



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE QUITO

CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

**EVALUACIÓN DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD (E_{50}), COHESIÓN Y ÁNGULO DE
FRICCIÓN EN SUELOS COMPACTADOS, VARIANDO LA HUMEDAD HASTA LA
CONDICIÓN SATURADA**

Trabajo de titulación previo a la obtención del
Título de Ingeniero e Ingeniera Civil

AUTOR: CLAUDIA LILIANA TIPAZ AZA
PAUL ALEXANDER ULCUANGO ZURITA
TUTOR: JUAN PABLO TARAMBÍS RODRÍGUEZ

Quito - Ecuador
2025

CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Nosotros, Paul Alexander Ulcuango Zurita con documento de identificación N° 1719028647 y Claudia Liliana Tipaz Aza con documento de identificación N° 1004610570; manifestamos que:

Somos los autores y responsables del presente trabajo; y, autorizamos a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total o parcial el presente trabajo de titulación.

Quito, 28 de febrero de 2025

Atentamente,



Paul Alexander Ulcuango Zurita

1719028647



Claudia Liliana Tipaz Aza

1004610570

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

Nosotros, Paul Alexander Ulcuango Zurita con documento de identificación N° 1719028647 y Claudia Liliana Tipaz Aza con documento de identificación N° 1004610570; expresamos nuestra voluntad y por medio del presente documento cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autores del Proyecto de Investigación: “Evaluación del módulo de elasticidad (E_{50}), cohesión y ángulo de fricción en suelos compactados, variando la humedad hasta la condición saturada”, el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero e Ingeniera Civiles, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

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

Quito, 28 de febrero de 2025

Atentamente,



Paul Alexander Ulcuango Zurita

1719028647



Claudia Liliana Tipaz Aza

1004610570

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Juan Pablo Tarambís Rodríguez con documento de identificación N° 1715336879, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: EVALUACIÓN DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD (E_{50}), COHESIÓN Y ÁNGULO DE FRICCIÓN EN SUELOS COMPACTADOS, VARIANDO LA HUMEDAD HASTA LA CONDICIÓN SATURADA, realizado por Paul Alexander Ulcuango Zurita con documento de identificación N° 1719028647 y por Claudia Liliana Tipaz Aza con documento de identificación N° 1004610570, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción de Proyecto de Investigación que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, 28 de febrero de 2025

Atentamente,



Ing. Juan Pablo Tarambís Rodríguez, MSc.

1715336879

EVALUACIÓN DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD (E_{50}), COHESIÓN Y ÁNGULO DE FRICCIÓN EN SUELOS COMPACTADOS, VARIANDO LA HUMEDAD HASTA LA CONDICIÓN SATURADA

EVALUATION OF ELASTICITY MODULUS (E_{50}), COHESION AND FRICTION ANGLE IN COMPACTED SOILS, VARYING THE HUMIDITY UP TO THE SATURATED CONDITION

Paul Ulcuango-Zurita¹, Claudia Tipaz-Aza², Juan Tarambís – Rodríguez³

Resumen

En esta investigación se evaluó el módulo de elasticidad secante y los parámetros de resistencia al corte de suelos cohesivos aplicando el 95% del grado de compactación para el diseño y construcción de infraestructuras que cuenten con suelos de características similares.

Se realizaron ensayos como: contenido de humedad, granulometría, límites de Atterberg para caracterizar los suelos del presente estudio, el ensayo proctor modificado determinó la densidad seca máxima y el porcentaje de humedad óptimo para las muestras en estado natural y conocer los valores óptimos para continuar con los ensayos triaxiales (UU), variando el contenido de humedad hasta alcanzar el estado saturado y conocer los parámetros de resistencia al corte con su respectivo módulo de elasticidad secante.

Palabras Clave: Cohesión, ángulo de fricción interna, densidad seca máxima, contenido de humedad óptima, granulometría, módulo de elasticidad secante.

Abstract

In this research, the modulus of elasticity and shear strength parameters of cohesive soils were evaluated by applying 95% of the degree of compaction for the design and construction of infrastructures with soils of similar characteristics.

Tests such as: moisture content, granulometry, Atterberg limits were performed to characterize the soils of this study, the modified proctor test determined the maximum dry density and the optimum moisture percentage for the samples in their natural state and to know the optimum values to continue with the triaxial tests (UU), varying the moisture content until reaching the saturated state and to know the shear strength parameters with their respective secant modulus of elasticity.

Keywords: Cohesion, angle of internal friction, maximum dry density, optimum moisture content, particle size, modulus of drying elasticity.

¹ Estudiante de la carrera de Ingeniería Civil – Universidad Politécnica Salesiana, sede Quito - Ecuador

² Estudiante de la carrera de Ingeniería Civil – Universidad Politécnica Salesiana, sede Quito - Ecuador

³ Docente de Ingeniería Civil – Universidad Politécnica Salesiana, sede Quito – Ecuador

Autor para correspondencia: pulcuango@est.ups.edu.ec, ctipaz@est.ups.edu.ec

1. Introducción

La determinación de las propiedades mecánicas de suelos cohesivos es esencial para el análisis y diseño de estructuras, especialmente en zonas de expansión urbana como el sur de Quito. Los parámetros de resistencia al corte y el módulo de elasticidad secante del suelo son factores determinantes en la modelación del comportamiento del suelo al ser sometido a cargas.

Bajo este contexto, la incertidumbre y falta de información con respecto a la implementación de rellenos debido al aumento de zonas pobladas, se ha adoptado como solución para dotar de más espacio a los habitantes y desencadenó que “muchos rellenos también fueron propicios para la construcción de nuevos equipamientos urbanos como centros comerciales, iglesias y áreas verdes, a la vez el relleno fue utilizado para el mejoramiento y diversificación de la movilidad” [1], con lo antes mencionado y la realización de investigaciones en el campo de la ingeniería civil se determinó que “el 94% de las construcciones de Quito no tienen un diseño sismorresistente”, [2] con lo cual “en la ciudad el 70% de edificaciones son informales, el 80% es susceptible a sufrir daños y el 45% tiene riesgo de colapso en caso de un sismo de alta magnitud” [3].

Esta investigación tiene como objetivo determinar los parámetros de resistencia al corte en suelos cohesivos variando el contenido de humedad a partir del estado óptimo hasta la condición saturada para comprobar la efectividad de mejoramiento por compactación según lo establecido en la MOP-001F-2002 en la que la densidad máxima para el caso de subrasantes tendrá un valor mínimo del 95% del obtenido en laboratorio. [4] [p.180].

El presente estudio se centra en determinar la influencia de la saturación alrededor de la variación en los parámetros de resistencia al corte, es decir, el ángulo de fricción interna (ϕ) y la cohesión (c), tomando en cuenta las propiedades

físicas del suelo como el peso específico, contenido de humedad y gravedad específica con el fin de determinar los demás parámetros de las muestras inalteradas.

Con lo antes mencionado el estudio también se enfoca en encontrar correlaciones empíricas entre los parámetros de resistencia al corte y las propiedades del suelo, para forjar un escenario más amplio se revisó investigaciones de Sarzosa y Panata en la cual se evaluaron “correlaciones entre compactación relativa, cohesión y ángulo de fricción interna de los ensayos Proctor modificado y corte directo, variando el grado de compactación y contenido de humedad” [5] en lo que se determinó que los parámetros de resistencia al corte son dependientes de las variaciones de densidad seca y contenido de humedad. Según Tenesaca y Caiza cuya investigación se enfocó en dos tipos de análisis, “en el primero la correlación matemática entre el ángulo de fricción (ϕ) con la relación de vacíos (e), y en el segundo se logró mejorar la correlación mediante la incorporación del tamaño medio de las partículas (D_{50}).”[6], con lo cual se afianza el desarrollo del presente proyecto.

Es necesario aclarar que los asentamientos inmediatos dependen del módulo de elasticidad del suelo al interactuar con la rigidez de la cimentación [7]. El estudio evalúa la resistencia y capacidad de deformación para garantizar la seguridad y durabilidad de las infraestructuras en lugares con condiciones de humedad y compactación variables que pueden resultar críticas para la estabilidad de las obras.

2. Materiales y Métodos

2.1 Muestras de suelo

2.1.1 Ubicación

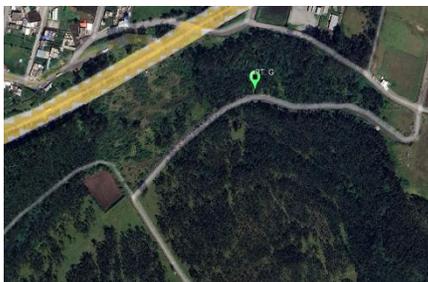


Figura 1 Camino del Inca, sur de Quito - sector Guamaní



Figura 2 Parque las Cuadras, sur de Quito - sector Quitumbe

Durante la etapa de selección de sitios para la extracción de suelos cohesivos en el sur de Quito se usó la investigación de Aucanshala, Carvajal y Valverde [8], en la cual dan a conocer la existencia del material usado para la presente investigación. A continuación, se muestra la Tabla 1 en la que se detalla la ubicación de las muestras en coordenadas UTM WGS84.

Tabla 1 Localización de muestras para ensayo

Sector	Coordenadas		Código
Parque Las Cuadras	E: 773082.00	N: 9968175.00	PC
Camino del Inca	E: 775459.00	N: 9960591.00	GI

2.2 Metodología

2.2.1 Adquisición de muestras

Mediante la guía de la norma ASTM D-4220M [9] se realizaron calicatas a cielo abierto para extraer dichas muestras, con el siguiente orden:

- Se eligió el sitio para marcar un dimensionamiento provisiona para posterior excavar 1.50m de profundidad con ayuda de un pico, barra y pala.

- Tallado y perfilado de prismas con dimensiones de 45x40x40cm, con ayuda de un machete.
- Para finalizar este proceso se envolvieron las muestras con stretch film para evitar desmoronamientos del bloque y cubiertas con una funda plástica industrial para evitar pérdidas de humedad natural.



Figura 3 Extracción de bloque de suelo localizado en el parque Las Cuadras



Figura 4 Extracción de bloque de suelo localizado en el camino del Inca



Figura 5 Almacenamiento en laboratorio de muestras inalteradas.

2.2.2 Caracterización de suelos

Con las muestras almacenadas en laboratorio se procederá con los siguientes ensayos de laboratorio, usados para la presente investigación descritos a continuación en la Tabla 2.

Tabla 2 Ensayos empleados

N.	Ensayo	Norma
1	Contenido de agua (humedad)	ASTM D-2216
2	Densidad Natural	ASTM D-4531
3	Gravedad específica	ASTM D-854
4	Límites de consistencia	ASTM D-4318
5	Granulometría	ASTM C-117
6	Proctor Modificado	ASTM D-1557
7	Ensayo Triaxial U.U.	ASTM D-2850

2.2.2.1 Contenido de Humedad

Al contenido de agua o humedad se lo define como la relación entre el peso del agua y el peso de los sólidos, expresado en porcentaje.

Cabe recalcar que existen partículas de agua y aire presentes en el suelo que se eliminan separando la fase líquida de la sólida con ayuda de un horno, según las indicaciones de la ASTM D-2216 [10]:

- Se determinó el peso de tres cápsulas para luego aumentar una porción de suelo en condiciones naturales cuyas masas totales se usarán como dato inicial.
- Se secó al horno durante 24 horas a una temperatura de 110 ± 5 °C.
- Se obtuvo la masa final del recipiente más el suelo seco y con estos datos se calculó el contenido de humedad natural del suelo.



Figura 6 Ensayo de contenido de humedad en las muestras de suelo

2.2.2.2 Densidad Natural

La densidad natural es la relación de la masa del suelo y de partículas de vacíos con aire o líquidos que contenga el suelo. Procedimiento sugerido por la ASTM D-4531 [11]:

- Se talló 3 muestras en forma de cubo con dimensiones de 5x5x5cm para luego determinar su masa en la balanza de precisión.
- Se recubrió los cubos con cera de parafina en estado líquido, de manera uniforme y se dejó secar para tomar sus masas.
- Se sumergió las muestras dentro de una canastilla sumergida con agua para determinar las masas.



Figura 7 Ensayo de densidad natural empleando cera de parafina

2.2.2.3 Gravedad Específica

La gravedad específica es la relación entre la densidad de las partículas de suelo que pasen el tamiz N°4 (4.75 mm) y la densidad del agua a cierta temperatura, ensayo practicado bajo la guía de la Norma ASTM D-854 [12]. Para el presente se desarrolló el procedimiento para muestras secas:



Figura 8 Determinación de la gravedad específica

- Se secó al horno una porción de muestra de cada suelo a una temperatura de 110 ± 5 °C para luego romper los terrones sobrantes usando un mortero con cabeza de goma y tamizó con la malla de 4.75 mm, por último, se tomó 60 gr para los ensayos.
- Se colocó dicha masa dentro del picnómetro junto con una determinada cantidad de agua para con una bomba de succión y manualmente retirar los vacíos del material.
- Se determinó la masa de la cápsula más el material del picnómetro para luego secarlo a una temperatura de 110 ± 5 °C y finalizar con la masa seca con el fin de obtener el parámetro presente.

2.2.2.4 Límites de consistencia

Según Braja Das [13] la transición entre el estado semisólido y el estado plástico es conocido como límite plástico, y entre este último al estado líquido se conoce como límite líquido, a este proceso se lo conoce como Límites de Atterberg.

• Límite líquido

Según la ASTM D-4318 [14], el ensayo consiste en determinar el porcentaje de humedad, variando la cantidad de agua para que la muestra montada en la copa de Casagrande cierre el surco con acción de cierta cantidad de golpes. Al finalizar se obtuvo el límite líquido en el golpe N. 25 con ayuda de la curva de flujo. Ver Figura 9.



Figura 9 Límite líquido en la copa de Casagrande

• Límite plástico

Según la ASTM D-4318 [14], se debe ensayar una muestra de material y formar rollos con un

diámetro de 3 mm hasta producir grietas y desmoronamientos de forma natural con el propósito de determinar la humedad que posee la mezcla de suelo con agua. Ver Figura 10.



Figura 10 Elaboración de rollos para determinar límite plástico

2.2.2.5 Granulometría

Según la ASTM C-117 [15], el ensayo consiste en determinar la distribución del tamaño de partículas desde arenas gruesas hasta arcillas finas. Para complementar la curva granulométrica se empleó el método de granulometría por hidrómetro según la ASTM D-422 [16], el cual consiste en la sedimentación de partículas y determinar el porcentaje exacto de material fino.



Figura 11 Ensayo de granulometría por lavado

- Se tomó y pesó una determinada masa para restregarla con agua de manera moderada sobre el tamiz N. 40 y N. 200 ya que las mallas son susceptibles a romperse.
- Al acabar el lavado se coloca el material de los dos tamices sobre un recipiente, evitando pérdidas, para luego secar en un horno a una temperatura de 110 ± 5 °C durante 24 horas.

- Terminado lo anterior se procedió a tamizar de forma manual o mecánica para luego pesar el material retenido en cada tamiz.

2.2.2.6 Clasificación SUCS

Este sistema de clasificación permite identificar y categorizar al suelo, la simbología a usar consta de dos letras, este apartado se complementó con el ensayo de la norma ASTM D-4318 [14], así también como de la ASTM C-137 [15].

La norma empleada para este análisis es la ASTM D-2487 [17].

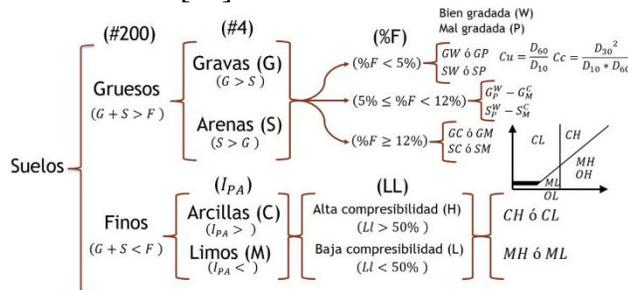


Figura 12 Ábaco de clasificación SUCS [18].

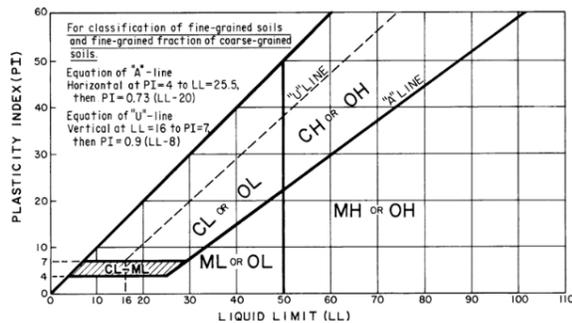


Figura 13 Carta de plasticidad [17].

2.2.2.7 Ensayo Proctor Modificado

Para dicho ensayo se usará la Norma ASTM D-1557 [19], establece que el ensayo se lo realiza en un molde de 101.6mm o 152.4mm de diámetro con un martillo de 4.536kg a una altura de 457mm, el mismo produce una energía de compactación de 1788045.198J/m³, el ensayo establece la relación existente entre el contenido de agua y peso unitario seco del suelo, el mismo se lo expresa en una curva de compactación.

- Para este ensayo se obtuvo previamente la humedad del suelo a ensayar para luego tomar una masa de 3000gr previamente tamizado sobre la malla de 4.75mm.

- A continuación, se realizaron variaciones del 2% de humedad para cada variación de humedad hasta obtener los datos de interés.
- Determinar la humedad óptima y el peso específico seco máximo mediante la elaboración de la curva de compactación.



Figura 14 Elaboración de ensayo Proctor modificado

Proceso de compactación dentro de la humedad óptima, para la realización de la presente investigación:

- Como primer paso se determinó la humedad del suelo a ensayar para posterior tomar una masa de 7000gr y elaborar 3 cilindros de cada muestra previamente tamizada.
- Con dichos datos mediante operaciones matemáticas se determinó la humedad faltante con el fin de obtener una muestra en el rango óptimo de la curva de compactación.
- A continuación, se homogenizó la muestra de suelo con agua, pero antes de iniciar la compactación se toman humedades de la mezcla como comprobación para un proceso de control.



Figura 15 Homogenización de suelo para elaboración de especímenes

2.2.2.8 Ensayo triaxial U.U. (no consolidado, no drenado)

Dicho ensayo es el más usado debido a su rapidez y a su metodología de práctica, ya que ayuda a medir la resistencia al corte respecto a la tensión total, no permite que se consolide ni se drene la muestra del suelo por ende debe mantener su estructura original y contenido de agua y no se mide la presión intersticial.

Para dicho ensayo se usó la guía de la norma ASTM D-2850 [20].

Métodos de ensayo para condiciones naturales:

A partir de la muestra cúbica en condiciones naturales se procede a tallar 3 cilindros para ensayar con presiones de confinamiento de 50 KPa, 100 KPa y 200KPa.



Figura 16 Muestra de Guamaní, elaboración de tallado

Métodos de ensayo para condiciones óptimas:

Previo al ensayo se talló tres especímenes cilíndricos en condiciones óptimas con un diámetro aproximado de 7 cm y una altura de 14.1 cm. Cabe recalcar que se tomó medidas del diámetro en la base, en medio y en la parte superior del mismo, para obtener un promedio que servirá como dato de ensayo.

Variaciones de humedad propuestas para cada tipo de suelo:

Tabla 3 Variaciones de humedad propuestas para la muestra del "Parque las Cuadras"

Ensayos	Humedad (%)
Pto. Antes del Óptimo	14.29
Pto. Óptimo	14.60
Variación 1	14.91
Variación 2	15.22
Variación 3	15.53
Variación 4	15.84
Pto. Saturado	16.15

Tabla 4 Variaciones de humedad propuestas para la muestra "Camino del Inca"

Ensayos	Humedad (%)
Pto. Antes del Óptimo	23.79
Pto. Óptimo	24.10
Variación 1	24.41
Variación 2	24.73
Variación 3	25.04
Variación 4	25.36
Pto. Saturado	25.67

Proceso de preparación de cilindros con las variaciones de humedad para cada intervalo propuesto:

Una vez tallados los especímenes a ocupar se toma el peso en estado óptimo para determinar con cálculos matemáticos el peso necesario de cada espécimen, en cada estado de humedad determinado en la Tabla 3 y Tabla 4, con el fin de garantizar que el peso establecido en cada punto de humedad sea adecuado se realizó la comprobación de estos con las siguientes ecuaciones:

$$W_{Verif}(\%) = \left(\frac{M_{muestra} - M_{seca}}{M_{seca}} \right) \times 100$$

Donde:

W_{Verif} (%): Contenido de Humedad con fin de verificación para cada punto de interés.

M_{muestra}: Masa del cilindro en estado óptimo.

M_{seca}: Masa seca de cada espécimen de cilindro.

La masa seca se determina con la siguiente ecuación:

$$M_{seca} = \frac{M_{muestra}}{1 + \frac{W_{opt} (\%)}{100}}$$

Donde:

$W_{opt} (\%)$: Contenido de humedad en estado óptimo del cilindro.

La masa del cilindro para ensayo sin contar con la masa de la membrana se determinó con la siguiente ecuación:

$$M_{ensayo} = M_{seca} \times \left(1 + \left(\frac{W_v (\%)}{100} \right) \right)$$

Donde:

$W_v (\%)$: Variación del punto de humedad al que se desea alcanzar según la Tabla 3 y Tabla 4. Para determinar la masa a usar en el ensayo triaxial U.U., se procede con la suma de la M_{ensayo} más la $M_{membrana}$.

Durante la preparación del ensayo se colocó la muestra dentro de la membrana de látex. Una vez realizado lo anterior se procedió a incrementar el contenido de humedad en la parte superior de cada cilindro, hasta obtener una determinada masa según la variación de humedad establecidas anteriormente.

La variación de humedad en los especímenes se la realizó preparando muestras en condiciones óptimas y añadiendo la humedad requerida para cada intervalo con el propósito de simular los escenarios de campo una vez se aplique el mejoramiento descrito.

3. Resultados y Discusión

En la presente sección se exponen los resultados obtenidos en el laboratorio de mecánica de suelos de la Universidad Politécnica Salesiana.

3.1 Ensayos de caracterización de suelos

A continuación, se presentan los resultados que determinaron los criterios para la clasificación del material granular fino.

Tabla 5 Resultados base para clasificación de suelos

Código	Contenido de humedad (%)	Densidad natural (gr/cm^3)	Gravedad específica
PC	21.65	1.66	2.56
GI	44.81	1.66	2.69

3.2 Análisis granulométrico y clasificación SUCS

Como paso inicial se verificó el tipo de suelo empleado para esta investigación, los resultados obtenidos se representarán a continuación:

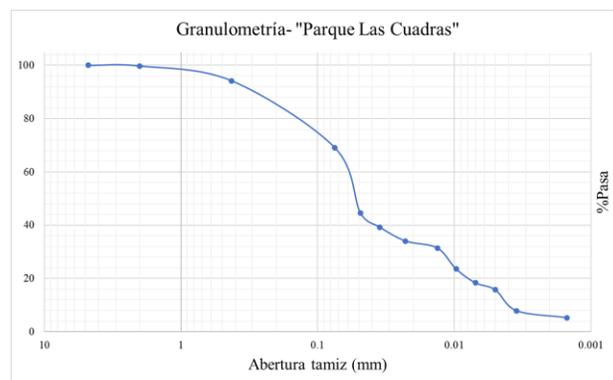


Figura 17 Curva Granulométrica - "Parque Las Cuadras"

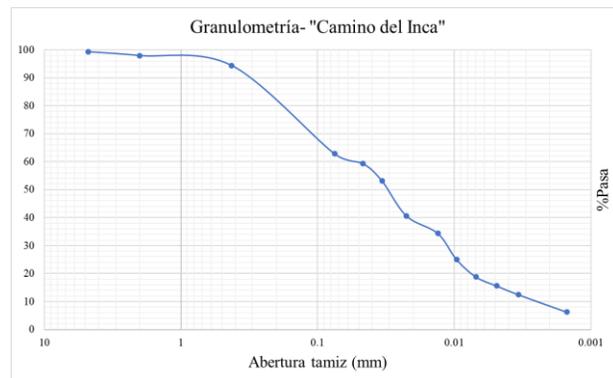


Figura 18 Curva Granulométrica - "Guamaní"

Tabla 6 Clasificación SUCS

Código	LL	LP	IP	SUCS
PC	41.76	23.84	17.91	CL
GI	50.01	30.49	19.52	MH

A través del análisis de los resultados obtenidos y aplicando el sistema de clasificación SUCS, se logró caracterizar los suelos de las localidades estudiadas. Para la muestra de suelo del “Parque Las Cuadras” se identificó un porcentaje que pasa el tamiz N. 200 de 69.14% y con ayuda de la carta de plasticidad se identificó como una Arcilla inorgánica magra de baja plasticidad (CL).

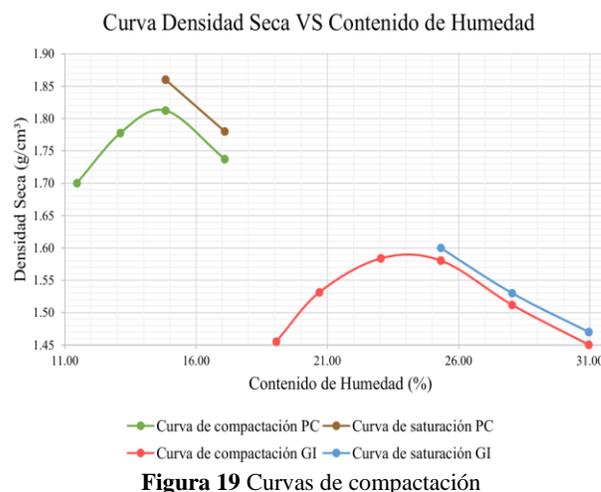
Para la muestra del suelo “Camino del Inca” se identificó un porcentaje que pasa el tamiz N. 200 de 62.79% y con ayuda de la carta de plasticidad se identificó como un Limo inorgánico de alta plasticidad (MH).

3.3 Ensayo Proctor modificado

En este apartado se determina el contenido de humedad óptimo, el cual sirvió como punto de partida para la preparación de los especímenes mediante variaciones de humedad, que posteriormente permitieron obtener los parámetros de resistencia al corte, con el fin de evaluar el comportamiento que podría presentar un relleno compactado en obra, bajo condiciones de variación de contenido de agua debido a cambios en las condiciones atmosféricas en los sitios escogidos para esta investigación. Ver Tabla 7.

Tabla 7 Resultados del ensayo Proctor modificado

Código	$\gamma_{d\ Max}$	Humedad óptima (%)
PC	1.814	14.6
GI	1.590	24.1



3.4 Parámetros de resistencia al corte

3.4.1 Ensayo triaxial U.U.

Para un análisis completo del comportamiento geotécnico del suelo con respecto al contenido de humedad, se ensayaron las muestras en estado natural con el fin de analizar los cambios en los parámetros de resistencia al corte con respecto a las muestras compactadas y parcialmente saturadas.

Tabla 8 Parámetros de resistencia al corte en estado natural

Código	Contenido de humedad (%)	ϕ (grados)	c (KPa)	E_{50} (KPa)
PC	21.65	15.99	63.71	7669.25
GI	44.81	26.07	61.12	12237.11

Nota: La muestra de suelo “PC” ensayada con la presión de confinamiento de 100 [KPa], se descartó debido a que el círculo de Mohr generado no se ajustaba lo suficiente a la envolvente de falla descrita por los círculos obtenidos con las presiones de confinamiento de 50 y 200 [KPa].

Posteriormente se ensayaron las muestras con un intervalo de humedad antes del estado óptimo y de esta manera evaluar el comportamiento del suelo compactado, sometido a pérdidas de humedad por efecto de las condiciones climáticas.

Tabla 9 Parámetros de resistencia al corte con porcentajes de humedad antes del estado óptimo

Código	Contenido de humedad (%)	ϕ (grados)	c (KPa)	E_{50} (KPa)
PC	14.29	37.80	91.85	27537.95
GI	23.79	28.95	108.97	30287.07

Finalmente, con las muestras compactadas en condición de humedad óptima mediante el ensayo Proctor modificado con un grado de compactación del 95%, se tallaron y colocaron dentro de las membranas para proceder con las variaciones de humedad establecidas en la Tabla 3 y Tabla 4, con el fin de llegar a la humedad deseada.

Tabla 10 Parámetros de resistencia al corte del ensayo triaxial U.U., de la muestra del “Parque las Cuadras”

Nomenclatura	Contenido de humedad (%)	ϕ (grados)	c (KPa)
Pto. Óptimo	14.60	38.58	98.46
Variación 1	14.91	29.31	85.82
Variación 2	15.22	29.05	84.41
Variación 3	15.53	26.78	82.20
Variación 4	15.84	25.67	80.62
Pto. Saturado	16.15	21.85	77.32

Tabla 11 Parámetros de resistencia al corte del ensayo triaxial U.U., de la muestra del “Camino del Inca”

Nomenclatura	Contenido de humedad (%)	ϕ (grados)	c (KPa)
Pto. Óptimo	24.10	36.43	107.30
Variación 1	24.41	32.63	105.66
Variación 2	24.73	29.32	104.27
Variación 3	25.04	27.71	103.79
Variación 4	25.36	23.18	102.53
Pto. Saturado	25.67	15.21	99.86

En base a los resultados de la Tabla 8 se constató que los parámetros de resistencia al corte en estado natural son menores frente a los valores resultantes con el 95% de compactación.

Como se puede observar en la Tabla 9 los parámetros de resistencia al corte son superiores en comparación con los resultados del suelo en estado natural, pero menores que los valores

definidos en el estado óptimo, por lo tanto, se puede evidenciar que este tipo de suelos, una vez compactados adquieren propiedades que mejoran las propiedades del suelo frente a posibles asentamientos.

Subsiguientemente, en base a los parámetros de resistencia al corte resultantes de las muestras compactadas al 95%, sometidas a las diferentes variaciones de humedad, se comprobó efectivamente que los parámetros de resistencia al corte sufren disminuciones, pero siguen manteniendo cierta efectividad frente a los estados de carga a los que fueron sometidos.

3.4.2 Módulo secante

A partir de la información recolectada de los ensayos triaxiales U.U. se elaboraron las curvas esfuerzo desviador [KPa] vs deformación unitaria para calcular el módulo de elasticidad secante al 50% del esfuerzo desviador (E_{50}). Ver Tabla 12, Tabla 13.

Tabla 12 Módulo de elasticidad secante de la muestra del “Parque las Cuadras”

Nomenclatura	Contenido de humedad (%)	E_{50} (KPa)
Pto. Antes del óptimo	14.29	27537.95
Pto. Óptimo	14.60	27972.76
Variación 1	14.91	16186.81
Variación 2	15.22	23479.40
Variación 3	15.53	22082.38
Variación 4	15.84	16751.59
Pto. Saturado	16.15	14356.90

Nota: El módulo de elasticidad para la variación 1 se descartó debido a que no siguen la secuencia, pero cabe recalcar que el valor obtenido no se encuentra en un rango demasiado alejado respecto al estado óptimo y los subsiguientes al mencionado.

Tabla 13 Módulo de elasticidad secante de la muestra del "Camino del Inca"

Nomenclatura	Contenido de humedad (%)	E ₅₀ (KPa)
Pto. Antes del óptimo	23.79	30287.07
Pto. Óptimo	24.10	19970.07
Variación 1	24.41	21442.73
Variación 2	24.73	11756.59
Variación 3	25.04	19823.75
Variación 4	25.36	19377.16
Pto. Saturado	25.67	18465.35

Nota: Los módulos de elasticidad para las variaciones 1 y 2 se descartaron debido a que no siguen la secuencia, cabe recalcar que los valores mencionados no se encuentran en un rango alejado respecto al estado óptimo y los subsiguientes a los puntos descartados.

3.5 Correlaciones Simples

Como complemento para la presente investigación, se aborda el análisis de las correlaciones simples entre el porcentaje de humedad y los parámetros de resistencia al corte de los sitios escogidos. El objetivo es explorar cómo varían estos parámetros en función del contenido de humedad.

Las siguientes correlaciones fueron realizadas considerando como variable independiente a la humedad y la variable dependiente corresponde a cada uno de los parámetros de resistencia al corte. Después del análisis efectuado, se determinó que se consigue una fuerte correlación mediante líneas de tendencia polinómicas de grado dos, cuyas ecuaciones se ajustan a los parámetros experimentales, obtenidos de los ensayos de laboratorio. Lo anteriormente expuesto se basa en los valores calculados, del coeficiente de Determinación (R^2), mismo que se aproxima a la unidad, lo que refleja un estrecho margen entre los valores experimentales y los valores predichos.

Nota: Para las tres primeras correlaciones simples, la variable "x" representa el porcentaje de humedad a partir del estado óptimo.

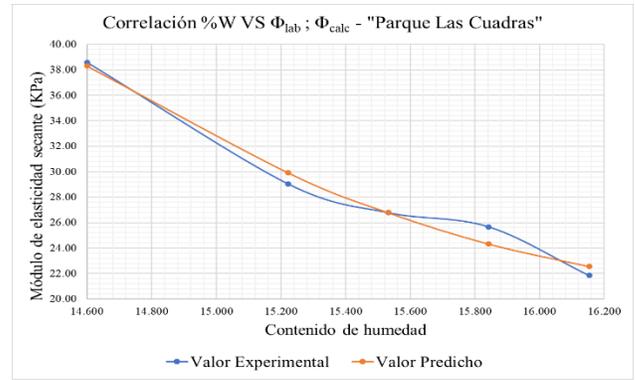


Figura 20 Correlación %W VS ϕ - "Parque Las Cuadras"

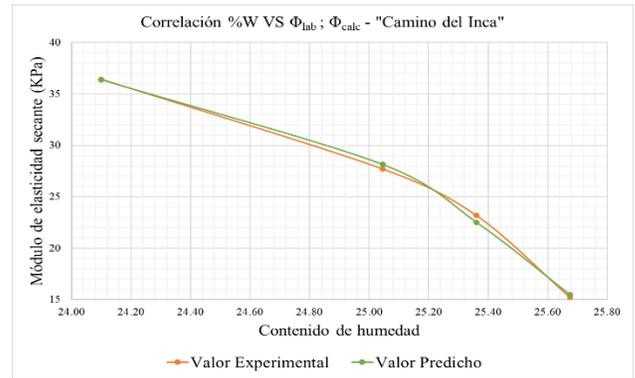


Figura 21 Correlación %W VS ϕ - "Camino del Inca"

Tabla 14 Ecuaciones de correlación simple entre el contenido de humedad vs ángulo de fricción interna

%W VS ϕ (°)	R^2
Parque Las Cuadras	
$\phi_{pr} = 3.5836x^2 - 120.3482x + 1031.5163$	0.9801
Camino del Inca	
$\phi_{pr} = -7.2343x^2 + 346.8063x - 4119.8691$	0.9971

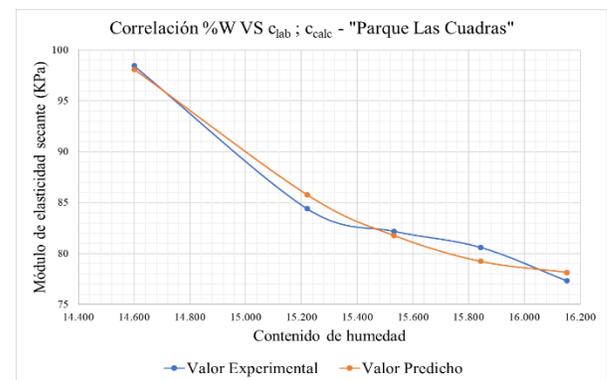


Figura 22 Correlación %W VS C - "Parque Las Cuadras"

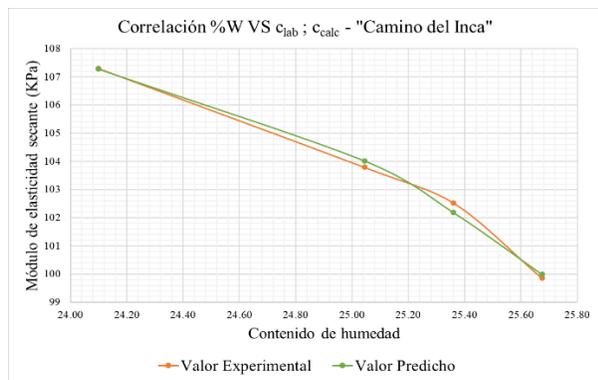


Figura 23 Correlación %W VS C - "Camino del Inca"

Tabla 15 Ecuaciones de correlación simple entre el contenido de humedad vs cohesión

% W VS C (KPa)	R ²
Parque Las Cuadras	
$c_{pr} = 7.5236x^2 - 244.2156x + 2059.9157$	0.9821
Camino del Inca	
$c_{pr} = -1.8660x^2 + 88.2557x - 935.8918$	0.9935

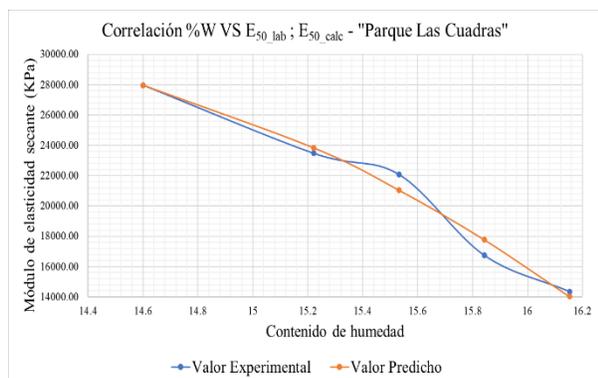


Figura 24 Correlación %W VS E_{50} - "Parque Las Cuadras"

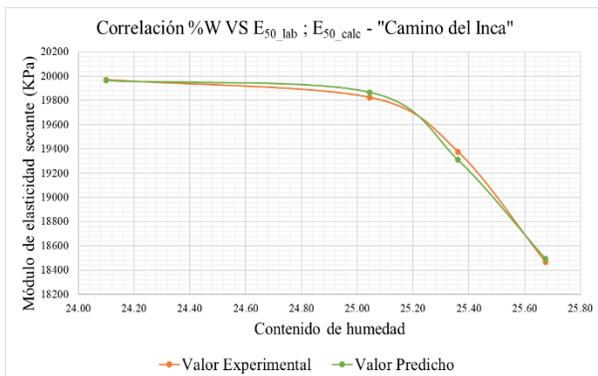


Figura 25 Correlación %W VS E_{50} - "Camino del Inca"

Tabla 16 Ecuaciones de correlación simple entre el contenido de humedad vs E_{50}

% W VS E_{50} (KPa)	R ²
Parque Las Cuadras	
$E_{50pr} = -2497.7094x^2 + 67829.3417x - 429926.9643$	0.9801
Camino del Inca	
$E_{50pr} = -1321.3527x^2 + 64834.3020x - 775086.1349$	0.9949

Las siguientes correlaciones fueron efectuadas considerando como variables independientes al ángulo de fricción interna y a la cohesión, y la variable dependiente corresponde al módulo de elasticidad. Después del análisis realizado, se determinó que se alcanza una fuerte correlación mediante líneas de tendencia polinómicas de grado dos, cuyas ecuaciones se ajustan a los parámetros experimentales, obtenidos de los ensayos de laboratorio. Lo expuesto se basa en los valores calculados, del coeficiente de Determinación (R^2), el cual se aproxima a la unidad, reflejando una estrecha dispersión entre los valores experimentales y los valores predichos del módulo de elasticidad.

Nota: En las siguientes ecuaciones la variable "x" representa el ángulo de fricción interna y la cohesión, cada una relacionada con el módulo de elasticidad.

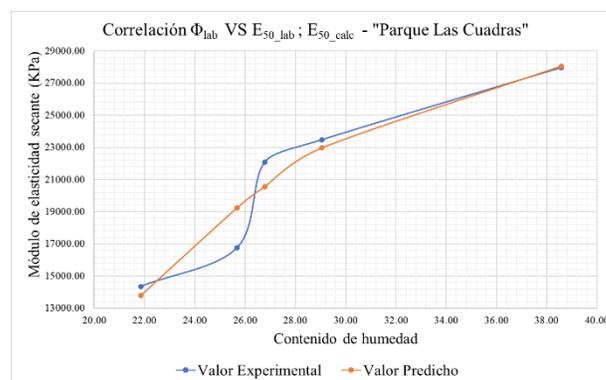


Figura 26 Correlación ϕ VS E_{50} - "Parque Las Cuadras"

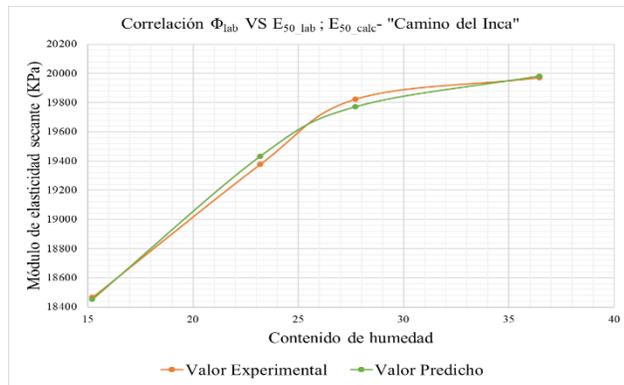


Figura 27 Correlación ϕ VS E_{50} - "Camino del Inca"

Tabla 17 Ecuaciones de correlación simple entre el ángulo de fricción interna vs E_{50}

ϕ VS E_{50} (KPa)	R^2
Parque Las Cuadras	
$E_{50pr} = - 44.2033x^2 + 3524.1914x - 42102.0208$	0.9235
Camino del Inca	
$E_{50pr} = - 3.8339x^2 + 269.9971x + 15232.9298$	0.9956

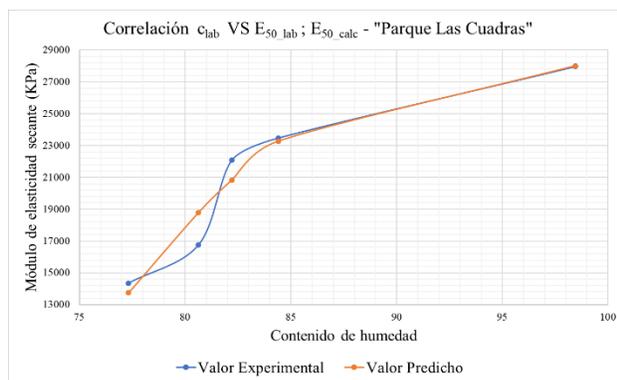


Figura 28 Correlación C VS E_{50} - "Parque Las Cuadras"

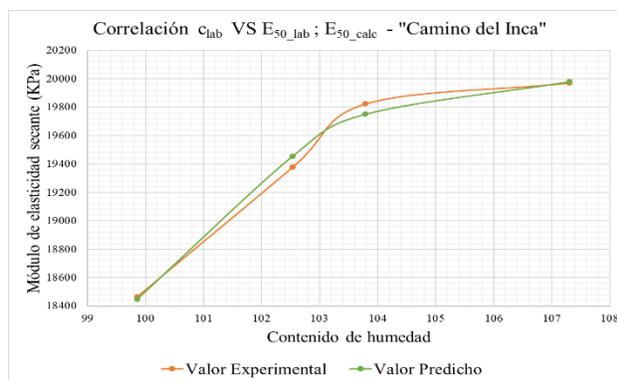


Figura 29 Correlación C VS E_{50} - "Camino del Inca"

Tabla 18 Ecuaciones de correlación simple entre la cohesión vs E_{50}

C VS E_{50} (KPa)	R^2
Parque Las Cuadras	
$E_{50pr} = - 47.7737x^2 + 9072.7563x - 402156.2210$	0.9481
Camino del Inca	
$E_{50pr} = - 35.7457x^2 + 7610.6968x - 385096.4859$	0.9915

Como se puede observar en las tablas de este apartado, el coeficiente de Determinación (R^2) se encuentra dentro de un rango adecuado, que permite afirmar que existe una correlación directa entre las variables dependiente e independiente. Las ecuaciones expuestas fueron verificadas matemáticamente aplicando el método de mínimos cuadrados.

3.6 Porcentajes de variación de los Parámetros de Resistencia al Corte de las muestras de suelo en Estado Óptimo vs el estado Óptimo Saturado

En este apartado se observa cómo interviene la variación del contenido de humedad en los parámetros de resistencia al corte.

Tabla 19 Variación de los parámetros de resistencia al corte del "Parque las Cuadras"

Código	Pto. Óptimo	Pto. Saturado	Variación (%)
Contenido de humedad (%)	14.60	16.15	10.637%
ϕ (grados)	38.58	21.85	-43.370%
c (KPa)	98.46	77.32	-21.466%
E_{50exp} (KPa)	27972.76	14356.90	-48.675%

Tabla 20 Variación de los parámetros de resistencia al corte en el "Camino del Inca"

Código	Pto. Óptimo	Pto. Saturado	Variación (%)
Contenido de humedad (%)	24.10	25.67	6.5347%
ϕ (grados)	36.43	15.21	-58.2482%
c (KPa)	107.30	99.86	-6.9355%
E_{50exp} (KPa)	19970.07	18465.35	-7.5349%

4. Conclusiones

La presente investigación concluye mediante los resultados obtenidos en los ensayos Proctor modificado y triaxial U.U., que el contenido de humedad es un factor clave durante la compactación de suelos ya que si este no es dosificado de manera controlada existen dos escenarios posibles, la deficiencia o el excedente en el contenido de humedad, lo cual tendrá una incidencia considerable durante el proceso de compactación en obra, en consecuencia, el suelo no alcanzará el grado de compactación requerido, y esto a su vez afectará negativamente a las obras, debido a posibles asentamientos y subsiguientes daños a las estructuras.

En el caso del “Parque Las Cuadras” se observa que el suelo compactado en estado óptimo adquiere propiedades mecánicas que superan aquellas en condiciones naturales, siempre y cuando cumplan con los requerimientos de compactación establecidos en las especificaciones del proyecto. Es importante tener en cuenta que, si se diera el caso en que el contenido de humedad llegue al 16.15%, se observará una disminución en el ángulo de fricción interna del 43.37%, en la cohesión de 21.466% y en el módulo de elasticidad de 48.675%, lo que indica que el suelo sufre una reducción significativa en sus propiedades mecánicas. Ver Tabla 19.

Para la muestra de suelo “Camino del Inca” se evidencia de igual manera, que el suelo compactado en estado óptimo adquiere propiedades mecánicas que superan aquellas en condiciones naturales, siempre y cuando cumplan con las especificaciones, asegurando un rango de compactación adecuado. Considerando las condiciones meteorológicas de la zona por su alto índice de precipitación, es importante tener en cuenta las variaciones de humedad que pueden incidir negativamente en las propiedades mecánicas del suelo, ya que al llegar a un contenido de humedad del 25.67%, se evidencia

un descenso del 58.2482% en el ángulo de fricción interna, un 6.9355% en la cohesión y 7.5349% en el módulo de elasticidad. Ver Tabla 20.

Comparando los escenarios de condiciones naturales versus condiciones óptimas de compactación, para ambos tipos de suelo se observa un incremento significativo en cuanto a las propiedades mecánicas del material, por lo que resulta adecuado emplear técnicas enfocadas en mejorar dichos parámetros, con el fin de brindar mayor calidad a las obras.

Al analizar las correlaciones simples entre contenido de humedad y los parámetros de resistencia al corte, en condiciones de compactación al 95%, se evidencia que este parámetro es determinante en cuanto al comportamiento del suelo y sus propiedades geomecánicas. A la vez, se ha determinado mediante líneas de tendencia polinómicas de grado 2, la obtención de un ajuste que permite predecir con buena precisión los parámetros de resistencia al corte en ambas muestras de suelo (“Parque Las Cuadras”; “Camino del Inca”), las mismas que se encuentran respaldadas por los valores obtenidos del coeficiente de Determinación (R^2), muy cercano a 1.

Se recomienda en futuras investigaciones, analizar muestras de suelo provenientes de distintos sectores de Quito y del país con el fin de recopilar más datos que permitan realizar un análisis más detallado, y que proporcionen información relevante para la construcción de rellenos compactados y obras relacionadas que dependan de sus propiedades geotécnicas.

Referencias

- [1] D. Salazar, F. Demoraes, N. Bermúdez, and S. Zavgorodniaya, “De Trébol a girasol: consecuencias de un hundimiento ocurrido el 31 de marzo de 2008 en un eje esencial de la red vial de la ciudad de Quito,” *http://journals.openedition.org/bifea*, no. 38 (3), pp. 561–572, Dec. 2009, doi:

- 10.4000/BIFEA.2360.
- [2] “94% de construcciones de Quito no está listo para un terremoto - El Comercio.” Accessed: Dec. 02, 2024. [Online]. Available: <https://www.elcomercio.com/actualidad/seguridad/casas-construccion-sismos-peligro-quito.html>
- [3] “El 45% de las casas informales de Quito tiene mayor riesgo sísmico - El Comercio.” Accessed: Dec. 02, 2024. [Online]. Available: <https://www.elcomercio.com/actualidad/quito/construccion-informal-sismos-vulnerabilidad-estudio.html>
- [4] MOP, “Especificaciones Generales para la construcción de caminos y puentes.,” *Repub. Del Ecuador Minist. Obras Publicas Y Comun. Mop - 001-F 2002*, vol. 3, no. 9, pp. 1689–1699, 2002, [Online]. Available: https://www.obraspublicas.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2013/07/01-07-2013_ConcursoPublico_StoDomingo-Esmeraldas-Especificaciones-Tecnicas.pdf
- [5] E. Panata and V. Sarzosa, “ANÁLISIS DE LA VARIACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE RESISTENCIA AL CORTE EN SUELOS DE SITIOS DE PRÉSTAMO DE CALDERÓN, LA LOMA Y CHILLOGALLO DE LA CIUDAD DE QUITO, CON DIFERENTES GRADOS DE COMPACTACIÓN Y CONTENIDOS DE HUMEDAD, MEDIANTE EL ENSAYO DE CORTE DIRECTO,” 2024.
- [6] L. Tenesaca and C. Daniel, “Correlación entre el ángulo de fricción y la relación de vacíos en arenas utilizando el ensayo de corte directo,” *Tesis*, p. 13, 2019, [Online]. Available: <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/1273/13/UPS-QT00803.pdf>
- [7] R. Ramírez, G. Alva, A. Falcón, P. Polo, E. Ortega, and J. Anaya, “Análisis comparativo de métodos para el cálculo del asentamiento de cimentaciones superficiales sobre suelo granular,” *Pontif. Univ. Católica del Perú*, p. 45, 2020, [Online]. Available: https://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/bitstream/handle/20.500.12404/17205/RAMÍREZ_GONZÁLES_RENZO_ANÁLISIS_COMPARATIVO_MÉTODOS.pdf?sequence=1
- [8] C. Aucanshala, B. Carvajal, and M. Valverde, “DISEÑO DEFINITIVO DE LA VÍA DE BORDE DEL CAMINO DE LOS INCAS; UBICADA EN LA PROVINCIA DE PICHINCHA, CANTÓN QUITO, PARROQUIAS QUITUMBE Y TURUBAMBA,” *Tesis*, pp. 1–317, 2015, [Online]. Available: <http://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/5081/1/UPS-CYT00109.pdf>
- [9] American Society for Testing and Materials, “Standard Practices for Preserving and Transporting Soil Samples,” *Am. Soc. Test. Mater.*, vol. D5079-02, no. Reapproved 2006, pp. 1–7, 2014, doi: 10.1520/D4220.
- [10] American Society for Testing and Materials, “Standard Test Methods for Laboratory Determination of Water (Moisture) Content of Soil and Rock by Mass,” *Astm D2216*, no. March, pp. 1–7, 2019, doi: 10.1520/D2216-19.
- [11] American Society for Testing and Materials, “Método de Ensayo Estándar para Densidad a Granel de Turba y Productos de Turba,” *Astm D4531*, vol. 86, no. Reaprobado, pp. 1–2, 2008.
- [12] American Society for Testing and Materials, “Métodos de prueba estándar para Gravedad específica de los sólidos del suelo por picnómetro de agua,” *Astm D854*, pp. 1–10, 2014.
- [13] B. M. Das and K. Sobhan, “Principles of Geotechnical Engineering. In Cengage Learning. Cengage Learning.,” *Cengage Learn.*, p. 819, 2018.
- [14] American Society for Testing and Materials, “Standard Test Methods for

- Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils,” *Astm D4318*, vol. 14, no. 200, pp. 1–10, 2017, doi: 10.1520/industry.
- [15] American Society for Testing and Materials, “Standard Test Method for Materials Finer than 75- μm (No. 200) Sieve in Mineral Aggregates by Washing,” *Astm C117*, pp. 1–3, 2013.
- [16] ASTM D422, “Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils,” *ASTM Int.*, vol. 63, pp. 1–15, 2007.
- [17] American Society for Testing and Materials, “Práctica Estándar para la Clasificación de suelos para propósitos de ingeniería (Sistema de Clasificación Unificada de Suelos),” *Astm D2487*, no. C, pp. 1–21, 2011, doi: 10.1520/D2487-.
- [18] “¿Qué es el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS)? | GIG.” Accessed: Dec. 02, 2024. [Online]. Available: <https://ingeotecnica.com/sistema-unificado-de-clasificacion-de-suelos-sucs>
- [19] American Society for Testing and Materials, “Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Modified Effort (56,000 ft-lbf/ft³ (2,700 kN-m/m³)) 1,” *ASTM D1557*, vol. 12, no. Reapproved, pp. 1–7, 2012, doi: 10.1520/D1557-12R21.1.
- [20] American Society for Testing and Materials, “Astm D-2850,” *Am. Soc. Test. Mater.*, pp. 1–10, 2017.