



**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE QUITO**

CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

**ESTABILIZACIÓN Y CONTROL DE ASENTAMIENTOS ELÁSTICOS EN ARCILLAS DE ALTA
PLASTICIDAD, MEDIANTE EL USO DE CAL Y CEMENTO**

Trabajo de titulación previo a la obtención del
título de Ingeniera Civil

AUTORA: Jenny Susana Balarezo Tuarez
TUTOR: Freddy Israel Rodríguez Badillo

Quito - Ecuador
2023

CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Jenny Susana Balarezo Tuarez con documento de identificación N° 2351023185 manifestó que:

Soy el autor y responsable del presente trabajo; y, autorizo a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total parcial el presente trabajo de titulación.

Quito, 06 de junio del 2023

Atentamente,



Jenny Susana Balarezo Tuarez

2351023185

**CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE
TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**

Yo, Jenny Susana Balarezo Tuarez con documento de identificación N°2351023185, expreso mi voluntad y por medio del presente documento cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy autor del Artículo Académico “Estabilización y Control de Asentamientos Elásticos en Arcillas de Alta Plasticidad, Mediante el Uso de Cal y Cemento”, el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniera Civil, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En concordancia con lo manifestado, suscribo este documento en el momento que hago la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, 06 de junio del 2023

Atentamente,



Jenny Susana Balarezo Tuarez

2351023185

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Freddy Israel Rodríguez Badillo con documento de identificación N°1720094026, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: ESTABILIZACIÓN Y CONTROL DE ASENTAMIENTOS ELÁSTICOS EN ARCILLAS DE ALTA PLASTICIDAD, MEDIANTE EL USO DE CAL Y CEMENTO, realizado por Jenny Susana Balarezo Tuarez con documento de identificación N° 2351023185, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción de Artículo Académico que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, 06 de junio del 2023

Atentamente,



Ing. Freddy Israel Rodríguez Badillo, MSc.

1720094026

ESTABILIZACIÓN Y CONTROL DE ASENTAMIENTOS ELÁSTICOS EN ARCILLAS DE ALTA PLASTICIDAD, MEDIANTE EL USO DE CAL Y CEMENTO

STABILIZATION AND CONTROL OF ELASTIC SETTLEMENTS IN HIGH PLASTICITY CLAYS, THROUGH THE USE OF LIME AND CEMENT

Jenny Balarezo - Tuarez¹, Freddy Rodríguez - Badillo²

Resumen

La presente investigación fue llevada a cabo con el objetivo de evaluar y comparar el uso de cal y cemento en arcillas de alta plasticidad las cuales se caracterizan por su baja resistencia y variaciones volumétricas debido a su humedad, adquiridas por capilaridad y/o infiltración debido al medio al que se encuentren expuestas.

El estudio se basa principalmente en analizar y conocer como mejora la resistencia del suelo y el módulo de elasticidad provocando la disminución de los asentamientos, esto mediante la utilización de un agente estabilizante, tal es el caso de la cal viva y cemento portland tipo 1.

Para el estudio se identificaron 2 sitios de muestreo, los cuales pertenecen a la provincia de Santo Domingo de los Tsáchilas y Sucumbíos, se realizó el respectivo trabajo de campo para la extracción de bloques representativos del sitio y posteriormente la realización de ensayos de laboratorio para obtener las propiedades físicas (granulometría, límites de Atterberg, gravedad específica y densidad natural) y mecánicas (ensayo de compactación, ensayo de triaxial "UU", ensayo de compresión inconfiada) de estos suelos.

Se ejecutó un plan de pruebas, donde se tomaron distintos porcentajes de cal y cemento con el fin de comparar y analizar los distintos resultados obtenidos mediante el trabajo de laboratorio y de esa manera

Abstract

The present investigation was carried out with the objective of evaluating and comparing the use of lime and cement in high plasticity clays which are characterized by their low resistance and volumetric variations due to their humidity, acquired by capillarity and/or infiltration due to the medium to which they are exposed.

The study is mainly based on analyzing and knowing how the soil resistance and the modulus of elasticity improve, causing the reduction of settlements, this through the use of a stabilizing agent, such is the case of quicklime and type 1 portland cement.

For the study, 2 sampling sites were identified, which belong to the province of Santo Domingo de los Tsáchilas and Sucumbíos, the respective field work was carried out for the extraction of representative blocks from the site and later laboratory tests were carried out to obtain the physical (particle size, Atterberg limits, specific gravity and natural density) and mechanical properties (compaction test, "UU" triaxial test, unconfined compression test) of these soils.

A test plan was executed, where different percentages of lime and cement were taken in order to compare and analyze the different results obtained through laboratory work and in this way to know what is the optimal stabilization percentage for these soils.

Finally, a simple regression analysis of the reduction of the liquid limit, increase in the simple compression

¹ Estudiante de Ingeniería Civil - Universidad Politécnica Salesiana - Quito, Ecuador.

² Docente de la carrera de Ingeniería Civil - Universidad Politécnica Salesiana - Quito, Ecuador.

Autor para correspondencia: jbalarzot@est.ups.edu.ec

conocer cuál es el porcentaje óptimo de estabilización para estos suelos.

Finalmente se realizó un análisis de regresión simple de la reducción del límite líquido, aumento de la resistencia compresión simple y aumento del módulo de elasticidad, a partir de estos resultados se obtuvieron correlaciones en función de los distintos porcentajes de cal y cemento.

Palabras Clave: Asentamientos, estabilización de suelos, infiltración, regresión simple, correlaciones.

resistance and increase in the modulus of elasticity was carried out, from these results correlations were obtained based on the different percentages of lime and cement.

Keys words: Settlements, soil stabilization, infiltration, simple regression, correlations

1. Introducción

El estudio se basa en la estabilización y mejoramiento del módulo de elasticidad en arcillas de alta plasticidad, debido a que el país existen varios sitios que se caracterizan por poseer este tipo de suelos, los cuales son complejos de trabajar y construir; debido a su naturaleza, ya que son suelos que poseen una alta plasticidad y son propensos a cambios volumétricos por las condiciones climáticas a las que se encuentra expuestos de acuerdo al sitio de origen [1], lo que a la larga puede generar daños y pérdidas económicas bastante elevadas.

Por tal motivo es necesario que el suelo en el que se va a llevar distintas obras civiles cuente con ciertas características tanto físicas como mecánicas, para que pueda cumplir satisfactoriamente las solicitudes requeridas. En esta investigación se propone la utilización de estabilizantes químicos como son la cal y cemento para el mejoramiento de dichos suelos, ya que es una alternativa factible de conseguir en el medio local.

2. Materiales y Métodos

2.1 Ubicación

Para la localización de las muestras se determinaron 2 sitios, el primero perteneciente a la provincia de Santo Domingo de los Tsáchilas, en la parroquia de Alluriquín y el segundo a la provincia de Sucumbíos, en la parroquia de Siete de Julio. De acuerdo con los mapas georreferenciados se ubica a cada sitio como se muestra en la figura 1 y 2.

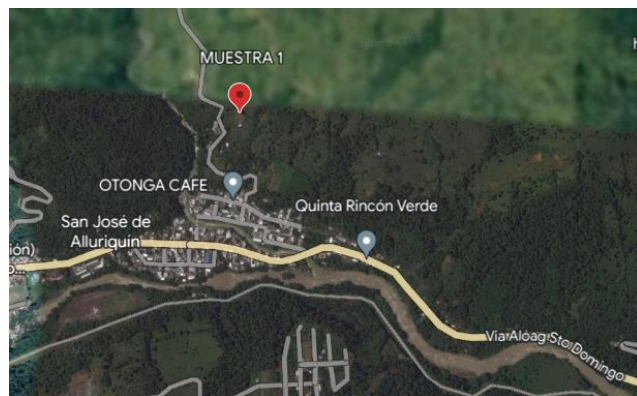


Figura 1. Parroquia de Alluriquín



Figura 2. Parroquia siete de Julio

Las coordenadas de los sitios donde fueron extraídos los 2 bloques de suelo correspondientes a la parroquia de Alluriquín y Siete de Julio se muestran en la Tabla 1, los cuales se encuentran en el sistema UTM WGS84.

Tabla 1. Coordenadas de los sitios de extracción de las muestras inalteradas

| N.º Bloque | Ciudad | UTM WGS84 | |
|------------|---------------|-----------|-----------|
| 1 | Santo Domingo | E:722688 | N:9964240 |
| 2 | Shushufindi | E:316565 | N:9982120 |

2.2 Metodología

2.2.1 Obtención de Muestras Inalteradas

Las muestras inalteradas fueron extraídas en bloques mediante calicatas a cielo abierto siguiendo la norma ASTM D4220 [2]. Donde se tallaron 2 prismas de aproximadamente 40x40x40 en cada una de las zonas de muestreo, posteriormente fueron embaladas para mantener su humedad natural.

El procedimiento de extracción de las muestras inalteradas representativas de la parroquia de Alluriquín y Siete de Julio se muestran en la figura 3 y 4.



Figura 3. Extracción de la muestra representativa de suelo ubicada en la parroquia de Alluriquín.



Figura 4. Extracción de la muestra representativa del suelo ubicada en la parroquia Siete de Julio.

2.2.2 Ensayos de Laboratorio

2.2.2.1 Granulometría

Basados en la norma ASTM D421-85 [3] y ASTM D422-63 [4]:

- Granulometría por tamizado

Este ensayo permite separar las partículas de suelo a través de una serie de tamices en fracciones granulométricas de tamaño decreciente y de esta manera determinar el límite máximo y mínimo del material que se retenga en cada tamiz, y posteriormente elaborar la curva granulométrica para analizar la variedad de partículas de suelo.

- Granulometría por hidrómetro

Este ensayo usa la ley de Stokes, aplicado principalmente a partículas de suelo que pasen por el tamiz N.º 200 (0,075mm), donde “[...] mientras más pequeña es la partícula, mayor será el tiempo que se demora en asentarse en el agua. Si las partículas poseen tamaños menores a 0.0005 mm no es efectivo el método pues se encontrarán en una suspensión constante” [5, p.67].

Para el procedimiento del ensayo se realizó una solución de hexametáfosfato de sodio al 4% con la muestra de suelo, la cual se dejó reposar aproximadamente 24 hora, este defloculante evita la aglomeración de las partículas finas de suelo. Luego se transfirió la mezcla a una probeta y se agregó agua destilada hasta alcanzar su totalidad de 1000 ml, para posteriormente tomar lecturas del hidrómetro (152H), de acuerdo con los siguientes periodos establecidos: 2, 5, 15, 30, 60, 250, y 1440 minutos.



Figura 5. Toma de lecturas para el ensayo de granulometría por hidrómetro

Adicionalmente, en otra probeta se preparó la misma solución de hexametáfosfato de sodio y agregando agua destilada hasta su totalidad de 1000 ml, teniendo este la misma temperatura a la que se realizó el ensayo.

Para los cálculos del ensayo se utilizaron las siguientes ecuaciones [6]:

$$R_c = R_a - C_d \pm C_t \quad (1)$$

$$P = \frac{1606 \cdot (R_c - 1) \cdot a}{M_t} * 100 \quad (2)$$

$$R = R_a + C_m \quad (3)$$

$$D = K * \sqrt{\frac{L}{T}} \quad (4)$$

Donde:

- R_a**= Lectura real del hidrómetro
- R_c**= Lectura corregida del hidrómetro
- R**= Lectura del hidrómetro por menisco
- P**= Porcentaje de suelo disperso que permanece en suspensión
- M_t**= Masa de suelo total usada en el ensayo (g)
- a**= Constante que depende de la gravedad específica.
- D**= Diámetro de las partículas de suelo en suspensión (mm)

K= Coeficiente que depende de la gravedad específica del suelo y la temperatura de cada lectura tomada.

L= Profundidad efectiva basado en el hidrómetro y cilindro de sedimentación (cm).

T= Tiempo transcurrido desde el inicio de la sedimentación hasta cada lectura con el hidrómetro (min).

C_t= Corrección por temperatura, donde a cada una de las lecturas de hidrómetro se les aplica un factor de corrección, el cual puede ser positivo o negativo.

C_d= Corrección por defloculante, el cual se toma desde la lectura 1.000 del hidrómetro y la parte superior del menisco formado entre el hidrómetro y el agua estilada con la solución de hexametáfosfato de sodio.

C_m= Corrección por menisco, la cual comprende la parte inferior del menisco formada por el hidrómetro y el agua destilada con la solución de hexametáfosfato de sodio.

2.2.2.2 Límites de Atterberg

Basados en la norma ASTM D 4318-10 [7]

- Límite Líquido

Este ensayo se realizó con una cierta cantidad de masa de suelo pasante del tamiz N°40, la cual se extiende sobre la cuchara de Casagrande y se hace una ranura en el centro de unos 2 mm de ancho. Por lo tanto, el LL es la humedad que se obtiene al llegar a los 25 golpes y se cierra con una distancia de ½ pulgada (12,7mm) a lo largo de la ranura.

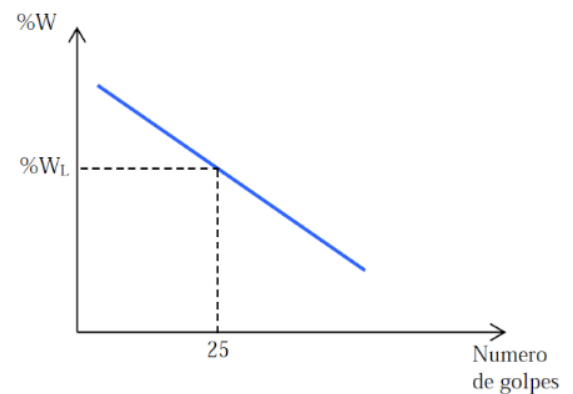


Figura 6. Curva de fluidez [8]

- Límite Plástico

El límite plástico es el porcentaje de agua que se obtiene al realizar rollitos con cierta cantidad de muestras de suelo de un diámetro de 3,5 mm, los cuales presenten pequeñas fisuras.



Figura 7. Muestra de suelo agrietada

- Índice de Plasticidad

El índice de plasticidad se obtiene de la diferencia entre el límite líquido y el límite plástico de un suelo.

2.2.2.3 Gravedad Específica

Especificado en la norma ASTM D854-14 [9], la gravedad específica se determinó mediante la prueba de picnómetro, este ensayo se lo realiza a partículas de suelo que pasan a través del tamiz N°40 (0,00425mm) [6, p. 41], la cual se obtiene de la relación de la densidad del material a la densidad del agua a cierta temperatura en la que se vaya a realizar el ensayo.

“La gravedad específica de las partículas de suelo se encontrará dentro de un rango de 2.60 y 2.80. Para suelos que consistan en materiales porosos y orgánicos, se obtendrá una gravedad específica con un valor inferior a 2, mientras que en suelos que poseen sustancias pesadas el valor de la gravedad específica será mayor que 3”. [10].

Para los cálculos del ensayo se utilizaron las siguientes ecuaciones [6 p 45]:

$$M_{pwt} = M_p + (V_p * \rho_{wt}) \quad (5)$$

$$M_s = M_{cs} + M_c \quad (6)$$

$$G_s = \frac{M_s}{M_{pwt} - (M_{pwst} - M_s)} \quad (7)$$

$$G_{s(20^\circ C)} = G_s * K \quad (8)$$

Donde:

M_{pwt}= Masa del picnómetro más agua a la temperatura de ensayo (g).

M_p= Masa del picnómetro (g).

V_p= Volumen medio calibrado del picnómetro (ml).

ρ_{wt}= Densidad del agua a la temperatura de ensayo (g/ml).

M_s= Masa de suelo seco (g).

M_{cs}= Masa del recipiente y la muestra seca (g).

M_c= Masa del recipiente (g).

M_{pwst}= Masa del picnómetro, agua, y partículas de suelo a la temperatura de ensayo (g).

G_s= Gravedad específica de las partículas sólidas del suelo.

G_{s(20°C)}= Gravedad específica corregida a 20°C.

K= Coeficiente de temperatura.



Figura 8. Determinación de la gravedad específica

2.2.2.4 Densidad Natural

Especificado en la norma ASTM D4531-15 [11], la densidad aparente se obtuvo mediante el método de la parafina. El procedimiento de este ensayo consiste en tomar un cubo de aproximadamente 5x5x5 cm de la muestra inalterada, el cual se recubre de parafina hasta que quede completamente cubierto. Luego aplicando el principio de Arquímedes se sumergió el cubo en agua para posteriormente tomar su peso, de tal manera da como resultado que el volumen del cubo con parafina será igual al peso sumergido. Mediante las siguientes fórmulas se determinó la densidad aparente del suelo [6, p. 26]:

$$V_{\rho c} = \frac{M_{\rho c} - M_{\rho s}}{\rho_w} \quad (9)$$

$$V_{\rho} = \frac{M_{\rho c} - M}{\rho_{\text{parf}}} \quad (10)$$

$$V = V_{\rho c} - V_{\rho} \quad (11)$$

$$\rho = \frac{M}{V} \quad (12)$$

Donde:

V_{ρc}= Volumen de la muestra con parafina (cm³)

M_c= Masa en el aire de muestra con parafina (g)

M_{ρc}= Masa de la muestra con parafina sumergida en agua (g)

ρ_w= Densidad del agua (g/cm³)

V_ρ= Volumen de parafina (cm³)

M= Masa en el aire de la muestra (g)

ρ_{parf}= Densidad de la parafina (g/cm³)

V= Volumen real de la muestra (g/cm³)

ρ= Densidad natural del suelo (g/cm³)

2.2.2.5 Ensayo de Compactación

Especificado en la norma ASTM D1557-12 [12], el ensayo de compactación permite conocer la densidad seca máxima y la humedad óptima del suelo, con el fin de calificar el grado de densificación alcanzado al haber sido sometido a una energía de

compactación, siendo capaz de resistir un mayor esfuerzo cortante.

Como se muestra en la figura 9 para lograr una buena compactación es necesario conocer que cantidad de agua necesita el suelo para alcanzar su densidad seca máxima. [6, p. 177]

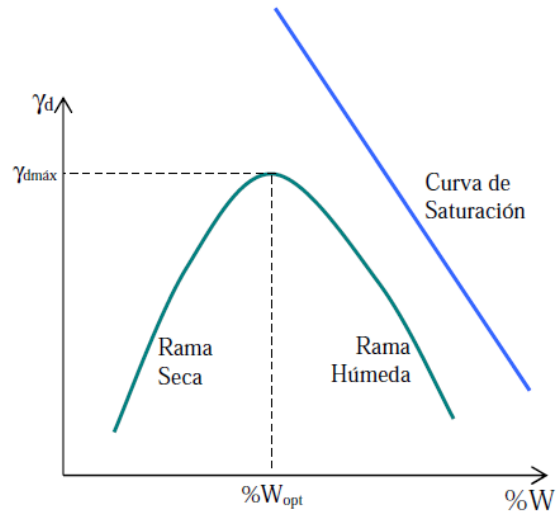


Figura 9. Curva de compactación. [13]

Se utilizó el ensayo proctor modificado, el cual es recomendable para suelos limosos y arcillosos que cuenten con una alta plasticidad, ya que la energía de compactación es mayor en comparación con el proctor estándar.

2.2.2.6 Ensayo de Triaxial “UU”

Especificado en la norma ASTM D2850 [14], el ensayo de triaxial “UU” determina los parámetros de resistencia al corte “c” y “φ”, los cuales permiten conocer cómo será el comportamiento que tendrá el suelo ante las distintas cargas que se vayan a aplicar ante la presencia de obras civiles que se lleven a cabo sobre estos suelos. [15]

Para el procedimiento del ensayo se utilizaron 3 muestras cilíndricas, a las cuales se aplicaron diferentes esfuerzos de confinamiento, estos generan esfuerzos laterales en las muestras de suelo, los cuales se generan la acción del agua que se ocupa en la cámara del equipo hasta llegar a la falla de la muestra y de esta manera generar una envolvente de resistencia.



Figura 10. Equipo para el Ensayo de Triaxial UPS.

2.2.2.7 Ensayo de Compresión Inconfinada

Especificado en la norma ASTM D 2166-16 [16], el ensayo de compresión inconfinada se lo realiza principalmente a suelos cohesivos, consiste en aplicar cierta carga axial a una muestra de suelo cilíndrica hasta llegar a su máximo esfuerzo alcanzado, obteniendo así la resistencia a la compresión inconfinada. El ensayo se lo realizó en la máquina de triaxial “UU” aplicando un esfuerzo de confinamiento de 0 kPa para obtener datos con mayor exactitud debido a que el equipo es digital.

2.2.3 Estabilización de Suelos

La estabilización de suelos es tratamiento que se le da al suelo para mejorar sus propiedades físicas y mecánicas, este tratamiento puede ser mecánico o químico, permitiendo así mejorar sus propiedades físicas y mecánicas. Este proceso permite construir en terrenos con suelos que poseen una resistencia relativamente baja, sean propensos a cambios volumétricos por las condiciones climáticas del sitio y aquellos que tienen un nivel freático alto, por lo que su implementación en la ingeniería civil es fundamental. De acuerdo con Suarez [17]:

“Gracias a estos tratamientos que se le pueden dar a suelos que poseen una baja resistencia o son expansivos ante variaciones en su humedad, podemos obtener un material que sea conveniente para soportar las condiciones adversas de clima, resistir efectos del tránsito, controlar la expansión, reducir la plasticidad, incrementar la resistencia, disminuir la compresibilidad, la permeabilidad y la erosión”.

2.2.3.1 Estabilización de Suelos con Cal

La cal como agente estabilizador en suelos de alta plasticidad, logra resultados favorables en cuanto a sus propiedades físicas y mecánicas, provocando una notable reducción de la plasticidad debido a que los iones de calcio existentes en este aditivo remuevan los iones de magnesio presentes en este tipo de suelos, los cuales se encargan de atraer el agua reduciendo así la plasticidad.

A diferencia de otros estabilizantes, la cal posee una lenta pero gradual ganancia de resistencia, favorecida en climas templados. Por su buena impermeabilidad las mezclas de suelo y cal generan excelentes superficies de trabajo, hecho que beneficia notoriamente la economía de la construcción al disminuir el número de días útiles en los que se lleve a cabo el trabajo y al permitir reanudar inmediatamente después los trabajos debido a lluvias abundantes y prolongadas. [18].

Por lo tanto, la implementación de cal logra grandes resultados ya que mejora significativamente las propiedades de los suelos arcillosos de alta plasticidad.

- Dosificación Cal

El porcentaje de cal óptimo se determinó mediante el uso del ábaco propuesto por C.MacDowell, el cual se encuentra en función del índice de plasticidad (IP) y el porcentaje que pasa por el tamiz N°40 (0,0025mm).

Para ello se toman los valores del IP obtenidos de las muestras inalteradas, el cual corresponde a los valores superiores del ábaco, después se traza una línea paralela de la curva

más cercana al porcentaje de cal correspondiente de la gráfica, hasta que intersequen con la horizontal que proviene del porcentaje del pasante del tamiz N°40 y desde ese punto se traza una vertical donde se lee el porcentaje óptimo de cal, como se puede observar en la figura 11 [19].

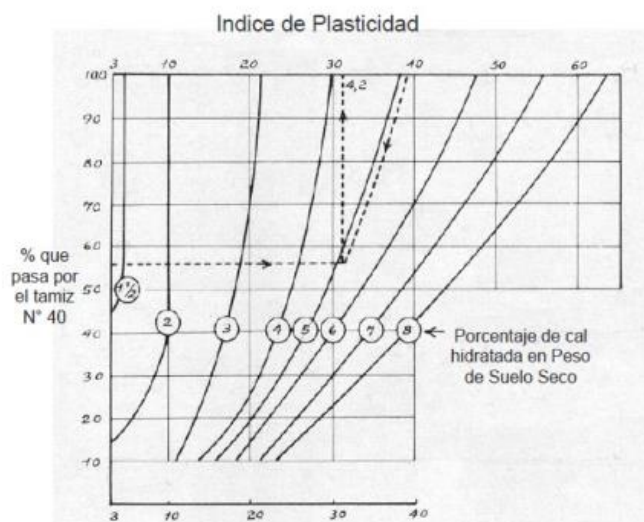


Figura 11. Porcentaje óptimo de cal. Método C.MacDowell

De la gráfica se obtuvo una dosificación del 3,4% para la parroquia de Alluriquín y 4,7% para la parroquia Siete de Julio del peso de suelo seco. Además, para el análisis se tomó intervalos del 2% para conocer las variaciones con respecto a las muestras en estado natural.

Por lo tanto, los valores de dosificación son: 1,4%, 3,4% y 5,4 % para la muestra N°1, y 2,7%, 4,7% y 6,7% para la muestra N°2.

2.2.3.2 Estabilización de Suelos con Cemento

El suelo-cemento es un tratamiento que se le da al suelo, el cual consiste en una mezcla de suelo disgregado, cemento Portland y agua que, compactada a una humedad óptima se obtiene una densidad máxima que produce un material resistente, durable y de bajo costo que tiene muchísimos usos en ingeniería. [20] Así se obtendrá un material que posea las características mecánicas necesarias, logrando satisfacer los requerimientos y

exigencias de proyectos futuros implantados sobre dicho suelo.

- **Dosificación de Cemento**

Para obtener la cantidad de cemento requerido para su estabilización fueron tomados en base a la tabla 2 [21] que dependen a la clasificación ASSHTO que se le haya dado al suelo.

Tabla 2. Cantidad de Cemento Requerido Para Estabilizar

| Grupo AASHO | % De cemento por peso se |
|-------------|--------------------------|
| A-1-a | 3 a 5 |
| A-1-b | 5 a 8 |
| A-2 | 5 a 9 |
| A-3 | 7 a 11 |
| A-4 | 7 a 12 |
| A-5 | 8 a 13 |
| A-6 | 9 a 15 |
| A-7 | 10 a 16 |

De la clasificación AASHTO se obtuvo que ambos sitios pertenecen al Grupo A-7, por lo tanto, su dosificación fue de 10% a 16%. Además, se tomó un porcentaje intermedio para un mejor análisis.

2.2.4 Análisis de Regresión Simple

El análisis de regresión simple es una técnica estadística, la cual permite formar una relación entre dos conjuntos de variables, las variables dependientes que son la disminución del límite líquido, incremento de la resistencia a la compresión simple e incremento del módulo de elasticidad, y las variables independientes que son el porcentaje de cal y cemento. Dando como resultado una ecuación que se puede utilizar para hacer proyecciones o estimaciones sobre los datos.[22]

Variable dependiente: Es el factor que se está tratando de predecir en este caso es el límite líquido, resistencia compresión simple y módulo de elasticidad.

Variables independientes: Estos serán los valores observados en este caso los distintos porcentajes de cal y cemento.

Los parámetros de regresión simple son:

- **Intercepto:** Es el valor esperado de la variable dependiente Y cuando el valor de

la variable independiente X es cero. [22, p. 8]

- **Coefficiente de correlación:** Denota los valores de la variable independiente que definen incremento o disminución de la variable dependiente. Estos valores ayudan a formar la ecuación de correlación de la reducción del límite líquido, incremento de la compresión simple e incremento del módulo de elasticidad. [15, p. 6]
- **Error estándar:** Es un error promedio que calcula la confianza de la ecuación de regresión simple, cuanto mayor es el error más grande serán los puntos de dispersión se forman alrededor de la línea de regresión, quiere decir que mientras más cercano este a cero se puede ultimar que el estimador es bueno. [23]
- **Valor de un estadístico t de Student y un p-valor:** Permite determinar si los efectos de la variable independiente (%CAL y %CEMENTO) son realmente importantes para explicar la variable dependiente (Reducción de limite líquido, incremento de la resistencia a la compresión simple e incremento del módulo de elasticidad), si dicho valor obtenido es menor o igual al 5% se considera que existe una relación estadísticamente significativos.
- **R- Cuadrado ajustado:** Se emplea con el fin de distinguir el grado de efectividad que cuenta la variable independiente (%CAL y %CEMENTO), el cual varía de 0 a 1. Los valores cercanos a 1 tendrán un buen ajuste de la reducción del límite líquido, incremento de la resistencia a la compresión simple e incremento del módulo de elasticidad. [23, p. 9]

3. Resultados y Discusión

A continuación, se muestran los resultados de las características físicas y mecánicas del suelo sin tratar y con diferentes porcentajes propuestos tanto de cal y cemento.

3.1 Suelo Natural

3.1.1 Granulometría

A continuación, se muestra en la Tabla 3 los resultados obtenidos de la granulometría por tamizado e hidrómetro de la parroquia de Alluriquín y Siete de Julio.

Tabla 3. Granulometría por hidrómetro

| Clasificación | Ubicación | |
|-------------------|------------|----------------|
| | Alluriquín | Siete de Julio |
| % Arenas y gravas | 22,48 | 7,76 |
| % Limos | 46,06 | 45,89 |
| % Arcillas | 31,46 | 46,35 |

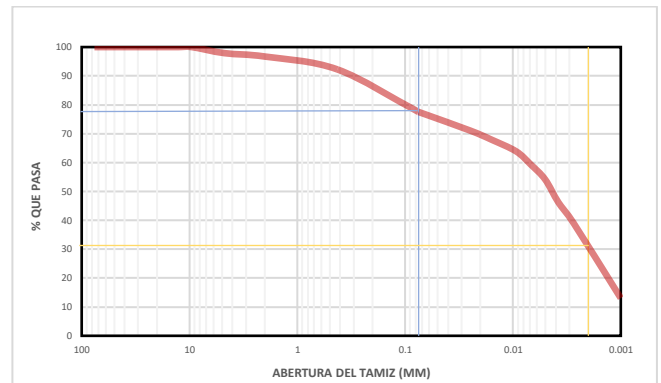


Figura 12. Curva granulométrica parroquia de Alluriquín

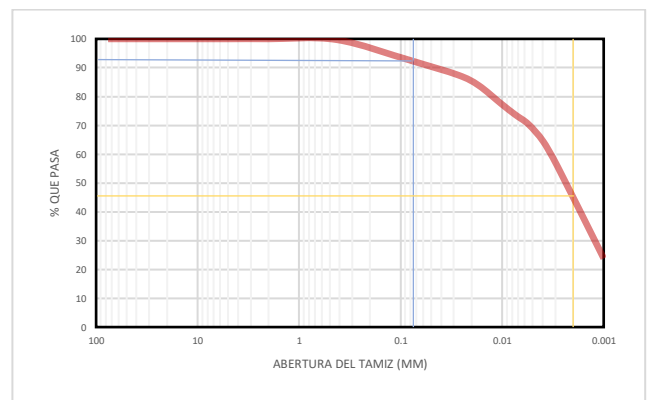


Figura 13. Curva granulométrica parroquia Siete de Julio.

El porcentaje de limos y arcillas se clasifica de la siguiente manera:

- Porcentaje de limos se encuentra entre 0,075 a 0,002 mm de la abertura del tamiz.
- Porcentaje de arcillas tamaños menores a 0,002 mm de la abertura del tamiz.

3.1.2 Límites de Atterberg

Los resultados obtenidos del límite líquido, límite plástico e índice plásticos de la parroquia de Alluriquín y Siete de Julio en estado natural se detallan en la Tabla 4.

Tabla 4. Límites de Atterberg de Suelo en Estado Natural

| | Ubicación | |
|------------------------|------------|----------------|
| | Alluriquín | Siete de Julio |
| Humedad Natural | 43,78% | 28,77% |
| Límite Líquido | 74,44% | 67,18% |
| Límite Plástico | 49,14% | 35,84% |
| Índice Plástico | 25,29% | 31,33% |

El límite líquido correspondiente para el sitio N°1 fue de 74,44% y para el sitio N°2 fue de 67,18%, por lo tanto, para ambos sitios el LL fue >50% y de acuerdo con la carta de plasticidad se clasifican estos suelos como de alta plasticidad.

3.1.3 Clasificación AASHTO y Clasificación SUCS

Los datos obtenidos de la granulometría por tamizado e hidrómetro y los límites de Atterberg permitieron clasificar a los suelos de la siguiente manera:

- Clasificación AASHTO

La parroquia de Alluriquín pertenece al grupo A-7-5 y la parroquia Siete de Julio al grupo A-7-6 de la clasificación AASHTO, pertenecientes a suelos limo-arcillosos ya que el pasante del tamiz N°200 es mayor que el 35%, el límite líquido corresponde a

porcentajes >36% y el índice de plasticidad a porcentajes >11%.

- Clasificación SUCS

De acuerdo con los resultados obtenido de límite líquido e índice de plasticidad se clasificó al suelo como un limo de alta plasticidad (MH) para la parroquia de Alluriquín y una arcilla de alta plasticidad (CH) para la parroquia Siete de Julio. El porcentaje del pasante del tamiz N°200 corresponde a más del 50%, por lo tanto, se clasifican como suelos de gano fino (arcillas y limos), de igual manera cuentan con un límite líquido >50% que de acuerdo con la carta de plasticidad son suelos de alta plasticidad.

3.1.5 Compactación Proctor Modificado

Los resultados obtenidos del peso seco máximo y humedad óptima para las parroquias de Alluriquín y siete de julio se muestran en la tabla 5.

Tabla 5. Ensayo de Compactación Proctor Modificado de Suelo en Estado Natural

| Ubicación | Alluriquín | Siete de Julio |
|--|------------|----------------|
| γ_d(g/cm³) | 2,04 | 1,88 |
| W_{ópt} (%) | 21,5 | 17,35 |

Para una adecuada compactación el suelo debe cumplir con ciertas condiciones como por ejemplo en el caso de la parroquia de Alluriquín para alcanzar el peso específico máximo deberá haber una reducción de la humedad del 22% y para la parroquia de Siete de Julio una reducción del 11% con respecto a la humedad natural.

3.1.6 Ensayo Triaxial “UU”

Se tallaron 2 muestras de cada sitio para realizar el ensayo de triaxial “UU”, los cuales se detallan en la tabla 6.

Tabla 6. Ensayo Triaxial “UU” No Consolidado-No Drenado de suelo en Estado Natural.

| Muestra | Ubicación | | | |
|--------------------------|------------|--------|----------------|--------|
| | Alluriquín | | Siete de Julio | |
| | 1 | 2 | 1 | 2 |
| σ_1 (kPa) | 173,02 | 266,28 | 118,73 | 273,53 |
| σ_3 (kPa) | 26,5 | 53,1 | 26,50 | 102,30 |
| σ_d (falla) (kPa) | 146,52 | 213,18 | 92,23 | 171,23 |
| ϕ (°) | | 36,98 | | 25,97 |
| C (kPa) | | 12,19 | | 12,88 |

Los datos de cohesión y ángulo de fricción de las muestras de suelo inalteradas se obtuvieron de los círculos de Mohr-Coulomb, ya que al graficar los esfuerzos de corte vs los esfuerzos normales se traza una línea tangente a los círculos (envolvente de falla), de la cual se genera una pendiente que corresponde al ángulo de fricción (ϕ) y la intercepción que genera la envolvente de falla con el eje de las ordenadas determina la cohesión (c) [6, p. 300]. En la figura 14 y 15 los círculos de Mohr correspondientes a cada sitio.

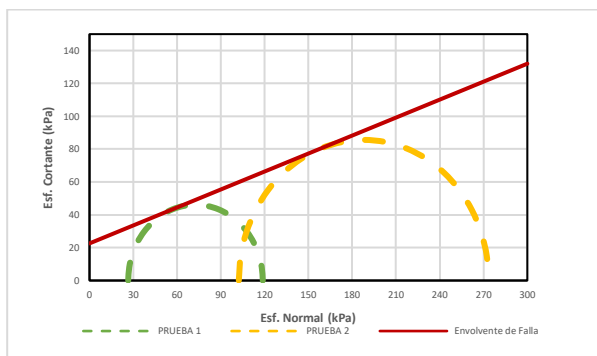


Figura 14. Círculos de Mohr – Parroquia Alluriquín.

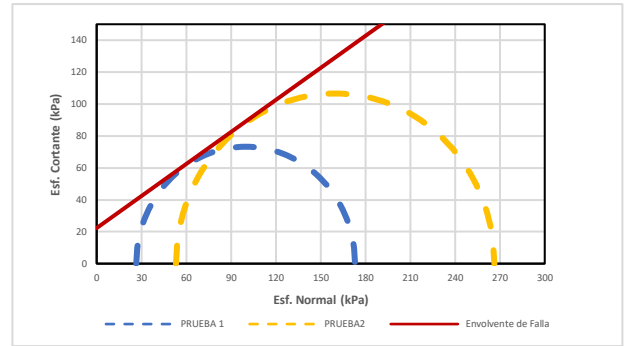


Figura 15. Círculos de Mohr – Parroquia siete de Julio.

3.2 Suelo Estabilizado

A continuación, se muestran el resumen de los resultados de las propiedades físicas y mecánicas de las muestras de suelo sin tratar y suelo estabilizado mediante los distintos porcentajes de cal y cemento calculados. Adicionalmente el análisis de las correlaciones obtenidas de la reducción del LL, incremento de la resistencia a la compresión simple e incremento del módulo de elasticidad.

3.2.1 Propiedades Físicas

Los resultados obtenidos de los límites de Atterberg del suelo sin tratar y el suelo estabilizado para las parroquias de Alluriquín y siete de julio respectivamente se muestran en la Tabla 7 y 8.

Tabla 7. Resultado de las Propiedades Físicas del Suelo Natural vs. Suelo Estabilizado perteneciente a la Parroquia de Alluriquín.

| | Alluriquín | | | | | | |
|----|------------|-------|-----|-----|-----------|----|----|
| | Natural | % Cal | | | % Cemento | | |
| | | 1,4 | 3,4 | 5,4 | 9 | 12 | 15 |
| LL | 74 | 72 | 71 | 70 | 69 | 68 | 67 |
| LP | 49 | 51 | 51 | 52 | 54 | 55 | 55 |
| IP | 25 | 21 | 20 | 18 | 15 | 14 | 12 |

Tabla 8. Resultado de las Propiedades Físicas del Suelo Natural vs. Suelo Estabilizado perteneciente a la Parroquia Siete de Julio.

| | Siete de Julio | | | | | | |
|----|----------------|-------|-----|-----|-----------|----|----|
| | Natural | % Cal | | | % Cemento | | |
| | | 2,7 | 4,7 | 6,7 | 10 | 13 | 16 |
| LL | 67 | 64 | 63 | 63 | 61 | 60 | 60 |
| LP | 36 | 38 | 39 | 40 | 40 | 41 | 42 |
| IP | 31 | 29 | 27 | 26 | 21 | 19 | 18 |

En la tabla 7 y 8 se obtuvo que para ambos agentes estabilizantes se generan que el límite líquido disminuya y el límite plástico se incremente, lo que a su vez genero la reducción del índice de plasticidad.

A continuación, se puede apreciar los resultados obtenidos previamente en las figuras 7 y 8 de los límites de Atterberg vs. los distintos porcentajes de cal y cemento.

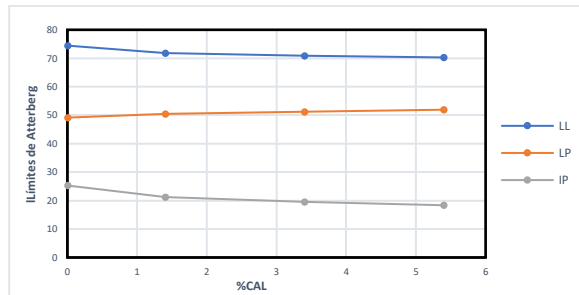


Figura 16. Límites de Atterberg vs. %CAL de la Parroquia de Alluriquín

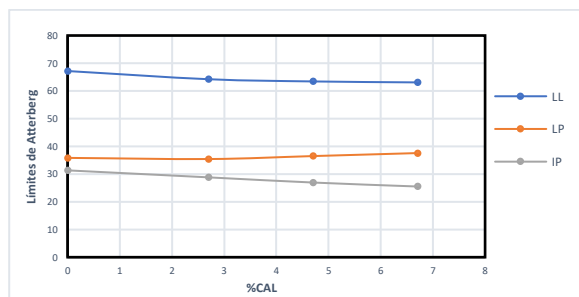


Figura 17. Límites de Atterberg vs. %CAL de la Parroquia Siete de Julio.

En el caso de la cal existe una disminución del límite líquido alrededor del 4%, un incremento del límite plástico del 3-4% y una reducción del índice plástico del 5-6%.

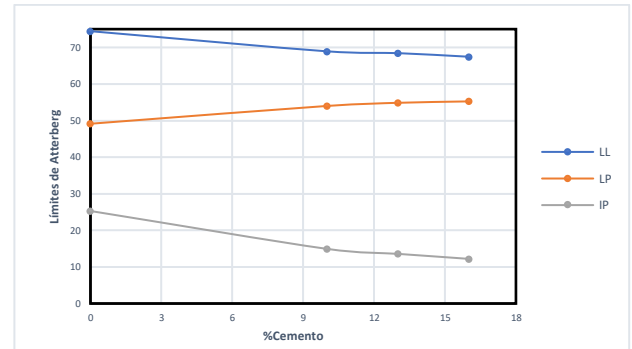


Figura 18. Límites de Atterberg vs. %CEMENTO de la Parroquia de Alluriquín.

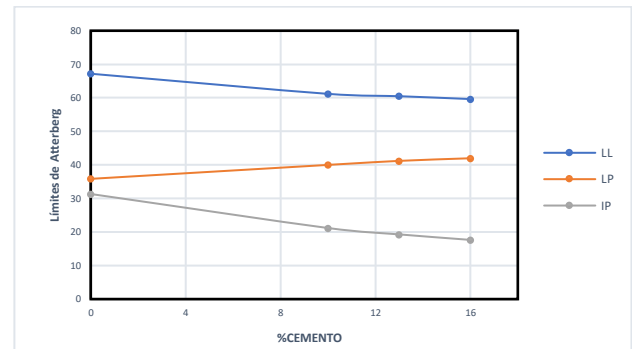


Figura 19. Límites de Atterberg vs. %CEMENTO de la Parroquia Siete de Julio.

En el caso del cemento el límite líquido se redujo en un 7%, aumento el límite plástico alrededor del 6% y una reducción del índice plástico del 13-14%.

3.2.2 Propiedades Mecánicas

En las Tablas 9 y 10 se presenta el resumen de resultados que se obtuvieron de las propiedades mecánicas del suelo natural en comparación con los datos obtenidos del suelo estabilizado.

Nota: No se realizó el ensayo de triaxial “UU”, ya que el equipo tiene una capacidad de 5000N y al aplicar un esfuerzo de confinamiento (σ_3) no se logró concretar la falla de la probeta debido a que alcanza una resistencia mayor a la capacidad del equipo, la compresión simple realizada en el mismo equipo con confinamiento de 0 kPa logró resistencias muy altas.

Tabla 9. Resultados de las Propiedades Mecánicas del Suelo Natural vs. Suelo Estabilizado Perteneciente a la parroquia Alluriquín.

| | Alluriquín | | | | | | |
|---------------------------------|------------|--------|--------|--------|-----------|---------|---------|
| | Natural | % Cal | | | % Cemento | | |
| | | 1,4 | 3,4 | 5,4 | 9 | 12 | 15 |
| γ_d (g/cm ³) | 2,04 | 2,00 | 1,99 | 1,97 | 1,99 | 1,97 | 1,95 |
| W _{ópt} (%) | 21,50 | 22,80 | 23,70 | 25,00 | 22,30 | 23,00 | 23,30 |
| qu (kg/cm ²) | 0,52 | 5,33 | 7,24 | 7,43 | 9,93 | 11,86 | 11,64 |
| E (kg/cm ²) | 67,93 | 493,52 | 871,73 | 865,09 | 1171,04 | 1601,94 | 1592,30 |

Tabla 10. Resultados de las Propiedades Mecánicas del Suelo Natural vs. Suelo Estabilizado Perteneciente a la parroquia Siete de Julio.

| | Siete de Julio | | | | | | |
|---------------------------------|----------------|--------|--------|--------|-----------|---------|---------|
| | Natural | % Cal | | | % Cemento | | |
| | | 2,7 | 4,7 | 6,7 | 10 | 13 | 16 |
| γ_d (g/cm ³) | 1,88 | 1,86 | 1,83 | 1,82 | 1,83 | 1,80 | 1,78 |
| W _{ópt} (%) | 17,35 | 19,48 | 20,00 | 20,80 | 18,10 | 18,62 | 19,00 |
| qu (kg/cm ²) | 0,28 | 5,91 | 7,60 | 7,54 | 10,24 | 12,15 | 11,93 |
| E (kg/cm ²) | 51,97 | 512,89 | 941,33 | 910,48 | 1492,15 | 1776,94 | 1648,12 |

La tabla 9 y 10 se obtuvo que al ir incrementando ambos agentes estabilizantes la densidad seca máxima disminuye y la humedad óptima se incrementa, logrando así que la energía de compactación sea menor para alcanzar la densidad máxima que pueda ofrecer dicho suelo.

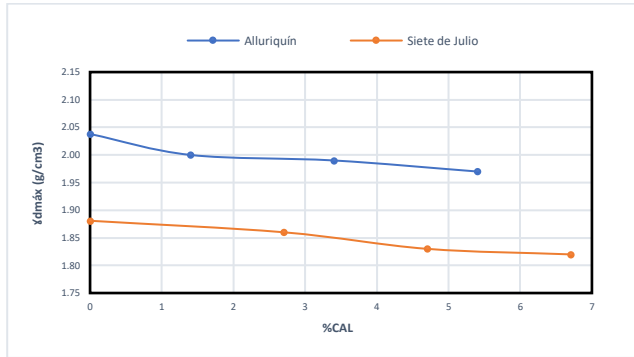


Figura 20. Densidad seca máxima vs. %CAL.

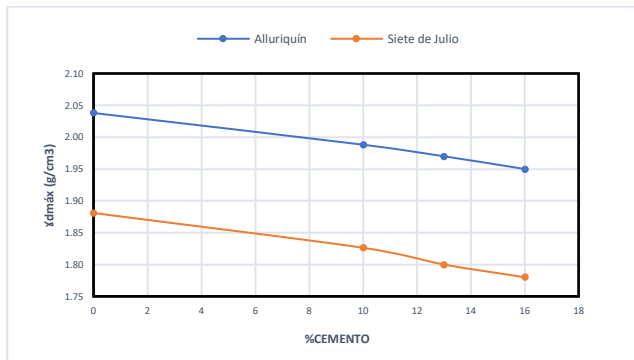


Figura 21. Densidad seca máxima vs. %CEMENTO.

En la figura 20 y 21 existe una disminución de la densidad máxima seca entre 3-4% en el caso de la cal y entre 4-5% en el caso del cemento respectivamente para cada sitio.

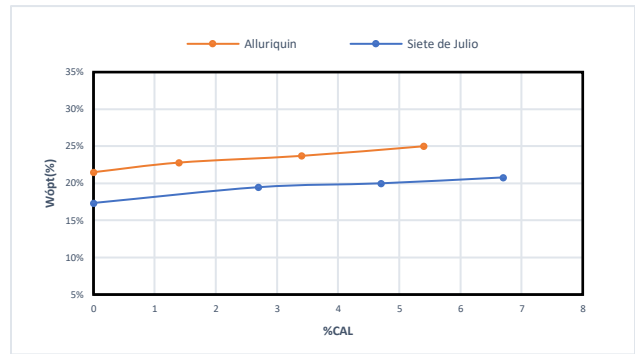


Figura 22. Humedad óptima vs. %CAL.

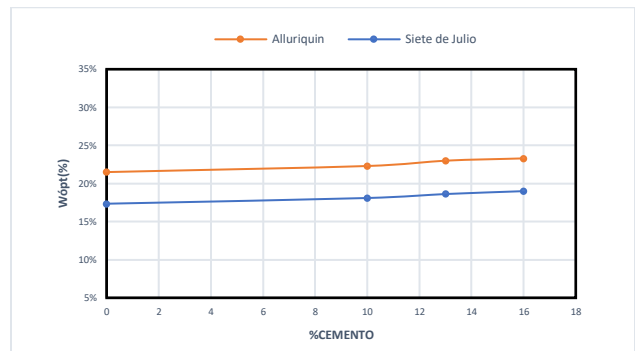


Figura 23. Humedad óptima vs. %CEMENTO.

El incremento de la humedad óptima de compactación fue de 3,5% en el caso de la cal y entre 1-2% en el caso del cemento como se observa en la figura 22 y 23.

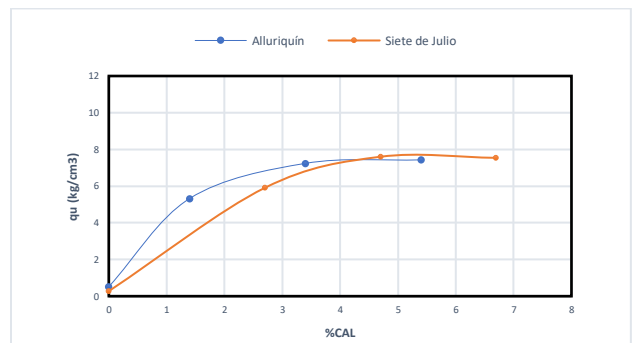


Figura 24. Resistencia a la Compresión Simple vs. %CAL.

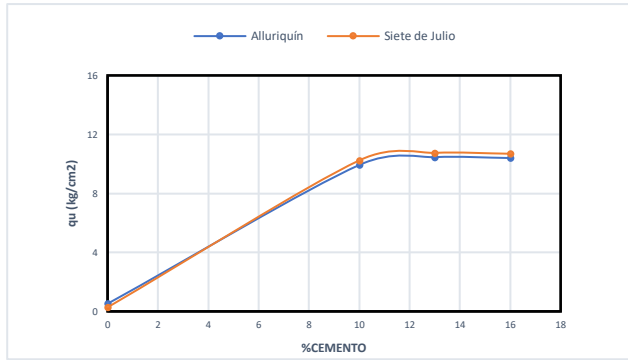


Figura 24. Resistencia a la Compresión Simple vs. %CEMENTO.

El ensayo de resistencia a la compresión simple se realizó 4 horas posterior al tallado de las muestras de suelo con el correspondiente porcentaje de agente estabilizador, obteniendo un incremento en su entre 1300-2600% en el caso de la cal y del 2180-4240% en el caso del cemento respectivamente para cada sitio. Además, se realizaron pruebas en probetas donde se dejó reposar la muestra 24 horas en fundas plásticas para que no pierdan su humedad y se obtuvo un incremento alrededor del 1920-3920% en el caso de la cal y un incremento del 4230-8560% en el caso del cemento.

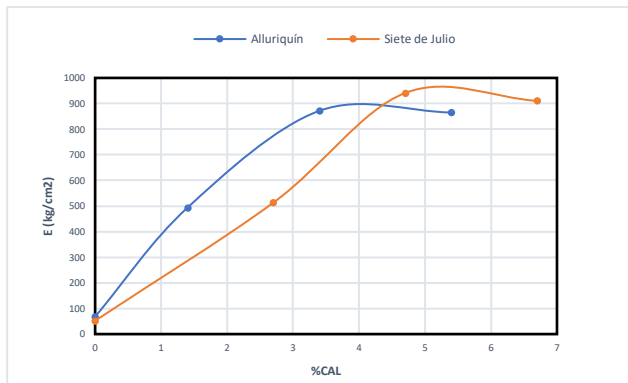


Figura 25. Módulo de Elasticidad vs. %CAL.

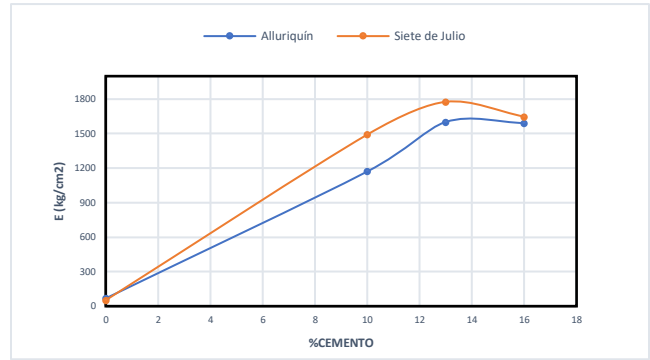


Figura 26. Módulo de Elasticidad vs. %CEMENTO.

Al incrementarse la resistencia a la compresión simple también hubo un aumento en el módulo de elasticidad alrededor de 1170-1652% con respecto a la cal y 2258-3320% en el caso del cemento respectivamente para cada sitio.

3.2.3 Análisis de Regresión Simple

- Reducción del límite líquido

Los resultados obtenidos del modelo ajustado, de la reducción del límite líquido en base al porcentaje de cal se detallan en la tabla 11 y en la figura 16.

El modelo que se ajustó a la regresión simple fue multiplicativo:

$$\Delta LL = a + b * \%CAL \quad (13)$$

Donde:

ΔLL = Variable dependiente

$\%CAL$ = Variable independiente

a y b = Constantes

El coeficiente de correlación (R- cuadrada) fue de 92,75%, del cual se obtuvo la siguiente ecuación:

$$LL_{cal} = LL_n - (2,32538 + 0,297437 * \%CAL) \quad (14)$$

Tabla 11. Resultados del Modelo Ajustado de Regresión Simple de la Variable Dependiente de la Reducción Del Límite Líquido en Base al Porcentaje de Cal

| Parámetro | Estimación | Error Estándar | Valor-P |
|------------|------------|----------------|---------|
| intercepto | 0,859 | 0,059 | 0 |
| Pendiente | 0,304 | 0,042 | 0,002 |

En la tabla 11 se observa que el valor -p obtenido es 0,0016, que se encontraría dentro del rango igual o menor a 5%, por ende, existe una relación entre el LL_{cal} y el porcentaje de cal estadísticamente significativa con un nivel de confianza del 95%.

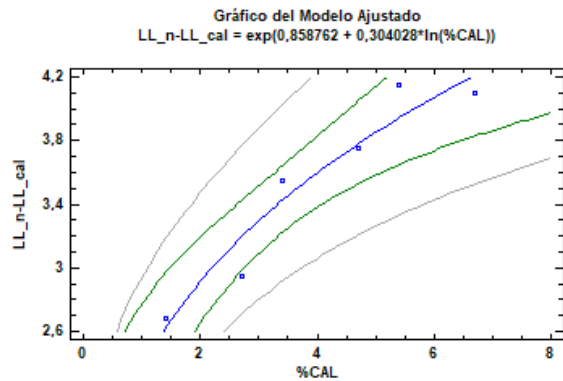


Figura 27. Modelo Ajustado Multiplicativo de la Reducción del Límite Líquido en Base al Porcentaje de Cal.

Se observa en la figura 27 que de acuerdo con el modelo ajustado multiplicativo se genera una línea de tendencia, donde se puede interpretar que existe una buena correlación entre el porcentaje de cal y los datos obtenidos de la reducción del límite líquido, ya que tienen una tendencia sin mayor dispersión.

- Incremento de la resistencia a la compresión simple

Los resultados obtenidos del modelo ajustado del incremento de la resistencia a la compresión simple de acuerdo con el porcentaje de cal se detallan en la tabla 12 y en la figura 17.

El modelo que se ajustó a la regresión simple fue doble inverso:

$$\Delta qu = 1/(a + b/\%CAL) \quad (15)$$

Donde:

Δqu = Variable dependiente

$\%CAL$ = Variable independiente

a y b = son contantes

El coeficiente de correlación (R- cuadrada) fue de 92,99%, del cual se obtuvo la siguiente ecuación:

$$qu_{cal} = \frac{1}{0,116927 + 0,130759/\%CAL} + qu_n \quad (16)$$

Tabla 12. Resultados del Modelo Ajustado de Regresión Simple de la Variable Dependiente del Incremento de la Resistencia Última en Función del Porcentaje de Cal.

| Parámetro | Estimación | Error Estándar | Valor-P |
|------------|------------|----------------|---------|
| intercepto | 0,116 | 0,008 | 0 |
| Pendiente | 0,134 | 0,022 | 0,004 |

En la tabla 12 se observa que el valor -p obtenido es 0,0037, que se encontraría dentro del rango igual o menor a 5%, por ende, existe una relación entre el qu_{cal} y el porcentaje de cal estadísticamente significativa con un nivel de confianza del 95%.

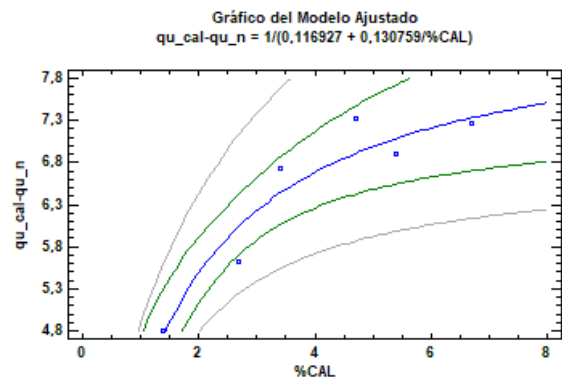


Figura 28. Modelo Ajustado Doble Inverso, del Incremento de la Resistencia Última en Función del Porcentaje de Cal.

Se observa en la figura 28 que de acuerdo con el modelo ajustado doble inverso se genera una

línea de tendencia, donde se puede interpretar que existe una buena correlación entre el porcentaje de cal y los datos obtenidos del incremento de la resistencia a la compresión simple, ya que tienen una tendencia sin mayor dispersión.

- Incremento del módulo de elasticidad

Los resultados obtenidos del modelo ajustado del aumento del módulo de elasticidad en base al porcentaje de cal se muestran en la tabla 13 y en la figura 18.

El modelo que se ajustó a la regresión simple fue multiplicativo aplicando logaritmo natural:

$$\Delta E = a * \%CAL^b \quad (17)$$

Donde:

ΔE = Variable dependiente

$\%CAL$ = Variable independiente

a y b = son constantes

El coeficiente de correlación (R- cuadrada) fue de 77,47%, del cual se obtuvo la siguiente ecuación:

$$E_{cal} = e^{(5,85547+0,516286*\ln(\%CAL))} + E_n \quad (18)$$

Tabla 13. Resultados del Modelo Ajustado de Regresión Simple de la Variable Dependiente del Incremento del Módulo de Elasticidad en Base al Porcentaje de Cal

| Parámetro | Estimación | Error Estándar | Valor-P |
|------------|------------|----------------|---------|
| intercepto | 5,855 | 0,091 | 0 |
| Pendiente | 0,516 | 0,139 | 0,021 |

En la tabla 13 se observa que el valor -p obtenido es 0,0207, que se encontraría dentro del rango igual o menor a 5%, por ende, existe una relación entre el E_{cal} y el porcentaje de cal estadísticamente significativa con un nivel de confianza del 95%.

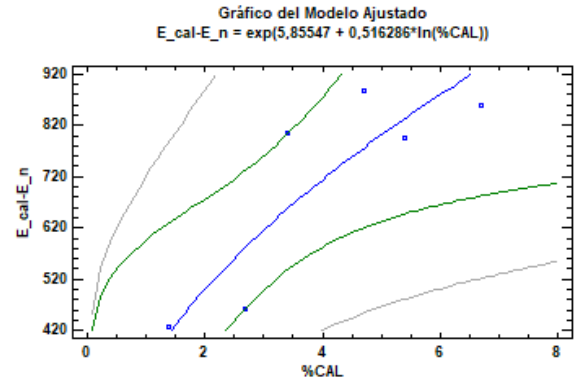


Figura 29. Modelo Ajustado-Multiplicativa, del Aumento del Módulo de Elasticidad en Base al Porcentaje de Cal.

Se observa en la figura 29 que de acuerdo con el modelo ajustado-multiplicativa se genera una línea de tendencia, donde se puede interpretar que existe una buena correlación entre el porcentaje de cal y los datos obtenidos del incremento del módulo de elasticidad.

- Reducción del límite líquido

Los resultados obtenidos del modelo ajustado de la reducción del límite líquido en base al porcentaje de cemento se detallan en la tabla 14 y en la figura 19.

El modelo que se ajustó a la regresión simple fue cuadrado de X:

$$\Delta LL = a + b * \%CEMT^2 \quad (19)$$

Donde:

ΔLL = Variable dependiente

$\%CEMT$ = Variable independiente

a y b = son constantes

El coeficiente de correlación (R- cuadrada) fue de 93,74%, del cual se obtuvo la siguiente ecuación:

$$LL_{cemt} = LL_n - (4,72209 + 0,0106641 * \%CEMT^2) \quad (20)$$

Tabla 14. Resultados del Modelo Ajustado de Regresión Simple de la Variable Dependiente de la Reducción del Límite Líquido En Función del Porcentaje de Cemento.

| Parámetro | Estimación | Error Estándar | Valor-P |
|------------|------------|----------------|---------|
| intercepto | 4,722 | 0,240 | 0 |
| Pendiente | 0,011 | 0,001 | 0,002 |

En la tabla 14 se observa que el valor -p obtenido es 0,0015, que se encontraría dentro del rango igual o menor a 5%, por ende, existe una relación entre el LL_{cemt} y el porcentaje de cal estadísticamente significativa con un nivel de confianza del 95%.

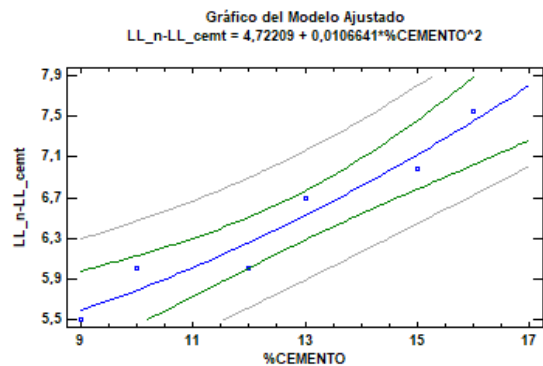


Figura 30. Modelo Ajustado Cuadrado de X, para la Reducción del Límite Líquido en Base al Porcentaje de Cemento.

Se observa en la figura 30 que de acuerdo con el modelo ajustado cuadrado de X existe una buena correlación entre el porcentaje de cemento y los datos procedentes de la reducción del límite líquido, ya que los puntos siguen una tendencia clara y no muy dispersa.

- Incremento de la resistencia a la compresión simple

Los resultados obtenidos del modelo ajustado del Incremento de la resistencia a la compresión simple en función del porcentaje de cemento se especifican en la tabla 15 y en la figura 20.

El modelo que se ajustó a la regresión simple fue doble inverso:

$$qu_{cemt} = \frac{1}{a + \frac{b}{\%CEMT}} \quad (21)$$

Donde:

qu_{cemt} = Variable dependiente

$\%CEMT$ = Variable independiente

a y **b** = son constantes

El coeficiente de correlación (R- cuadrada) fue de 53,11%, del cual se obtuvo la siguiente ecuación:

$$qu_{cemt} = \frac{1}{0,087446 + 0,150612/\%CEMT} + qu_n \quad (22)$$

Tabla 15. Resultados Del Modelo Ajustado de Regresión Simple de la Variable Dependiente del Incremento de la Resistencia Última en Función del Porcentaje de Cemento.

| Parámetro | Estimación | Error Estándar | Valor-P |
|------------|------------|----------------|---------|
| intercepto | 0,058 | 0,009 | 0,003 |
| Pendiente | 0,415 | 0,104 | 0,017 |

En la tabla 15 se observa que el valor -p obtenido es 0,0165, que se encontraría dentro del rango igual o menor a 5%, por ende, existe una relación entre el qu_{cal} y el porcentaje de cal estadísticamente significativa con un nivel de confianza del 95%.

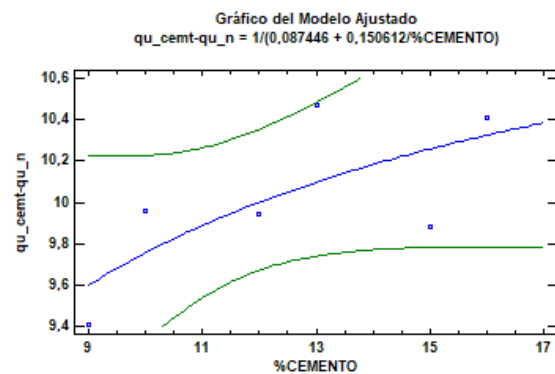


Figura 31. Modelo Ajustado Doble Inverso, del Aumento de la Resistencia a la compresión Simple en Base al Porcentaje de Cemento.

En la figura 31 de acuerdo con el modelo ajustado doble inverso se puede interpretar que existe una buena correlación entre el porcentaje de cemento y los datos obtenidos del incremento de la resistencia a la compresión simple. Mejor será la correlación cuando los puntos siguen una tendencia clara y no muy dispersa.

- Incremento del módulo de elasticidad

Los resultados obtenidos del modelo ajustado del incremento del módulo de elasticidad en base al porcentaje de cemento se especifican en la tabla 16 y en la figura 21.

El modelo que se ajustó a la regresión simple fue doble inverso:

$$\Delta E = \frac{1}{a + \frac{b}{\%CEMT}} \quad (23)$$

Donde:

ΔE = Variable dependiente

$\%CEMT$ = Variable independiente

a y **b**= son contantes

El coeficiente de correlación (R- cuadrada) fue de 63,81%, del cual se obtuvo la siguiente ecuación:

$$E_{cemt} = \frac{1}{0,00028379 + \frac{0,00481942}{\%CEMT}} + E_n \quad (24)$$

Tabla 16. Resultados Del Modelo Ajustado de Regresión Simple de la Variable Dependiente del Incremento del Módulo de Elasticidad en Base al Porcentaje de Cemento.

| Parámetro | Estimación | Error Estándar | Valor-P |
|------------|------------|----------------|---------|
| intercepto | 0 | 0 | 0,140 |
| Pendiente | 0,005 | 0,002 | 0,0366 |

En la tabla 15 se observa que el valor -p obtenido es 0,0366, que se encontraría dentro del rango igual o menor a 5%, por ende, existe una relación entre el E_{cemt} y el porcentaje de cal

estadísticamente significativa con un nivel de confianza del 95%.

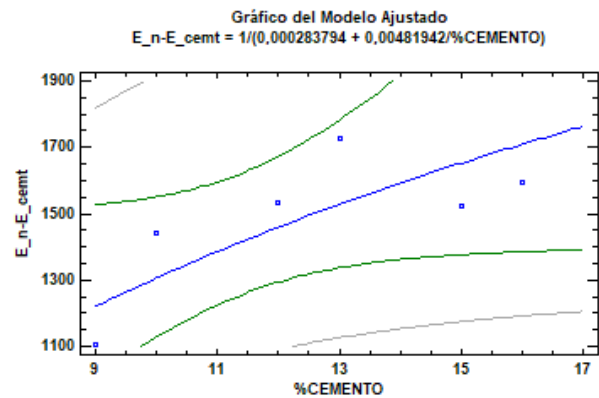


Figura 32. Modelo Ajustado Doble Inverso, del Aumento de la Resistencia Última en Función del Porcentaje de Cemento.

Se observa en la figura 32 que de acuerdo con el modelo ajustado doble inverso se genera una línea de tendencia, donde se puede interpretar que existe una buena correlación entre el porcentaje de cemento y los datos obtenidos del incremento del módulo de elasticidad, ya que existe una tendencia sin mayor dispersión.

4. Conclusiones

Las características físicas del suelo dieron como resultado de acuerdo con la clasificación SUCS un suelo limoso de alta plasticidad (MH) correspondiente a la parroquia de Alluriquín y un suelo arcilloso de alta plasticidad (CH) que corresponde a la parroquia Siete de Julio.

El suelo sin tratar de la parroquia de Alluriquín alcanza una resistencia a la compresión simple de 0,52 kg/cm² y para la parroquia Siete de Julio de 0,28 kg/cm² clasificándolos como suelos de consistencia media y blanda respectivamente para cada sitio, según Terzaghi y Peck. [24]

El uso de cal y cemento generó cambios en las propiedades físicas del suelo natural. El material estabilizado con cal provocó una disminución del límite líquido del 4% y un aumento en el límite plástico del 3%. De igual manera con el uso de cemento hubo una disminución del límite líquido del 7% y un incremento del 6% del límite plástico. Por lo tanto, se puede concluir que para lograr una

mayor reducción del límite líquido se recomienda el uso del cemento.

Las propiedades mecánicas de estos suelos también fueron modificadas, donde la densidad seca máxima disminuyó a partir de que el porcentaje de estabilizante (cal y cemento) aumentaba y la humedad óptima de compactación se incrementó.

La resistencia a la compresión simple incrementó significativamente, de acuerdo con los ábacos propuestos por C. MacDowell, donde se obtuvo que el porcentaje óptimo de cal fue de 3,4% y 4,7% respectivamente para cada sitio alcanzando una resistencia a la compresión simple de 1300 y 2600%. Por lo tanto, se recomienda el uso de estos ábacos con los que se alcanzó la máxima resistencia de acuerdo con el porcentaje óptimo obtenido y con ensayos realizados con porcentajes de cal más altos no se encuentra un incremento relevante.

De acuerdo con las tablas que dependen de la clasificación AASHTO del suelo se logró determinar que el porcentaje óptimo de cemento se encuentra entre 10-16% incrementándose la resistencia a compresión simple entre 2180 y 4240% respectivamente para cada sitio, este incremento se logró con un porcentaje de cemento intermedio de 13%. Este ensayo se lo realizó después de 2 horas de haber sido compactado la muestra. Se concluye que se recomienda el uso de estas tablas para calcular el porcentaje óptimo de cemento ya que alcanza la máxima resistencia se encuentra dentro del rango estipulado.

Se realizaron ensayos en probetas que se dejaron reposar 24 horas en fundas plásticas para que no pierda humedad y se obtuvo un incremento en la resistencia a la compresión simple del 1920% para la muestra de la parroquia de Alluriquín y 3920% para la muestra de la parroquia Siete de Julio en el caso de la cal y un incremento del 4230% y 8560% en el caso del cemento respectivamente para cada sitio. Se recomienda realizar una investigación donde se evidencie el aumento de la resistencia en función del tiempo.

Al generarse un incremento en la resistencia a la compresión simple igual se incrementó el

módulo de elasticidad de 1174% para la muestra de la parroquia de Alluriquín y 1652% para la muestra de la parroquia Siete de Julio en el caso de la cal y 2258% y 3320% en el caso del cemento respectivamente para cada sitio.

Las correlaciones obtenidas en esta investigación serán válidas para suelos que presenten las mismas características de los suelos ensayados y que necesiten tratamientos mediante la utilización de estabilizantes químicos como es el caso de la cal y cemento, para mejorar sus propiedades haciéndolos aptos para las obras civiles que se quieran implementar sobre dichos suelos.

Referencias

- [1]. C. Higuera, J. Gómez y O. Pardo “Caracterización de un suelo arcilloso tratado con hidróxido de cal.” Revista Facultad de Ingeniería, UPTC, vol. 21, pp. 21-40, Enero – junio de 2012. Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=4222676>
- [2]. ASTM D4220 / D4220M-14, Prácticas estándar para conservar y transportar muestras de suelo, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2014, www.astm.org
- [3]. ASTM D421-85/ D, Práctica para la preparación en seco de muestras de suelo para el análisis del tamaño de partículas de suelos, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2007, www.astm.org
- [4]. ASTM D422, Método para el Análisis del Tamaño de Partículas de Suelos, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2007, www.astm.org

- [5]. M. Sánchez, “Estabilización de Suelos Expansivos con Cal y Cemento en el Sector Calcical, del Cantón Tosagua, Provincia de Manabí” Tesis de grado, Pontificia Universidad Católica del Ecuador, 2014.
- [6]. V. Aguirre y S. Yépez, “Manual de Laboratorio para los Ensayos de Propiedades Físicas y Mecánicas de los Suelos” Tesis de grado, Universidad Politécnica Salesiana, Quito, 2019
- [7]. ASTM D421-85, Método de prueba estándar para límite líquido, límite plástico y Índice de plasticidad del suelo, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2007, www.astm.org
- [8]. La Librería del Ingeniero, (s.f.). “Límites de Consistencia de una Masa de Suelo-Excel”. [Online]. Available: [https://biblioguias.uam.es/citar/estilo_iee_e#:~:text=Iniciales%20y%20Apellido%20del%20autor,pp.\)%2C%20Mes%20A%20C3%B1o](https://biblioguias.uam.es/citar/estilo_iee_e#:~:text=Iniciales%20y%20Apellido%20del%20autor,pp.)%2C%20Mes%20A%20C3%B1o).
- [9]. ASTM D854-14, Método de prueba estándar para la gravedad específica del suelo Sólido por agua Picnómetro, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2016, www.astm.org
- [10]. COTECNO, (s.f.). “Gravedad específica del suelo mediante el método y el procedimiento del picnómetro”. [Online]. Available: <https://www.cotecno.cl/gravedad-especificadel-suelo-mediante-el-metodo-y-el-procedimiento-del-picnometro-y-calculos/>
- [11]. ASTM D4531-15, Métodos de prueba estándar para densidad aparente y seca de turba y productos de turba, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2016, www.astm.org
- [12]. ASTM D1557-12, Métodos de prueba estándar para las características de compactación de laboratorio del suelo usando esfuerzo modificado (56,000 ft-lbf/ft³ (2,700 kN-m/m³)), ASTM International, West Conshohocken, PA, 2021, www.astm.org
- [13]. La Librería del Ingeniero, (s.f.). “Ensayo de Compactación del Suelo-Excel”. [Online]. Available: <https://www.libreriaingeniero.com/2017/09/ensayo-de-compactacion.html>
- [14]. ASTM D2850, Método de prueba estándar para prueba de compresión triaxial no consolidada-no drenada en suelos cohesivos, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2015, www.astm.org.
- [15]. S. Llumiquinga. “Influencia del Agua Intersticial en los Parámetros de Resistencia al Corte (triaxial UU) evaluado en 2 sitios del Distrito Metropolitano de Quito, aplicado a la estabilidad de taludes en Suelos parcialmente saturados en términos de Esfuerzos Totales”, Tesis de grado, Universidad Politécnica Salesiana, Quito, mayo, 2022.
- [16]. ASTM D 2166-16, Método de prueba estándar para la resistencia a la compresión no confinada del suelo

cohesivo, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2016, www.astm.org.

- [17]. J. Suarez. (2006). Estabilización de suelos. [Diapositivas de PowerPoint]. Available: <https://es.scribd.com/doc/248964359/414-Estabilizacion-de-Suelos>
- [18]. Highway Research Board. Use of sub-cement mixtures for base courses. Road Problems N°7. Washington D. C., 1943
- [19]. J. Silvestre, “Análisis Comparativo de los Efectos del Agua de Mar y de Cal en la Estabilización de Suelos Arcillosos en Calles que Conforman el Barrio 2 de noviembre de la Comuna Engabao Perteneciente al Cantón Playas Provincia del Guayas”, Tesis de grado, Universidad de Guayaquil, Guayas, 2018.
- [20]. J. Toirac “El Suelo-Cemento como Material de Construcción” vol. XXXIII, núm. 4, octubre-diciembre, 2008, pp. 520-571 Instituto Tecnológico de Santo Domingo, República Dominicana. Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=87012672003>
- [21]. A. Montejo, *Estabilización de Suelos*, Bogotá: Ediciones de la U, 2018.
- [22]. Y. Naranjo, K Jaramillo. “Correlaciones múltiples entre propiedades geomecánicas, velocidades de onda de compresión (vp), corte (vs) y datos de clasificación SUCS en el suelo de cimentación del bloque g de la Universidad Politécnica Salesiana sede Quito - campus Sur”, Tesis de grado, Quito, junio, 2021
- [23]. B. Tapia y C. Castro. “Correlación del Módulo de Elasticidad obtenido con el Ensayo Triaxial UU y los Datos del Ensayo de Corte Directo UU en la Cangahua del Norte de la Ciudad de Quito”, Tesis de grado, Universidad Politécnica Salesiana, Quito, diciembre, 2020.
- [24]. Terzaghi, K. and Peck, R.B. (1948) *Soil Mechanics in Engineering Practice*. John Wiley.