



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Civil

**DISEÑO DE INVESTIGACIÓN PARA LA ESTABILIZACIÓN DE SUELOS ARCILLOSOS CON
UN MATERIAL DE DESECHO (ARENA CUARZO-FELDESPÁTICA) PARA SU USO COMO
SUBRASANTE DE PAVIMENTOS EN EL DEPARTAMENTO DE CHIMALTENANGO**

Lucero Yesenia Alvarado Jiménez

Asesorado por el MSc. Ing. Erick Rodas Aldana

Guatemala, agosto de 2020

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**DISEÑO DE INVESTIGACIÓN PARA LA ESTABILIZACIÓN DE SUELOS ARCILLOSOS CON
UN MATERIAL DE DESECHO (ARENA CUARZO-FELDESPÁTICA) PARA SU USO COMO
SUBRASANTE DE PAVIMENTOS EN EL DEPARTAMENTO DE CHIMALTENANGO**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

LUCERO YESENIA ALVARADO JIMÉNEZ
ASESORADO POR EL MSC. ING. ERICK RODAS ALDANA

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERA CIVIL

GUATEMALA, AGOSTO DE 2020

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

| | |
|------------|---------------------------------------|
| DECANA | Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada |
| VOCAL I | Ing. José Francisco Gómez Rivera |
| VOCAL II | Ing. Mario Renato Escobedo Martínez |
| VOCAL III | Ing. José Milton de León Bran |
| VOCAL IV | Br. Christian Moisés de la Cruz Leal |
| VOCAL V | Br. Kevin Armando Cruz Lorente |
| SECRETARIO | Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez |

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

| | |
|------------|---------------------------------------|
| DECANA | Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada |
| EXAMINADOR | Ing. Hugo Leonel Montenegro Franco |
| EXAMINADOR | Ing. Juan Merck Cos |
| EXAMINADOR | Ing. Alfredo Arrivillaga Ochaeta |
| 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:

DISEÑO DE INVESTIGACIÓN PARA LA ESTABILIZACIÓN DE SUELOS ARCILLOSOS CON UN MATERIAL DE DESECHO (ARENA CUARZO-FELDESPÁTICA) PARA SU USO COMO SUBRASANTE DE PAVIMENTOS EN EL DEPARTAMENTO DE CHIMALTENANGO

Tema que me fuera asignado por la Dirección de Escuela de Estudios de Postgrado con fecha 16 de abril de 2020.

Lucero Yesenia Alvarado Jiménez

Ref. EEPFI-505-2020
Guatemala, 16 de abril de 2020

Director
Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
Escuela de Ingeniería Civil
Presente.

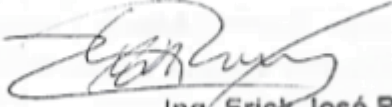
Estimado Ing. Aguilar:

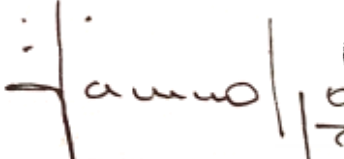
Reciba un cordial saludo de la Escuela de Estudios de Postgrado. El propósito de la presente es para informarle que se ha revisado y aprobado el **DISEÑO DE INVESTIGACIÓN: ESTABILIZACIÓN DE SUELOS ARCILLOSOS CON UN MATERIAL DE DESECHO (ARENA CUARZO-FELDESPÁTICA) PARA SU USO COMO SUBRASANTE DE PAVIMENTOS**, presentado por la estudiante **Lucero Yesenia Alvarado Jiménez** carné número **201503674**, quien optó por la modalidad del "PROCESO DE GRADUACIÓN DE LOS ESTUDIANTES DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA OPCIÓN ESTUDIOS DE POSTGRADO". Previo a culminar sus estudios en la Maestría en Ciencias en Ingeniería Geotécnica.

Y habiendo cumplido y aprobado con los requisitos establecidos en el normativo de este Proceso de Graduación en el Punto 6.2, aprobado por la Junta Directiva de la Facultad de Ingeniería en el Punto Décimo, Inciso 10.2 del Acta 28-2011 de fecha 19 de septiembre de 2011, firmo y sello la presente para el trámite correspondiente de graduación de Pregrado.


Atentamente,

"Id y Enseñad a Todos"


Ing. Erick José Rodas Aldana
Col. 6,766
Mtro. Erick José Rodas Aldana
Asesor


Mtro. Armando Fuentes Roca
Coordinador de Área de Infraestructura




Mtro. Edgar Darío Álvarez
Director



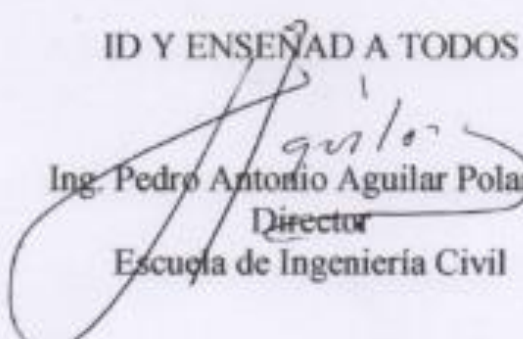
Escuela de Estudios de Postgrado
Facultad de Ingeniería



EEP-EIC-012-2020

El Director de la Escuela de Ingeniería Civil de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del Asesor, el visto bueno del Coordinador y Director de la Escuela de Estudios de Postgrado, del Diseño de Investigación en la modalidad Estudios de Pregrado y Postgrado titulado: **ESTABILIZACIÓN DE SUELOS ARCILLOSOS CON UN MATERIAL DE DESECHO (ARENA CUARZO-FELDESPÁTICA) PARA SU USO COMO SUBRASANTE DE PAVIMENTOS**, presentado por la estudiante universitaria Lucero Yesenia Alvarado Jiménez, procedo con el Aval del mismo, ya que cumple con los requisitos normados por la Facultad de Ingeniería en esta modalidad.

ID Y ENSEÑAD A TODOS



Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
Director
Escuela de Ingeniería Civil

Guatemala, abril de 2020



DTG. 420.2020.

La Decana 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 Ingeniería Civil, al Trabajo de Graduación titulado: **DISEÑO DE INVESTIGACIÓN PARA LA ESTABILIZACIÓN DE SUELOS ARCILLOSOS CON UN MATERIAL DE DESECHO (ARENA CUARZO-FELDESPÁTICA) PARA SU USO COMO SUBRASANTE DE PAVIMENTOS EN EL DEPARTAMENTO DE CHIMALTENANGO**, presentado por la estudiante universitaria: **Lucero Yesenia Alvarado Jiménez**, y 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
DECANA
FACULTAD DE INGENIERÍA
★

Inga. Anabela Cordova Estrada
Decana

Guatemala, noviembre de 2020

AACE/asga

ACTO QUE DEDICO A:

- Dios** Dador de sabiduría e inteligencia y por brindarme todas las herramientas para culminar con éxito esta meta, a él sea la gloria.
- Mis padres** Rodolfo Alvarado y Margarita Jiménez, por su apoyo, comprensión y amor incondicional.
- Mis hermanos** Estuardo y Richard Alvarado, por su apoyo y ánimo en todo momento.
- Mis amigos** Andrés Quiroa, Erick Alvarado, Karla Barrios, Rocío Bautista, Oscar Villanueva, Álvaro Lucero y Allison Herrera, por su amistad invaluable.

AGRADECIMIENTOS A:

**Universidad de San
Carlos de Guatemala**

Por ser mi casa de estudios y brindarme educación superior de calidad.

**Facultad de
Ingeniería**

Por la excelente preparación académica recibida.

**Mis amigos de la
Facultad**

Por brindarme su apoyo y amistad durante la carrera universitaria.

ÍNDICE GENERAL

| | |
|--------------------------------------|-----|
| ÍNDICE DE ILUSTRACIONES..... | V |
| LISTA DE SÍMBOLOS | VII |
| GLOSARIO | IX |
| RESUMEN..... | XI |
| | |
| 1. INTRODUCCIÓN | 1 |
| | |
| 2. ANTECEDENTES | 3 |
| | |
| 3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA | 11 |
| | |
| 4. JUSTIFICACIÓN | 13 |
| | |
| 5. OBJETIVOS | 15 |
| 5.1. General | 15 |
| 5.2. Específicos | 15 |
| | |
| 6. ALCANCE DE LA INVESTIGACIÓN | 17 |
| | |
| 7. MARCO TEÓRICO..... | 19 |
| 7.1. Suelos arcillosos | 19 |
| 7.2. Minerales arcillosos | 19 |
| 7.2.1. Caolinita..... | 21 |
| 7.2.2. Monmorilonita | 21 |
| 7.2.3. Illita | 22 |

| | | |
|----------|--|----|
| 7.3. | Arcillas y su naturaleza química | 23 |
| 7.4. | Propiedades físicas, químicas y mecánicas de las arcillas..... | 24 |
| 7.4.1. | Propiedades físicas | 24 |
| 7.4.2. | Propiedades mecánicas | 24 |
| 7.4.3. | Propiedades químicas..... | 25 |
| 7.5. | Características y estructuración de las partículas minerales de suelos finos..... | 25 |
| 7.5.1. | Estructuración del suelo | 26 |
| 7.5.1.1. | Estructura panaloide | 26 |
| 7.5.1.2. | Estructura floculenta..... | 27 |
| 7.5.1.3. | Estructura compuesta | 28 |
| 7.5.1.4. | Castillo de naipes | 28 |
| 7.5.1.5. | Estructura dispersa | 29 |
| 7.6. | Caracterización geotécnica de las arcillas..... | 30 |
| 7.6.1. | Propiedades físico-mecánicas..... | 30 |
| 7.6.1.1. | Tamaño de partícula y color..... | 30 |
| 7.6.1.2. | Resistencia..... | 31 |
| 7.6.1.3. | Plasticidad..... | 31 |
| 7.6.1.4. | Permeabilidad y porosidad..... | 31 |
| 7.7. | Subrasante | 31 |
| 7.7.1. | Factores que influyen en la subrasante..... | 33 |
| 7.7.1.1. | Capacidad portante del suelo..... | 33 |
| 7.7.1.2. | Contenido de humedad del suelo..... | 33 |
| 7.7.1.3. | Contracción o expansión del suelo..... | 34 |
| 7.8. | Métodos de estabilización de suelos | 34 |
| 7.8.1. | Estabilización mecánica | 36 |
| 7.8.1.1. | Estabilización de suelos por compactación | 36 |
| 7.8.1.2. | Estabilización de suelos por mezcla..... | 37 |

| | | |
|-----------|---|----|
| 7.8.2. | Estabilización por drenaje..... | 38 |
| 7.8.3. | Estabilización por medios eléctricos | 38 |
| 7.8.4. | Estabilización por empleo de calor y calcinación.... | 39 |
| 7.8.5. | Estabilización química | 39 |
| 7.9. | Ensayos de laboratorio | 41 |
| 7.9.1. | Granulometría según ASTM D-422 | 41 |
| 7.9.2. | Límite líquido | 42 |
| 7.9.3. | Límite plástico..... | 42 |
| 7.9.4. | Proctor modificado..... | 42 |
| 7.9.5. | Ensayo CBR (California Bearing Ratio) | 43 |
| 7.9.6. | Ensayo de expansión | 44 |
| 7.10. | Clasificación del suelo | 45 |
| 7.10.1. | Sistema unificado (USCS) | 45 |
| 7.10.1.1. | Suelos de grano fino..... | 46 |
| 7.10.2. | Método AASHTO | 48 |
| 7.11. | Parámetros de clasificación de suelos..... | 49 |
| 7.11.1. | Parámetros de naturaleza | 50 |
| 7.11.1.1. | La granulometría..... | 50 |
| 7.11.1.2. | Plasticidad | 50 |
| 8. | HIPÓTESIS | 53 |
| 9. | PROPUESTA DE ÍNDICE DE CONTENIDOS | 57 |
| 10. | METODOLOGÍA..... | 63 |
| 10.1. | Primera fase: recopilación de información | 63 |
| 10.2. | Segunda fase: recopilación de muestras y caracterización de los materiales a utilizar | 63 |
| 10.3. | Tercera fase: ensayos de laboratorio..... | 64 |

| | | |
|-------|--|----|
| 10.4. | Cuarta fase: análisis de resultados..... | 64 |
| 11. | TÉCNICAS DE ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN | 67 |
| 12. | CRONOGRAMA | 69 |
| 13. | FACTIBILIDAD DEL ESTUDIO | 71 |
| 14. | REFERENCIAS | 73 |

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

| | | |
|-----|--|----|
| 1. | Combinación de átomos que conforman los minerales arcillosos | 20 |
| 2. | Diagrama de estructuras de (a) caolinita; (b) ilita; (c) monmorilonita ... | 23 |
| 3. | Estructura panaloide | 27 |
| 4. | Estructura floculenta..... | 27 |
| 5. | Estructura compuesta | 28 |
| 6. | Estructura en castillo de naipes | 29 |
| 7. | Estructura dispersa | 29 |
| 8. | Sección transversal de un pavimento flexible | 32 |
| 9. | Carta de plasticidad, método de clasificación USCS..... | 47 |
| 10. | Cronograma de actividades | 69 |

TABLAS

| | | |
|------|---|----|
| I. | Sistema de clasificación de suelos de la AASHTO | 49 |
| II. | Operacionalización de la hipótesis | 53 |
| III. | Resumen de costos..... | 72 |

LISTA DE SÍMBOLOS

| Símbolo | Significado |
|----------------|--------------------|
| % | Porcentaje |
| Q | Quetzales |

GLOSARIO

| | |
|---------------------|---|
| AASHTO | Asociación Americana de Oficiales de Carreteras Estatales y Transportes, por sus siglas en inglés American Association of State Highway and Transportation Officials. |
| Arcilla | Sedimento o depósito mineral que es plástico cuando se humedece, es un material muy fino compuesto principalmente por silicatos de aluminio hidratados. |
| Caolinita | Mineral de arcilla, silicato natural de aluminio que constituye un elemento propio de la arcilla. |
| CBR | Relación de soporte California, por sus siglas en inglés California Bearing Ratio. |
| EAFS | Escorias negras de horno eléctrico de arco. |
| Hidrofobante | Actividad donde una sustancia es miscible con el agua. |
| Ilita | Mineral de arcilla, silicato laminar, micácea no expansiva. |
| LFS | Escoria blanca de horno de cuchara. |

| | |
|------------------------|--|
| Límite líquido | Frontera entre los estados semilíquido y plástico del suelo. |
| Límite plástico | Frontera convencional entre los estados plásticos y semisólidos del suelo. |
| Monmorilonita | Mineral del grupo de los silicatos, perteneciente a la arcilla expansiva. |
| Subrasante | Capa de la estructura de pavimento, la cual consta de la cimentación de esta. |
| USCS | Sistema Unificado de Clasificación de Suelos, por sus siglas en inglés Unified Soil Classification System. |

RESUMEN

En este trabajo se estudiará la idoneidad del aprovechamiento de un material de desecho (arena cuarzo-feldespática) en la estabilización de suelos arcillosos de mala calidad que serán utilizados como subrasantes de carreteras, pisos industriales, terraplenes y plataformas.

Para conseguir las propiedades resistentes apropiadas en terrenos naturales arcillosos, sobre los que se construyen obras civiles e infraestructuras es preciso mezclarlos con materiales capaces de mejorar las propiedades de los suelos, o con ciertos subproductos que pueden ser empleados con esta finalidad, como lo es la arena cuarzo-feldespática.

Se analizará las propiedades del material de desecho (arena cuarzo-feldespática) y de varios suelos arcillosos susceptibles de estabilización en el municipio de Chimaltenango; tras la elaboración de mezclas entre ambos en distintas proporciones.

Se realizará diversos ensayos en laboratorio para caracterizar los materiales y mezclas entre ambos. Los resultados obtenidos a través de la experimentación, indicará el comportamiento del suelo estabilizado con arena cuarzo-feldespática, finalmente se correlacionará el cambio en las características y propiedades de este, como su expansividad y capacidad portante con el fin de evaluar la efectividad de este agente estabilizador.

1. INTRODUCCIÓN

Los suelos arcillosos frecuentemente no cumplen con los requerimientos necesarios para ser usados en proyectos de pavimentación, por lo que es necesario estabilizarlos para mejorar sus propiedades y poder ser utilizados para el fin que se requiere.

La subrasante de un pavimento es la capa más crítica e importante para una infraestructura por la cual transita un sinfín de vehículos o por la magnitud de las cargas a las que estará sometida, por esta razón es esencial asegurar un pavimento de buena calidad, que cumpla con todos los requisitos que las normas exigen. Normalmente las subrasantes se construyen con la mayor cantidad posible del material del lugar y cuando el suelo existente es de carácter arcilloso, se producen cambios de volumen cuando está en contacto con la humedad, lo cual afecta las propiedades mecánicas del suelo, en consecuencia, se produce baches, fisuras y hundimientos, de manera que se reduce la vida útil del pavimento.

Por tal motivo, la presente investigación busca determinar la estabilización de subrasantes conformadas por suelos arcillosos por medio de la adición de un agente estabilizador, en este caso un material de desecho (arena cuarzo-feldespática). Con los resultados obtenidos de esta investigación se aportará una solución para la estabilización de suelos arcillosos que serán utilizados como subrasantes de carreteras, pisos industriales, terraplenes y plataformas.

Esta investigación brindará una nueva solución económica con un nuevo material para la estabilización de suelos, buscando lograr una mejora en la reducción de la plasticidad de las arcillas y así incrementar su valor soporte.

La investigación será de diseño experimental-correlacional, estará comprendida en seis capítulos: el primero, hace una revisión de estudios previos de estabilización de subrasantes conformadas por suelos arcillosos; en el segundo capítulo, se realizará una revisión bibliográfica de teorías sobre arcillas, estabilización de suelos y técnicas de estabilización; el tercer capítulo, constará la recopilación de muestras, caracterización de los materiales y clasificación de los suelos a utilizar; en el cuarto capítulo, se realizará mezclas de arena cuarzo-feldespática en proporciones del 5 %, 10 %, 15 % y 20 % con relación al peso seco del suelo y en el quinto capítulo se realizará distintos ensayos a estas mezclas para determinar en qué medida se logra mejorar las características y propiedades del suelo.

Por último, se analizará la información obtenida para determinar el grado de mejora de los suelos estabilizados en comparación con los suelos en estado natural. Al final de la investigación se presentará las conclusiones y recomendaciones en la que se espera aportar nuevos conocimientos, producto del análisis y experimentación realizada en esta investigación.

2. ANTECEDENTES

En los últimos años se han desarrollado varias investigaciones con el fin de solucionar la inestabilidad de los suelos arcillosos, estas investigaciones han explorado el uso de diversos materiales estabilizadores que van desde los materiales más tradicionales, como la cal, hasta productos de desecho o naturales, dentro de estos se pueden destacar a nivel latinoamericano los siguientes trabajos:

En el artículo caracterización fisicoquímica de arcillas del municipio de Guapi, Costa Pacífica Caucana (Colombia), se hizo una caracterización física y química para determinar las propiedades de los suelos arcillosos y potencializar su uso, la caracterización se hizo por medio de: espectroscopia infrarroja, difracción de rayos X, fluorescencia de rayos X, análisis térmicos, microscopía electrónica de transmisión, límites de consistencia y peso específico del material. Los resultados de los ensayos demostraron un alto índice de plasticidad, también, evidenció que según el sistema unificado de clasificación de suelos USCS por sus siglas en inglés (*Unified Soil Classification System*), las arcillas son pertenecientes al grupo CH, es decir, arcillas de alta plasticidad (Muñoz y Mancilla, 2007).

De los análisis químicos, se determinó que los elevados índices de sílice en las arcillas indica que su principal material arcilloso es la caolinita, para determinar la plasticidad de las arcillas se realizó ensayos de límite líquido, límite plástico, expansión y peso específico; para la caracterización fisicoquímica se realizó ensayos de espectroscopia infrarroja, difracción de rayos X y para conocer la morfología y el tamaño de partícula del material se utilizó un microscopio

electrónico. A partir de este estudio se puede conocer las propiedades características de las arcillas y probar que la plasticidad y cambios de volumen que presenta depende del contenido mineral que posee el material, así como el tamaño de sus partículas, este estudio es una guía para conocer los ensayos que debe de realizarse a los suelos para caracterizarlos física y mineralógicamente.

En la tesis diferencias de las propiedades físico-mecánicas en arcillas de tres formaciones geológicas, distribuidas en el bloque Chortí, República de Guatemala, se realizó una investigación de enfoque correlacional-experimental, se hizo una revisión de los conceptos generales sobre las arcillas, su naturaleza y comportamiento, también se analizó las arcillas como estructura de suelo. Asimismo, se realizó ensayos de laboratorio para la caracterización de las arcillas, a partir de estos ensayos se determinó las diferencias de las propiedades mecánicas de las arcillas, que derivan de su formación química-mineralógico, estas son en mayor parte cualitativas, es decir, color, textura, tamaño de grano, etc., sin embargo, los procesos de meteorización es lo que determina los cambios significativos en las propiedades cuantitativas, las cuales rigen el comportamiento mecánico de estas (Castellanos, 2015).

Este estudio evidencia que la antigüedad en las formaciones geológicas debe usarse como parámetro inicial en la clasificación de las arcillas, ya que su origen determina las características físicas y mecánicas del material.

En la tesis estabilización de suelos arcillosos de macas con valores de CBR menores al 5 % y límites líquidos superiores al 100 %, para utilizarlo como subrasantes en carreteras”, se investigó la estabilización de suelos arcillosos con límites líquidos por medio de la adición de cal viva, con el fin de usarlo como subrasantes estabilizadas en carreteras de pavimento flexible, el tipo de investigación fue correlacional y consistió en realizar mezclas de suelo con el

10 %, 20 %, 30 % y 40 % de cal con relación al peso seco del suelo para luego ser analizado mediante ensayos de laboratorio (Castillo, 2017).

La investigación concluyó que al mezclar el suelo con un 20 % de cal, se obtiene un porcentaje de reducción del 169 % al 153,9 % en el LL (límite líquido) y se logra reducir la expansión del suelo en un 100 %, se descubrió que sobre el 20 % de adición de cal viva la reducción del LL no es significativa; el valor CBR aumenta alrededor de un 15,8 % por cada porcentaje de cal que se añada. A través de esta investigación se determina que la cal viva empleada como material estabilizante logra controlar los cambios de volumen en los suelos arcillosos al adicionar un 20 % de cal viva al suelo, por debajo de este porcentaje los cambios que se logró en las propiedades mecánicas y físicas del suelo no son los óptimos y por encima de este valor el cambio que se alcanzó no es significativo, dichos datos son útiles para la experimentación que se realizará.

En la tesis estabilización de suelos arcillosos con ceniza de cáscara de arroz para el mejoramiento de subrasante, se evaluó si las cenizas de cáscara de arroz pueden ser usadas como material estabilizante de suelos arcillosos, para emplearlo a nivel de subrasante de un pavimento, el tipo de investigación fue experimental, se realizó muestreos obtenidos a través de la realización de calicatas de 1,5 metros de profundidad, se observó que se logró una disminución de expansión del suelo conforme se iba incrementado el porcentaje de ceniza de cáscara de arroz, hasta alcanzar un 0 % de expansión (Castro, 2017).

Al obtener los resultados de compactación se identificó una disminución de la densidad máxima seca del suelo estabilizado, lo cual logró un aumento del contenido óptimo de humedad y un aumento del valor CBR de 5 % hasta 19,4 % con una mezcla con 20 % de ceniza de cáscara de arroz, para las combinaciones de suelo arcilloso, ceniza de cáscara de arroz y cal se logró incrementar de 5 % hasta 38,5 % con un 20 % de contenido de ceniza de cáscara de arroz.

Luego de analizar los resultados se observó que el uso de la ceniza de cáscara de arroz como material estabilizante de suelos en obras de pavimentos promete buenos resultados; sin embargo, los resultados no son muy significativos al emplearlo solo, siendo más favorables cuando se utiliza como agente estabilizador secundario.

Nuevamente un estudio demuestra que al adicionar un 20 % de un material estabilizante a la mezcla con un suelo se logra una mejora en las propiedades físicas y mecánicas de este. Se consiguió una reducción de expansión o cambios de volumen e incrementar el valor soporte del suelo arcilloso estudiado.

En la tesis estabilización de suelos arcillosos adicionando ceniza de caña de azúcar en el tramo de Pinar-Marian, distrito de independencia 2018, se analizó la estabilización de suelos arcillosos adicionando ceniza de caña de azúcar, la investigación fue de enfoque cuantitativo, experimental y correlacional, para el cual se tomó muestras de suelo arcilloso en el tramo Pinar-Marian, luego de realizar los ensayos de límites de consistencia, Proctor modificado y CBR con la mezcla del suelo con las cenizas de caña de azúcar en porcentajes del 10, 20 y 30 % se determinó la estabilización de este suelo para fines de pavimentación, se consiguió resultados favorables, en el que se alcanzó mejorar las propiedades físicas y mecánicas del suelo, el suelo logró estabilizarse con la adición del 20 % de cenizas de caña de azúcar con referencia al peso de la muestra, se obtuvo un incremento en el valor CBR de un 15,18 % a un 95 % (Espinoza, 2018).

También se logró una reducción del índice de plasticidad de 16,11 % a 9,73 %, así mismo se consiguió disminuir el porcentaje de expansión del suelo de 1,47 % a 0,24 %. Esta investigación demuestra una vez más que la adición de un 20 % de material estabilizante al suelo consigue mejorar sus propiedades,

lo cual servirá como un parámetro de evaluación fundamental en la investigación que se realizará.

En la tesis utilización de bolsas de polietileno para el mejoramiento de suelo a nivel de la subrasante en el Jr. Arequipa, progresiva km 0+000 al km 0+100 distrito de Orcotuna, Perú, se examinó cuan influyente son las bolsas de polietileno en un suelo a nivel de la subrasante, la investigación fue de enfoque experimental y para la toma de muestra se realizó calicatas de 1.5 metros de profundidad, también se obtuvo muestras de bancos de suelos arcillosos ubicados en el distrito de Orcotuna, Perú. Con las muestras recolectadas se realizó mezclas con bolsas de polietileno fundido en forma de grumos al 2 %, 4 %, 6 %, 8 % y 10 % con relación al peso seco del suelo, se determinó que las bolsas de polietileno poseen una gran influencia en la mejora de la subrasante logrando que el CBR aumente un promedio de 7,98 %, asimismo se produjo una mejora de las propiedades físicas y mecánicas; se comprobó que la muestra del tramo de la progresiva KM 0+000 al km 0+100 presenta gran presencia de arcilla y por medio de la adición de bolsas de polietileno fundido en forma de grumos hace que tenga mayor fricción y por ende incrementa su capacidad portante (Leiva, 2016).

Dicha investigación demuestra que se puede emplear un sin fin de materiales como agente estabilizador del suelo, confirmando que el material que se prevé utilizar en esta investigación posee un gran potencial como agente estabilizador, teoría que se examinará en este estudio.

En la tesis estabilización de suelos arcillosos con cenizas de carbón para su uso como subrasante mejorada y/o sub base de pavimentos” se estudió el efecto que produce la adición de cenizas volantes de carbón en un suelo arcilloso con el fin de evaluar su uso en obras de pavimentación, la investigación fue de

enfoque correlacional, se tomó muestras en la ciudad de Villarica, provincia de Oxapampa el cual era un suelo de carácter arcilloso, se realizó varias pruebas para caracterizar el suelo y la ceniza volante para luego realizar distintas mezclas en distintas proporciones, finalmente se dimensionó una estructura típica de pavimento y diseño según método *National Association of Australian State Road Authorities* -NAASRA- (Pérez, 2012).

La investigación concluyó que la ceniza volante funciona como aditivo inhibidor de las propiedades expansivas del material, pero este requiere ser adicionando en porcentajes excesivos, al menos en el caso de una arcilla expansiva, se necesita adicionar un promedio mayor al 20 % de ceniza volante para lograr disminuir los efectos de expansión en el suelo arcilloso, se observó que los valores de espesores de pavimentos se reducen conforme se incrementa el valor de CBR, finalmente se determinó que las arcillas en combinación con cenizas volantes y cemento en un 3 % da buenos resultados mejorando la resistencia del suelo arcilloso en un promedio de 7,7 % de CBR.

Dicho estudio evaluó el efecto de un material de desecho como agente estabilizador en suelos arcillosos para su uso como subrasante de pavimentos, se puede observar una mejora en las propiedades del suelo al ser estabilizado, logrando una reducción considerable en el espesor del pavimento lo cual genera un ahorro en los costos de ejecución de proyecto. Esta investigación será utilizada como una guía para el proceso metodológico y se espera que los resultados de este estudio sean similares a los descritos en esta investigación.

En la tesis doctoral titulada aprovechamiento de escorias blancas (LFS) y negras (EAFS) de acería eléctrica en la estabilización de suelos y en capas de firmes de caminos rurales la investigación fue de enfoque experimental y correlacional, cuyo fin fue caracterizar las escorias LFS y EAFS para utilizarlas

como agentes estabilizadores de suelos arcillosos y realizar una comparación económica de las subrasantes estabilizadas *in situ* versus las puesta en obra, se comprobó que con la adición de escorias de horno de cuchara LFS a los suelos arcillosos en distintas proporciones, los resultados obtenidos indican que se obtiene un comportamiento similar al de las mezclas de suelo-cal, registrando una mejora de las propiedades de suelos modificados en cuanto a su expansividad y su capacidad portante, de manera general, las mezclas de suelos y escorias reducen severamente el porcentaje de hinchamiento libre de los suelos originales determinado en la célula edométrica, se cree que este fenómeno puede deberse al intercambio iónico producido entre los suelos y las escorias y a reacciones puzolánicas (Ortega, 2011).

Este estudio indica que el efecto de la estabilización de un suelo con un material de desecho es similar a lo que ocurre cuando se estabiliza suelos con cal, es decir, que logra controlar los cambios de volumen del suelo y por ende aumenta su capacidad soporte, por este motivo esta investigación es de suma importancia ya que no permite descartar el uso de un material de desecho como un agente estabilizador de arcillas.

El artículo científico estabilización de subrasantes con productos químicos cuyo fin fue el de estudiar el estado del arte de la estabilización de subrasantes con productos químicos, a través, de la exploración del uso de aceite sulfonado, cemento aditivado y enzimas orgánicas Hidrofobante, en este estudio se realizó varias mezclas del suelo con sustancias naturales y sintéticas para evaluar su eficacia y realizar una comparación económica de las subrasantes estabilizadas *in situ* versus las puesta en obra (Díez, Montes y Caicedo, 2012).

Se concluyó, que para garantizar el éxito del tratamiento con cualquiera de los productos químicos debe por lo menos conocerse con mucha claridad el tipo

de suelo que se tiene, ya que con este factor se podrá definir el tipo de producto a emplear y la dosificación que se debe usar; sin olvidar que factores como la homogenización del producto en la mezcla suelo agua y la humedad natural del terreno también son determinantes en el momento de garantizar los resultados esperados.

Este estudio será de gran utilidad ya que a partir de él se podrá hacer una revisión del estado del arte de la estabilización de suelos arcillosos, así como, de los distintos productos empleados a través del tiempo como agentes estabilizadores.

En la tesis estudio de un suelo arcilloso expansivo del Valle Central Occidental de Costa Rica para su uso como subrasante tuvo como objetivo evaluar las características físicas y mecánicas de las arcillas expansivas, así como estabilizarlas químicamente para mejorar su desempeño como subrasante, la investigación concluyó que los materiales ensayados eran altamente expansivos, finalmente se determinó que con un 6 % de cal puede estabilizarse el suelo logrando reducir la expansión y mejorar su valor soporte CBR. Dicho estudio sirve como fuente de información sobre estabilización química de suelos arcillosos (Castro, 2012).

Estas investigaciones han explorado el uso de diversos materiales sintéticos, naturales y químicos para la estabilización de subrasantes, bases o subbase de pavimentos, sin embargo, no hay un estudio que explore el uso de una arena compuesta por cuarzo y feldespato como agente estabilizador.

3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Una estructura vial está formada por las capas de: subrasante, subbase, base y capa de rodadura. La capa más crítica es la subrasante, ya que está formada por el suelo natural existente en el área, en la mayoría de los casos el material arcilloso no cumple con las especificaciones requeridas para ser utilizada como subrasante, lo cual produce que, aunque las capas superiores cumplan técnicamente, el tramo vial presente problemas tales como fisuras, baches y hasta hundimientos, esta situación también se presenta en subrasantes de terraplenes o subrasantes de pisos industriales.

Esta problemática se presenta principalmente en suelos de carácter arcilloso, ya que, debido a su naturaleza, presenta cambios de volumen y bajo valor soporte, en consecuencia, la vida útil de los pavimentos es menor que el promedio de la mayoría. Por lo tanto, el presente estudio busca proponer una alternativa de estabilización que reduzca los costos de construcción, a través de la estabilización de suelos arcillosos por medio de la adición de arena cuarzo-feldespática para su uso como subrasante de pavimentos. Cabe mencionar la necesidad de cuestionar lo siguiente:

- Pregunta central

¿Cómo influye la adición de arena cuarzo-feldespática en el comportamiento de suelos arcillosos (propiedades químicas, físicas y mecánicas del suelo) para su uso como subrasante de pavimentos?

- Preguntas auxiliares
 - ¿Cuáles son las propiedades (químicas, físicas y mecánicas) de la arena cuarzo-feldespática y cómo influye en la resistencia del suelo arcilloso (CBR)?
 - ¿Cuál es el porcentaje óptimo de adición de arena cuarzo-feldespática con el cuál se obtienen mejores parámetros para fines de la subrasante?
 - ¿Cuál es el nivel de mejoramiento de las propiedades de los suelos estabilizados con arena cuarzo-feldespática en comparación con los suelos en estado natural?
 - ¿Cuánto se reduce el espesor del pavimento en los suelos estabilizados?

4. JUSTIFICACIÓN

Al desarrollar esta investigación se determinará una alternativa para la estabilización de suelos arcillosos por medio del uso de un material de desecho (arena cuarzo-feldespática) como sustituto de otro agente estabilizador, mediante técnicas aplicables y funcionales donde se obtendrá resultados de subrasantes mejorados, subbase y terraplenes, de tal manera que cumplan las condiciones que exigen este tipo de infraestructura, se prevé que la arena cuarzo-feldespática mejore la plasticidad del suelo arcilloso, lo cual a la vez, está relacionado a la mejora de su resistencia o capacidad portante.

Esta investigación estará basada en argumentos técnicos, los criterios que se desarrollen podrán ser analizados y aplicados por profesionales, constructores y estudiantes relacionados al campo de geotecnia y vías terrestres, proveyendo así, una solución más a la estabilización de suelos, en este caso a los más problemáticos, es decir, los suelos de carácter arcilloso, los resultados obtenidos podría ser aplicados al momento de ejecutar subrasantes de carreteras, pisos industriales, terraplenes y plataformas; como usuarios la empresa SICASA (Sílice de Centroamérica S.A) se verá beneficiada al reducir las cantidades de desecho acumulado anualmente en su propiedad.

Son varias las circunstancias que justifican el mejoramiento de los suelos del sitio, como lo es la demanda de un pavimento de calidad, que va ligado a una mayor durabilidad de los materiales y una elevada capacidad soporte CBR (*California Bearing Ratio*). Este estudio busca lograr una subrasante de calidad que cumpla con los parámetros y requisitos que exigen una infraestructura de tal importancia, se utilizará como estabilizante de suelos arcillosos una arena

cuarzo-feldespática (este material es almacenado en un banco de material ubicado en San Miguel Pochuta, Chimaltenango), dado el origen del material y la inmensa cantidad que se almacena constantemente, no tiene ningún costo más que el transporte del material al lugar a estabilizar.

Para lograr la estabilización de los suelos arcillosos se recopilará muestras alteradas de suelo en el municipio, se caracterizará el suelo y la arena cuarzo-feldespática y se realizará mezclas de suelo-arena en distintas proporciones para realizar ensayos granulométricos, límites de Atterberg, Proctor modificado CBR y el ensayo de expansión según norma ASTM-D4829, con el fin de determinar el grado de mejora de las propiedades del suelo estudiado para su uso como subrasante.

5. OBJETIVOS

5.1. General

Determinar cómo la adición de arena cuarzo-feldespática influirá en el comportamiento de suelos arcillosos (propiedades químicas, físicas y mecánicas del suelo) para su uso como subrasante de pavimentos.

5.2. Específicos

- Caracterizar las propiedades (químicas, físicas y mecánicas) de la arena cuarzo-feldespática y su influencia en la resistencia de suelos arcillosos (CBR).
- Evaluar el porcentaje óptimo de adición de arena cuarzo-feldespática con el cual se obtienen mejores parámetros para fines de subrasante.
- Comparar el nivel de mejora de las propiedades de los suelos estabilizados con los suelos en estado natural para su uso como subrasante.
- Evaluar el porcentaje de reducción de espesor de pavimento en suelos estabilizados con arena cuarzo-feldespática.

6. ALCANCE DE LA INVESTIGACIÓN

La investigación será de enfoque experimental y correlacional, ya que pretende evaluar las características físicas, mecánicas y químicas de los suelos arcillosos en estado natural y de los estabilizados con arena cuarzo-feldespática por medio de muestreos y experimentación a nivel de laboratorio.

Para el muestreo de los materiales se realizará exploraciones en el municipio de Chimaltenango para la obtención de muestras alteradas de suelo arcilloso, la arena cuarzo-feldespática se obtendrá del banco de material de la empresa SICASA ubicado en San Miguel Pochuta, Chimaltenango; una vez recopiladas las muestras, se procederá a caracterizar geotécnicamente ambos materiales (suelo y arena cuarzo-feldespática), para conocer sus propiedades físicas y mecánicas; posteriormente se realizará mezclas del suelo con la arena en distintas proporciones y se determinará la mejora de las propiedades del suelo al ser estabilizado con la arena por medio de ensayos de laboratorio; finalmente se evaluará el suelo estabilizado para su uso como subrasante de pavimentos y se analizará la reducción dada en el espesor de pavimentos de estos suelos estabilizados por medio del método AASHTO.

El principal beneficiario es la empresa SICASA ya que con el uso de la arena cuarzo-feldespática en subrasantes se reducirá el volumen de almacenamiento de este material, también se verá beneficiado toda persona originaria de la región que desee hacer uso de este material, ejecutores de proyectos viales y pisos industriales.

Dentro de los usuarios están los profesionales ejecutores de proyectos relacionados al campo de la geotecnia, profesionales y estudiantes relacionados a el campo de ingeniería civil, estudiantes y profesionales académicos que buscan tesis que involucran las variables que se consideran en esta investigación, así como, diseñadores de proyectos viales o de construcción que buscan una alternativa de estabilización de suelos.

7. MARCO TEÓRICO

7.1. Suelos arcillosos

Las arcillas son constituyentes esenciales de gran parte de los suelos y sedimentos, debido a ser productos finales de la meteorización de los silicatos, formados a mayores presiones y temperatura. Se clasifica por su textura como clásticos; se mantiene ciertos minerales antígenos unidos por un matriz cementante (Chupina, 2006).

El contenido de arcilla en un suelo o roca tiene mucho que ver según los factores climáticos incidentes. La cantidad de arcilla aumenta en función de la humedad y la temperatura, pasando a escala logarítmica para condiciones tropicales y subtropicales (Chupina, 2006).

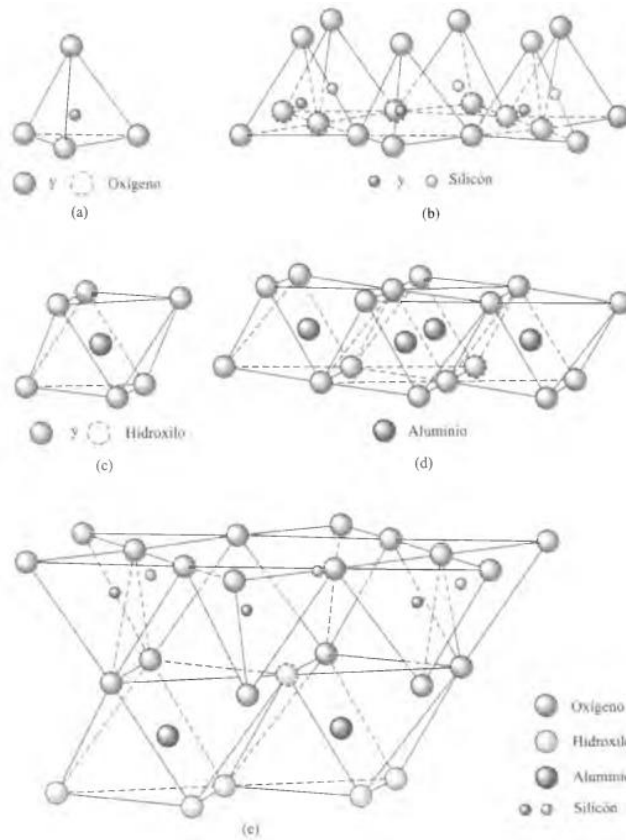
Los suelos arcillosos se caracterizan por ser suelos finos, catalogados de esta manera por el tamaño de sus partículas, a la vez estos suelos pueden clasificarse de acuerdo con el tipo de minerales que contiene el suelo.

7.2. Minerales arcillosos

Los minerales arcillosos son complejos silicatos de aluminio compuestos de una o dos unidades básicas: tetraedro de sílice y octaedro de alúmina. Cada tetraedro consiste en cuatro átomos de oxígeno que rodean a un átomo de silicio. La combinación de unidades de tetraedros de sílice da una lámina de sílice, tres átomos de oxígeno en la base de cada tetraedro son compartidos por tetraedros vecinos (Braja, 2012, pág. 3).

Las unidades octaédricas consisten en seis hidroxilos que rodean un átomo de aluminio, las combinaciones de las unidades octaédricas de hidroxilos de aluminio dan una lámina octaédrica, en ocasiones el magnesio reemplaza los átomos de aluminio en las unidades octaédricas; en tal caso la lámina octaédrica se llama lámina de brucita (Braja, 2012, pág. 3).

Figura 1. **Combinación de átomos que conforman los minerales arcillosos**



(a) Tetraedro de sílice; (b) lámina de sílice; (c) octaedro de alúmina (óxido de aluminio); (d) lámina octaédrica (gibbsita); (e) lámina elemental de sílice-gibbsita (según Grim, 1959).

Fuente: Braja. (2012). *Fundamentos de ingeniería de cimentaciones*.

En una lámina de sílice, cada átomo de silicio con una valencia positiva de cuatro está unido a cuatro átomos de oxígeno con una valencia negativa total de ocho, sin embargo, en la base del tetraedro cada átomo de oxígeno está unido a dos átomos de silicio, lo cual significa que el átomo superior de oxígeno de cada tetraedro tiene una carga de valencia negativa de uno por ser contrabalanceada (Braja, 2012).

Cuando la lámina de sílice es colocada sobre la lámina octaédrica, los átomos de oxígeno reemplazan a los hidroxilos para satisfacer sus enlaces de valencia, las cuales pueden clasificarse como: caolinita, illita y la monmorilonita (Braja, 2012).

7.2.1. Caolinita

Los suelos con caolinita como mineral de arcilla, presentan un comportamiento normal en los ensayos, presenta una baja a media plasticidad y buena permeabilidad.

El efecto del aumento de humedad sobre las propiedades del suelo generalmente no es importante. La caolinita consiste en capas repetidas de láminas elementales de sílice-gibbsita, cada capa se mantiene unida entre sí por enlaces hidrogénicos (Braja, 2012).

7.2.2. Monmorilonita

La monmorilonita tiene una estructura similar a la illita, es decir, una lámina de gibbsita intercalada entre dos láminas de sílice.

En la monmorilonita hay sustitución isomorfa (sustitución de un elemento por otro, sin cambio en la forma cristalina) de magnesio y hierro, por aluminio en las láminas octaédricas, los iones de potasio no están presentes y una gran cantidad de agua es atraída hacia los espacios entre las capas (Braja, 2012).

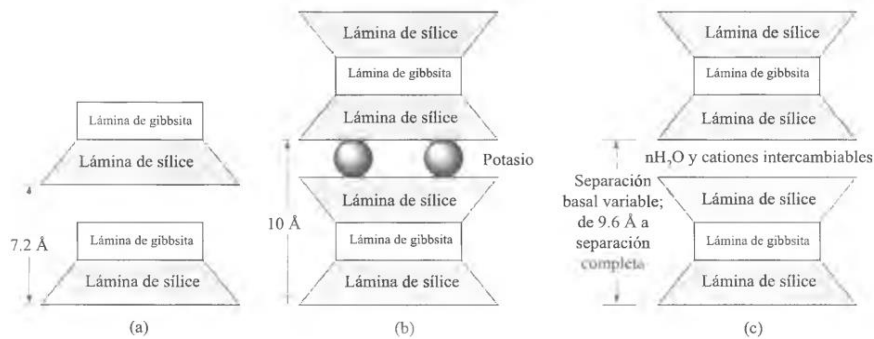
Los materiales con contenidos apreciables de monmorilonita poseen muy alta plasticidad y baja permeabilidad. El efecto del aumento de humedad puede resultar en una disminución importante de la resistencia al cortante. La montmorillonita tiene un alto nivel de reacción con el cemento y la cal (Braja, 2012).

7.2.3. Illita

La illita consiste en una lámina de gibbsita enlazada a dos láminas de sílice, una arriba y otra abajo, a veces, también es llamada mica arcillosa. Las capas de illita están entrelazadas por iones de potasio (Braja, 2012).

La carga negativa para balancear los iones de potasio proviene de la sustitución de aluminio por silicio en las láminas tetraédricas. Al aumentar la humedad de una Aloisita puede disminuir la resistencia al cortante en forma apreciable (Braja, 2012).

Figura 2. Diagrama de estructuras de (a) caolinita; (b) illita; (c) monmorilonita



Fuente: Braja. (2012). *Fundamentos de ingeniería de cimentaciones*.

7.3. Arcillas y su naturaleza química

Las arcillas son materiales que poseen partículas microscópicas procedentes de la composición química causada por la meteorización de las rocas, estos suelos se caracterizan por ser plásticos cuando se ven afectados por la humedad y suelen ser suelos duros cuando están secos.

Las arcillas generalmente se clasifican como rocas sedimentarias compuestas por uno o varios minerales, son ricas en silicatos hidratados de aluminio, hierro o magnesio, alúmina hidratada u oxido férrico, dotadas comúnmente de plasticidad cuando está suficientemente pulverizada y humedecida, rígida cuando esta seca y vítreo cuando se calcina al estar sometido a altas temperaturas (Chupina, 2006).

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

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

La composición química de las arcillas permite tener una idea acerca de una serie de propiedades tales como la resistencia al fuego, estabilidad biológica, las características mecánicas y otras características técnicas, la cual resulta cómodo expresarla mediante la cantidad de óxidos, en porcentaje, que estos contienen. Los óxidos básicos y ácidos están vinculados químicamente entre sí y dan lugar a la formación de minerales que define muchas de las propiedades del material (Chupina, 2006).

7.4. Propiedades físicas, químicas y mecánicas de las arcillas

La arcilla se emplea como materiales de ingeniería debido a su resistencia mecánica, dureza, resistencia al calor y a la corrosión elevada, así como a sus propiedades eléctricas, magnéticas y ópticas deseables (Chupina, 2006).

7.4.1. Propiedades físicas

Se refiere a las propiedades geológicas de la arcilla, es decir, su plasticidad y viscosidad, otras propiedades hidrofísicas, físico térmicas, acústicas, eléctricas son las que establecen la cualidad del mineral respecto a diferentes procesos físicos.

7.4.2. Propiedades mecánicas

Se refieren al proceder del material al ser sometido a la acción destructiva y deformativa de cargas mecánicas, como lo es la resistencia mecánica, dureza, elasticidad, plasticidad y fragilidad.

7.4.3. Propiedades químicas

Capacidad para las transformaciones químicas y la estabilidad contra la corrosión química.

7.5. Características y estructuración de las partículas minerales de suelos finos

La forma de las partículas minerales con las que está conformado un suelo determina su comportamiento, así como su plasticidad o resistencia al esfuerzo cortantes.

En los suelos finos, la forma de los componentes tiende a ser aplastada, por lo que los minerales de arcilla adoptan en general la forma laminar, en que dos dimensiones son incomparablemente más grandes que la tercera; como excepción, algunos minerales de arcilla poseen forma acicular, en la que una dimensión es mucho más grande que las otras dos (Rico y Del Castillo).

La superficie de cada partícula de suelo fino, posee carga eléctrica negativa, por lo menos en sus partes planas, la intensidad de la carga depende de la estructuración y composición de la arcilla, las fuerzas que definen la estructura son fundamentalmente de naturaleza electromagnética.

Así, la partícula atrae cationes de diferentes elementos químicos existentes en la misma, tales como Na^+ , K^+ , Ca^{++} , Mg^{++} , Al^{+++} , Fe^{+++} , etc. Lo anterior conduce, en primer lugar, al hecho de que cada partícula individual de arcilla se ve rodeada de una capa de partículas de agua orientadas en forma definida y ligadas a su estructura (agua absorbida); cuando la partícula atrae cationes de otros elementos químicos, estos atraen a su vez

a otras moléculas de agua, orientadas, por lo que el espesor de la película de agua absorbida por el cristal de arcilla es función no solo de la naturaleza del mismo, sino también del tipo de los cationes atraídos (Rico y Del Castillo, 2010, p. 21).

En base a lo anterior, se puede determinar que las propiedades mecánicas de una arcilla podrán cambiar, si se hace variar los cationes contenidos en sus complejos de absorción, de manera que variando estos logre tenerse propiedades mecánicas distintas a las de la arcilla original, lo cual da lugar a la estabilización química del suelo.

7.5.1. Estructuración del suelo

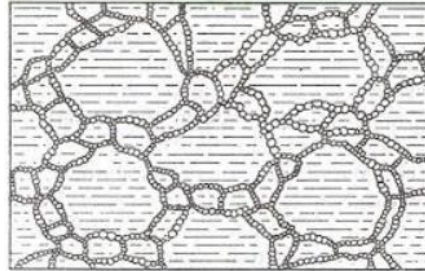
“Se denomina estructura de un suelo al arreglo o disposición que adopten sus partículas minerales y juega un papel fundamental en su comportamiento, especialmente en lo que se refiere a resistencia, compresibilidad y permeabilidad” (Rico y Del Castillo, 2010, p. 21).

Existen varias hipótesis sobre estructuración de suelos finos, las cuales se detallan en los siguientes enunciados.

7.5.1.1. Estructura panaloide

Esta estructura es típica de granos de 0.02mm o menores, que se depositan en agua o aire, estas están sometidas a fuerzas gravitacionales, sin embargo, las fuerzas que ejercen un mayor efecto sobre estas partículas son las fuerzas eléctricas. En la siguiente figura se puede apreciar la forma de esta estructura.

Figura 3. **Estructura panaoide**

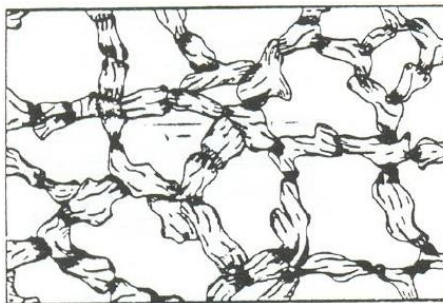


Fuente: Rico y Del Castillo. (2010). *La ingeniería de suelos en las vías terrestres, carreteras, ferrocarriles y aeropistas.*

7.5.1.2. **Estructura floculenta**

Esta estructura es típica de partículas de tamaño mucho menor, que por sí solas ya no se sedimentarían por el efecto de impacto causado por las vibraciones moleculares del medio y que ocurra la sedimentación, por sí solas se moverían al azar con un movimiento característico llamado Browniano (Rico y Del Castillo, 2010).

Figura 4. **Estructura floculenta**

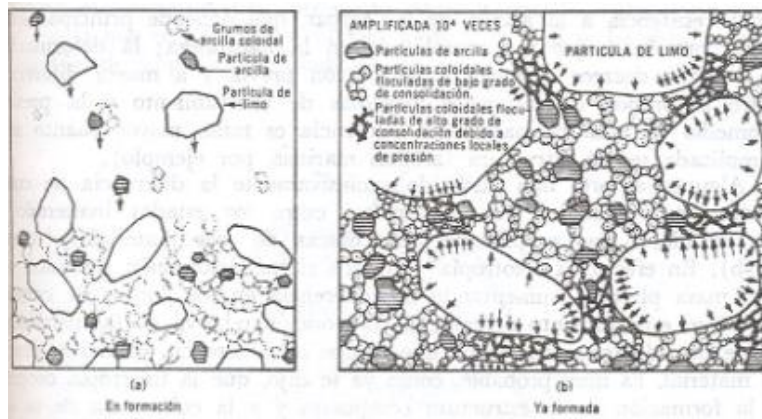


Fuente: Rico y Del Castillo. (2010). *La ingeniería de suelos en las vías terrestres, carreteras, ferrocarriles y aeropistas.*

7.5.1.3. Estructura compuesta

Las estructuras anteriores, rara vez se presentan puras en la naturaleza, pues la sedimentación comprende todo tipo de tamaños y tipos, formando esqueletos de granos gruesos y pequeños, que forman nexos que permiten la sedimentación de partículas gruesas y finas simultáneamente, esto ocurre frecuentemente en el agua de mar o lagos con contenido de sales apreciable donde el efecto floculante de las sales es generada por el viento y las corrientes de agua (Rico y Del Castillo, 2010).

Figura 5. Estructura compuesta

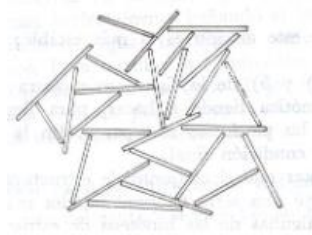


Fuente: Rico y Del Castillo. (2010). *La ingeniería de suelos en las vías terrestres, carreteras, ferrocarriles y aeropistas.*

7.5.1.4. Castillo de naipes

Una interpretación diferente para los flóculos de la estructura, ya que las partículas de las arcillas son láminas con diferente intensidad de carga y magnitud en la superficie como en las aristas, por ello las partículas tienen un acomodo parecido a un castillo de naipes o flocculada (Rico y Del Castillo, 2010).

Figura 6. **Estructura en castillo de naipes**

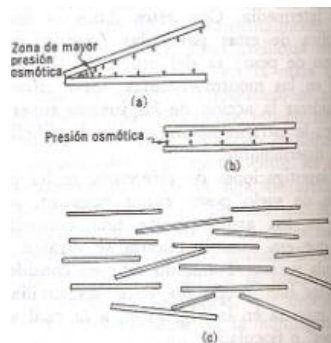


Fuente: Rico y Del Castillo. (2010). *La ingeniería de suelos en las vías terrestres, carreteras, ferrocarriles y aeropistas.*

7.5.1.5. **Estructura dispersa**

Algunos autores coinciden en que la estructura de los flóculos de las arcillas, pueden separarse y orientarse, debido a las presiones osmóticas generadas y eliminadas por el incremento o pérdida de agua en el suelo, lo que concluye que el agua con la carga de sus iones orienta a las láminas de arcilla en sus aristas (Rico y Del Castillo, 2010).

Figura 7. **Estructura dispersa**



Fuente: Rico y Del Castillo. (2010). *La ingeniería de suelos en las vías terrestres, carreteras, ferrocarriles y aeropistas.*

7.6. Caracterización geotécnica de las arcillas

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

Las arcillas al sufrir modificaciones en su composición tienden a cambiar sus propiedades físico-mecánicas, produciendo así, un cambio en el tratamiento geotécnico de las mismas.

7.6.1. Propiedades físico-mecánicas

Rico y Castillo (2010) mencionan que las principales propiedades físico-mecánicas a evaluar desde el punto de vista geotécnico son las que afectan directamente la construcción de obras civiles, infraestructuras y estabilización de suelos, como se describen a continuación.

7.6.1.1. Tamaño de partícula y color

El tamaño de partícula de un suelo arcilloso influye en la plasticidad de este, contracción, expansión y poder de secado. El cambio volumétrico que sufre una arcilla depende de la formación mineralógica. El color en las arcillas indica el grado de oxidación o descomposición que han sufrido por los distintos procesos erosivos a los que fue sometida, puede encontrarse en colores oscuros, verdosos, rojos, amarillos, grises o negros (cuando tienen un alto contenido de materia orgánica) y blancas.

7.6.1.2. Resistencia

La resistencia de un suelo arcilloso depende del mineral predominante en el suelo, se puede determinar la resistencia a la tracción, flexión y compresión.

7.6.1.3. Plasticidad

“Puede definirse como la propiedad de un material por la que es capaz de soportar deformaciones rápidas, sin rebote elástico, sin variación volumétrica apreciable y sin desmoronarse ni agrietarse”. (Rico et al., 2010, p. 27). Esta propiedad es una de las más importantes en las arcillas y es adquirida cuando la arcilla se mezcla homogéneamente con agua.

7.6.1.4. Permeabilidad y porosidad

La permeabilidad es la relación entre el volumen de la pieza y el volumen de los poros, en la cual el agua fluye a través del suelo por acción de la gravedad; las líneas de flujo se dice que es laminar cuando permanecen sin juntarse entre sí y posee una velocidad baja, al aumentar la velocidad más allá de un cierto límite, se hace turbulento. La porosidad es la relación entre el volumen del material y el volumen de sus poros.

7.7. Subrasante

Es una de las capas de la estructura de pavimentos la cual consta de la cimentación de esta. “Estas capas son ordenadas en forma creciente de resistencia y rigidez de los materiales y colocadas con espesor decreciente sobre la subrasante” (Vargas, 2009, pág. 17).

La subrasante es el soporte natural, preparado y compactado, sobre el cual se construye un pavimento, la función de esta capa básicamente es la de dar un apoyo uniforme, sin cambios bruscos en el valor soporte, es decir, que es más importante que la subrasante brinde un apoyo estable a que tenga un elevado valor soporte, por lo que se debe tener cuidado con la expansión de suelos.

En las obras de pavimentación se busca una subrasante de buenas cualidades, con el fin de disminuir a un nivel aceptable los esfuerzos y deformaciones transmitidos al suelo, así al diseñar los espesores de capas de pavimentos, sean de un espesor menor lo cual debe estar ligado a un pavimento resistente y duradero a buen costo (AASHTO, 1993).

“Las propiedades importantes para analizar en la subrasante son las propiedades físicas (granulometría, límites de consistencia, densidad, contenido de agua), propiedades de rigidez (módulo recipiente, módulo de elasticidad y CBR), propiedades hidráulicas [coeficiente de drenaje permeabilidad, coeficiente de expansión]” (Menéndez, 2013, pág. 33).

Figura 8. **Sección transversal de un pavimento flexible**



Fuente: Ugaz. (2006). *Estabilización de suelos y su aplicación en el mejoramiento de subrasante*. Recuperado de <http://cybertesis.uni.edu.pe/handle/uni/3163>.

7.7.1. Factores que influyen en la subrasante

Los parámetros determinantes en la respuesta de la subrasante y en su comportamiento, generalmente depende de tres características básicas, las cuales se hallan interrelacionadas en tres, siendo estas las siguientes:

7.7.1.1. Capacidad portante del suelo

La subrasante debe tener la capacidad de soportar las cargas transmitidas por la estructura del pavimento. La capacidad de carga es función del tipo de suelo, del grado de compactación y de su contenido de humedad, consecuentemente, es necesario que la subrasante sea capaz de soportar un número grande de repeticiones de carga sin presentar deformaciones (Rico, Téllez y Garnica, 1998).

7.7.1.2. Contenido de humedad del suelo

El diferente grado de humedad de la subrasante afecta en forma determinante su capacidad de carga, pudiendo además llegar a provocar inclusive contracciones o expansiones indeseables, especialmente en el caso de la presencia de suelos finos. El contenido de humedad es afectado principalmente por las condiciones de drenaje, elevación del nivel freático, infiltración etc. Una subrasante con un elevado contenido de humedad sufrirá deformaciones prematuras ante el paso de las cargas de sollicitación de los vehículos (Rico, *et al.*, 1998).

7.7.1.3. Contracción o expansión del suelo

Algunos suelos se contraen o se expanden, dependiendo de su grado de plasticidad y su contenido de humedad. Cualquier pavimento construido sobre estos suelos, si no se adoptan las medidas pertinentes, tenderán a deformarse y deteriorarse prematuramente. Para evitar que las deflexiones admisibles en la subrasante excedan los límites establecidos, la presión transmitida por la carga se debe mantener por debajo del valor de la carga máxima transmitida al suelo, para lo cual deberá tomarse en cuenta el tránsito de diseño a través del número de repeticiones de carga, las deflexiones máximas esperadas y el CBR del material con el que se ejecutará el mejoramiento (Rico, *et al.*, 1998).

7.8. Métodos de estabilización de suelos

La estabilización de suelos es producto de no encontrar adecuado en algún sentido los suelos que han de utilizar para un determinado fin en un lugar específico, en base a ello se presentan tres posibles opciones:

- Se acepta el suelo tal y como se encuentra naturalmente y se toma en cuenta su calidad y propiedades para un diseño adecuado.
- Eliminar el suelo que no cumple con las exigencias y sustituirlo por otro de características adecuadas.
- Modificar el suelo existente y sus propiedades para hacerlo capaz de cumplir con los requerimientos.

La última alternativa da lugar a las técnicas de estabilización de suelos. Existen muchos procedimientos para lograr mejorar las propiedades de los suelos (Montejo, 1998).

El propósito de la estabilización de suelos consiste en mejorar las propiedades del suelo, sin embargo, no siempre se obtienen resultados positivos en los que se mejoren de manera simultánea todas las propiedades del suelo, debido a que algunas veces el mejoramiento de una propiedad pueda significar el deterioro de otro u otras. “No debe verse la estabilización solo como una medida correctiva; algunos de los mejores usos de estas técnicas representan más bien medidas preventivas contra condiciones adversas susceptibles de ulterior desarrollo” (Rico y Del Castillo, 2010, p. 137).

Las propiedades de los suelos pueden alterarse por medio de cualquiera de los siguientes procedimientos:

- Estabilización por medios mecánicos (compactación y mezclas de suelos u otro material).
- Estabilización por drenaje.
- Estabilización por medios eléctricos (electroósmosis y utilización de pilotes electrometálicos).
- Estabilización por empleo de calor y calcinación.
- Estabilización por medios químicos (por medio de la adición de agentes estabilizante específicos, como la cal, cemento, asfalto, entre otros).

7.8.1. Estabilización mecánica

La estabilización mecánica consta de la mezcla de suelos con otro u otros materiales, también se quiere hacer mención que la forma más común y rutinaria de tratamiento mecánico es la compactación del suelo. Cuando se diseñan mezclas de suelos, para lograr con ellas unas determinadas propiedades deseables, la granulometría suele ser el requisito más relevante en la fracción gruesa, en tanto que la plasticidad lo es, naturalmente más fina (Montejo, 1998, pág. 108).

“El tamaño máximo de las partículas de la mezcla tiene importancia, puesto que tamaños demasiado grandes son difíciles de trabajar y producen superficies muy rugosas; una proporción demasiado grande de tamaños gruesos conduce a mezclas muy segregables” (Montejo, 1998, pág. 108).

La presencia de contenidos importantes de materiales finos, menores que la malla 40, hace difícil lograr buenas características de resistencia y de deformabilidad, además de que puede conducir a superficies demasiado lisas y fangosas, cuando están húmedas y pulverulentas, cuando están secas (Montejo, 1998, pág. 108).

7.8.1.1. Estabilización de suelos por compactación

La compactación de suelos es un proceso de estabilización mecánico, por medio del cual se busca mejorar las características de resistencia, compresibilidad y esfuerzo-deformación del suelo; por lo general el proceso implica una reducción más o menos rápida de los vacíos, como consecuencia de la cual en el suelo ocurren cambios de volumen de importancia. No todo el aire

sale del suelo, por lo que la condición de un suelo compactado es la de un suelo parcialmente saturado (Rico y Del Castillo, 2010).

Álvarez (2005) menciona que la energía que se requiere para compactar los suelos en el campo se puede aplicar mediante cualquiera de las cuatro formas que adelante se enumeran, las cuales se diferencian por la naturaleza de los esfuerzos aplicados y por la duración de estos, la energía de compactación es la que se entrega al suelo por unidad de volumen, durante el proceso mecánico de que se trate y puede clasificarse según como lo describe de la siguiente manera:

- Compactación por amasado (presiones estáticas).
- Compactación por presión (rodillos lisos y neumáticos).
- Compactación por impacto (la duración de la transmisión del esfuerzo es corta, los equipos usados son pisones y rodillos apisonadores).
- Compactación por vibración.
- Compactación por métodos mixtos.

7.8.1.2. Estabilización de suelos por mezcla

En la estabilización de suelos por mezclas, la granulometría es el requisito más importante en la fracción gruesa, mientras que la plasticidad es naturalmente, en la fina. Rico y Del Castillo (2010) afirma:

El tamaño máximo de las partículas de la mezcla tiene importancia, puesto que tamaños demasiado grandes son difíciles de trabajar y producen superficies muy rugosas; una proporción demasiado grande de tamaños gruesos conduce a mezclas muy segregables. La presencia de contenidos importante de materiales finos, menores que la malla 40, hace difícil lograr buenas características de resistencia y de deformabilidad, además que puede conducir a superficies demasiado lisas y fangosas, cuando están húmedas y pulverulentas, cuando están secas (p. 497).

Para este tipo de estabilización puede usarse un sinfín de materiales, como lo es la cal, cemento asfalto (los cuales también son clasificados como métodos químicos por la reconfiguración que produce en las arcillas), fibras, enzimas orgánicas, materiales de desecho, entre otros.

7.8.2. Estabilización por drenaje

Consiste en un drenaje superficial y desagüe subterráneo. Se colocan sistemas de canalizaciones y tubos subterráneos que captan el agua y la sacan de la zona en que se sitúa la estructura; de tal manera que se pueda canalizar el agua proveniente de cualquier dirección a través de estos canales y cunetas; alejándola de la zona de la obra. El fin es evitar impactos negativos de las aguas sobre la estabilidad, durabilidad y transitabilidad de la carretera (Montejo, 1998).

7.8.3. Estabilización por medios eléctricos

El método más conocido es la electroósmosis, la cual consta de la aplicación de una diferencia de potencial eléctrico a una muestra de suelo fino con exceso de humedad, este efecto produce una traslación del agua desde el ánodo (electrodo positivo) hasta el cátodo (electrodo negativo), el caudal que fluye a

través de la muestra de suelo en las condiciones anteriormente expuestas es proporcional al potencial eléctrico exterior que haya sido aplicado. Este método provee un aumento de resistencia al corte y a la compresión simple de los suelos finos (arcillosos).

7.8.4. Estabilización por empleo de calor y calcinación

Este método de estabilización es de tipo térmico, se realiza a temperaturas muy elevadas, superiores a los 400 °C, que calcinan el suelo. Esta técnica consiste en pasar gases a temperaturas cercanas a 1000 °C por ductos o huecos dentro del suelo, la distribución de la temperatura depende de la porosidad del suelo y la temperatura de los gases inyectados.

A temperaturas tan altas ocurren cambios irreversibles en la estructura cristalina de los minerales de arcillas, estas alteraciones se ven reflejadas en las propiedades físicas que obviamente sufrirán modificaciones sustanciales como el índice plástico, el cual tiende a disminuir de manera notoria, la capacidad de absorción del agua también varía al igual que la expansividad y la compresibilidad. Este tipo de estabilización no es económica para suelos saturados (Rico y Del Castillo, 2010).

7.8.5. Estabilización química

Este tema no es fácil de definir ya que todo tipo de estabilización de suelos involucra algún tipo de acción química, es por ello que una definición amplia de la estabilización química se ve envuelta en estabilización con cemento, asfalto y cal lo cual a la vez cuenta como un tratamiento de estabilización mecánica y que presentan cierto aspecto químico (Ugaz, 2006, p. 143).

Existen sustancias químicas especiales para estabilizar suelos arcillosos en los cuales los sistemas resultan más eficaces en comparación con los mencionados anteriormente. “El estabilizador químico debe ser tal que en pequeñas cantidades produzca los efectos deseados, que actúe rápidamente y que su función sea muy poco afectada por la composición del suelo” (Ugaz, 2006, p. 143).

Comúnmente se utiliza el cemento, cal y asfalto, aunque últimamente se han explorado nuevas tecnologías como la estabilización iónica (aplicada en suelos finos, se basa en el intercambio iónico entre el agente estabilizador con las partículas de arcilla mineral); con resinas, polímeros, enzimas orgánicas, ácido fosfórico, fosfatos, cloruro de sodio, sulfatos de calcio, cloruro de calcio, hidróxido de sodio y sales de aluminio (Rico y Del Castillo, 2010).

Este método de estabilización busca generar una reacción química en el suelo, que logre modificar las características y propiedades del suelo, para darle mayor capacidad de respuesta a los requerimientos de carga dinámica a los que estará sometido el suelo.

Los estabilizadores químicos como lo expresa (Duque, 2016) pueden clasificarse de la siguiente forma:

- Para cubrir e impermeabilizar los granos del suelo o proveer de fuerza cohesiva.
- Para formar una adhesión cementante entre las partículas del suelo (proporcionando fuerza y durabilidad).

- Para suelos finos tipo arcillas, los cuales generarán una alteración en la naturaleza del suelo, bajando la plasticidad y mejorando la resistencia del suelo.

7.9. Ensayos de laboratorio

De acuerdo con lo que explica (Botía, 2015) los ensayos de laboratorio son una herramienta que permiten evaluar las propiedades de los suelos en un ambiente controlado, simulando las condiciones *in situ* que puedan sufrir los suelos. Dentro de los ensayos comúnmente utilizados para medidas de estabilización se encuentran los siguientes:

7.9.1. Granulometría según ASTM D-422

Es el proceso en el cual se separan las partículas constituidas en proporción a su tamaño. Tiene la finalidad de determinar las proporciones de las partículas constituyentes del suelo y clasificarlos de acuerdo con su tamaño.

La forma que adopte la curva granulométrica proporciona una idea clara de la distribución del tamaño de los granos del suelo, así un suelo representado por partículas de un solo tamaño estará representado por una línea vertical, el suelo que tenga una buena graduación de sus granos estará representado por una línea muy tendida.

La parte fina de los suelos, según la clasificación USCS (*Unified Soil Classification System*) se considera que está conformada por los materiales que pasan por el tamiz núm. 200 (malla de 0,0029); esta parte fina por lo general está constituida por, limos y arcillas.

7.9.2. Límite líquido

Los límites de Atterberg se representan por una gráfica en donde el límite líquido es la frontera entre los estados semilíquido y plástico del suelo. Las normas especifican que el límite líquido (LL) podría ser aproximadamente definido como el contenido de agua para el cual un suelo tiene una resistencia al esfuerzo cortante de aproximadamente $0,025 \text{ kg/cm}^2$, otros estudios indican que los valores pueden ser algo más bajos, en orden de $0,02 \text{ kg/cm}^2$.

Atterberg fue el primero en establecer un procedimiento para determinar el límite líquido y el límite plástico, pero el procedimiento era muy ambiguo y no podía utilizarse comúnmente, luego Casagrande introdujo un aparato sencillo conocido como copa de Casagrande, mediante el cual se hace común el determinar el límite líquido, por esto el límite líquido también puede ser definido como el contenido de agua necesaria para que se cierre un surco de sección trapezoidal en la cuchara de Casagrande con la aplicación de 25 golpes (Juárez y Rico, 1996, p. 35).

7.9.3. Límite plástico

Es la frontera convencional entre los estados plásticos y semisólido, el límite plástico (LP) también puede ser definido como el contenido de humedad para el cual cilindros menores de 3 mm de diámetro no pueden ser rolados sin que se agrieten o rompan (Juárez y Rico, 1996).

7.9.4. Proctor modificado

El ensayo de Proctor es el proceso que implica reducir los vacíos presentes en un suelo, conduciendo a una variación de volumen para un porcentaje de

humedad; la compactación no reduce en su totalidad los espacios vacíos y no se expulsa toda la humedad, por esta razón la condición de un suelo compactado en carretera es un suelo que se encuentra parcialmente saturado.

La prueba de Proctor modificado es un ensayo mejorado del Proctor estándar y está regido por la Norma D-1557 de la ASTM y T-180 de la AASHTO; esta mejora se debió al implemento de los rodillos y su utilidad en la compactación en campo.

En la prueba de Proctor modificado se hace utilidad del mismo molde de volumen $943,3 \text{ cm}^3$, como en el proceso del Proctor estándar, no obstante, el suelo de muestra es compactado en cinco capas de 25 golpes cada una, con la ayuda de un pistón de peso 44,5 N a una caída de 457,2 mm (Ugaz, 2006).

7.9.5. Ensayo CBR (California Bearing Ratio)

El CBR consiste en un ensayo ideado en la Dirección de Carreteras de California y aceptado alrededor del mundo, con la finalidad de determinar la capacidad de soporte de un suelo, compactados a una humedad óptima y niveles de compactación variables, este se utiliza generalmente para evaluar la calidad relativa de suelos para subrasante, subbase y bases.

El ensayo consiste en determinar la presión necesaria para que un émbolo de 4,96 cm de diámetro o de 3 pulg² de área penetre un determinado número de milímetros a una velocidad constante de 1,27 mm por minuto en una probeta de 15 cm (6 plg) de diámetro y 12,5 cm (5 plg) de altura; una vez determinada la presión se la relaciona con la presión necesaria para obtener la misma penetración en una muestra patrón (Norma técnica guatemalteca 41010 h1, 2016).

Las muestras se sumergen en agua durante 96 horas previas a realizarse el ensayo con el fin de simular condiciones de saturación y de esta forma tener los valores de CBR en las condiciones más críticas.

El peso que se agrega en la superficie de la probeta de ensayo tiene la finalidad de simular las sobrecargas debidas al peso de la estructura vial.

7.9.6. Ensayo de expansión

El ensayo de expansión se determina mediante la Norma ASTM D-4829, la cual indica que, sobre la placa de base perforada, se coloca un disco de papel filtro grueso y se ajusta el molde con el suelo compactado en forma invertida, de manera que el espacio formado por el disco espaciador quede en la parte superior (Ugaz, 2006).

En la superficie libre de la muestra se coloca un disco de papel filtro grueso y sobre este se coloca la placa metálica perforada provista de un vástago regulable. Sobre esta placa se colocarán las sobrecargas, cuyo número deberá ser especificado o de lo contrario, se usará una sobrecarga mínima de 4,54 kg, equivalente al peso de un pavimento de hormigón de 5 pulgadas de espesor (Ugaz, 2006).

A continuación, se coloca todo el conjunto cuidadosamente dentro del estanque sin agua, se coloca el trípode con el dial que medirá la expansión. Luego, se llena el estanque con agua y se registra la lectura inicial del comparador de dial (Li). El tiempo de inmersión dependerá del tipo de saturación.

Para un ensayo con saturación normal se deja el molde sumergido durante 96 horas, en cambio para un ensayo de saturación completa se dejará el tiempo necesario hasta que no haya más hinchamiento de la probeta.

Registrada la lectura final del comparador del dial (Lf), se retira el trípode y se saca el molde del agua, para dejarlo drenar durante 15 minutos. Finalmente se retiran las sobrecargas, los discos de papel filtro y las placas perforadas para determinar el peso del molde más el suelo compactado y saturado (W₂) (Ugaz, 2006).

7.10. Clasificación del suelo

Existen varios métodos de clasificación de suelos, de echo cada país tiene un método propio de clasificación de suelos, como es el caso de Australia, Reino Unido, Estados Unidos, etc. Sin embargo, los métodos comúnmente más utilizados a nivel internacional son: sistema unificado de clasificación de suelos (USCS por sus siglas en inglés) y el sistema AASHTO de clasificación de suelos.

Los sistemas anteriormente mencionados (USCS y AASHTO) clasifican los suelos de acuerdo con su granulometría y sus límites líquidos y plásticos.

7.10.1. Sistema unificado (USCS)

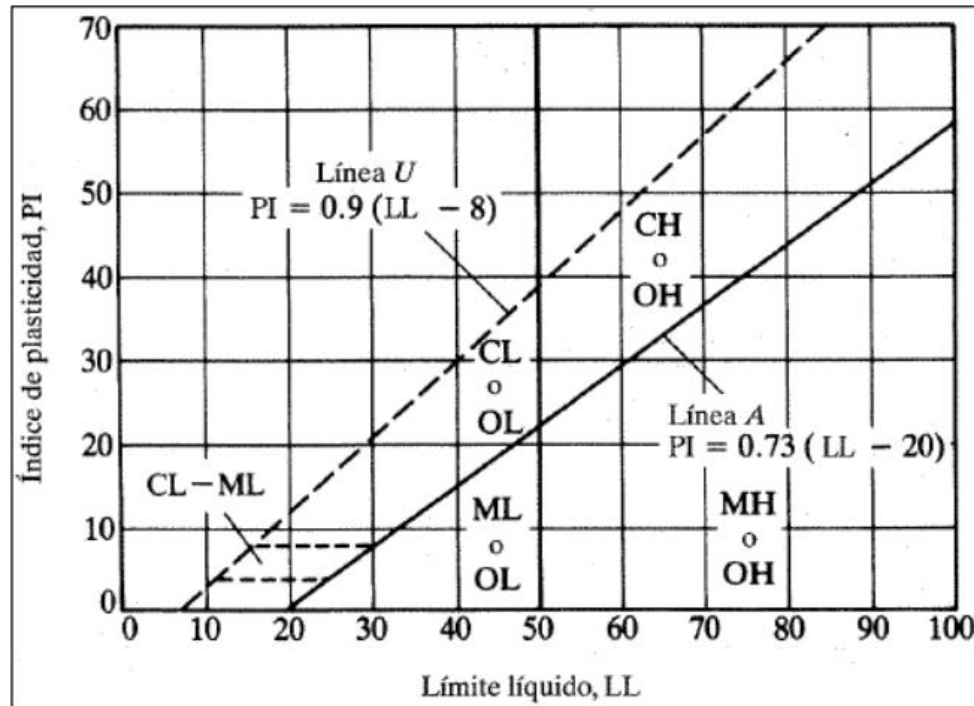
El sistema de clasificación de suelos USCS pos sus siglas en inglés (*Unified Soil Classification System*), es utilizado en ingeniería y geología para describir la textura y el tamaño de los granos del suelo; básicamente clasifica los suelos en dos amplias categorías:

- Suelos de grano grueso: Son de naturaleza tipo grava y arenosa con menos del 50 % pasando por la malla núm. 200, esto quiere decir, que un suelo se considera grueso si más del 50 % de sus partículas son gruesas.
- Suelos de grano fino: Son los que más del 50 % de sus granos pasan por la malla núm. 200. Este sistema puede aplicarse a la mayoría de los materiales no consolidados, y está representado por un símbolo de dos letras, las cuales se describen a continuación:

7.10.1.1. Suelos de grano fino

Para la clasificación por el método USCS se utiliza la carta de plasticidad, el principal uso de la carta está en situar en ella el suelo según su plasticidad, es decir, según el LL y el IP del suelo, a partir de estos parámetros se ubica el suelo en un determinado grupo según figura 7 y en base a esto se da una idea de las propiedades mecánicas e hidráulicas del suelo.

Figura 9. Carta de plasticidad, método de clasificación USCS



Fuente: Braja. (2012). *Fundamentos de ingeniería de cimentaciones*.

El sistema considera a los suelos agrupados, formándose el símbolo de cada grupo por dos letras mayúsculas, dando lugar a las siguientes divisiones: limos inorgánicos, arcillas inorgánicas, limos y arcillas orgánicas.

Los grupos anteriores se subdividen en dos grupos según su límite líquido, se consideran suelos de compresibilidad baja o media si su límite líquido se encuentra por debajo del 50 %; de compresibilidad alta si su límite líquido es mayor al 50 %.

- Grupos CL y CH: El grupo CL comprende a la zona sobre la línea A de la carta de plasticidad definida por $LL < 50\%$ e $IP > 70\%$ (LL: límite líquido, IP: índice de plasticidad). El grupo CH corresponde a la zona arriba de la línea A, definida por $LL > 50\%$.
- Grupo ML y MH: El grupo ML comprende a la zona debajo de la línea A, con $LL < 50\%$ y la porción sobre la línea A con $IP < 4$; el grupo MH corresponde a la zona debajo de la línea A, definida por $LL > 50\%$. En estos grupos quedan comprendidos los limos típicos inorgánicos y limos arcillosos, los tipos comunes de limos inorgánicos y limos arcillosos. Los suelos altamente orgánicos, usualmente fibrosos, tales como turbas y suelos pantanosos, extremadamente compresibles, forman un grupo independiente de símbolo Pt (del inglés *peat*: turba).
- Grupos Pt: Las pruebas de límites pueden ejecutarse en la mayoría de los suelos turbosos, después de un completo remoldeo. El límite líquido de estos suelos puede estar entre 300% y 500% , quedando su posición en la carta de plasticidad netamente abajo de la línea A; el índice plástico normalmente varía entre 100% y 200% .

7.10.2. Método AASHTO

“En 1945, este método fue propuesto originalmente para el *Highway Research Board’s Commite on Classification of Materials for Subgrades and Granular Type Roads*” (Braja, 2012, pág. 18).

Tabla I. Sistema de clasificación de suelos de la AASHTO

| Clasificación general | (35% o menos de la muestra total pasa por la malla no. 200) | | | | | | |
|---|--|--------|----------------------------------|---|--------|--------|--------|
| | A-1 | | A-3 | A-2 | | | |
| Clasificación del grupo | A-1-a | A-1-b | | A-2-4 | A-2-5 | A-2-6 | A-2-7 |
| Cribado por mallas (% que pasa) | | | | | | | |
| Malla no. 10 | 50 máx | | | | | | |
| Malla no. 40 | 30 máx | 50 máx | 51 mín | | | | |
| Malla no. 200 | 15 máx | 25 máx | 10 máx | 35 máx | 35 máx | 35 máx | 35 máx |
| Para la fracción que pasa la malla no. 40 | | | | | | | |
| Límite líquido (LL) | | | | 40 máx | 41 mín | 40 máx | 41 mín |
| Índice de plasticidad (PI) | 6 máx | | No plástico | 10 máx | 10 máx | 11 mín | 11 mín |
| Tipo de material más común | Fragmentos de roca, grava y arena | | Arena fina | Grava y arena limosas o arcillosas | | | |
| Calificación de la subrasante | Excelente a buena | | | | | | |
| Clasificación general | Materiales de limo y arcilla (Más del 35% de la muestra total pasa por la malla no. 200) | | | | | | |
| Clasificación del grupo | A-4 | A-5 | A-6 | A-7 A-7-5 ^a A-7-6 ^b | | | |
| Análisis de mallas (% que pasa) | | | | | | | |
| Malla no. 10 | | | | | | | |
| Malla no. 40 | | | | | | | |
| Malla no. 200 | 36 mín | 36 mín | 36 mín | 36 mín | | | |
| Para la fracción que pasa la malla no. 40 | | | | | | | |
| Límite líquido (LL) | 40 máx | 41 mín | 40 máx | 41 mín | | | |
| Índice de plasticidad (PI) | 10 máx | 10 máx | 11 mín | 11 mín | | | |
| Tipo usual de material | Principalmente suelos limosos | | Principalmente suelos arcillosos | | | | |
| Calificación de la subrasante | Regular a pobre | | | | | | |

^a Si $PI \leq LL - 30$, es un A-7-5.
^b Si $PI > LL - 30$, es un A-7-6.

Fuente: Braja (2012). *Fundamentos de ingeniería de cimentaciones*.

7.11. Parámetros de clasificación de suelos

La caracterización de un suelo se lleva a cabo por medio de dos tipos de parámetros, conocidos como parámetros de naturaleza y parámetros de estado.

7.11.1. Parámetros de naturaleza

Se caracterizan porque no varían ni con el tiempo, ni a lo largo de las manipulaciones que puedan realizarse a los suelos durante los trabajos, los más importantes son:

7.11.1.1. La granulometría

Es importante conocer:

- El tamaño máximo de las partículas del suelo, que determinará la elección de la maquinaria más conveniente a utilizar, así como el método de trabajo a emplear. Se puede afirmar que la operación de mezclado de suelos con tamaño máximo de diámetro 50 mm se puede realizar con garantías suficientes de calidad y homogeneidad.
- La cantidad o proporción de partículas que pasa por el tamiz UNE 80 μm permite, en cierta medida, evaluar el grado de su sensibilidad al agua.
- Desde el punto de vista del tamaño de las partículas que componen un suelo se han hecho diversas clasificaciones, más o menos arbitrarias.

7.11.1.2. Plasticidad

Indica a la vez la cantidad y el grado de actividad de la fracción arcillosa que contiene un suelo. Se puede medir con la ayuda de los siguientes parámetros:

- El índice de plasticidad (IP): Es el parámetro más utilizado y representa, de alguna forma, la susceptibilidad de un suelo al agua y su

comportamiento plástico. Se trata en realidad de dos ensayos de laboratorio, el de *Determinación del límite líquido de un suelo por el método del aparato de Casagrande* y el de *Determinación del límite plástico de un suelo*. Mediante estos dos ensayos se determinarán las propiedades plásticas del terreno permitiendo conocer su límite líquido (LL), su límite plástico (LP) y su índice de plasticidad (IP).

- En general un $IP < 12$ indica un suelo poco plástico y un $IP > 40$ indica un suelo muy plástico. Un suelo no plástico ($IP = 0$), se representa como NP.

8. HIPÓTESIS

Los suelos arcillosos que presentan un bajo nivel soporte (CBR) y cambios de volumen por la humedad, pueden ser estabilizados por medio de la adición de arena cuarzo-feldespática, logrando reducir la plasticidad de las arcillas e incrementar su valor de CBR para su uso como subrasante de pavimentos.

Tabla II. **Operacionalización de la hipótesis**

| Variables | Definición conceptual | Definición operacional | Dimensiones | Indicadores |
|----------------------------------|---|--|-------------------------|----------------------|
| Arena cuarzo-feldespática | Arena: Metal o mineral reducido natural o artificialmente en partículas muy pequeñas. | La arena cuarzo-feldespática se caracterizará físicamente, mecánicamente y químicamente (porcentajes de componentes y granulometría), luego se procederá a mezclarlo con el suelo arcilloso en diferentes porcentajes para estabilizar el suelo. | Contenido de humedad | Proctor modificado |
| | Cuarzo: Mineral formado por silicio y oxígeno. | | Porcentaje de absorción | CBR Densidad seca |
| | Feldespato: Mineral relativamente duro, se encuentra en la posición 6 de la escala de Mohs, es de un brillo que oscila entre vítreo y perlado. | | Resistencia | CBR |

Continuación de la tabla II.

| | | | | |
|--|---|--|--|---|
| Estabilización de suelos arcillosos | <p>Suelos: Material sobre el cual se ejecutan diversas obras, y que interesan las propiedades fisicoquímicas.</p> | <p>Se buscará determinar con ensayos de laboratorio, las propiedades del suelo natural y del suelo estabilizado.</p> | <p>Tipo de suelo (clasificación de suelos, método USCS y AASHTO)</p> | <p>Análisis granulométrico</p> |
| | <p>Estabilización: Es un proceso a través del cual las superficies naturales son sometidas a alguna operación o procedimiento para que podamos utilizar sus propiedades mejoradas (Valle, 2010).</p> | | <p>Humedad natural</p> | <p>Contenido de humedad</p> |
| | <p>Estabilización de suelos arcillosos: Es el proceso que se le da a un suelo sometiéndolo a una mezcla entre el suelo y otro material con características estabilizantes de tal forma que pueda mejorar sus propiedades físicas mecánicas (Espinoza y Velásquez, 2018).</p> | | <p>Índice de plasticidad</p> | <p>Límite líquido Límite plástico</p> |
| | | | <p>Densidad seca y húmeda</p> | <p>Proctor modificado</p> |
| | | | <p>Capacidad y resistencia del suelo</p> | <p>Ensayo CBR</p> |

Continuación de la tabla II.

| | | | | |
|---|---|---|----------------------|---------------------------------------|
| Estabilización de subrasante del suelo | Estabilización de subrasantes: El mejoramiento de suelos consiste en cambiar las características de un suelo con un material más resistente (Mejía y Carranza, 2002). | Para mejorar la subrasante se hará combinaciones de suelos arcillosos con arena cuarzo-feldespática, y se analizará las variaciones que tendrá en cuanto su óptimo contenido de humedad, plasticidad y resistencia. | Contenido de humedad | Proctor modificado |
| | | | Plasticidad | Límite líquido Límite plástico |
| | | | Resistencia | CBR |

Fuente: elaboración propia.

9. PROPUESTA DE ÍNDICE DE CONTENIDOS

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

LISTA DE SIMBOLOS

GLOSARIO

RESUMEN

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

OBJETIVOS

HIPÓTESIS

RESUMEN DEL MARCO TEÓRICO

INTRODUCCIÓN

1. MARCO TEÓRICO

1.1. Suelos arcillosos

1.2. Minerales arcillosos

1.2.1. Caolinita

1.2.2. Monmorilonita

1.2.3. Illita

1.3. Arcillas y su naturaleza química

1.4. Propiedades físicas, químicas y mecánicas de las arcillas

1.4.1. Propiedades físicas

1.4.2. Propiedades mecánicas

1.4.3. Propiedades químicas

1.5. Características y estructuración de las partículas minerales de suelos finos

1.5.1. Estructuración del suelo

1.5.1.1. Estructura panaloide

- 1.5.1.2. Estructura floculenta
- 1.5.1.3. Estructura compuesta
- 1.5.1.4. Castillo de naipes
- 1.5.1.5. Estructura dispersa
- 1.6. Caracterización geotécnica de las arcillas
 - 1.6.1. Propiedades físico-mecánicas
 - 1.6.1.1. Tamaño de partícula y color
 - 1.6.1.2. Resistencia
 - 1.6.1.3. Plasticidad
 - 1.6.1.4. Permeabilidad y porosidad
- 1.7. Subrasantes
 - 1.7.1. Factores que influyen en la subrasante
 - 1.7.1.1. Capacidad portante del suelo
 - 1.7.1.2. Contenido de humedad del suelo
 - 1.7.1.3. Contracción o expansión del suelo
- 1.8. Métodos de estabilización de suelos
 - 1.8.1. Estabilización mecánica
 - 1.8.1.1. Estabilización de suelos por compactación
 - 1.8.1.2. Estabilización de suelos por mezcla
 - 1.8.2. Estabilización por drenaje
 - 1.8.3. Estabilización por medios eléctricos
 - 1.8.4. Estabilización por empleo de calor y calcinación
 - 1.8.5. Estabilización química
- 1.9. Ensayos de laboratorio
 - 1.9.1. Granulometría
 - 1.9.2. Límite líquido
 - 1.9.3. Límite plástico
 - 1.9.4. Proctor modificado

- 1.9.5. Ensayo CBR (California Bearing Ratio)
 - 1.9.6. Ensayo de expansión (con edómetro o ensayo de lambe)
 - 1.10. Clasificación de suelos
 - 1.10.1. Sistema unificado (USCS)
 - 1.10.1.1. Suelos de grano fino
 - 1.10.2. Método AASHTO
 - 1.11. Parámetros de clasificación de suelos
 - 1.11.1. Parámetros de naturaleza
 - 1.11.1.1. La granulometría
 - 1.11.1.2. Plasticidad
2. CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES
- 2.1. Arena cuarzo-feldespática
 - 2.1.1. Origen y proceso de la obtención de la arena cuarzo feldespática
 - 2.1.2. Caracterización química y mineralógica de la arena cuarzo-feldespática
 - 2.1.3. Muestreo
 - 2.2. Suelos arcillosos
 - 2.2.1. Obtención de muestras de suelo arcilloso
 - 2.2.2. Caracterización química y mineralógica de suelos
 - 2.2.3. Caracterización geotécnica de los suelos
 - 2.2.4. Clasificación de los suelos
3. ENSAYOS DE LABORATORIO
- 3.1. Mezclas de suelo con arena cuarzo-feldespática
 - 3.2. Ensayos de laboratorio a realizar
 - 3.2.1. Análisis granulométrico por tamizado

- 3.2.2. Límites de Atterberg
 - 3.2.2.1. Límite líquido
 - 3.2.2.2. Límite plástico
 - 3.2.2.3. Índice de plasticidad
- 3.2.3. Ensayos mecánicos
 - 3.2.3.1. Proctor modificado
 - 3.2.3.2. Ensayo CBR
- 3.2.4. Ensayo de expansión
- 3.3. Clasificación de suelos
 - 3.3.1. Sistema USCS
 - 3.3.2. Sistema AASHTO

4. PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

- 4.1. Caracterización de la arena cuarzo-feldespática
- 4.2. Caracterización de las muestras de suelo
- 4.3. Mezclas de suelo con arena cuarzo-feldespática
- 4.4. Ensayos de laboratorio
 - 4.4.1. Resultado del análisis granulométrico por tamizado
 - 4.4.2. Resultado de los límites de Atterberg
 - 4.4.2.1. Límite líquido
 - 4.4.2.2. Límite plástico
 - 4.4.2.3. Índice de plasticidad
 - 4.4.3. Resultado de los ensayos mecánicos
 - 4.4.3.1. Proctor modificado
 - 4.4.3.2. Ensayo CBR
 - 4.4.4. Ensayo de expansión
- 4.5. Clasificación de suelos
 - 4.5.1. Sistema USCS
 - 4.5.2. Sistema AASHTO

4.6. Dimensionamiento de pavimento típico

5. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

5.1. Variaciones en las propiedades del suelo en estado natural con las mezclas de suelo estabilizado

5.2. Análisis de reducción de capa de pavimento con suelos estabilizados

CONCLUSIONES

RECOMENDACIONES

REFERENCIAS

10. METODOLOGÍA

10.1. Primera fase: recopilación de información

En esta fase se recopilará información con respecto a las arcillas y técnicas de estabilización, a partir de esta recopilación se determinará los sitios en los que hay presencia de arcillas expansivas, permitiendo definir de forma preliminar los lugares en los que se tomará las muestras, también se revisarán los antecedentes teóricos y prácticos relacionados con los temas de estudio, permitiendo identificar si los materiales propuestos ya han sido caracterizados geotécnicamente y los ensayos que se debe de realizar para la caracterización y análisis de resultados.

10.2. Segunda fase: recopilación de muestras y caracterización de los materiales a utilizar

En esta fase se realizará visitas a campo para la recolección de muestras inalteradas y alteradas en los alrededores del municipio de Chimaltenango (dado que en este municipio se encuentra el banco de material de desecho que se utilizará como agente estabilizador, es decir, la arena cuarzo-feldespática), se tomará tres muestras de suelos de carácter arcilloso, se realizará ensayos in situ para tener un parámetro de los suelos a recolectar, también se hará una visita al banco de material de arena cuarzo-feldespática y se tomará dos muestras una más fina que la otra, posteriormente se llevará las mezclas al laboratorio para ser caracterizados químicamente, mineralógicamente y geotécnicamente para lo que se realizarán los siguientes ensayos: químicos, granulometrías, plasticidad, densidad de partículas, Proctor modificado, densidades y CBR.

10.3. Tercera fase: ensayos de laboratorio

Una vez definidos y caracterizados los materiales con los que se trabajará en esta investigación, se empezará a realizar mezclas de suelo con el 5 %, 10 %, 15 % y 20 % de arena con relación al peso seco del suelo, por cada mezcla se realizará los ensayos descritos a continuación:

- Ensayos químicos para caracterización mineralógica de materiales.
- Ensayo granulométrico según Norma ASTM D 422.
- Ensayo para determinar el límite líquido según Norma ASTM 423-66.
- Ensayo para determinar el límite plástico según Norma ASTM 424-59.
- Ensayo Proctor modificado para determinar la densidad seca máxima y la humedad óptima según Norma ASTM D-698.
- Ensayo de expansión según Norma ASTM D-4546.
- Ensayo de relación de carga california (CBR), según la Norma ASTM D-73.

10.4. Cuarta fase: análisis de resultados

A partir de los ensayos realizados en la tercera fase, se analizará los valores obtenidos de los ensayos para examinar determinados parámetros, descritos a continuación:

- Caracterización de los materiales: se determinará las propiedades de los materiales estudiados (suelo arcilloso y arena cuarzo-feldespática).
- Granulometría: se analizará la granulometría del suelo en estado natural versus el suelo tratado por medio de la adición de arena cuarzo-feldespática.
- Límites de consistencia (límite líquido y plástico): se comprobará las modificaciones de las propiedades físicas del suelo tratado y se comparará con las del suelo en estado natural.
- Ensayos de CBR, Proctor modificado y comportamiento volumétrico o ensayo de expansión: se analizará el incremento en la resistencia del material tratado contra el material sin tratamiento y se evaluará si cumple con los requerimientos recomendados en manuales de diseño e investigaciones para ser utilizado como subrasante, en su estado natural y una vez estabilizado.

Por último, se analizará como se ve afectado el grosor del pavimento según los valores de subrasante estabilizada y se verá si se produce una reducción del grosor de este.

11. TÉCNICAS DE ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN

Para el siguiente proyecto de investigación, se presentan las técnicas de investigación a utilizar para completar el objetivo de esta investigación.

- Muestreo

Consiste en el método que se utiliza para seleccionar los mecanismos de la muestra total de la población, para este proyecto se tomará muestras inalteradas de suelos arcillosos en la región de Chimaltenango.

- Ensayos de laboratorio

Se realizarán los ensayos correspondientes bajo los procedimientos y especificaciones indicadas en normas nacionales e internacionales, con el fin de clasificar los materiales a utilizar y determinar las características de las mezclas suelo-arena, los ensayos se hará en el laboratorio de suelos de la Facultad de Ingeniería, los cuales se describen a continuación:

- Ensayos químicos para caracterización mineralógica de materiales.
- Ensayo granulométrico según norma ASTM D 421-58.
- Ensayo para determinar el límite líquido según norma ASTM 423-66.
- Ensayo para determinar el límite plástico según norma ASTM 424-59.

- Ensayo Proctor modificado para determinar la densidad seca máxima y la humedad óptima según norma ASTM D-698.
- Ensayo de expansión según norma ASTM D-4546.
- Ensayo de relación de carga california (CBR), según la Norma ASTM D-73.
- Revisiones bibliográficas y uso de software auxiliar.

Como complemento a esta investigación se realizará una revisión profunda de bibliografía que involucre teorías relacionadas al tema, consultas electrónicas y para el modelado de esquemas y diagramas que sean necesarios se utilizará un software auxiliar como lo es AutoCAD Civil 3D.

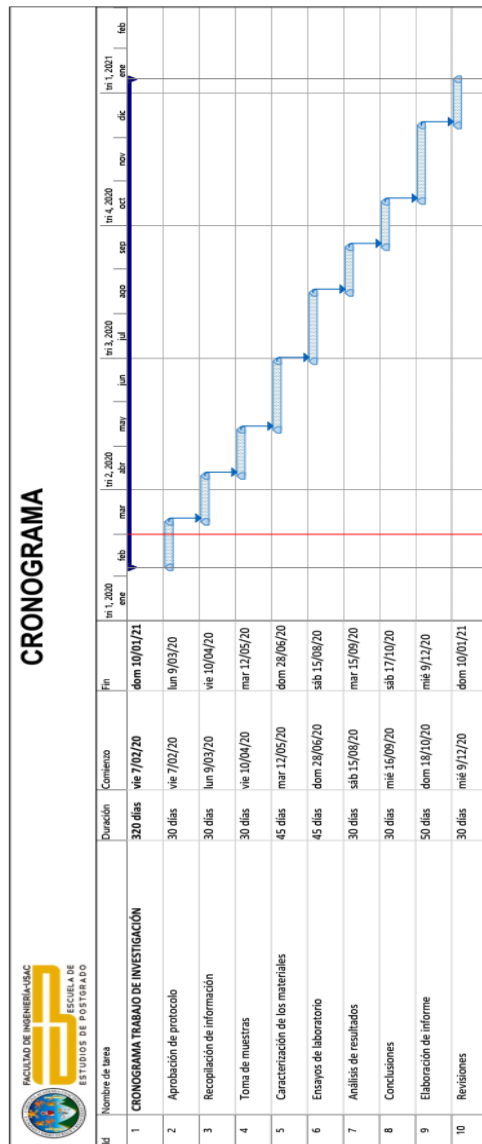
- Correlación del estudio

Con el fin de conocer la relación o grado de asociación que exista entre dos o más conceptos, ya que este es un estudio correlacional; para la interpretación de datos se utilizará el método de correlación de Pearson y regresión lineal.

Esta investigación buscará evaluar por medio de la correlación los resultados de mejora del suelo estabilizado y el del suelo en estado natural. Las variables de estudio a utilizar son: estabilización de suelos arcillosos (variable dependiente) y arena cuarzo-feldespática (variable independiente).

12. CRONOGRAMA

Figura 10. Cronograma de actividades



Fuente: elaboración propia.

13. FACTIBILIDAD DEL ESTUDIO

Para la presente investigación es necesario contar con los siguientes recursos:

- Recurso humano

Se debe de contar con personas que harán los muestreos, laboratoristas quienes realizan los ensayos y por los colaboradores que sean requeridos.

- Recurso financiero

Se debe de contar con un recurso financiero el cual servirá para las actividades tales como las visitas de reconocimiento, exploración y muestreo, se debe de contar con financiamiento para aquellas actividades tales como consultas a libros o normativos de suelos y subrasantes, así como el transporte de las muestras y el pago de los ensayos a realizar en un laboratorio de suelos, cabe resaltar que la investigación será financiada directamente por el investigador.

- Recurso tecnológico

Se requiere de una computadora, impresora, contar con el apoyo del Centro de Investigaciones de Ingeniería (CII) y con el laboratorio de suelos de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

Dado que el valor estimado del estudio no es tan elevado y que para la elaboración de los ensayos se contará con el apoyo del centro de investigaciones de ingeniería (CII) y del laboratorio de suelos de la Universidad, el costo a cubrir por el investigador será minimizado, por lo tanto, se determina que si es factible llevar a cabo el estudio. A continuación, se resumen las actividades estimadas a realizar:

Tabla III. **Resumen de costos**

| Núm. | Actividad | Cantidad | Unidad | Precio unitario | Precio total |
|--------------------|--|----------|--------|-----------------|--------------------|
| 1 | Revisión bibliográfica | 15 | U | Q 50.00 | Q 1,250.00 |
| 2 | Muestreo | 4 | U | Q 125.00 | Q 500.00 |
| 3 | Transporte de muestras | 4 | U | Q 200.00 | Q 800.00 |
| 4 | Ensayos de laboratorio | | | | |
| | 4.1 Granulometría | 4 | U | Q 280.00 | Q 1,120.00 |
| | 4.2 Densidades | 6 | U | Q 300.00 | Q 1,800.00 |
| | 4.3 Límites de Atterberg | 6 | U | Q 265.00 | Q 1,590.00 |
| | 4.4 Proctor modificado | 6 | U | Q 400.00 | Q 2,400.00 |
| | 4.5 CBR | 6 | U | Q 475.00 | Q 2,850.00 |
| | 4.6 Análisis químicos | 4 | U | Q 550.00 | Q 2,200.00 |
| 5 | Elaboración e impresión del informe de investigación | 1 | U | Q 900.00 | Q 900.00 |
| COSTO TOTAL | | | | | Q 15,410.00 |

Fuente: elaboración propia.

14. REFERENCIAS

1. Alvarez, J. (2005). *Maquinaria utilizada para la compactación del suelo en áreas de tamaño limitado* (Tesis de grado). Universidad de San Carlos de Guatemala. Guatemala. Recuperado de http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08_2515_C.pdf
2. American Association of State Highway and Transportation Officials. *Método de diseño AASHTO 93*. Semana 23. Recuperado de http://www.biblioteca.udep.edu.pe/bibvirudep/tesis/pdf/1_102_181_62_936.pdf
3. Ampérez, N. (2019). *Elaboración de adoquines de concreto, utilizando como agregado fino arena cuarzo-feldespática* (Tesis de pregrado). Universidad de San Carlos de Guatemala. Guatemala. Recuperado de <http://www.repositorio.usac.edu.gt/13919/1/Nester%20Giovani%20Amp%C3%A9rez%20Sol%C3%ADz.pdf>
4. Bidyashwari, H. (2017). *Physical Properties of Soil and Its Implication to Slope Stability of Nungbi Khunou, NH-150, Manipur*. Semana 15. Recuperado de [https://www.scirp.org/\(S\(czeh2tfqyw2orz553k1w0r45\)\)/reference/ReferencesPapers.aspx?ReferenceID=2157233](https://www.scirp.org/(S(czeh2tfqyw2orz553k1w0r45))/reference/ReferencesPapers.aspx?ReferenceID=2157233)

5. Botía, W. (2015). *Manual de procedimientos de ensayos de suelos y memoria de cálculo* (Tesis de grado). Universidad Militar Nueva Granada. Bogotá. Recuperado de <https://repository.unimilitar.edu.co/bitstream/handle/10654/6239/MANUAL%20DE%20PROCEDIMIENTOS%20DE%20ENSAYOS%20DE%20SUELOS.pdf;jsessionid=35F6997E66BA859A7E61960E5EEC5860?sequence=1>
6. Braja, D. (2012). *Fundamentos de ingeniería de cimentaciones*. México DF, México: Cengage Learning.
7. Castellanos, S. (2015). *Diferencias de las propiedades físico-mecánicas en arcillas de tres formaciones geológicas distribuidas en el bloque Chortí, República de Guatemala* (Tesis de pregrado). Universidad de San Carlos de Guatemala. Guatemala. Recuperada de <http://www.repositorio.usac.edu.gt/4937/1/SERGIO%20ANTONIO%20CASTELLANOS%20L%C3%93PEZ.pdf>
8. Castillo, B. (2017). *Estabilización de suelos arcillosos de Macas con valores CBR menores al 5 % y límites líquidos superiores al 100 % para utilizarlos como subrasante de carreteras. Estabilización de suelos arcillosos de Macas con valores CBR menores al 5 % y límites líquidos superiores al 100 % para utilizarlos como subrasante de carreteras* (Tesis de maestría). Universidad de Cuenca. Ecuador. Recuperado de <http://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/26917>

9. Castro, E. (2012). *Estudio de un suelo arcilloso expansivo del Valle Central Occidental de Costa Rica para su uso como subrasante* (Tesis de maestría). Universidad de Costa Rica. Costa Rica. Recuperado de <http://repositorio.sibdi.ucr.ac.cr:8080/xmlui/bitstream/handle/123456789/3558/33740.pdf?sequence=1>
10. Castro, A. (2017). *Estabilización de suelos arcillosos con ceniza de cascara de arroz para el mejoramiento de subrasante* (Tesis de grado). Universidad Nacional de Ingeniería. Lima. Recuperado de <http://cybertesis.uni.edu.pe/handle/uni/10054>
11. Chupina, D. (2006). *Estudio comparativo entre las técnicas más utilizadas para la fabricación de ladrillos* (Tesis de pregrado). Universidad de San Carlos de Guatemala. Guatemala. Recuperado de http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08_0984_Q.pdf
12. Díez, L., Montes, O. y Caicedo, B. (2012). *Estabilización de subrasantes con productos químicos* (Tesis de maestría). Escuela de Ingeniería de Antioquía. Colombia. Recuperado de https://repository.eia.edu.co/bitstream/11190/1772/1/AlvarezSantiago_2015_EstabilizacionQuimicaSuelos.pdf
13. Duque, G. (2016). *Geomecánica para ingenieros*. Recuperado de Universidad Nacional de Colombia: <http://bdigital.unal.edu.co/53252/85/introduccion.pdf>

14. Espinoza, A. (2018). *Estabilización de suelos arcillosos adicionando ceniza de caña de azúcar en el tramo de Pinar.Marian* (Tesis de pregrado). Universidad César Vallejo. Perú. Recuperado de <https://hdl.handle.net/20.500.12692/26696>
15. Gonzáles, L., Ferrer, M., Ortuño, L., y Oteo, C. (2002). *Ingeniería Geológica*. Madrid, España: Pearson.
16. Juárez, B. y Rico, R. (1996). *Mecánica de suelos*. México DF, México: Limusa.
17. Lambe, T. (1968). *Mecánica de Suelos*. Nueva York: McGraw-Hill.
18. Leiva, R. (2016). *Utilización de bolsas de polietileno para el mejoramiento de suelo a nivel de la subrasante en el Jr. Arequipa, progresica km 0+0 al km 0+100 distrito de Orcotuna, Perú* (Tesis de pregrado). Universidad Nacional del Centro del Perú. Perú. Recuperado de <http://repositorio.uncp.edu.pe/bitstream/handle/UNCP/1181/Leiva%20Gonzales%20Roly%20Roberth%20-%202016%20-%20Pregrado.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
19. Menéndez, J. (2013). *Ingeniería de Pavimentos: diseño y gestión de pavimentos*. Lima, Perú: ICG.
20. Montejo, A. (1998). *Ingeniería de pavimentos*. Bogotá, Colombia: Stela Valbuena de Fierro.

21. Muñoz, E. y Mancilla, J. (2007). *Caracterización fisicoquímica de arcillas del municipio de Guapi, Costa Pacífica Caucana (Colombia)*. Recuperado de https://www.researchgate.net/profile/Javier_Munoz_Chaves/publication/277712668_Caracterizacion_fisicoquimica_de_arcillas_del_municipio_de_Guapi-costa_Pacifica_Caucana_Colombia/links/5570fd0408ae2f213c223bfa/Caracterizacion-fisicoquimica-de-arcillas-del-municipio-de-Guapi-costa-Pacifica-Caucana-Colombia.pdf
22. Norma técnica guatemalteca 41010 h1 (2016). *Método de Ensayo. Análisis granulométrico por tamices de los agregados fino y grueso*. Recueparado de https://conred.gob.gt/site/normas/NRD3/3_agregados/Norma_NTG_41010_h1_ASTM_C136-14.pdf
23. Ortega, V. (2011). *Aprovechamiento de escorias blancas (LFS) y negras (EAFS) de acería eléctrica en la estabilización de suelos y en capas de firmes de caminos rurales* (Tesis de pregrado). Universidad de Burgos. España. Recupeado de <http://hdl.handle.net/10259/176>
24. Pérez, R. (2012). *Estabilización de suelos arcillosos con cenizas de carbón para su uso como subrasante mejorada y/o sub base de pacimentos* (Tesis de posgrado). Universidad Nacional de Ingeniería. Lima. Recuperado de <http://cybertesis.uni.edu.pe/handle/uni/1313>

25. Rico, A., Téllez, R. y Garnica, P. (1998). *Pavimentos flexibles. problemática, metodologías de diseño y tendencias*. Instituto Mexicano del Transporte. México. Recuperado de <https://www.imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt104.pdf>
26. Rico, A. y Del Castillo, H. (2010). *La ingeniería de suelos en las vías terrestres, carreteras, ferrocarriles y aeropistas Volumen. (I)*. México: Limusa.
27. Rico, A. y Del Castillo, H. (2010). *La ingeniería de suelos en las vías terrestres, carreteras, ferrocarriles y aeropistas Volumen (II)*. México: Limusa.
28. Ugaz, R. M. (2006). *Estabilización de suelos y su aplicación en el mejoramiento de subrasante* (Tesis de grado). Recuperado de <http://cybertesis.uni.edu.pe/handle/uni/3163>
29. Vargas, W. (2009). *La mecánica de suelos en la ingeniería de pavimentos*. Universidad Nacional de Ingeniería. Lima. Recuperado de <https://www.lanamme.ucr.ac.cr/repositorio/bitstream/handle/50625112500/322/49.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.