticidad de 23.3 % y coeficiente de compresión 0.29.

Por lo anterior, el enfoque desde el punto de vista geotécnico implica que la muestra de suelo Tv puede generar asentamientos considerables en el estrato de arcilla, debido a su capacidad de absorción y por tanto el aumento de su volumen.

4.2.2. Interpretación de resultados Qp

La muestra M_2 se localiza dentro de la colonia Montesano y lotificación Senderos Apartamentos zona 16 capitalina, con enfoque en construcción de vivienda multifamiliar. Su formación geológica corresponde a la unidad Qp y de período cuaternario.

De la interpretación química y siguiendo el orden de los ensayos realizados se determina que el suelo Qp se clasifica como neutro debido a su pH; a través de la difracción de rayos x y de la composición química se identifica la anortoclasa con mayor concentración, se clasifica por los minerales formadores de roca en el grupo I y según su origen en el grupo de caolinita. La fluorescencia de rayos x indica que el óxido de silicio existe en mayor concentración respecto a los óxidos generales. La espectrometría de fluorescencia de rayos x indica que es altamente reactivo.

De los ensayos físico-mecánicos se describe a una arcilla con arena color café; debido a la formación mineralógica de caolinitas la partícula en contacto con el agua tiene un comportamiento similar al de las Illitas, es decir, mínimo aumento en el tiempo inicial y según transcurra éste se mantiene estable lo que puede generar consolidación en menor grado. La granulometría identifica a una arcilla baja, es decir, con baja compresibilidad de clasificación CL, con índice de plasticidad de 15.6 % y aumenta en el coeficiente de compresión 0.48.

El enfoque geotécnico implica que la muestra de suelo Qp puede generar problemas en la estabilización del estrato debido a su baja compresibilidad.

4.3. Comparación de resultados

Basado en la interpretación obtenida, se tiene mayor claridad de lo que representa cada muestra de suelo y su comportamiento.

Tabla 39.

Comparación resultados químico-mineralógicos

Comparación de resultados químico - mineralógicos		
Identificación de la muestra	**M1**	**M2**
Formación geológica	Unidad Tv	Unidad Qp
Período geológico	Terciario	Cuaternario
Fase mineral	Moscovita	Anortoclasa
Por mineral formador de roca	Grupo III	Grupo I
Por su formación mineralógica	Illita	Caolinita
Por su grado de acidez	7.32 neutro	7.02 neutro
Por su reactividad	Potencialmente reactivo	Potencialmente reactivo
Por fluorescencia de rayos X		
Óxido de aluminio, Al_2O_3	23.2516 %	23.9537 %
Óxido de calcio, CaO	1.6214 %	2.1487 %
Óxido de cromo, Cr_2O_3	0.0243 %	0.0334 %
Óxido de hierro, Fe_2O_3	8.0193 %	8.7387 %
Óxido de potasio, K_2O	0.4499 %	0.6530 %
Óxido de magnesio, MgO	0.3879 %	0.4758 %
Óxido de manganeso, MnO	0.1959 %	0.2169 %
Óxido de sodio, Na_2O	0.9630 %	2.1471 %
Óxido de fósforo, P_2O_5	0.0308 %	0.0000 %
Óxido de azufre, SO_3	0.0061 %	0.0171 %
Óxido de silicio, SiO_2	40.9648 %	45.9402 %
Óxido de titanio, TiO_2	0.8714 %	1.0760 %

Nota. Comparación de resultados químico - mineralógicos, geológicos Tv y Qp. Elaboración propia, realizado en Word.

Tabla 40.

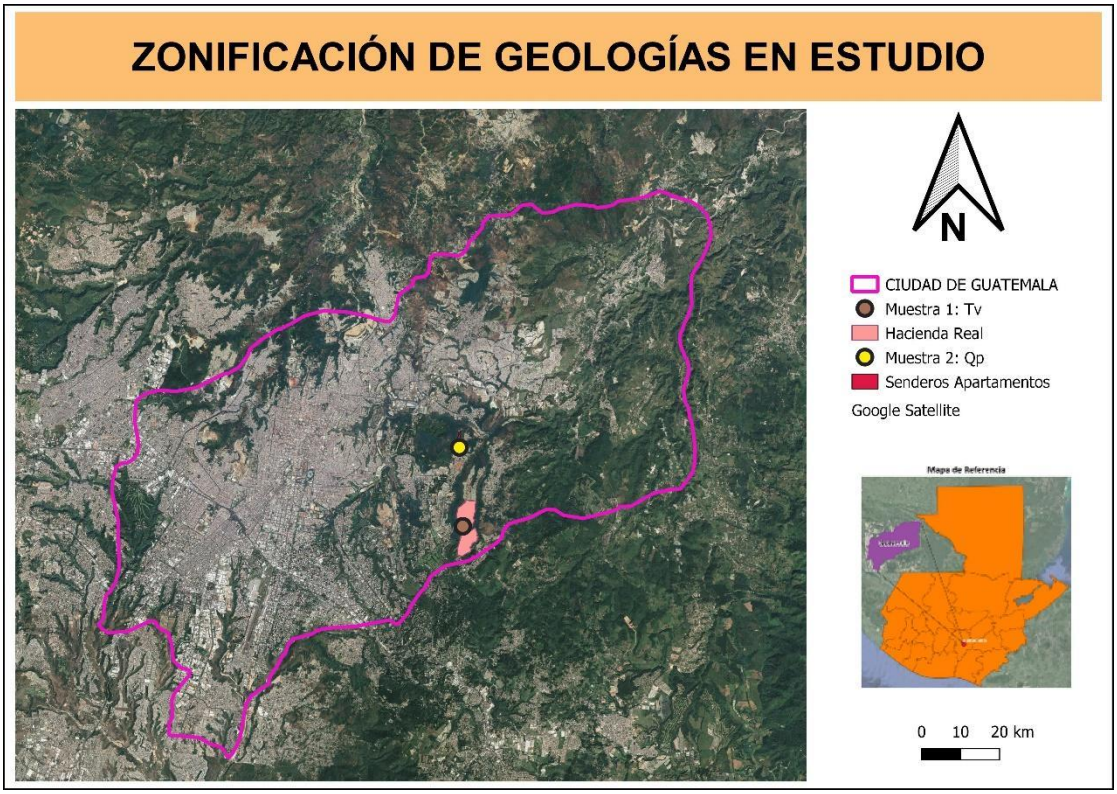
Comparación resultados físico-mecánicos

Comparación de resultados físico - mecánicos		
Identificación de la muestra	**M1**	**M2**
Peso de la muestra (g):	1,340.90	1,295.50
Clasificación SUCS	CH	CL
Clasificación AASHTO	A-7-6	A-6
Grava (%):	0.9	0
Arena (%):	22.8	32.4
Pasa tamiz 200 (%):	76.3	67.6
Límite líquido (%):	50.4	40
Límite plástico (%):	27.1	24.4
Índice de plasticidad (%):	23.3	15.6
Gravedad específica (Gs):	2.55	2.69
Coeficiente de compresión (Cc):	0.29	0.48
Coeficiente de expansión (Cs):	0.067	0.034
σ'p (kg/cm^2):	0.73	0.80
Cohesión (Ton/m^2):	5.77	10.49
Ángulo de fricción interna (°):	15.49	11.40

Nota. Comparación de resultados físico - mecánicos, geologías Tv y Qp. Elaboración propia, realizado en Word.

Figura 34.

Zonificación de geologías en estudio



Nota. Regiones establecidas según geologías Tv y Qp. Elaboración propia, realizado en la QGIS.

- **Tv**: Hacienda Real, se considera de acidez neutra, de origen Illitas y altamente reactivo. Debido a su clasificación granulométrica CH de alta compresibilidad puede generar asentamientos considerables en el estrato arcilloso lo cual se mejora con el control del contenido de humedad, mezcla de algunos aditivos, entre otros.

- Qp: Senderos Apartamentos, se considera suelo de acidez neutra, de origen Caolinita y altamente reactivo. Debido a su clasificación granulométrica CL se identifica baja compresibilidad y esto puede generar

problemas de estabilización lo cual se tiende a mejorar a través del control de la humedad, incorporación de aditivos, entre otros.

4.4. Correlación de variables obtenidas

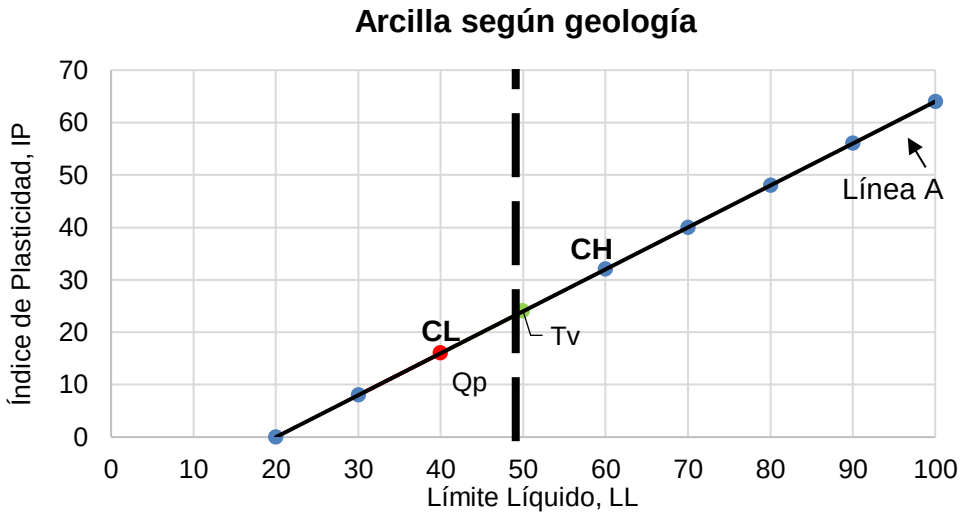
Las variables de la investigación son las arcillas, los minerales contenidos en ellas y por tanto sus formaciones geológicas. Ante ello se analizaron los siguientes parámetros:

4.4.1. Arcillas contenidas según geología

Las arcillas están conformadas por partículas de diferentes tamaños y por tanto varían según la clasificación a la que correspondan.

Figura 35.

Arcillas según geología



Nota. Arcillas contenidas en geologías Tv y Qp. Elaboración propia, realizado en Excel.

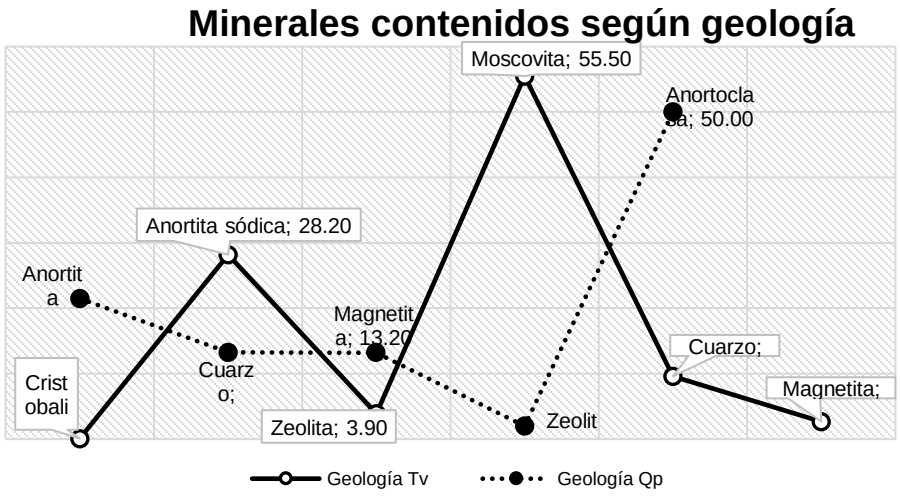
Debido a que el índice de plasticidad de la geología Tv se encuentra arriba de la línea A le corresponde clasificación CH; por lo que su contenido de gravas es de 0.9 %, arena en 22.8 % y en finos 76.3 %. En tanto, el índice de plasticidad de la geología Qp se encuentra sobre la línea A e indica clasificación CL; contiene en gravas 0 %, en arenas 32.4 % y en finos 67.6 %. Ante ello, se puede determinar que existe correlación de las arcillas en sus diferentes geologías.

4.4.2. Minerales contenidos según geología

Las geologías Tv y Qp varían en su contenido de minerales debido a sus fases y composiciones químicas.

Figura 36.

Minerales contenidos según geología



Nota. Minerales contenidos en geologías Tv y Qp. Elaboración propia, realizado en Excel.

Las geologías Tv y Qp a pesar de que corresponden a períodos geológicos y grupos formadores diferentes comparten cierta similitud en las fases minerales

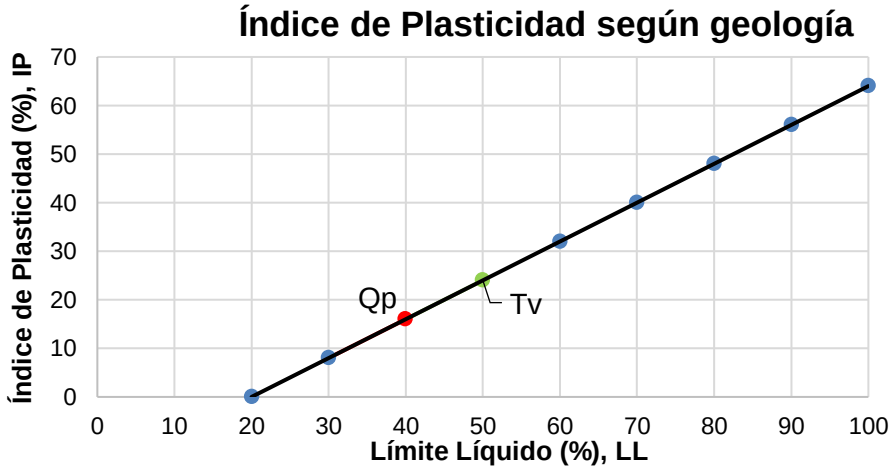
y en su composición química que las integran. Entre las fases minerales en común están: anortita sódica, zeolita, cuarzo y magnetita. Sin embargo, difieren en la presencia de cristobalita (Tv), moscovita (Tv) y anortoclasa (Qp).

4.4.3. Plasticidad según geología

Las geologías Tv y Qp se localizan dentro del bloque Chortí. Sin embargo, los valores de límite líquido (50.4 %, 40.0 %) en tanto, su índice de plasticidad (23.3 %, 15.6 %), respectivamente, son distintos y son considerados de plasticidad baja por encontrarse en rango de 0 a 30.

Figura 37.

Índice de plasticidad según geología



Nota. Plasticidad según geologías Tv y Qp. Elaboración propia, realizado en Excel.

A la geología Tv la caracteriza el grupo de Illitas y, por tanto, le corresponde clasificación CH; a la geología Qp la caracteriza el grupo de caolinitas, que la clasifica como CL. Entonces, de la gráfica de plasticidad se

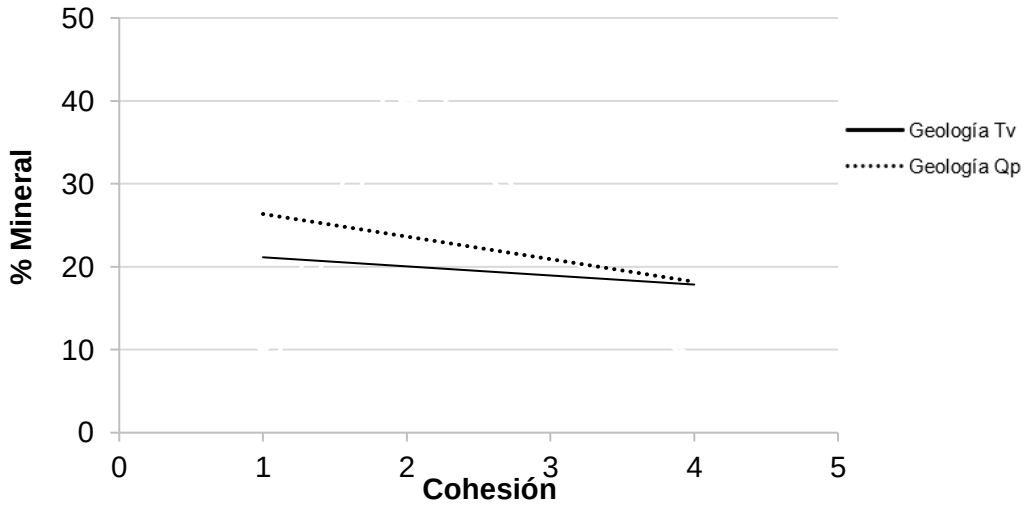
puede determinar que existe una correlación según la plasticidad y la geología de las arcillas en estudio.

4.4.4. Corte directo según fluorescencia rayos x

Los parámetros del ensayo corte directo permiten la identificación del ángulo de fricción interna y de su cohesión, tal es el caso que éstos se ven influenciados por la composición química de cada suelo. El comportamiento obtenido es similar en geologías Tv y Qp cuando los óxidos predominantes son de silicio y aluminio.

Figura 38.

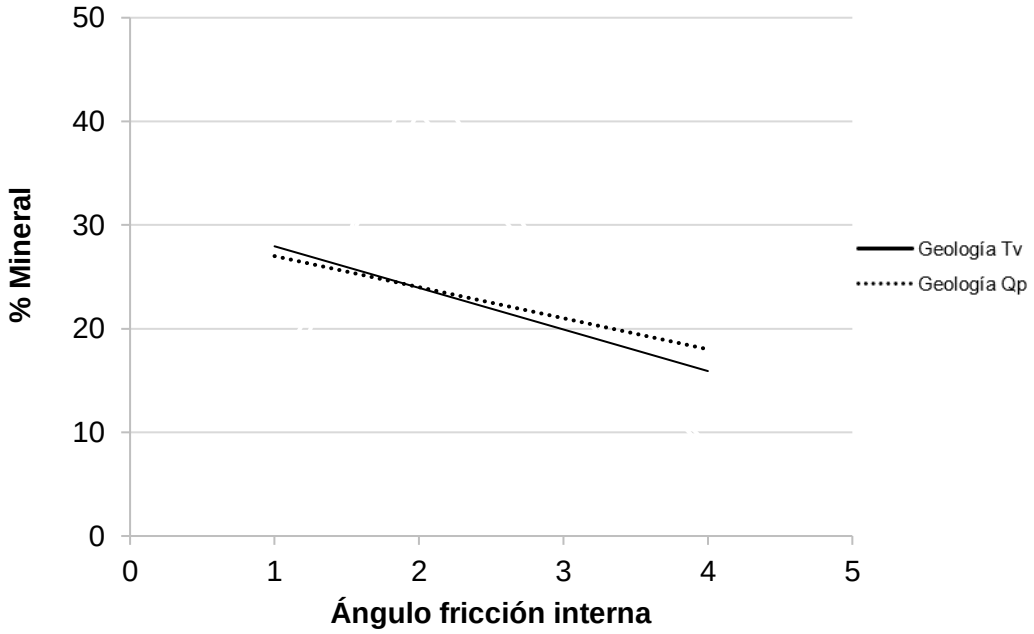
Cohesión según óxidos predominantes



Nota. Cohesión vs Minerales en geologías Tv y Qp. Elaboración propia, realizado en Excel.

Figura 39.

Ángulo de fricción según óxidos predominantes



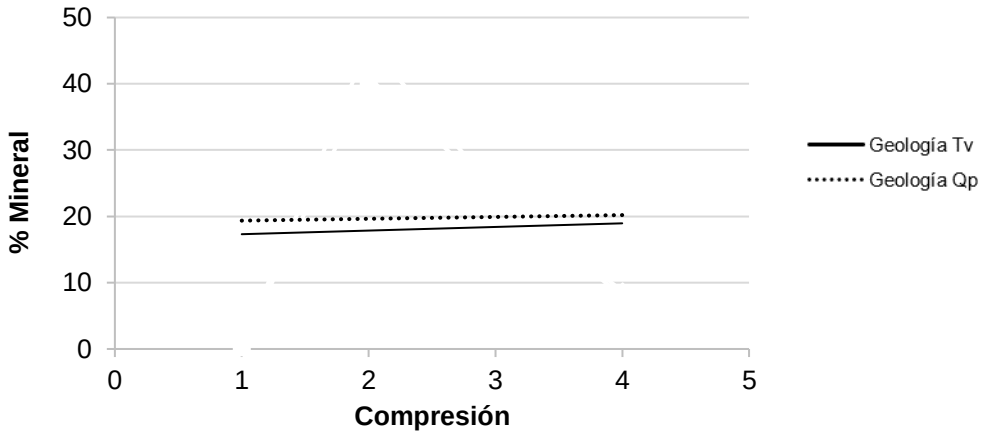
Nota. Ángulo de fricción interna vs Minerales en geologías Tv y Qp. Elaboración propia, realizado en Excel.

4.4.5. Consolidación según fluorescencia rayos x

El ensayo de consolidación permite la identificación del coeficiente de compresión y de expansión, tal es el caso que éstos se ven influenciados por la composición química de cada suelo. El comportamiento obtenido es similar en geologías Tv y Qp cuando los óxidos predominantes son de silicio y aluminio.

Figura 40.

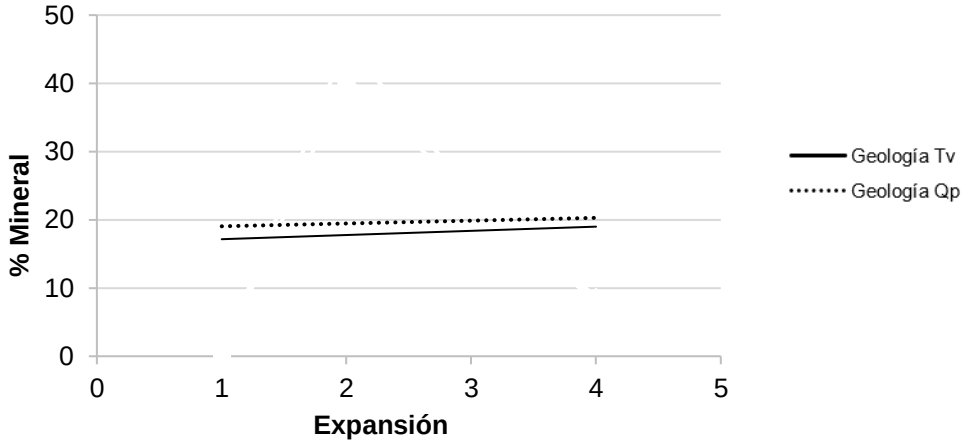
Compresión según óxidos predominantes



Nota. Coeficiente de compresión vs Minerales en geologías Tv y Qp. Elaboración propia, realizado en Excel.

Figura 41.

Expansión según óxidos predominantes



Nota. Coeficiente de compresión vs Minerales en geologías Tv y Qp. Elaboración propia, realizado en Excel.

El índice de compresión Cc, suele variar según el tipo de suelo, tal es el caso de arcillas normalmente consolidadas entre 0.20 y 0.50. Por tanto, el resultado obtenido refiere a Tv y a Qp como arcillas consolidadas. El índice de expansión Cs, de un suelo sobreconsolidado se determina a través de la pendiente de la curva de consolidación, en los dos casos corresponde a 0.0677 y 0.0346, respectivamente.

El valor del coeficiente de consolidación Cv, se basa en la granulometría con clasificación SUCS, es decir, que para CL y CH su rango varía entre 1.6 a 2.6 (cm^2/s) $x10^{-4}$ siendo el valor contenido en dicho rango.

4.5. Propuesta de mejoramiento de suelos arcillosos

Bauzá (2006) refiere una problemática en el empleo de los suelos finos como “los materiales arcillosos se distinguen por un comportamiento y unas características que los hacen objetivo especial de los procesos de mejora” (p. 9). Esto explica que la presencia de ese tipo de suelo es casi inevitable para proyectos de obra civil.

En este apartado se presentan los parámetros principales para el mejoramiento de las arcillas en general, sin embargo, se mencionan los tres principales.

4.5.1. Contenido de humedad

La estabilización de cualquier tipo de suelos pretende reducir los efectos de los daños causados debido a la ejecución de obras civiles, tomando en cuenta los estudios preliminares (permeabilidad, resistencia al cortante, consolidación) para dicha actividad.

Un proceso de mejoramiento físico es el control de las condiciones de humedad; teniendo como principio fundamental el valor constante del grado de saturación del suelo arcilloso y que no altere el estrato en estudio; esto se logra a través de obras de mitigación como captaciones de agua o impermeabilizaciones en muros de contención que impidan su ingreso, entre otros.

4.5.2. Retiro y/o cambio de suelo

Se debe analizar la situación del proyecto en ejecución, considerando que el factor económico influye en la toma de acciones necesarias para que las condiciones de la obra civil continúen. Otros factores que inciden son las variaciones climáticas, el uso de maquinaria, técnicas de excavación, pero sobre todo depende de las propiedades mecánicas y de las características físicas del suelo.

Esto hace referencia que en el lugar de la obra civil se pueden presentar imprevistos como material excedente, material mínimo o que no cumple con los requisitos mínimos del proyecto. Sin embargo, como solución adecuada debe analizarse lo más conveniente, si se retira el material existente o se reevalúa con la sustitución de otro tipo de suelo para alcanzar el mejoramiento arcilloso, o en caso extremo que se retire el material definitivamente.

4.5.3. Incorporación de aditivos

La incorporación de aditivos se considera como un proceso de mejoramiento químico debido al análisis meticuloso de los grados de acidez, de

las fases mineralógicas, de las composiciones químicas, de reactividad, entre otros.

En la actualidad, la estabilización de suelos se determina a partir del tipo de geología, con ello optar a la reducción de la erosión y a los efectos de cambios climáticos; y así lograr que el suelo se fortalezca. Es necesario el análisis de ensayos en laboratorio debido a sus propiedades mecánicas para que los materiales de incorporación (tratamiento geotécnico) sean los adecuados y genere una mejora en la estructura del suelo. Cabe mencionar que cualquier tipo de aditivo utilizado así será la incidencia en el presupuesto de la obra civil.

CONCLUSIONES

1. Las diferencias establecidas de las formaciones geológicas Tv y Qp en sus características físicas son: color y tamaño de la partícula considerándoseles como cualitativas; de las propiedades mineralógicas están: grado de acidez y fase mineral; y de las propiedades mecánicas: índice de plasticidad, gravedad de los finos, consolidación y su resistencia a corte. Todo esto indica que las propiedades mecánicas dependen del contenido de sus minerales en el suelo; además, del estado del macizo rocoso y del tiempo al que ha sido expuesto a la meteorización por lo que la estabilización es parte de una solución técnica y favorable.

2. Los minerales contenidos en las arcillas procedentes de las geologías de estudio se identifican según la composición química, es decir, en altos porcentajes con presencia de silicio y aluminio, siendo en menor concentración hierro, calcio, sodio, titanio, potasio, magnesio, manganeso, fósforo, cromo y azufre. Dichos minerales se consideran hidrofílicos por su superficie que reacciona al entrar en contacto con el agua y debido a la cantidad de humedad la consolidación se hace presente en el suelo, por lo que se puede determinar que la geología Tv tiene mayor grado de consolidación respecto a la geología Qp.

3. La región delimitada en el mapa de zonificaciones del estudio, para la geología Tv y localizada dentro de la lotificación Hacienda Real determina que corresponde a la fase mineral moscovita: ésta pertenece a los minerales comunes del grupo III, es decir, a los silicatos que a su vez se dividen en filosilicatos; rica en potasio, tiene de sistema cristalino al

monoclínico (plano de simetría vertical axial único), de color marrón, amarillo o verde con brillo perlado. En tanto la geología Qp localizada en lotificación Senderos Apartamentos se identifica con la fase mineral anortoclasa: pertenece a los minerales comunes del grupo I, es decir, a los feldespatos alcalinos, rica en sodio, su estructura cristalina varía entre monoclínica y triclínica (los ángulos formados entre sí son diferentes a 90°), de color transparente, blanco, crema, amarillo.

4. Los suelos arcillosos localizados en la zona de estudio se pueden diferenciar uno a otro según su contenido de impurezas, lo que implica su alteración química con la presencia del hierro y hace considerar a la arcilla como no pura, combinada de varios elementos y disminuye sus propiedades mecánicas; tal es el caso para Tv con 8.01 % de impurezas asimismo Qp con 8.73 % de impurezas. Estos parámetros son utilizados para la emisión de recomendaciones en el diseño de cimentaciones superficiales de las obras civiles para que cumplan con el tiempo de vida útil.

5. Los criterios geotécnicos para determinar la estabilización de los suelos arcillosos en cimentaciones superficiales de obras civiles pueden variar. Sin embargo, cuando hay presencia de material potencialmente reactivo (es el caso de esta investigación) se pueden emitir soluciones como: retiro y/o cambio de suelo, la incorporación de aditivos como elementos de estabilización, control en el contenido de humedad lo que permite se utilicen en campo para optimizar las condiciones de los suelos en proyectos de diversa índole.

RECOMENDACIONES

1. Caracterizar a las arcillas para la ejecución de obras civiles, partiendo de su formación geológica y formación mineral, a fin de identificar los parámetros críticos de sus propiedades mecánicas, de tal manera que permita la estabilización de los suelos arcillosos.

2. Validar la importancia del contenido de los minerales en las arcillas porque éstos influyen en la composición química de sus rocas ígneas y por tanto se hace notar la presencia del óxido de Silicio y sus efectos que conlleva.

3. Analizar las unidades geológicas en su entorno, es decir, la incidencia del clima, la topografía, la precipitación promedio, campos fisiográficos y geomorfológicos para que el análisis del tipo de arcilla sea integrado en diversos aspectos y se comprenda la información que las representa para la toma de decisiones técnicas en cuanto la estabilización.

4. Diseñar adecuadamente las cimentaciones superficiales para que la presencia de las impurezas en las zonas de estudio, principalmente al contenido de Hierro y otros minerales, sean analizados en cuanto a la formación mineralógica y por tanto las propiedades mecánicas que aporta el suelo arcilloso en enfoques geotécnicos.

5. Realizar en cualquier tipo de suelo los ensayos químicos-mineralógicos y físico-mecánicos mencionados en esta investigación, principalmente si el área de estudio se localiza en suelo arcilloso para la emisión de

recomendaciones en la planificación, diseño y ejecución de obras civiles enfocados en estabilización de suelos.

REFERENCIAS

Acevedo, L. (2016). *Caracterización física y geológica de la roca para cimentación del nuevo puente Los Esclavos, kilómetro 66-400 carretera CA-01 Oriente, municipio de Cuilapa, Departamento de Santa Rosa*. [Tesis de maestría, Universidad de San Carlos de Guatemala]. Archivo digital. http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08_0546_MT.pdf

Bauzá, J. (2006). *El tratamiento de suelos arcillosos mediante cal. Comportamiento mecánico y evolución a largo plazo ante cambios de humedad*. [Tesis de doctorado, Universidad de Sevilla]. Archivo digital. http://hdl.handle.net/11441/32957

Belart, C. (2008). *Biología y Geología.* Editex. https://www.todostuslibros.com/libros/biologia-y-geologia-4o-eso_978-84-9771-407-5

Bowles, J. (1981). *Manual de Laboratorio de Suelos en Ingeniería Civil.* McGraw-Hill. https://www.udocz.com/apuntes/23747/manual-de-laboratorio-de-suelos-joseph-bowles

Bravo, B., y Lopez, H. (2021). *Mejoramiento de las propiedades mecánicas de suelos arcillosos empleando valvas de molusco y vidrio en la ciudad de Talara, Piura*. [Tesis de pregrado, Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas]. Archivo digital. http://hdl.handle.net/10757/654603

Calvo, M. y Durán, D. (2013). *Determinación del índice de compresibilidad e índice de expansión de los suelos cohesivos blandos en la zona de Tonsupa en la Provincia de Esmeraldas.* [Tesis de grado, Pontífica Universidad Católica del Ecuador]. Archivo digital. http://repositorio.puce.edu.ec/handle/22000/11999

Cano, E. (2006). Biodiversidad de Guatemala. *Universidad del Valle de Guatemala, I*. 1-7.

Castro, A. (2015). *Petrografía de rocas ígneas y metamórficas*. Paraninfo. https://www.google.com.gt/books/edition/Petrograf%C3%ADa_de_Rocas_%C3%8Dgneas_y_Metam%C3%B3r/3P_rBgAAQBAJ?hl=es&gbpv=1&dq=inauthor:%22CASTRO+DORADO,+ANTONIO%22&printsec=frontcover

Chupina, A. (2006). *Estudio comparativo entre las técnicas más utilizadas para la caracterización de arcillas y su aplicación industrial en la fabricación de ladrillos*. [Tesis de pregrado, Universidad de San Carlos de Guatemala]. Archivo digital. http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08_0984_Q.pdf

Chupina, A. (2015). *Susceptibilidad a la licuefacción en la planicie costera del pacífico de Guatemala*. [Tesis de pregrado, Universidad de San Carlos de Guatemala]. Archivo digital. https://1library.co/document/yjenwl2q-susceptibilidad-licuefaccion-planicie-costera-pacifico-guatemala.html

Cementos Progreso (2023). *Informes de resultados*.

Compton, R. (1970). Geología de Campo. Agencia para el Desarrollo Internacional.

Das, B. (2011). *Fundamentos de ingeniería de cimentaciones*. Cengage Learning.

Das, B. (2015). *Fundamentos de ingeniería de cimentaciones*. Cengage Learning.

División política del departamento de Guatemala (2022). En Wikipedia. https://es.wikipedia.org/wiki/Departamento_de_Guatemala

Duque, G. (2002). *Mecánica de suelos*. Universidad Nacional de Colombia.

Duque, G. (2003). Manual de geología para ingenieros. *Universidad Nacional de Colombia, 1,* 1-27. http://www.bdigital.unal.edu.co/1572/

Escobar, C. (2002). *Origen formación y constitución del suelo, fisicoquímica de las arcillas*. Universidad Nacional de Colombia.

Gardi, C. (2014). *Atlas de suelos de América Latina y el Caribe.* Comisión Europea, Oficina de Publicaciones de la Unión Europea. https://scholar.google.com.gt/scholar_url?url=https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/bitstream/doc/1001699/1/ATLASLAC.pdf&hl=es&sa=X&ei=HgDoZODWCfqBy9YP0t2gwAI&scisig=AFWwaeaWhNP6rjXFKv-4yQtIkcbv&oi=scholarr

González L. (2002). *Ingeniería geológica.* Pearson Educación.

Hernández, J. (2008). *Características físicas y propiedades mecánicas de los suelos y sus métodos de medición*. [Tesis de pregrado, Universidad de San Carlos de Guatemala]. Repositorio institucional.

IDEA (2023). *Informes de resultados*.

Loor, A. (2018). *Mecánica de suelo, tomo I.* Editorial Área de Innovación y Desarrollo, S.L.

Orozco, W. (2014). Clasificación de rocas ígneas, sedimentarias y metamórficas en secciones delgadas a través programación estructurada. *Boletín de Ciencias de la Tierra,* (36), 5-9. https://revistas.unal.edu.co/index.php/rbct/article/view/44037/49367

Pérez, E. (2000). *Léxico estratigráfico del bloque Chortí en Guatemala. Cobán, Alta Verapaz*. [Tesis de pregrado, Universidad de Guatemala]. Archivo digital. https://es.scribd.com/document/419982929/Lexico-Del-Bloque-Chorti#

Pérez, E. y Toledo, N. (1987). *Estudio sobre las arcillas de Panimaquito, Purulha B.V. Cobán, Alta Verapaz*. [Tesis de pregrado, Universidad de Guatemala]. Archivo digital. https://catalogosiidca.csuca.org/Record/USAC.499701

Ramos, E. (2002). Caracterización de arcillas del Estado de Guanajuato y su potencial aplicación en cerámica. *Acta Universitaria, 12*(1), 1–9. https://www.redalyc.org/pdf/416/41612102.pdf

Tarbuck, E. & Lutgens, F. (2010). *Ciencias de la Tierra. Una introducción a la Geología Física*. Pearson Educación. https://www.academia.edu/37286413/TARBUCK_y_LUTGENS_Ciencias_de_la_Tierra_8va_ed

Tarbuck, E. (2005). *Ciencias de la Tierra.* Pearson Educación. http://www.xeologosdelmundu.org/wp-content/uploads/2016/03/TARBUCK-y-LUTGENS-Ciencias-de-la-Tierra-8va-ed.-1.pdf

APÉNDICES

Apéndice 1.

Lectura y toma de coordenadas

Nota. Identificación de ubicación de geología Qp. Elaboración propia.

Apéndice 2.

Identificación de las muestras de suelo

Nota. Identificación de ubicación de geología Qp. Elaboración propia.

Apéndice 3.

Realización de ensayo granulométrico

Nota. Granulometría a las muestras de suelo. Elaboración propia.

Apéndice 4.

Límites de consistencia

Nota. Realización del ensayo límites Atterberg. Elaboración propia.

Apéndice 5.

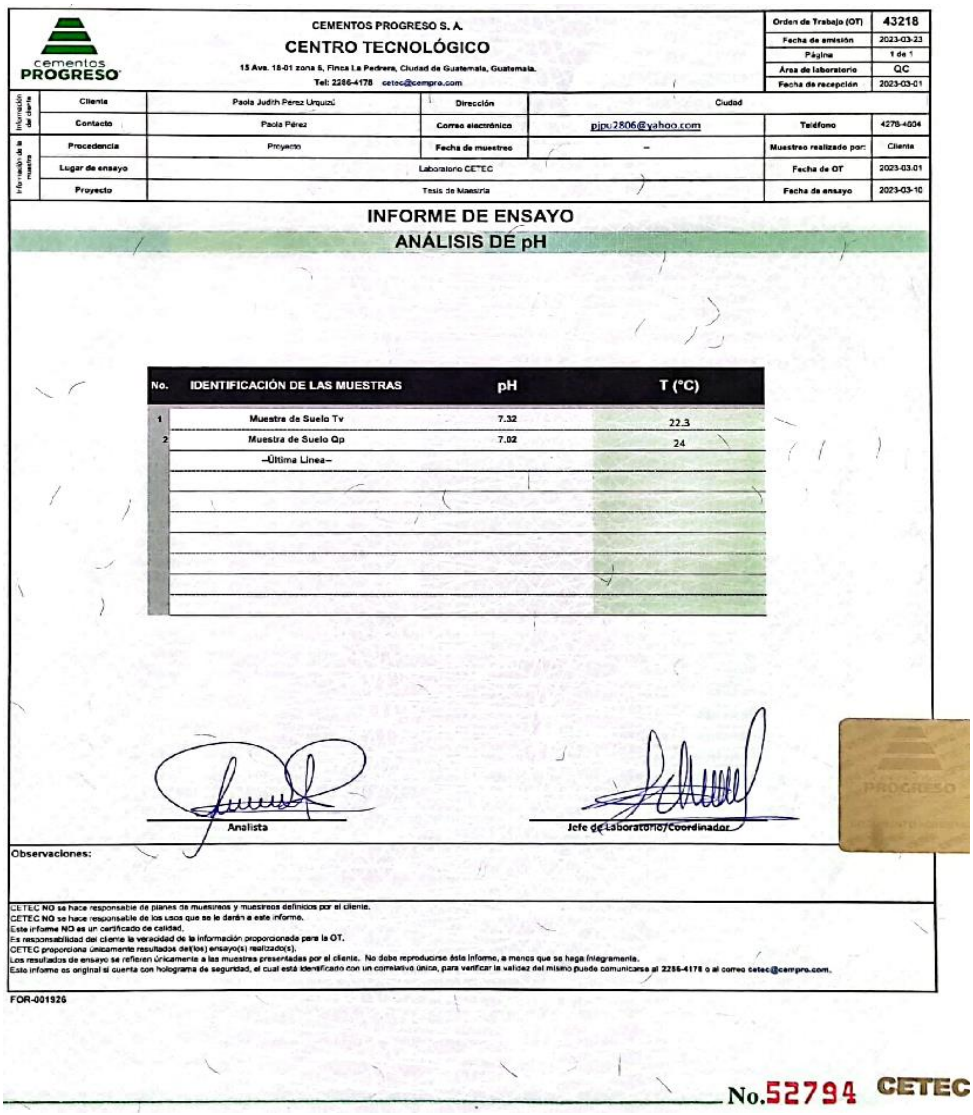
Densidad de finos

Nota. Realización ensayo gravedad específica de los finos. Elaboración propia.

ANEXOS

Anexo 1.

Análisis de pH



CEMENTOS PROGRESO S. A.
CENTRO TECNOLÓGICO
15 Ave. 18-01 zona 5, Finca La Pedrera, Ciudad de Guatemala, Guatemala.
Tel: 2286-4178 cetec@cempro.com

Orden de Trabajo (OT)	43218
Fecha de emisión	2023-03-23
Página	1 de 1
Área de laboratorio	QC
Fecha de recepción	2023-03-01

Información del cliente						
	Cliente	Paola Judith Perez Urquizú	Dirección	Ciudad		
	Contacto	Paola Pérez	Correo electrónico	pjpu2806@yahoo.com	Teléfono	4278-4004
Información de la muestra	Procedencia	Proyecto	Fecha de muestreo	–	Muestreo realizado por:	Cliente
	Lugar de ensayo	Laboratorio CETEC			Fecha de OT	2023-03-01
	Proyecto	Tesis de Maestría			Fecha de ensayo	2023-03-10

INFORME DE ENSAYO
ANÁLISIS DE pH

No.	IDENTIFICACIÓN DE LAS MUESTRAS	pH	T (°C)
1	Muestra de Suelo Tv	7.32	22.3
2	Muestra de Suelo Qp	7.02	24
	–Última Línea–		

Analista

Jefe de Laboratorio/Coordinador

Observaciones:

CETEC NO se hace responsable de planes de muestreo y muestreos definidos por el cliente.
CETEC NO se hace responsable de los usos que se le darán a este informe.
Este informe NO es un certificado de calidad.
Es responsabilidad del cliente la veracidad de la información proporcionada para la OT.
CETEC proporciona únicamente resultados de(los) ensayo(s) realizado(s).
Los resultados de ensayo se refieren únicamente a las muestras presentadas por el cliente. No debe reproducirse éste informe, a menos que se haga íntegramente.
Este informe es original si cuenta con holograma de seguridad, el cual está identificado con un correlativo única, para verificar la validez del mismo puede comunicarse al 2286-4178 o al correo cetec@cempro.com.

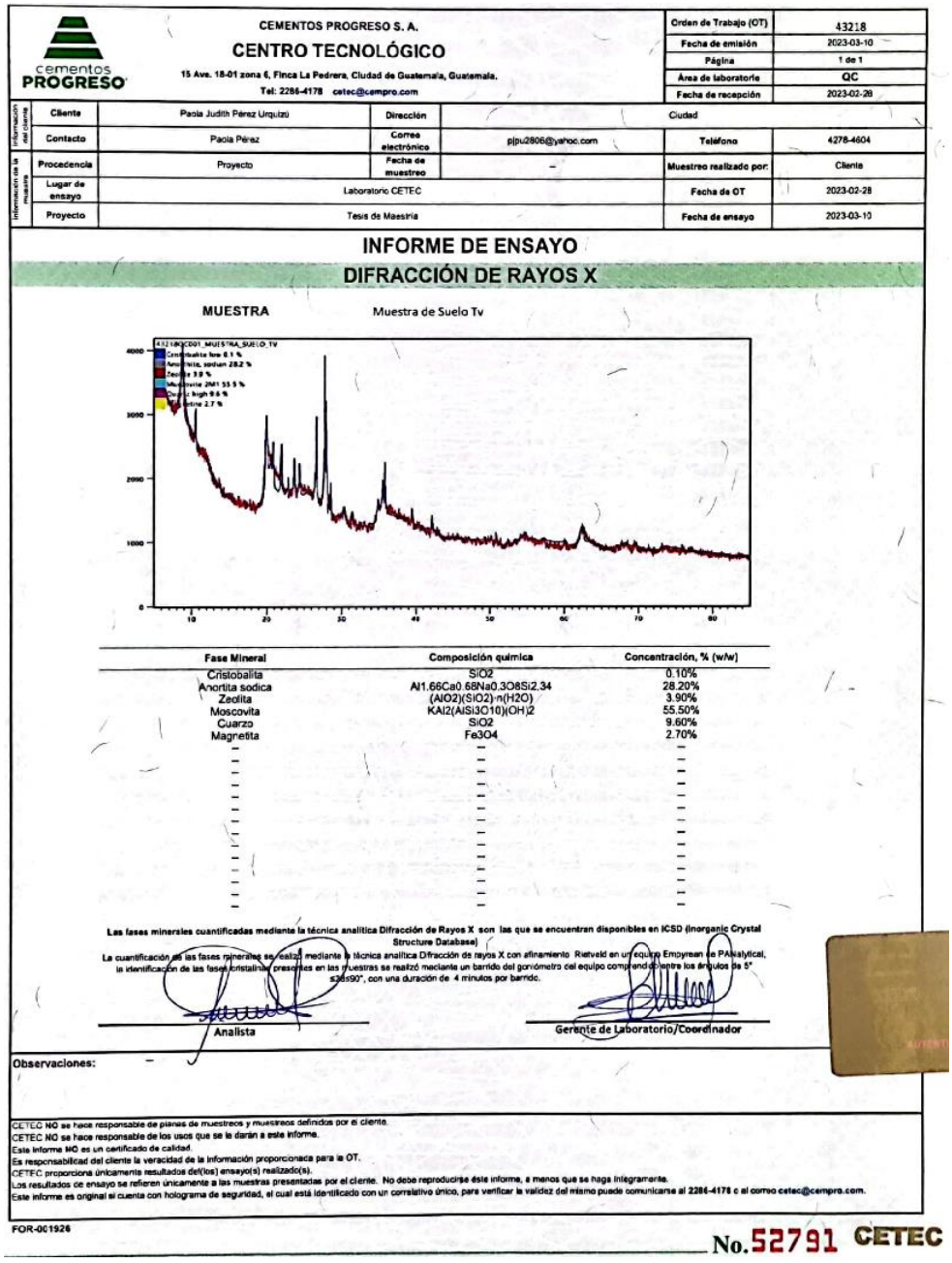
FOR-001926

No.52794 CETEC

Nota. Informe de resultados. Obtenido de Cementos Progreso (2023). *Informes de resultados*.

Anexo 2.

Difracción de rayos X



CEMENTOS PROGRESO S. A.

CENTRO TECNOLÓGICO

15 Ave. 18-01 zona 6, Finca La Pedrera, Ciudad de Guatemala, Guatemala.
Tel: 2286-4178 cetec@cempro.com

Orden de Trabajo (OT)	43218
Fecha de emisión	2023-03-10
Página	1 de 1
Área de laboratorio	QC
Fecha de recepción	2023-02-28

Información del Cliente						
	Cliente	Paola Judith Pérez Urquizú	Dirección	Ciudad		
	Contacto	Paola Pérez	Correo electrónico	pjpu2806@yahoo.com	Teléfono	4278-4604
Información de la muestra	Procedencia	Proyecto	Fecha de muestreo	–	Muestreo realizado por:	Cliente
	Lugar de ensayo	Laboratorio CETEC			Fecha de OT	2023-02-28
	Proyecto	Tesis de Maestría			Fecha de ensayo	2023-03-10

INFORME DE ENSAYO

DIFRACCIÓN DE RAYOS X

MUESTRA Muestra de Suelo Tv

Fase Mineral	Composición química	Concentración, % (w/w)
Cristobalita	SiO2	0.10%
Anortita sodica	Al1.66Ca0.68Na0.3O8Si2.34	28.20%
Zeolita	(AlO2)(SiO2)·n(H2O)	3.90%
Moscovita	KAl2(AlSi3O10)(OH)2	55.50%
Cuarzo	SiO2	9.60%
Magnetita	Fe3O4	2.70%

Las fases minerales cuantificadas mediante la técnica analítica Difracción de Rayos X son las que se encuentran disponibles en ICSD (Inorganic Crystal Structure Database)

La cuantificación de las fases minerales se realizó mediante la técnica analítica Difracción de rayos X con afinamiento Rietveld en un equipo Empyrean de PANalytical, la identificación de las fases cristalinas presentes en las muestras se realizó mediante un barrido del goniómetro del equipo comprendido entre los ángulos de 5° ≤2θ≤90°, con una duración de 4 minutos por barrido.

Analista

Gerente de Laboratorio/Coordinador

Observaciones: –

CETEC NO se hace responsable de planes de muestreos y muestreos definidos por el cliente.
CETEC NO se hace responsable de los usos que se le darán a este informe.
Este informe NO es un certificado de calidad.
Es responsabilidad del cliente la veracidad de la información proporcionada para la OT.
CETEC proporciona únicamente resultados del(los) ensayo(s) realizado(s).
Los resultados de ensayo se refieren únicamente a las muestras presentadas por el cliente. No debe reproducirse éste informe, a menos que se haga íntegramente.
Este informe es original si cuenta con holograma de seguridad, el cual está identificado con un correlativo único, para verificar la validez del mismo puede comunicarse al 2286-4178 o al correo cetec@cempro.com.

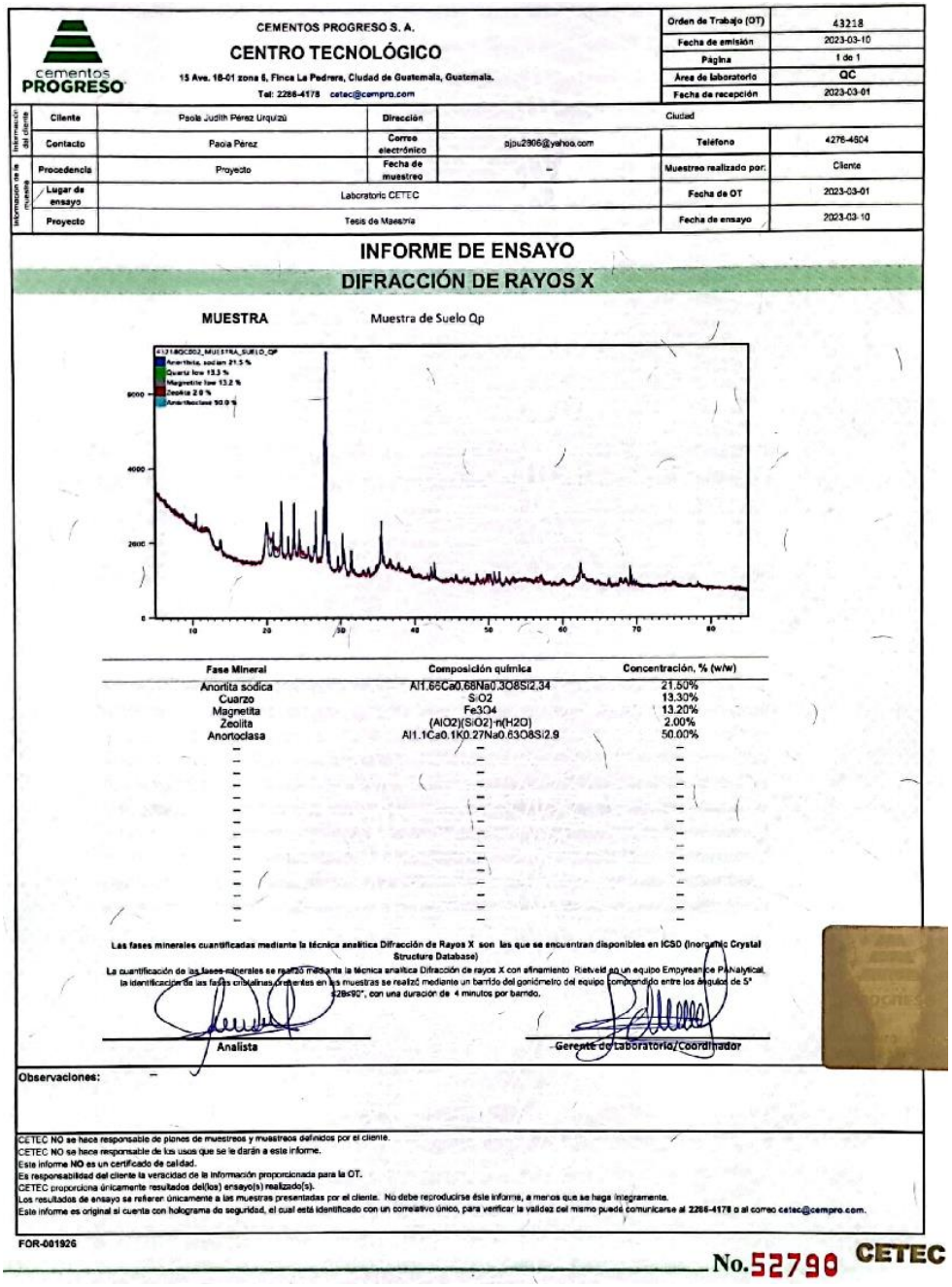
FOR-001926

No. 52791 CETEC

Nota. Informe de resultados. Obtenido de Cementos Progreso (2023). *Informes de resultados*.

Anexo 3.

Difracción de rayos X



CEMENTOS PROGRESO S. A.

CENTRO TECNOLÓGICO

15 Ave. 18-01 zona 6, Finca La Pedrera, Ciudad de Guatemala, Guatemala.

Tel: 2286-4178 cetec@cempro.com

Orden de Trabajo (OT)	43218
Fecha de emisión	2023-03-10
Página	1 de 1
Área de laboratorio	QC
Fecha de recepción	2023-03-01

Información del cliente						
	Cliente	Paola Judith Pérez Urquizú	Dirección	Ciudad		
	Contacto	Paola Pérez	Correo electrónico	ajpu2906@yahoo.com	Teléfono	4276-4804
Información de la muestra	Procedencia	Proyecto	Fecha de muestreo	-	Muestreo realizado por:	Cliente
	Lugar de ensayo	Laboratorio CETEC			Fecha de OT	2023-03-01
	Proyecto	Tesis de Maestría			Fecha de ensayo	2023-03-10

INFORME DE ENSAYO

DIFRACCIÓN DE RAYOS X

MUESTRA Muestra de Suelo Qp

Fase Mineral	Composición química	Concentración, % (w/w)
Anortita sodica	Al1.65Ca0.68Na0.3O8Si2.34	21.50%
Cuarzo	SiO2	13.30%
Magnetita	Fe3O4	13.20%
Zeolita	(AlO2)(SiO2)·n(H2O)	2.00%
Anortoclasa	Al1.1Ca0.1K0.27Na0.63O8Si2.9	50.00%

Las fases minerales cuantificadas mediante la técnica analítica Difracción de Rayos X son las que se encuentran disponibles en ICSD (Inorganic Crystal Structure Database)

La cuantificación de las fases minerales se realizó mediante la técnica analítica Difracción de rayos X con afinamiento Rietveld en un equipo Empyrean de PANalytical. La identificación de las fases cristalinas presentes en las muestras se realizó mediante un barrido del goniómetro del equipo comprendido entre los ángulos de 5° 2θ≤90°, con una duración de 4 minutos por barrido.

Analista

Gerente de Laboratorio/Coordinador

Observaciones: -

CETEC NO se hace responsable de planes de muestreos y muestreos definidos por el cliente.
CETEC NO se hace responsable de los usos que se le darán a este informe.
Este informe NO es un certificado de calidad.
Es responsabilidad del cliente la veracidad de la información proporcionada para la OT.
CETEC proporciona únicamente resultados del(los) ensayo(s) realizado(s).
Los resultados de ensayo se refieren únicamente a las muestras presentadas por el cliente. No debe reproducirse éste informe, a menos que se haga íntegramente.
Este informe es original si cuenta con holograma de seguridad, el cual está identificado con un correlativo único, para verificar la validez del mismo puede comunicarse al 2286-4178 o al correo cetec@cempro.com.

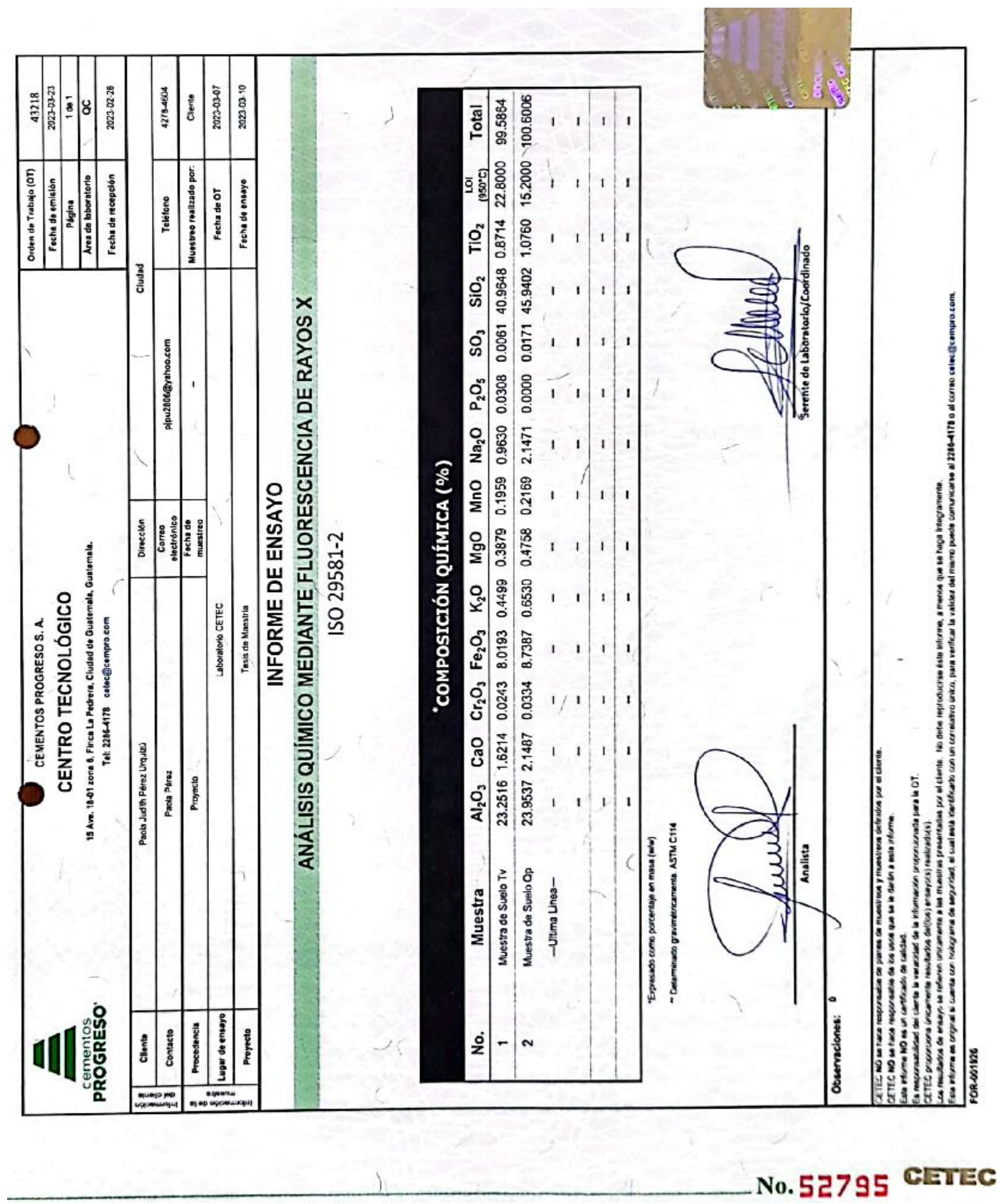
FOR-001926

No.52790 CETEC

Nota. Informe de resultados. Obtenido de Cementos Progreso (2023). *Informes de resultados*.

Anexo 4.

Análisis químico mediante fluorescencia de rayos X



CEMENTOS PROGRESO S. A.

CENTRO TECNOLÓGICO

15 Ave. 18-01 zona 6, Finca La Pedrera, Ciudad de Guatemala, Guatemala.

Tel: 2286-4178 cetec@cempro.com

Orden de Trabajo (OT)	43218
Fecha de emisión	2023-03-23
Página	1 de 1
Área de laboratorio	QC
Fecha de recepción	2023-02-28

Información del cliente	Cliente	Paola Judith Pérez Urquizú	Dirección		Ciudad	
	Contacto	Paola Pérez	Correo electrónico	pjpu2806@yahoo.com	Teléfono	4278-4604
Información de la muestra	Procedencia	Proyecto	Fecha de muestreo	–	Muestreo realizado por:	Cliente
	Lugar de ensayo	Laboratorio CETEC			Fecha de OT	2023-03-07
	Proyecto	Tesis de Maestría			Fecha de ensayo	2023-03-10

INFORME DE ENSAYO

ANÁLISIS QUÍMICO MEDIANTE FLUORESCENCIA DE RAYOS X

ISO 29581-2

*COMPOSICIÓN QUÍMICA (%)

No.	Muestra	Al_2O_3	CaO	Cr_2O_3	Fe_2O_3	K_2O	MgO	MnO	Na_2O	P_2O_5	SO_3	SiO_2	TiO_2	LOI (950°C)	Total
1	Muestra de Suelo Tv	23.2516	1.6214	0.0243	8.0193	0.4499	0.3879	0.1959	0.9630	0.0308	0.0061	40.9648	0.8714	22.8000	99.5864
2	Muestra de Suelo Op	23.9537	2.1487	0.0334	8.7387	0.6530	0.4758	0.2169	2.1471	0.0000	0.0171	45.9402	1.0760	15.2000	100.6006
	—Ultima Linea—	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
		–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
		–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
		–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–

*Expresado como porcentaje en masa (w/w)

** Determinado gravimétricamente. ASTM C114

Analista

Gerente de Laboratorio/Coordinado

Observaciones: 0

CETEC NO se hace responsable de planes de muestreos y muestreos definidos por el cliente.
CETEC NO se hace responsable de los usos que se le darán a este informe.
Este informe NO es un certificado de calidad.
Es responsabilidad del cliente la veracidad de la información proporcionada para la OT.
CETEC proporciona únicamente resultados del(los) ensayo(s) realizado(s).
Los resultados de ensayo se refieren únicamente a las muestras presentadas por el cliente. No debe reproducirse éste informe, a menos que se haga íntegramente.
Este informe es original si cuenta con holograma de seguridad, el cual está identificado con un correlativo único, para verificar la validez del mismo puede comunicarse al 2286-4178 o al correo cetec@cempro.com.

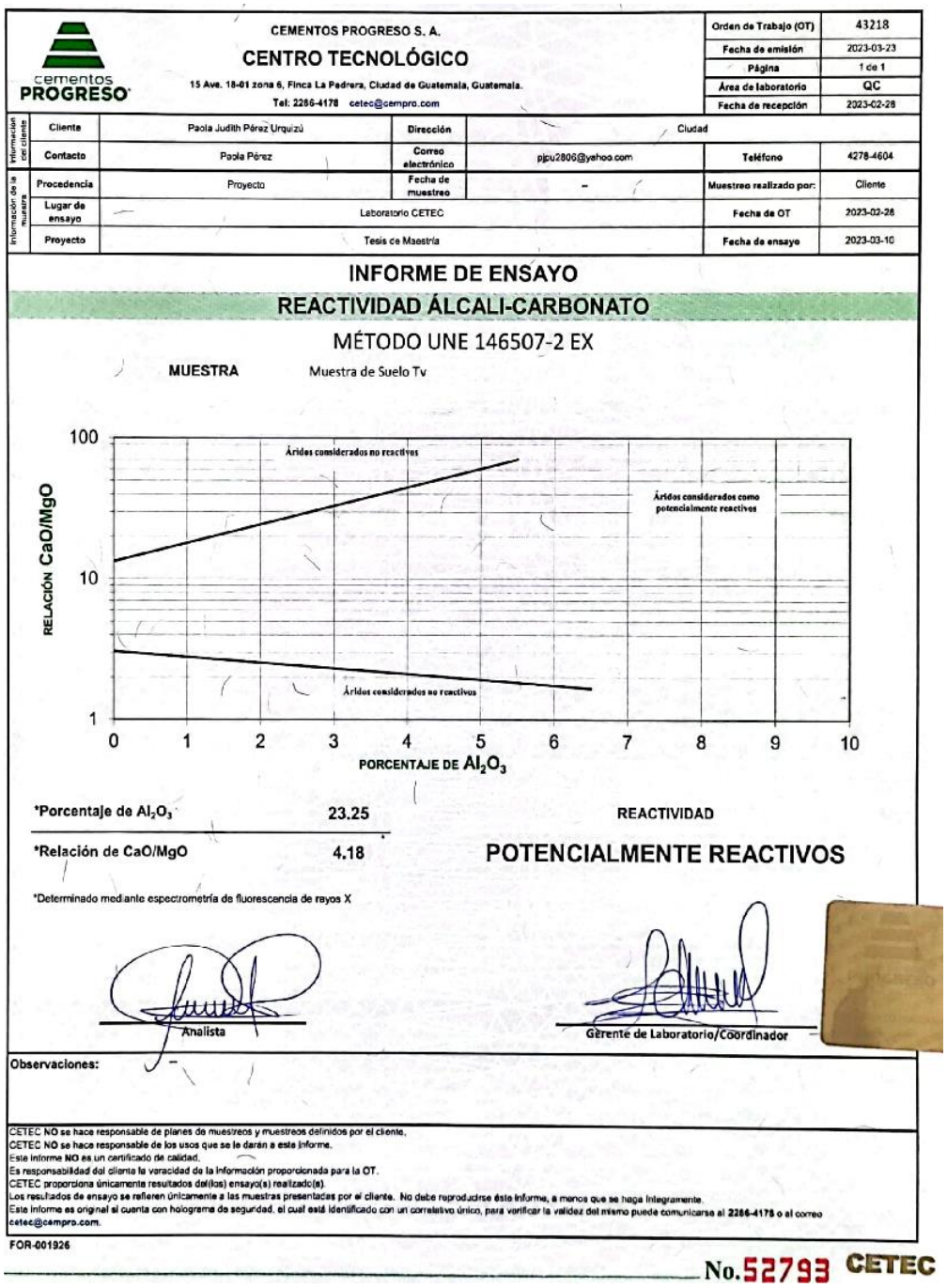
FOR-001926

No. 52795 CETEC

Nota. Informe de resultados. Obtenido de Cementos Progreso (2023). *Informes de resultados*.

Anexo 5.

Reactividad álcali-carbonato



CEMENTOS PROGRESO S. A.

CENTRO TECNOLÓGICO

15 Ave. 18-01 zona 6, Finca La Padrera, Ciudad de Guatemala, Guatemala.

Tel: 2286-4178 cetec@cempro.com

Orden de Trabajo (OT)	43218				
Fecha de emisión	2023-03-23				
Página	1 de 1				
Área de laboratorio	QC				
Fecha de recepción	2023-02-28				
Información del cliente	Cliente	Paola Judith Pérez Urquizú	Dirección	Ciudad	
	Contacto	Paola Pérez	Correo electrónico	pjpu2806@yahoo.com	Teléfono 4278-4604
Información de la muestra	Procedencia	Proyecto	Fecha de muestreo	–	Muestreo realizado por: Cliente
	Lugar de ensayo	Laboratorio CETEC			Fecha de OT 2023-02-28
	Proyecto	Tesis de Maestría			Fecha de ensayo 2023-03-10

INFORME DE ENSAYO

REACTIVIDAD ÁLCALI-CARBONATO

MÉTODO UNE 146507-2 EX

MUESTRA Muestra de Suelo Tv

*Porcentaje de Al_2O_3	23.25	REACTIVIDAD
*Relación de CaO/MgO	4.18	POTENCIALMENTE REACTIVOS

*Determinado mediante espectrometría de fluorescencia de rayos X

Analista

Gerente de Laboratorio/Coordinador

Observaciones: –

CETEC NO se hace responsable de planes de muestreos y muestreos definidos por el cliente.
CETEC NO se hace responsable de los usos que se le darán a este informe.
Este informe NO es un certificado de calidad.
Es responsabilidad del cliente la veracidad de la información proporcionada para la OT.
CETEC proporciona únicamente resultados del(los) ensayo(s) realizado(s).
Los resultados de ensayo se refieren únicamente a las muestras presentadas por el cliente. No debe reproducirse este informe, a menos que se haga íntegramente.
Este informe es original si cuenta con holograma de seguridad, el cual está identificado con un correlativo único, para verificar la validez del mismo puede comunicarse al 2286-4178 o al correo cetec@cempro.com.

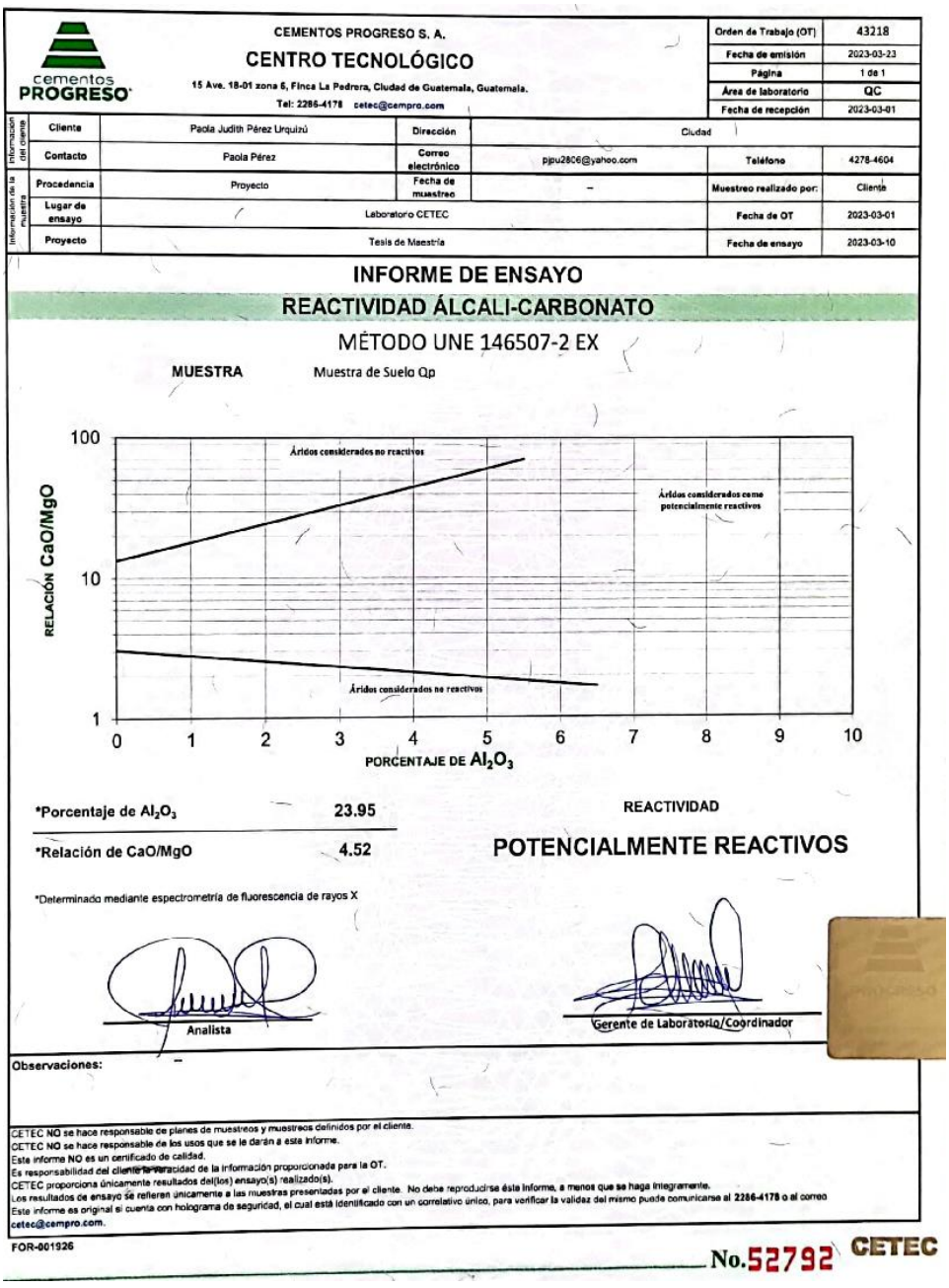
FOR-001926

No. 52793 CETEC

Nota. Informe de resultados. Obtenido de Cementos Progreso (2023). *Informes de resultados*.

Anexo 6.

Reactividad álcali-carbonato



CEMENTOS PROGRESO S. A.

CENTRO TECNOLÓGICO

15 Ave. 18-01 zona 6, Finca La Pedrera, Ciudad de Guatemala, Guatemala.
Tel: 2286-4178 cetec@cempro.com

Orden de Trabajo (OT)	43218				
Fecha de emisión	2023-03-23				
Página	1 de 1				
Área de laboratorio	QC				
Fecha de recepción	2023-03-01				
Información del cliente – Cliente	Paola Judith Pérez Urquizú	Dirección	Ciudad		
Información del cliente – Contacto	Paola Pérez	Correo electrónico	pjpu2806@yahoo.com	Teléfono	4278-4604
Información de la muestra – Procedencia	Proyecto	Fecha de muestreo	–	Muestreo realizado por:	Cliente
Información de la muestra – Lugar de ensayo	Laboratorio CETEC			Fecha de OT	2023-03-01
Información de la muestra – Proyecto	Tesis de Maestría			Fecha de ensayo	2023-03-10

INFORME DE ENSAYO

REACTIVIDAD ÁLCALI-CARBONATO

MÉTODO UNE 146507-2 EX

MUESTRA Muestra de Suelo Qp

*Porcentaje de Al_2O_3	23.95
*Relación de CaO/MgO	4.52

*Determinado mediante espectrometría de fluorescencia de rayos X

REACTIVIDAD

POTENCIALMENTE REACTIVOS

Analista

Gerente de Laboratorio/Coordinador

Observaciones: –

CETEC NO se hace responsable de planes de muestreos y muestreos definidos por el cliente.
CETEC NO se hace responsable de los usos que se le darán a este informe.
Este informe NO es un certificado de calidad.
Es responsabilidad del cliente la veracidad de la información proporcionada para la OT.
CETEC proporciona únicamente resultados del(los) ensayo(s) realizado(s).
Los resultados de ensayo se refieren únicamente a las muestras presentadas por el cliente. No debe reproducirse éste informe, a menos que se haga íntegramente.
Este informe es original si cuenta con holograma de seguridad, el cual está identificado con un correlativo único, para verificar la validez del mismo puede comunicarse al 2286-4178 o al correo cetec@cempro.com.

FOR-001926

No.52792 CETEC

Nota. Informe de resultados. Obtenido de Cementos Progreso (2023). *Informes de resultados*.

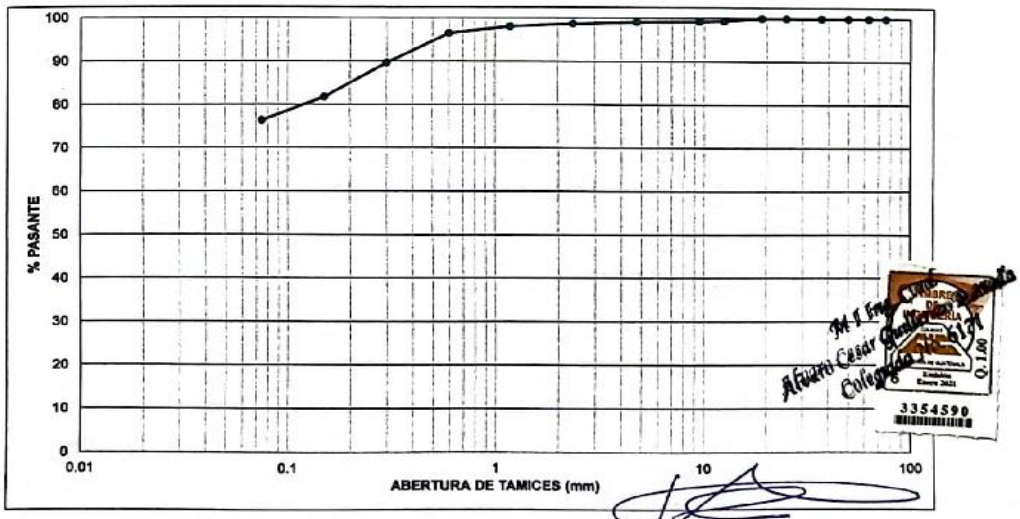
Anexo 7.

Análisis granulométrico

Ing. Alvaro C. Guillermo 6 C, Lote 4 "A", Col. El Recreo Amatitlan. Tel. 5526-7466	LABORATORIO DE CONTROL DE CALIDAD Analisis Granulometrico AASHTO T - 11, T - 27 y T - 37	Asfaltos, Pavimentos y Control de Calidad de Guatemala

PROYECTO :	TESIS DE MAESTRÍA
INTERESADO:	INGA. PAOLA PÉREZ
BANCO DE MATERIALES:	HACIENDA REAL
UBICACIÓN GEOGRÁFICA:	N 14°36'31.8744" W 90°27'40.8492"
GEOLOGÍA:	Tv, PALEOSUELO
FECHA MUESTREO:	15 DE FEBRERO DE 2023
FECHA DE ENSAYO:	18 DE FEBRERO DE 2023
CLASE DE MATERIAL :	ARCILLA DE ALTA COMPRESIBILIDAD CON ARENA, COLOR CAFÉ CLARO

Tamices		Pesos Retenidos	Retenido Parcial	Retenido Acumulado	Material Pasante	Especificaciones % Pasante	Descripcion del Material	
Denominación	Abertura (mm)	(gr)	(gr)	(%)	(%)	(min - max)		
3"	76	0.0	0.0	0.0	100.0		TM:	No. 16
2 1/2"	63	0.0	0.0	0.0	100.0		Peso Muest.	1,340.90 gr
2"	50	0.0	0.0	0.0	100.0		% de Grava:	0.9
1 1/2"	37	0.0	0.0	0.0	100.0		% de Arena:	22.8
1"	25	0.0	0.0	0.0	100.0		% Pasa # 200:	76.3
3/4"	19	0.0	0.0	0.0	100.0		L.L.:	50.5
1/2"	12.5	8.5	8.5	0.6	99.4		L.P.:	27.1
3/8"	9.5	10.4	1.9	0.8	99.2		I.P.:	23.4
No. 4	4.75	12.1	1.7	0.9	99.1		Clasificación SUCS:	CH
No. 8	2.36	17.7	5.6	1.3	98.7		Clasificación AASHTO:	A-7-6
No. 16	1.18	25.7	8.0	1.9	98.1		Índice de Grupo:	19.0
No. 30	0.6	47.3	21.6	3.5	96.5			
No. 50	0.3	139.3	92.0	10.4	89.6			
No. 100	0.15	244.9	105.8	18.3	81.7			
No. 200	0.075	317.6	72.7	23.7	76.3			



OBSERVACIONES:

LOS AGREGADOS FUERON LAVADOS POR EL TAMIZ 200.

M-I Ing. Civil
Alvaro Cesar Guillermo Estrada
Colegiado No. 6171

Nota. Informe de resultados. Obtenido de A. Guillermo (2023). *Informes de resultados*.

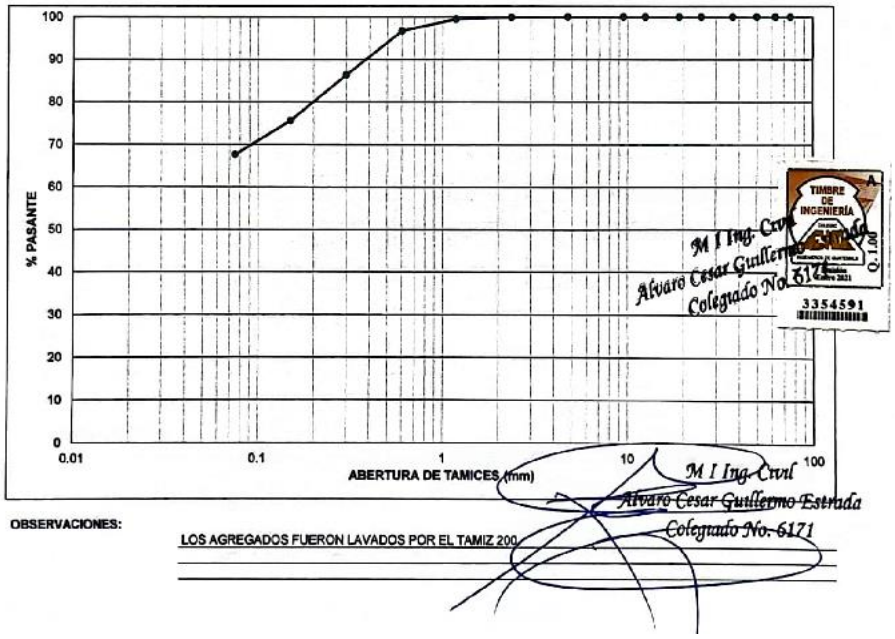
Anexo 8.

Análisis granulométrico

Ing. Alvaro C. Guillermo 6 C, Lote 4 "A", Col. El Recreo Amatitlan. Tel. 5526-7466	LABORATORIO DE CONTROL DE CALIDAD Analisis Granulometrico AASHTO T - 11, T - 27 y T - 37	Asfaltos, Pavimentos y Control de Calidad de Guatemala

PROYECTO :	TESIS DE MAESTRÍA
INTERESADO:	INGA. PAOLA PÉREZ
BANCO DE MATERIALES:	SENDEROS APARTAMENTOS
UBICACIÓN GEOGRÁFICA:	N 14°38'00.8556" W 90°27'43.8192"
GEOLOGÍA:	Qp, PALEOSUELO
FECHA MUESTREO:	15 DE FEBRERO DE 2023
FECHA DE ENSAYO:	18 DE FEBRERO DE 2023
CLASE DE MATERIAL :	ARCILLA DE BAJA COMPRESIBILIDAD CON ARENA, COLOR CAFÉ

Tamices		Pesos Retenidos	Retenido Parcial	Retenido Acumulado	Material Pasante	Especificaciones % Pasante	Descripcion del Material	
Denominación	Abertura (mm)	(gr)	(gr)	(%)	(%)	(min - max)		
3"	76	0.0	0.0	0.0	100.0		TM:	No. 16
2 1/2"	63	0.0	0.0	0.0	100.0		Peso Muest.	1,295.50 gr
2"	50	0.0	0.0	0.0	100.0		% de Grava:	0.0
1 1/2"	37	0.0	0.0	0.0	100.0		% de Arena:	32.4
1"	25	0.0	0.0	0.0	100.0		% Pase # 200:	67.6
3/4"	19	0.0	0.0	0.0	100.0		L.L.:	40.0
1/2"	12.5	0.0	0.0	0.0	100.0		L.P.:	24.4
3/8"	9.5	0.0	0.0	0.0	100.0		I.P.:	15.6
No. 4	4.75	0.1	0.1	0.0	100.0		Clasificación SUCS:	CL
No. 8	2.36	2.1	2.0	0.2	99.8		Clasificación AASHTO:	A-6
No. 16	1.18	7.1	5.0	0.5	99.5		Índice de Grupo:	10.0
No. 30	0.6	43.1	36.0	3.3	96.7			
No. 50	0.3	176.7	133.6	13.8	86.4			
No. 100	0.15	316.2	139.5	24.4	75.6			
No. 200	0.075	412.9	103.7	32.4	67.6			



OBSERVACIONES:

LOS AGREGADOS FUERON LAVADOS POR EL TAMIZ 200

Nota. Informe de resultados. Obtenido de A. Guillermo (2023). *Informes de resultados*.

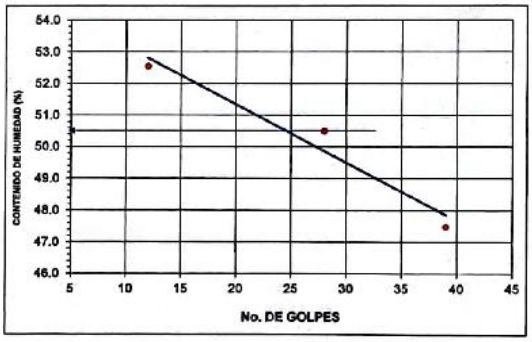
Anexo 9.

Limites de consistencia

Ing. Alvaro C. Guillermo 6 C, Lote 4 "A", Col. El Recreo Amatitlan Tel 5526-7466	LABORATORIO DE CONTROL DE CALIDAD Limite Liquido y Limite Plastico (Limites de Consistencia) AASHTO T - 89 y T - 90	Asfaltos, Pavimentos y Control de Calidad de Guatemala

PROYECTO :	TESIS DE MAESTRÍA
INTERESADO:	INGA. PAOLA PÉREZ
BANCO DE MATERIALES:	HACIENDA REAL
UBICACIÓN GEOGRÁFICA:	N 14°36'31.8744" W 90°27'40.8492"
GEOLOGÍA:	Tv, PALEOSUELO
FECHA DE MUESTREO:	15 DE FEBRERO DE 2023
FECHA DE ENSAYO:	18 DE FEBRERO DE 2023
CLASE DE MATERIAL :	ARCILLA DE ALTA COMPRESIBILIDAD CON ARENA, COLOR CAFÉ CLARO

TARA	PESO TARA	TARA + SUELO HÚMEDO	TARA + SUELO SECO	PESO AGUA	SUELO SECO	CONTENIDO DE AGUA	NUMERO DE GOLPES
No.	grs.	grs.	grs.	grs.	grs.	%	
LIMITE LIQUIDO							
9	12.27	29.51	23.96	5.55	11.69	47.48	39
10	12.29	28.86	23.30	5.56	11.01	50.50	28
11	12.09	29.74	23.66	6.08	11.57	52.55	12
LIMITE PLASTICO							
T-9	6.96	13.88	12.43	1.45	5.47	26.51	
T-10	6.82	14.64	12.94	1.70	6.12	27.78	
T-11	6.87	14.00	12.48	1.52	5.61	27.09	
HUMEDAD PROMEDIO							27.1



RESUMEN	
Clasificación S.U.C.S.	CH
Clasificacion AASHTO	A-7-6
Indice de Grupo	19
Limite Liquido	50.5
Limite Plastico	27.1
Indice de Plasticidad	23.4

OBSERVACIONES:

EL MATERIAL UTILIZADO PARA LOS LIMITES DE CONSISTENCIA PASA TAMIZ # 40.

TIMBRE DE INGENIERIA
3354593

M I Ing. Civil
Alvaro Cesar Guillermo Estrada
Colegiado No. 6171

Nota. Informe de resultados. Obtenido de A. Guillermo (2023). *Informes de resultados*.

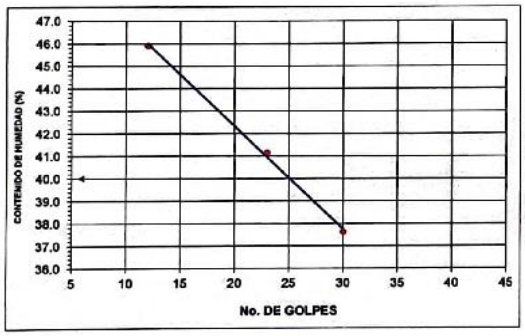
Anexo 10.

Limites de consistencia

Ing. Alvaro C. Guillermo 6 C, Lote 4 "A", Col. El Recreo Amatitlan Tel. 5526-7466	LABORATORIO DE CONTROL DE CALIDAD Limite Liquido y Limite Plastico (Limites de Consistencia) AASHTO T - 89 y T - 90	Asfaltos, Pavimentos y Control de Calidad de Guatemala

PROYECTO :	TESIS DE MAESTRÍA
INTERESADO:	INGA. PAOLA PÉREZ
BANCO DE MATERIALES:	SENDEROS APARTAMENTOS
UBICACIÓN GEOGRÁFICA:	N 14°38'00.8556" W 90°27'43.8192"
GEOLOGÍA:	Qp, PALEOSUELO
FECHA DE MUESTREO:	15 DE FEBRERO DE 2023
FECHA DE ENSAYO:	18 DE FEBRERO DE 2023
CLASE DE MATERIAL :	ARCILLA DE BAJA COMPRESIBILIDAD CON ARENA, COLOR CAFÉ

TARA	PESO TARA	TARA + SUELO HÚMEDO	TARA + SUELO SECO	PESO AGUA	SUELO SECO	CONTENIDO DE AGUA	NUMERO DE GOLPES
No.	grs.	grs.	grs.	grs.	grs.	%	
LIMITE LIQUIDO							
6	12.80	31.46	26.36	5.10	13.56	37.61	30
7	12.52	31.83	26.20	5.63	13.68	41.15	23
8	12.62	28.83	23.73	5.10	11.11	45.90	12
LIMITE PLASTICO							
T-6	7.09	13.94	12.60	1.34	5.51	24.32	
T-7	7.09	12.90	11.76	1.14	4.67	24.41	
T-8	7.14	13.11	11.94	1.17	4.80	24.38	
HUMEDAD PROMEDIO							24.4



RESUMEN	
Clasificación S.U.C.S.	CL
Clasificacion AASHTO	A-6
Indice de Grupo	10
Limite Liquido	40.0
Limite Plastico	24.4
Indice de Plasticidad	15.6

M I Ing. Civil
Alvaro Cesar Guillermo Estrada
Colegiado No. 6171

TIMBRE DE INGENIERÍA
Q. 1.00
3354589

OBSERVACIONES:

EL MATERIAL UTILIZADO PARA LOS LIMITES DE CONSISTENCIA PASA TAMIZ # 40.

M I Ing. Civil
Alvaro Cesar Guillermo Estrada
Colegiado No. 6171

Nota. Informe de resultados. Obtenido de A. Guillermo (2023). *Informes de resultados*.

Anexo 11.

Gravedad especifica en suelos

Ing. Alvaro C. Guillermo 6 C, Lote 4 "A", Col. El Recreo Amatitlan. Tel. 5526-7466	LABORATORIO DE CONTROL DE CALIDAD GRAVEDAD ESPECIFICA EN SUELOS ASTM D - 854	Asfaltos, Pavimentos y Control de Calidad de Guatemala

PROYECTO :	TESIS DE MAESTRÍA
INTERESADO:	INGA. PAOLA PÉREZ
BANCO DE MATERIALES:	HACIENDA REAL
UBICACIÓN GEOGRÁFICA:	N 14°36'31.8744" W 90°27'40.8492"
GEOLOGÍA:	Tv, PALEOSUELO
FECHA MUESTREO:	15 DE FEBRERO DE 2023
FECHA DE ENSAYO:	18 DE FEBRERO DE 2023
CLASE DE MATERIAL :	ARCILLA DE ALTA COMPRESIBILIDAD CON ARENA, COLOR CAFÉ CLARO

GRAVEDAD ESPECIFICA EN SUELOS

Pesos en (g)	Ensayo No. 1		Ensayo No. 2
Peso del Picnometro	171.0		171.0
Peso del Picnometro + Agua	668.2		668.2
Peso del Picnometro + Especimen seco	504.1		506.1
Peso Neto del Especimen seco	291.8		293.6
Peso del Picnometro + Agua + Especimen seco	847.3		844.7

1. Gravedad Especifica G. S	2.589		2.507
	2.548		

TIMBRE DE INGENIERÍA

M I Ing. Civil Alvaro Cesar Guillermo Estrada Colegiado No. 6171

OBSERVACIONES:

LA TEMPERATURA DEL AGUA FUE CLIMATIZADA A 25 °C.

M I Ing. Civil
Alvaro Cesar Guillermo Estrada
Colegiado No. 6171

Nota. Informe de resultados. Obtenido de A. Guillermo (2023). *Informes de resultados*.

Anexo 12.

Gravedad especifica en suelos

Ing. Alvaro C. Guillermo 6 C, Lote 4 "A", Col. El Recreo Amatitlan. Tel. 5526-7466	LABORATORIO DE CONTROL DE CALIDAD GRAVEDAD ESPECIFICA EN SUELOS ASTM D - 854	Asfaltos, Pavimentos y Control de Calidad de Guatemala

PROYECTO :	**TESIS DE MAESTRÍA**
INTERESADO:	**INGA. PAOLA PÉREZ**
BANCO DE MATERIALES:	**SENDEROS APARTAMENTOS**
UBICACIÓN GEOGRÁFICA:	**N 14°38'00.8556" W 90°27'43.8192"**
GEOLOGÍA:	**Qp, PALEOSUELO**
FECHA MUESTREO:	**15 DE FEBRERO DE 2023**
FECHA DE ENSAYO:	**18 DE FEBRERO DE 2023**
CLASE DE MATERIAL :	**ARCILLA DE BAJA COMPRESIBILIDAD CON ARENA, COLOR CAFÉ**

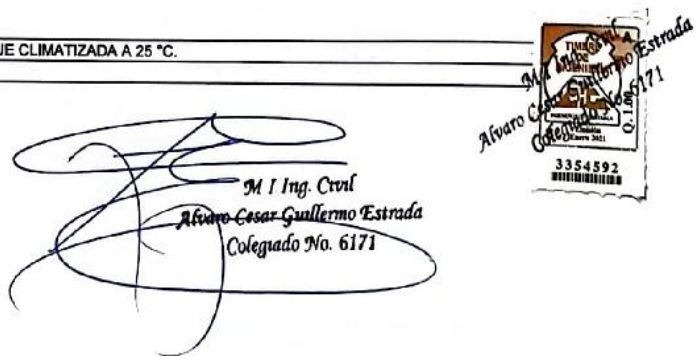
GRAVEDAD ESPECIFICA EN SUELOS

Pesos en (g)	Ensayo No. 1		Ensayo No. 2
Peso del Picnometro	171.0		171.0
Peso del Picnometro + Agua	668.2		668.2
Peso del Picnometro + Especimen seco	507.2		510.8
Peso Neto del Especimen seco	310.3		319.9
Peso del Picnometro + Agua + Especimen seco	864.2		868.2

1. Gravedad Especifica G. S	2.715		2.668
	2.691		

OBSERVACIONES:

LA TEMPERATURA DEL AGUA FUE CLIMATIZADA A 25 °C.



Nota. Informe de resultados. Obtenido de A. Guillermo (2023). *Informes de resultados*.

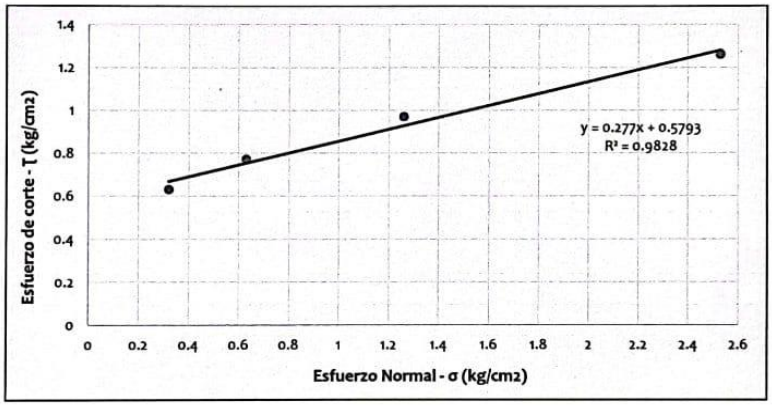
Anexo 13.

Ensayo de corte directo

Inversiones de Asesoría

R01TPP-2023

INTERESADO: PAOLA PÉREZ
PROYECTO: TESIS DE MAESTRÍA
UBICACIÓN: HACIENDA REAL
ASUNTO: ENSAYO DE CORTE DIRECTO Muestra 1, Tv
NORMA: AASHTO T-236, ASTM D-3080
CALICATA No.: 01 **PROFUNDIDAD:** 1.00
FECHA DE INFORME: 20 DE MARZO DEL 2023



PARAMETROS DE CORTE:	
ÁNGULO DE FRICCIÓN INTERNA: Ø = 15.49°	COHESIÓN APARENTE: Cu = 5.77 Ton/m²

PROBETA No.	1	2	3	4
ESFUERZO NORMAL (kg/cm²)	0.32	0.63	1.26	2.53
ESFUERZO DE CORTE (kg/cm²)	0.63	0.77	0.97	1.26
DENSIDAD SECA (Ton/m³)	0.99	0.99	0.99	0.99
DENSIDAD HÚMEDA (Ton/m³)	1.47	1.47	1.47	1.47
HUMEDAD (%H)	48.61	48.61	48.61	48.61

Ing. Cristian Antonio Figueroa
GERENTE GENERAL
Colegiado 13,790

Ing. Civil Cristian Antonio Figueroa
Especialización en Topografía y Geología
Colegiado 13790

TIMBRE DE INGENIERÍA Q.1.00

Nota. Informe de resultados. Obtenido IDEA (2023). *Informes de resultados*.

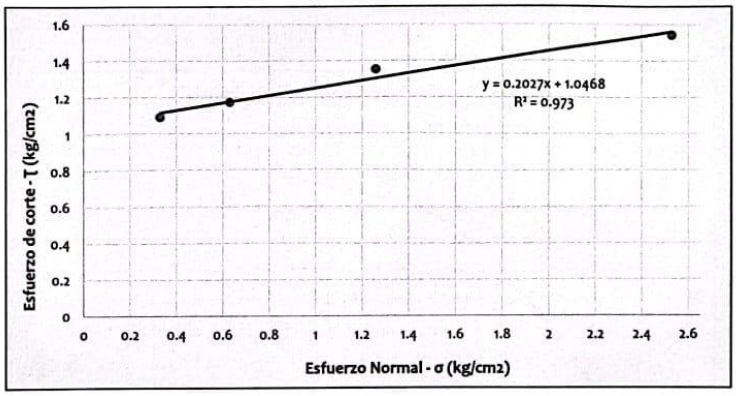
Anexo 14.

Ensayo de corte directo

Inversiones de Asesoría

R02TPP-2023

INTERESADO: PAOLA PÉREZ
PROYECTO: TESIS DE MAESTRÍA
UBICACIÓN: SENDEROS APARTAMENTOS
ASUNTO: ENSAYO DE CORTE DIRECTO Muestra 2, Qp
NORMA: AASHTO T-236, ASTM D-3080
CALICATA No.: 02 **PROFUNDIDAD:** 1.00
FECHA DE INFORME: 20 DE MARZO DEL 2023



PARAMETROS DE CORTE:	
ÁNGULO DE FRICCIÓN INTERNA: Ø = 11.40°	COHESIÓN APARENTE: Cu = 10.49 Ton/m²

PROBETA No.	1	2	3	4
ESFUERZO NORMAL (kg/cm²)	0.33	0.63	1.26	2.53
ESFUERZO DE CORTE (kg/cm²)	1.09	1.17	1.35	1.54
DENSIDAD SECA (Ton/m³)	0.99	0.99	0.99	0.99
DENSIDAD HÚMEDA (Ton/m³)	1.38	1.38	1.38	1.38
HUMEDAD (%H)	38.38	38.38	38.38	38.38

Ing. Cristian Antonio Figueroa
GERENTE GENERAL
Colegiado 13,790

TIMBRE DE INGENIERÍA
5030236

Ing. Civil Cristian Figueroa
Especialización en Topografía
Colegiado 13,790

Nota. Informe de resultados. Obtenido IDEA (2023). *Informes de resultados*.

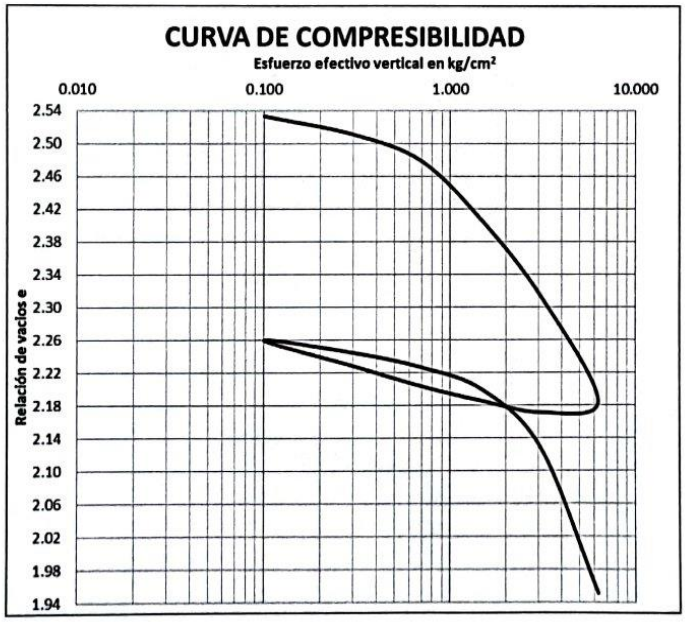
Anexo 15.

Ensayo de consolidación

Inversiones de Asesoría

R03TPP-2023

INTERESADO: PAOLA PÉREZ
PROYECTO: TESIS DE MAESTRÍA
UBICACIÓN: SENDEROS APARTAMENTOS
ASUNTO: ENSAYO DE CONSOLIDACIÓN Muestra 1, Tv
NORMA: AASHTO T216-07, ASTM D2435-03
CALICATA No.: 01 **PROFUNDIDAD:** 1.00
FECHA DE INFORME: 20 DE MARZO DEL 2023



Continuación del anexo 15.

Inversiones de Asesoría

R03TPP-2023

RESULTADOS		
ENSAYO No.		1
Muestra No.		M1, Unidad Tv
Gravedad Específica		2.55
Humedad (%)		39.99
γ (g/cm3)		1.50
γd (g/cm3)		1.08
eo		2.53
σ'p (kg/cm2)		0.73
CS		0.0677
CC		0.292
CV (m2/s)	0.027 (kg/cm2)	7.59856E-07
	0.081 (kg/cm2)	2.84946E-07
	0.188 (kg/cm2)	9.91116E-08
	0.403 (kg/cm2)	4.55913E-07
	0.833 (kg/cm2)	7.59856E-07
	1.692 (kg/cm2)	1.30261E-06

Ing. Cristian Antonio Figueroa
GERENTE GENERAL
Colegiado 13,790

TIMBRE DE INGENIERÍA
Q. 1.00
13
5030237

Ing. Civil Cristian Figueroa
Especialización en Topografía y Geología
Colegiado 13,790

Nota. Informe de resultados. Obtenido IDEA (2023). *Informes de resultados*.

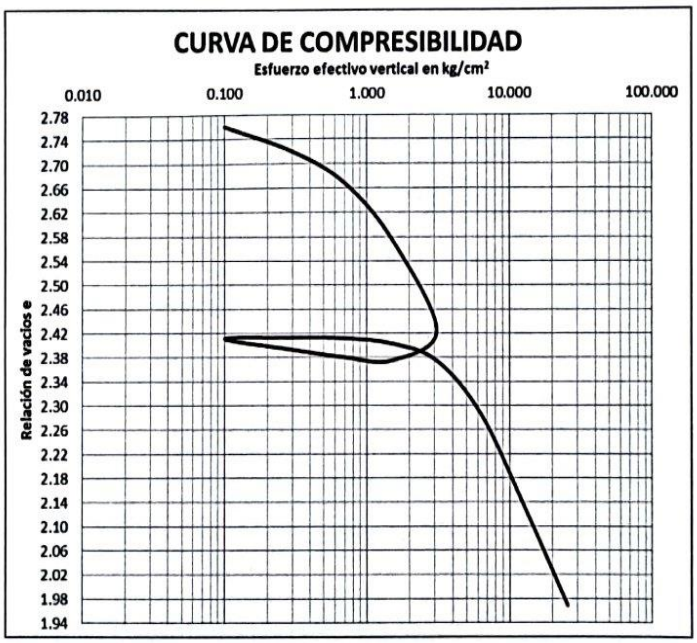
Anexo 16.

Ensayo de consolidación

Inversiones de Asesoría

R04TPP-2023

INTERESADO: PAOLA PÉREZ
PROYECTO: TESIS DE MAESTRÍA
UBICACIÓN: SENDEROS APARTAMENTOS
ASUNTO: ENSAYO DE CONSOLIDACIÓN Muestra 2, Qp
NORMA: AASHTO T216-07, ASTM D2435-03
CALICATA No.: 02 **PROFUNDIDAD:** 1.00
FECHA DE INFORME: 20 DE MARZO DEL 2023



Continuación del anexo 16.

Inversiones de Asesoría

R04TPP-2023

RESULTADOS		
ENSAYO No.		2
Muestra No.		M2, Unidad Qp
Gravedad Especifica		2.69
Humedad (%)		40.28
γ (g/cm3)		1.36
γd (g/cm3)		0.97
eo		2.76
σ'p (kg/cm2)		0.80
CS		0.0346
CC		0.481
CV (m2/s)	0.027 (kg/cm2)	1.26643E-06
	0.081 (kg/cm2)	5.69892E-07
	0.188 (kg/cm2)	2.74647E-07
	0.403 (kg/cm2)	3.25652E-07
	0.833 (kg/cm2)	3.25652E-07
	1.692 (kg/cm2)	5.99886E-07
	3.410 (kg/cm2)	1.98223E-07
	6.847 (kg/cm2)	1.49475E-09

Ing. Civil Cristian Figueroa
Especialización en Tecnología y Geología
Colegiado 13,790

Ing. Cristian Antonio Figueroa
GERENTE GENERAL
Colegiado 13,790

Nota. Informe de resultados. Obtenido IDEA (2023). *Informes de resultados*.