



**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE QUITO**

CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

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

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

AUTORES: Víctor Edwin Panata Tasgacho
María Victoria Sarzosa Bedoya
TUTOR: Juan Pablo Tarambís Rodríguez

Quito - Ecuador
2024

CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Nosotros, Víctor Edwin Panata Tasgacho con documento de identificación N° 0250164100 y María Victoria Sarzosa Bedoya con documento de identificación N° 1716597602; 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, 29 de febrero del 2024

Atentamente,



Víctor Edwin Panata Tasgacho
0250164100



María Victoria Sarzosa Bedoya
1716597602

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

Nosotros, Víctor Edwin Panata Tasgacho con documento de identificación N° 0250164100 y María Victoria Sarzosa Bedoya con documento de identificación N° 1716597602; 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 Artículo Académico: “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”, 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, 29 de febrero del 2024

Atentamente,



Víctor Edwin Panata Tasgacho
0250164100



María Victoria Sarzosa Bedoya
1716597602

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: 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, realizado por Víctor Edwin Panata Tasgacho con documento de identificación N° 0250164100 y por María Victoria Sarzosa Bedoya con documento de identificación N° 1716597602, 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, 29 de febrero del 2024

Atentamente,



Ing. Juan Pablo Tarambís Rodríguez, MSc.

1715336879

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

ANALYSIS OF THE VARIATION OF THE SHEAR RESISTANCE PARAMETERS IN SOILS OF CALDERÓN, LA LOMA AND CHILLOGALLO LOAN SITES OF THE CITY OF QUITO, WITH DIFFERENT DEGREES OF COMPACTION AND MOISTURE CONTENTS, BY MEANS OF THE DIRECT SHEAR TEST

Víctor Panata-Tasgacho¹, María Sarzosa-Bedoya²

Resumen

La investigación realizada en este artículo tiene como propósito conocer los parámetros de resistencia al corte variando el grado de compactación y contenido de humedad.

Se extrajo muestras de suelo de sitios de préstamo de Calderón, la Loma y Chillogallo en estado natural (bloques inalterados) y suelo alterado, para los diferentes ensayos planteados. En los laboratorios de mecánica de suelos y geotecnia se realizó ensayos de granulometría, límites de Atterberg, densidad natural, gravedad específica, Proctor modificado variando el grado de compactación de 80%, 90% y 95%, a su vez también el contenido de humedad óptima de 95% y 101%, para determinar la cohesión y ángulo de fricción interno de cada muestra en el ensayo de corte directo.

Se analizaron los resultados obtenidos, principalmente los de corte directo, para observar como varían los parámetros de resistencia al corte y brindar correctas correlaciones y conclusiones.

Palabras Clave: suelo, Proctor modificado, corte directo, compactación, humedad, densidad seca.

Abstract

The purpose of the research carried out in this article is to know the parameters of shear resistance by varying the degree of compaction and moisture content.

Soil samples were extracted from Calderón, La Loma and Chillogallo loan sites in a natural state (unaltered blocks) and altered soil, for the different tests proposed.

In the soil mechanics and geotechnics laboratories, the tests of granulometry, Atterberg limits, natural density, specific gravity, modified Proctor were carried out by varying the degree of compaction of 80%, 90% and 95%, in turn also the optimal moisture content of 95% and 101%, in order to then determine the parameters of cohesion and internal friction angle of each sample in the direct shear test.

All the results obtained were analyzed, mainly those of direct shear, in order to observe how the shear resistance parameters vary and provide correct correlations and conclusions.

Keywords: soil, modified Proctor, direct shear, compaction, moisture, dry density.

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

Autor para correspondencia: vpanata@est.ups.edu.ec, msarzosa@est.ups.edu.ec

1. Introducción

En el ámbito de la construcción conocer la capacidad portante del suelo es de mucha importancia, para entender su mecanismo de resistencia y determinar cuanta carga puede soportar, o si sería necesario utilizar mejoramiento para proyectos viales de gran importancia.

Una de las investigaciones sobre el tema a tratar es la de variación de los parámetros de resistencia al corte con diferentes grados de saturación en suelos cohesivos, obteniendo como resultado suelos de tipo arcillosos y limosos, los cuales al ser sometidos a largas temporadas de sumergencia provocan la reducción de su ángulo de fricción interna y en consecuencia de su esfuerzo cortante [1]. De dicho análisis se puede indicar que el agua es un factor perjudicial para la resistencia del suelo.

Analizar la resistencia del suelo variando su grado de compactación y humedad, factores determinantes en la capacidad portante del suelo, permiten estimar los parámetros de cohesión y coeficiente de fricción para conocer la carga que el suelo llegaría a soportar a largo plazo incluyendo su fase de consolidación y funcionamiento de por vida.

Un parámetro importante en la resistencia al esfuerzo cortante es la cohesión, la cual está presente en los materiales de grano fino como los limos y arcillas, por lo tanto, sus características dependen de la mineralogía, el contenido de humedad, la orientación de las partículas y la densidad del suelo [2].

En el Ecuador se deben cumplir con estándares de calidad en cuanto a la compactación de suelos donde se especifica que el grado de compactación relativa será de al menos el 95% de la densidad máxima, obtenidos en laboratorio, de acuerdo con las especificaciones generales del MOP-001F-2002 [3].

La finalidad de este estudio se basa en conocer las variaciones de los parámetros de resistencia al corte en suelos considerando el 80%, 90% y 95% grados de compactación y contenidos de humedad del 95% y 101% de la humedad óptima, determinada mediante los ensayos de compactación Proctor Modificado.

Esta investigación se enfoca en analizar los parámetros de resistencia al esfuerzo cortante, realizando ensayos de corte directo, mediante el cual se determina la variación del ángulo de fricción interna y cohesión, en muestras de suelo en estado natural y variando, tanto su grado de compactación, como su contenido de humedad. A partir de los resultados obtenidos se define la forma en que dichos parámetros afectan la resistencia y estabilidad del suelo.

La evaluación de los parámetros de resistencia al corte del suelo, son un factor esencial en el estudio, análisis y diseño de diferentes estructuras que se asentarán en el suelo [4].

La importancia del presente estudio radica en conocer la influencia de la variación del grado de compactación y humedad en suelos de tres sectores de la ciudad de Quito, a fin de entender su mecanismo de resistencia.

En el laboratorio se realizó el ensayo de corte directo, el cual permite determinar los parámetros de resistencia al corte como son: la cohesión (c) y el ángulo de fricción interna (ϕ); donde la muestra se somete a dos tipos de cargas una vertical (P) y una horizontal (F); obteniendo como resultado dos esfuerzos resultantes, un esfuerzo normal (σ) y un cortante (τ). En dicho ensayo al aplicar las cargas se induce a que la muestra falle a través de un plano horizontal, en el cual actuarán los esfuerzos ya mencionados [5].

Esta investigación puede servir como pauta para estudios más amplios sobre la capacidad de carga del suelo, llegando a un análisis comparativo de la cohesión y ángulo de fricción, además de analizar su comportamiento de factores externos, para lo cual se puede preparar un estudio con el ensayo triaxial para ampliar correlaciones y resultados más acertados.

2. Materiales y Métodos

Para desarrollar el proyecto satisfactoriamente se debe realizar como primer punto una revisión bibliográfica minuciosa sobre los parámetros mencionados anteriormente, para luego efectuar los ensayos correspondientes de laboratorio, con lo

cual se puede determinar y tabular los resultados obtenidos de la cohesión y ángulo de fricción interna, con diferentes grados de compactación y contenidos de humedad. A partir de dichos resultados se determinan diferencias, ventajas y desventajas en suelos de relleno compactados obtenidos de varios sectores de la ciudad de Quito: Calderón, la Loma y Chillogallo. Esta investigación se llevó a cabo en los laboratorios de mecánica de suelos y geotecnia de la Universidad Politécnica Salesiana.

2.1. Localización del suelo

Se extrajeron muestras inalteradas provenientes de sitios de préstamos de tres sectores de la ciudad de Quito: Calderón, la Loma y Chillogallo. Se trasladaron también muestras representativas de suelo inalterado, para los ensayos correspondientes en este estudio. A continuación, se detallará la localización exacta de cada muestra de suelo extraída.



Figura 1. Ubicación de la muestra extraída de Calderón.



Figura 2. Ubicación de la muestra extraída de la Loma.



Figura 3. Ubicación de la muestra extraída de Chillogallo.

2.1.1 Muestreo

Los suelos para analizar en el presente estudio fueron obtenidos de tres sectores diferentes de la ciudad de Quito, pero con características visuales similares. Se tomó una cantidad representativa de cada suelo alterado a 1.20 metros de profundidad y bloques en condición natural a 1.50 metros de profundidad para realizar el ensayo de densidad natural y corte directo de las muestras en estado natural. En la tabla 1 se detalla la descripción manual visual de las muestras de suelo extraídas.

Tabla 1. Descripción manual visual de las muestras de suelo

Sitio	Descripción
Calderón	Arena, color café claro, humedad casi nula
Loma	Arena, color café, sin materia orgánica, humedad semejante a la optima
Chillogallo	Arena, color café, humedad baja

2.2. Ensayos de laboratorio

Los ensayos necesarios para este estudio se realizaron en los laboratorios de mecánica de suelos y geotecnia, donde se tomó como guía el Manual de laboratorio para los ensayos de propiedades físicas y mecánicas de los suelos [5].

2.2.1. Granulometría

En las tres muestras de suelos se realizó Granulometría por lavado para obtener una correcta

Panata & 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

clasificación SUCS y AASHTO, para lo cual cada muestra de suelo se debe lavar a través de tamices, y se usa el material retenido en la malla N° 40 y 200 de partículas de arenas [6]. Se debe complementar la curva granulométrica, es por ello que también se debe realizar granulometría por el método del hidrómetro, mediante proceso de sedimentación el hidrómetro asegura la extracción de datos necesarios, para conocer el porcentaje exacto de finos [7].

2.2.2. Límites de Atterberg

La finalidad del ensayo de los Límites de Atterberg es describir la consistencia de suelos finos con contenido de agua variable [8]; también conocer el límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad de cada muestra de suelo a analizar.

2.2.3. Densidad natural y gravedad específica

En el ensayo de densidad natural del suelo, se tomó bloques inalterados de unos 5cmx5cm para cubrirlo con parafina y así conocer la densidad del suelo en estado natural, la cual expresa la masa por unidad de volumen [9].

El ensayo de gravedad específica se utiliza para calcular la densidad de los sólidos del suelo, en el caso del estudio se encontró arenas en los tres tipos de suelo a analizar. Se usa material que pasa el tamiz N° 4, el ensayo se realiza por medio de un picnómetro con agua y una bomba de vacío [10].

2.2.4. Proctor modificado

El ensayo de Proctor Modificado determina la densidad seca máxima y el contenido de humedad óptima del suelo [8]. En el laboratorio se realizó el ensayo con la finalidad de conocer los parámetros de densidad seca máxima y contenido de humedad, y determinar las variaciones correspondientes de 80%, 90% y 95% grados de compactación de las 3 muestras de suelo, también se realizó ensayos variando la humedad del suelo del 95% y 101% del contenido de humedad óptima. Para este ensayo se debe usar el molde metálico de capacidad de 2.320 cm³ y una masa de 4,535 kg, dando lugar a una energía de compactación mayor. Además, se pondrán 5 capas dando a cada una de ellas un total de 56 golpes [11].



Figura 4. Tallado de la muestra de suelo del ensayo de Proctor Modificado para ensayo de Corte Directo.

2.2.5. Corte directo

Este ensayo se realiza para determinar los parámetros de resistencia al corte del suelo que son la cohesión (c) y ángulo de fricción interna (ϕ); donde la muestra se somete a dos tipos de cargas una vertical (P) y una carga horizontal (F); obteniendo como resultado dos esfuerzos resultantes, un esfuerzo normal (σ) y un cortante (τ). Al aplicar las cargas se induce a que la muestra falle a través de un plano horizontal [5].

Se usaron muestras de suelo alteradas remoldeadas, mediante el ensayo de proctor modificada variando el grado de compactación y contenido de humedad. En los suelos cohesivos se deben tomar las lecturas de la deformación vertical durante la consolidación [12]. En este estudio la consolidación de las muestras se llevó a cabo con las siguientes presiones 100, 200 y 400 KPa, por un tiempo de 5 minutos. Según la norma ASTM D3080 la velocidad, tiempo de falla y desplazamiento, se define dependiendo el tipo de suelo [13].

Tabla 2 . Tiempo mínimo de falla del ensayo [13].

Clasificación SUCS	Tiempo mínimo de falla τ_f
SW, SP (<5% finos)	10 min
SW – SM, SP – SM, SM(>5% finos)	60 min
SC, ML, CL, SP – SC	200 min
MH, CH	24 h

3. Resultados y Discusión

En la siguiente sección se presentarán los resultados obtenidos de los ensayos realizados en los laboratorios de mecánica de suelos y geotecnia de la Universidad Politécnica Salesiana.

3.1. Granulometría

Como parte fundamental del estudio se debe conocer el tipo de suelo con el que se va a trabajar, información requerida para verificar en la tabla de tiempo mínimo de falla del ensayo de corte directo, según la norma ASTM D3080 [13], y, en consecuencia, escoger el tiempo adecuado de ensayo. Por lo mencionado, fue necesario realizar dicho ensayo para cada muestra de suelo. Se obtienen los resultados presentados en las tablas 3, 4 y 5.

Tabla 3. Análisis granulométrico de la muestra de suelo de Calderón

Tamiz	Masa retenida (g)	% Retenido acumulado	% Pasa	
4	4.82	0.48	99.52	
10	23.19	2.80	97.20	
20	32.68	6.07	93.93	
30	14.01	7.47	92.53	
40	19.15	9.39	90.62	ML
60	54.41	14.83	85.17	
100	99.14	24.74	75.26	
200	160.98	40.84	59.16	
Tara	591.62	100.00	0.00	

Tabla 4. Análisis granulométrico de la muestra de suelo de la Loma

Tamiz	Masa retenida (g)	% Retenido acumulado	% Pasa	
4	18.20	6.07	93.93	
10	26.50	14.90	85.10	
20	24.53	23.14	76.86	
30	9.64	26.36	73.74	
40	12.69	30.59	69.41	SM
60	15.10	35.62	64.38	
100	14.17	40.34	59.66	
200	31.10	51.38	48.62	
Tara	145.87	100.00	0.00	

Tabla 5. Análisis granulométrico de la muestra de suelo de la Chillogallo

Tamiz	Masa retenida (g)	% Retenido acumulado	% Pasa	
4	3.7	1.23	98.77	
10	7	3.57	96.43	
20	8.95	6.55	93.45	
30	7.18	8.94	91.06	
40	8.65	11.83	88.17	SM
60	23.06	19.51	80.49	
100	23.47	27.34	72.66	
200	75.15	52.39	47.61	
Tara	142.84	100.00	0.00	

Se realizó el ensayo de granulometría por lavado para la fracción de arena presente en el suelo y granulometría por hidrómetro para determinar el porcentaje de finos.

En el sector de Calderón se obtuvo como resultado el tipo de suelo según clasificación SUCS ML [14] y según clasificación AASHTO A-4(0) [15], teniendo así un suelo limo arenoso.

En los sectores de la Loma y Chillogallo se obtuvo como resultado el tipo de suelo según clasificación SUCS SM [14] y según clasificación AASHTO A-2-4(0) [15], teniendo así un suelo clasificado como arena limosa.

3.2. Límites de Atterberg y contenido de humedad

Tabla 6. Análisis de límites de Atterberg y contenido de humedad

	Calderón	Loma	Chillogallo
Límites de Atterberg	NP	NP	NP
Contenido de humedad (%)	2.4	16.69	8.04

En el laboratorio de mecánica de suelos se realizó el ensayo de límites de Atterberg para cada muestra, sin embargo, los suelos presentaban un contenido elevado de arenas, por tanto, no se pudo realizar los rollos de 3 mm de diámetro para la determinación del límite plástico y a su vez el

Panata & 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

índice de plasticidad; el suelo se agrietaba a los 6 mm de diámetro, llegando a la conclusión que son suelos no plásticos (NP).



Figura 5. Ensayo del límite plástico rollo cuarteado.

Tampoco se pudo realizar el ensayo de Casagrande, debido a que a los 4 golpes el surco en el suelo se unía y si se reducía la cantidad de agua, no se podía dividir la muestra con el ranurador.

En cuanto a la humedad, se obtuvieron contenidos bajos de agua en los suelos de Calderón y Chillogallo, mientras que, en el suelo de la Loma, el contenido de humedad se aproximaba a la humedad óptima requerida para alcanzar la densidad seca máxima en el ensayo de compactación Proctor Modificado.

3.3. Densidad natural y gravedad específica

Tabla 7. Valores de densidad natural y gravedad específica de las muestras de suelo

Lugar	Densidad Natural ρ (g/cm ³)	Gravedad específica (Gs)
Calderón	1.64	2.66
Loma	1.61	2.55
Chillogallo	1.59	2.53

3.4. Proctor modificado

En el laboratorio se realizaron 3 ensayos de compactación Proctor Modificado con la finalidad de obtener los valores de densidad seca máxima y el contenido de humedad óptimo de cada muestra de suelo, para en base a estos datos trabajar con los diferentes grados de compactación y contenido de humedad, establecidos en la fase inicial de la investigación.

A continuación, se presenta una gráfica de las curvas obtenidas en el ensayo de los tres tipos de suelo.

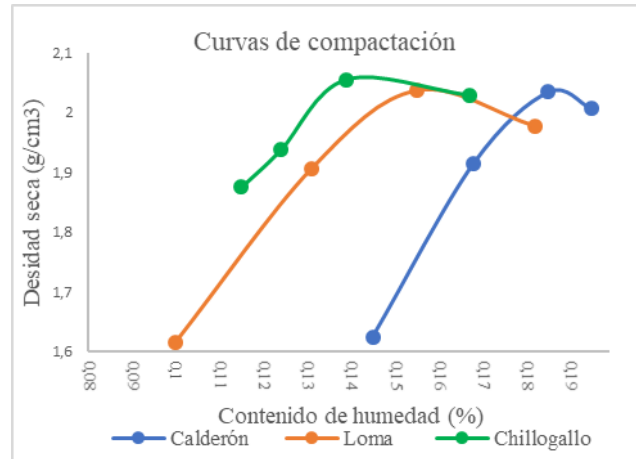


Figura 6. Curvas de Compactación obtenidas del ensayo Proctor Modificado con las tres muestras de suelo.

Tabla 8. Valores de densidad seca máxima y contenido de humedad óptima de las muestras de suelo

	Densidad seca máxima (g/cm ³)	Humedad óptima (%)
Calderón	2.039	18.70
Loma	2.0385	15.73
Chillogallo	2.0580	14.20

Para el grado de compactación se realizaron 9 ensayos de compactación Proctor Modificado variando el grado de compactación al 80%, 90% y 95%, donde se obtuvieron los datos de densidad seca y contenido de humedad expuestos en la Tabla 9. Para el grado de compactación del 80% el suelo al tener un bajo contenido de humedad es propenso al desmoronamiento y se dificultó el tallado de las muestras de 10x10x2 cm para el ensayo de corte directo. En la normativa MOP-001F-2002 [1] se detalla que no se puede aceptar valores menores al 95% del grado de compactación, y en este estudio se pudo comprobar que con grados de compactación de 80% y 90%, el suelo presenta un rango de resistencia reducido, con lo cual no es aplicable trabajar en campo con dichos valores.

Tabla 9. Valores de densidad seca y contenido de humedad de la variación del grado de compactación

	Grado de compactación (%)	Densidad seca (g/cm ³)	Humedad (%)
Calderón	80	1.631	14.55
	90	1.835	16.10
	95	1.937	17.01
Loma	80	1.636	10.18
	90	1.841	12.27
	95	1.943	13.51
Chillogallo	80	1.646	8.25
	90	1.852	11.20
	95	1.955	12.62

En cuanto a la variación del contenido de humedad, se trabajó con rangos del 95% y 101% de la humedad óptima, donde se pudo determinar que los parámetros de resistencia del suelo bajan drásticamente, evidenciando que el agua es un factor esencial en la compactación del suelo. Con el 95% de la humedad óptima el suelo no se pudo compactar de manera adecuada y al momento de tallar en los moldes, la adherencia entre las partículas resultaba demasiado baja. Mientras que con el 101%, el suelo se volvía lodoso. En base a lo mencionado, se debe trabajar con los valores de la densidad seca máxima y humedad óptima, obtenidos mediante los ensayos de laboratorio, en concordancia con la compactación relativa que establecen las especificaciones de obra.

Tabla 10. Valores de densidad seca en función de la variación del contenido de humedad al 95% y 101% del valor óptimo

	% Contenido de humedad óptima	Densidad seca (g/cm ³)	Humedad (%)
Calderón	95	1.535	13.70
	101	1.998	19.70
Loma	95	1.685	10.73
	101	2.023	16.73
Chillogallo	95	1.810	10.55
	101	2.050	15.20

3.5. Corte directo

Se realizó los ensayos de corte directo, para las muestras remoldeadas obtenidas en el ensayo de Proctor modificado variando el grado de compactación para 80%, 90% y 95%, en el cual se pudo determinar que la cohesión se eleva a medida que el grado de compactación aumenta en los tres tipos de suelos analizados: Calderón, la Loma y Chillogallo, mientras que el ángulo de fricción interno aumenta con el grado de compactación 90%, pero se distingue una disminución del valor en el grado de compactación 95%, este mecanismo se evidencia para las muestras de Calderón y la Loma.

Para las muestras de Chillogallo el ángulo de fricción interno se eleva a medida que aumenta el grado de compactación. A continuación, en las tablas 11, 12 y 13 se detallan los resultados obtenidos de cohesión y ángulo de fricción interna, con sus respectivas ecuaciones.

Tabla 11. Resultados del ensayo de Corte Directo variando el grado de compactación de Calderón

Grado %	c (kPa)	φ (°)	Ecuación
80	55.74	17.74	$\tau = 55.74 + \sigma \tan(17.74^\circ)$
90	56.49	18.99	$\tau = 56.49 + \sigma \tan(18.99^\circ)$
95	63.38	18.13	$\tau = 63.38 + \sigma \tan(18.13^\circ)$

Tabla 12. Resultados del ensayo de Corte Directo variando el grado de compactación de la Loma

Grado %	c (kPa)	φ (°)	Ecuación
80	41.03	21.67	$\tau = 41.03 + \sigma \tan(21.67^\circ)$
90	46.83	23.64	$\tau = 46.83 + \sigma \tan(23.64^\circ)$
95	47.05	22.83	$\tau = 47.05 + \sigma \tan(22.83^\circ)$

Panata & 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

Tabla 13. Resultados del ensayo de Corte Directo variando el grado de compactación de Chillogallo

Grado %	c (kPa)	ϕ (°)	Ecuación
80	32.46	20.90	$\tau = 32.46 + \sigma \tan(20.90^\circ)$
90	34.08	21.81	$\tau = 34.08 + \sigma \tan(21.81^\circ)$
95	41.59	25.73	$\tau = 41.59 + \sigma \tan(25.73^\circ)$

En las tres muestras de suelo que se obtuvieron variando el contenido de humedad, se pudo determinar que la cohesión disminuye a medida que aumenta el contenido de agua en su composición, ya que el suelo se vuelve mucho más blando y sus partículas no tienen la suficiente adherencia entre ellas para poder mantenerse unidas y es ahí que se ve afectado dicho valor con el aumento de agua. En cuanto al ángulo de fricción interna de las tres muestras de suelo, se observó que este de igual manera disminuye su valor, debido al aumento de agua en su composición. Dichos parámetros se los puede corroborar en las tablas 14, 15 y 16, expuestas a continuación:

Tabla 14. Resultados del ensayo de Corte Directo variando el contenido de humedad de Calderón

ω %	c (kPa)	ϕ (°)	Ecuación
95	37.11	19.84	$\tau = 37.11 + \sigma \tan(19.84^\circ)$
101	35.39	19.53	$\tau = 35.11 + \sigma \tan(19.53^\circ)$

Tabla 15. Resultados del ensayo de Corte Directo variando el contenido de humedad de la Loma

ω %	c (kPa)	ϕ (°)	Ecuación
95	30.17	24.31	$\tau = 30.17 + \sigma \tan(24.31^\circ)$
101	29.91	22.29	$\tau = 29.91 + \sigma \tan(22.29^\circ)$

Tabla 16. Resultados del ensayo de Corte Directo variando el contenido de humedad de Chillogallo

ω %	c (kPa)	ϕ (°)	Ecuación
95	26.76	21.21	$\tau = 26.76 + \sigma \tan(21.21^\circ)$
101	23.36	20.96	$\tau = 23.36 + \sigma \tan(20.96^\circ)$

Para complementar esta investigación, se realizó ensayos de las muestras de suelo en estado natural, para hacer el análisis respectivo con las variaciones antes ya presentadas en este artículo.

La cohesión y ángulo de fricción interno en el suelo de Calderón en estado natural es superior a los valores presentados con el grado de compactación de 95%, sus partículas en estado natural cumplen con los requisitos de las especificaciones MOP-001F-2002, vigentes en el país para el control de calidad en proyectos viales.

Con respecto a los parámetros de resistencia al corte en el suelo de la Loma, para el caso de la cohesión fueron menores en estado natural en comparación con los resultados obtenidos variando el grado de compactación, sin embargo, para el caso del ángulo de fricción interna en estado natural es superior al ángulo de fricción interna obtenido para el grado de compactación del 80%, pero es inferior frente a los grados de compactación del 90% y 95%.

En el suelo de Chillogallo se pudo evidenciar que la cohesión en estado natural es mayor que el valor obtenido con un grado de compactación de 90%, mientras que el ángulo de fricción interna en estado natural es menor que en los tres casos de grados de compactación analizados.

Tabla 17. Resultados del ensayo de Corte Directo en estado natural de Calderón

c (kPa)	ϕ (°)	Ecuación
64.42	20.19	$\tau = 64.42 + \sigma \tan(20.19^\circ)$

Tabla 18. Resultados del ensayo de Corte Directo en estado natural de la Loma

c (kPa)	ϕ (°)	Ecuación
40.51	22.68	$\tau = 40.51 + \sigma \tan(22.68^\circ)$

Tabla 19. Resultados del ensayo de Corte Directo en estado natural de Chillogallo.

c (kPa)	ϕ (°)	Ecuación
33.31	20.55	$\tau = 33.31 + \sigma \tan(20.55^\circ)$

3.5. Correlaciones

Se realizó 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, para las tres muestras de suelo, donde se pudo observar que la variable dependiente se ajusta mediante curvas con líneas de tendencia polinómica de grado 4, con sus respectivas ecuaciones y coeficiente de Pearson (R) con valor igual o cercano a 1, el cual nos permite determinar un buen ajuste con las curvas obtenidas, evidenciando una correlación directa. Dichos resultados se presentan en la fig. 7, fig. 8, tabla 20 y tabla 21.

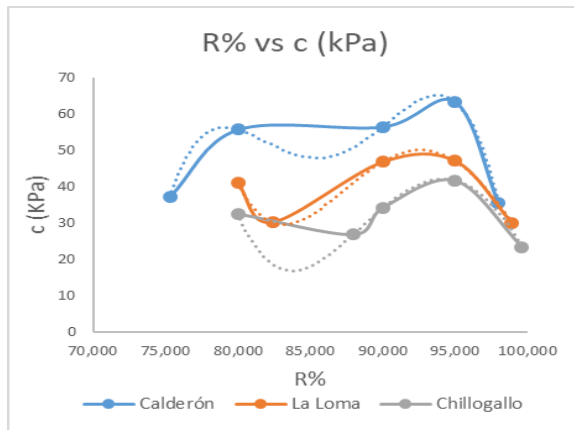


Figura 7. Curvas de correlación de variables compactación relativa vs cohesión.

Tabla 20. Ecuaciones de correlación de variables compactación relativa vs cohesión

R% vs c (kPa)	R
Calderón	
$y = -0.0043x^4 + 1.475x^3 - 190.05x^2 + 10857x - 231989$	1
Loma	
$y = 0.0019x^4 - 0.7267x^3 + 102.07x^2 - 6339.9x + 146979$	1
Chillogallo	
$y = 0.0013x^4 - 0.4967x^3 + 72.158x^2 - 4620.3x + 110110$	1

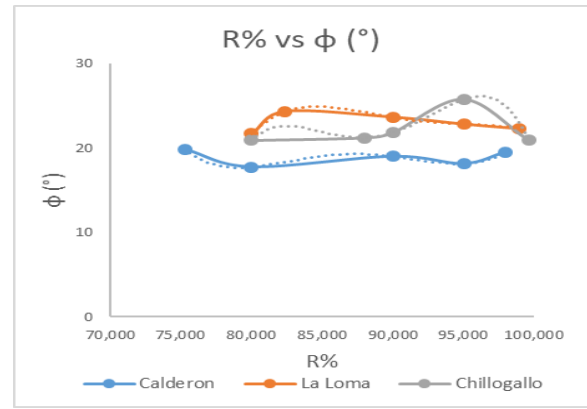


Figura 8. Curvas de correlación de variables compactación relativa vs ángulo de fricción interno.

Tabla 21. Ecuaciones de correlación de variables compactación relativa vs ángulo de fricción interno

R% vs ϕ (°)	R
Calderón	
$y = 0.0004x^4 - 0.1307x^3 + 17.016x^2 - 982.17x + 21220$	1
Loma	
$y = -0.0004x^4 + 0.1372x^3 - 188.888x^2 + 1154x - 26371$	1
Chillogallo	
$y = -0.0013x^4 + 0.455x^3 - 60.493x^2 + 3567.5x - 78723$	1

De igual forma también se realizó la correlación de variables entre densidad seca, cohesión y ángulo de fricción interno, para Calderón, la Loma y Chillogallo, con el 80%, 90%, 95% de grados de compactación y el 95% y 101% de la humedad óptima, donde se observó líneas de tendencia polinómicas con muy buen ajuste, es decir, R=1, exponiendo una correlación

Panata & 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 directa. En las fig. 9, fig. 10, tabla 22 y tabla 23, se presentan los resultados.

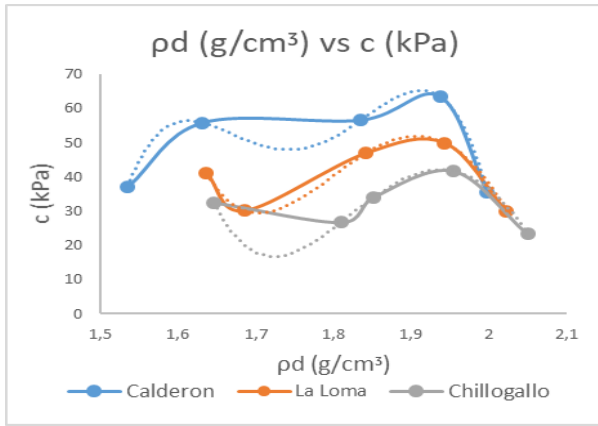


Figura 9. Curvas de correlación de variables densidad seca vs cohesión.

Tabla 22. Ecuaciones de correlación de variables densidad seca vs cohesión

pd (g/cm³) vs c (kPa)	R
Calderón	
$y = -24765x^4 + 173918x^3 - 456902x^2 + 532201x - 231866$	1
Loma	
$y = 10909x^4 - 84045x^3 + 241537x^2 - 306931x + 145576$	1
Chillogallo	
$y = 7146.2x^4 - 57449x^3 + 171642x^2 - 226039x + 110801$	1

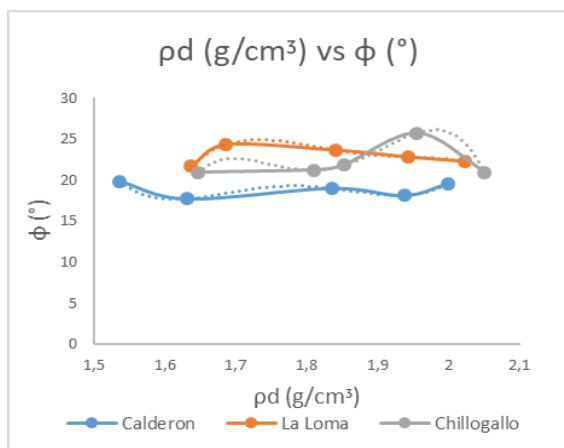


Figura 10. Curvas de correlación de variables densidad seca vs ángulo de fricción interno.

Tabla 23. Ecuaciones de correlación de variables densidad seca vs ángulo de fricción interno

pd (g/cm³) vs φ (°)	R
Calderón	
$y = 2170.2x^4 - 15407x^3 + 40910x^2 - 48147x + 21209$	1
Loma	
$y = -2111.4x^4 + 15880x^3 - 44724x^2 + 55894x + 26126$	1
Chillogallo	
$y = -7120x^4 + 52048x^3 - 142391x^2 + 172792x - 78458$	1

Para complementar un análisis a fondo de esta investigación, se realizó correlaciones entre humedad, cohesión y ángulo de fricción interno, donde de igual forma se evidenció un muy buen ajuste en las curvas, obteniendo un valor de R=1 que demuestra una correlación directa entre las variables. Resultados presentados en la fig. 11, fig. 12, tabla 24 y tabla 25.

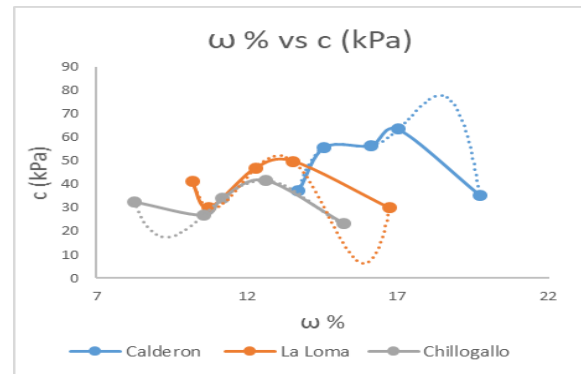


Figura 11. Curvas de correlación de variables humedad vs cohesión.

Tabla 24. Ecuaciones de correlación de variables humedad vs cohesión

ω % vs c (kPa)	R
Calderón	
$y = -0.8496x^4 + 55.7x^3 - 1363.9x^2 + 14789x - 59876$	1
Loma	
$y = 0,912x^4 - 48.12x^3 + 940.86x^2 - 8081.5x + 25779$	1
Chillogallo	
$y = 0.2421x^4 - 12.043x^3 + 220.13x^2 - 1748.8x + 5118.9$	1

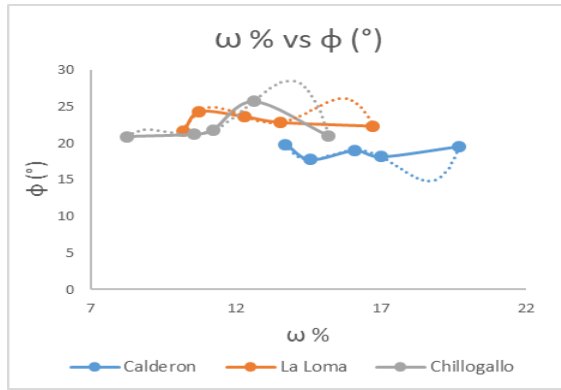


Figura 12. Curvas de Compactación obtenidas del ensayo Proctor Modificado con las tres muestras de suelo.

Tabla 25. Ecuaciones de correlación de variables humedad vs ángulo de fricción interno

ω % vs ϕ (°)	R
Calderón	
$y = 0.1408x^4 - 9.2683x^3 + 227.55x^2 - 2470.5x + 10027$	1
Loma	
$y = -0.1065x^4 + 5.6999x^3 - 113.36x^2 + 992.6x - 3205.3$	1
Chillogallo	
$y = -0.0836x^4 + 3.703x^3 - 60.491x^2 + 432.61x - 1123.3$	1

Cabe mencionar que los ecuaciones y valores de R presentados en las tablas de correlaciones, fueron comprobados mediante cálculos complementarios como: método de mínimos cuadrados con ajuste polinómico de grado 4, con intervalos en el rango de los valores obtenidos en el laboratorio y método de Gauss Jordan, verificando que se genera una tendencia similar a la que se obtiene con Microsoft Excel.

4. Conclusiones

Con los resultados obtenidos en los ensayos de Proctor modificado y corte directo para los tres tipos de suelos, se puede concluir que el agua es un factor mandatorio en la resistencia del suelo, debido a que un valor insuficiente de agua no permite alcanzar la compactación requerida y por ende la adherencia de sus partículas, mientras que al aumentar el contenido de agua sobre el porcentaje óptimo en el suelo, ocasiona que este se vuelva tipo lodoso, disminuyendo totalmente

los parámetros de resistencia al corte, es por ello que se debe trabajar con los valores de densidad seca máxima y contenido de humedad óptima, obtenidos en laboratorio para cumplir con el 95% del grado de compactación, establecido en las especificaciones reglamentarias del Ecuador para subrasante.

El suelo de Chillogallo en el ensayo de corte directo variando el grado de compactación, presentó un aumento progresivo de la cohesión y ángulo de fricción interno, por lo que se llega a concluir que es un suelo de buena calidad, para trabajar en una obra vial, cumpliendo los parámetros establecidos en la especificación MOP-001F-2002.

Es importante mencionar que una vez aumentada la humedad al 101% con respecto a la óptima, el suelo de Calderón presentó un cambio en su consistencia a un suelo lodoso y los suelos de la Loma y Chillogallo presentaron en su consistencia muy baja cohesión después de la compactación. En base a lo mencionado, se puede concluir que el agua es un factor perjudicial si se supera el parámetro de la humedad óptima. También cabe mencionar que al realizar los ensayos con el 95% de la humedad óptima, la compactación se tornó muy complicada, ya que las partículas de suelo no se adherían unas con otras por falta de humedad en los suelos analizados de la Ciudad de Quito.

Una vez realizados los ensayos de corte directo se puede concluir que el suelo de préstamo de Calderón no necesita ningún tipo de mejoramiento, ya que su cohesión en estado natural presenta un valor de 64.42 kPa, siendo esto mayor que el valor obtenido de cohesión con el grado de compactación de 95%, valor que cumple el estándar vigente en el país para subrasante. Por otra parte, para los suelos de préstamos de la Loma y Chillogallo sí resultaría necesario, aplicar algún tipo de medida para mejorar los parámetros de resistencia del suelo en estado natural, ya que los valores obtenidos en el estudio, fueron en la Loma de 40,51 kPa y Chillogallo de 33.31 kPa, siendo esto menor que

Panata & 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

los resultados para un grado de compactación al 95%.

Al realizar las diferentes correlaciones entre variables, podemos determinar que la línea de tendencia polinómica de grado 4 se ajusta a las curvas obtenidas mediante Microsoft Excel, mínimos cuadrados y Gauss Jordan, mediante la verificación de $R=1$, que evidencia una correlación directa, lo que lleva a concluir que los parámetros de resistencia al corte: cohesión y ángulo de fricción interna, dependen directamente de las variaciones de densidad seca y contenido de humedad.

Para una futura investigación se recomienda realizar un análisis más detallado, mediante la obtención de los parámetros de resistencia al corte del suelo, a partir de los diferentes puntos empleados en el ensayo Proctor Modificado de laboratorio para la gráfica de la curva de compactación, aumentando así el número de datos para el análisis. Se puede considerar por lo menos 6 puntos de forma ascendente hasta alcanzar la densidad seca máxima y al menos 2 puntos de forma descendente, variando los contenidos de humedad en intervalos de entre el 2% y el 2.5%. Posteriormente sería lo más adecuado trabajar con todos los puntos en el ensayo de corte directo y obtener los diferentes valores de cohesión y ángulo de fricción interna, obteniendo ecuaciones de correlación mediante curvas de tendencia polinómicas con ajuste más preciso, es decir, alcanzando valores del coeficiente de correlación R , más cercanos a la unidad. Además, se debe realizar un ensayo de corte directo con los valores de densidad seca máxima y humedad óptima e incluir dichos parámetros en las curvas de correlaciones, para complementar los datos y obtener un mejor resultado en las gráficas de ajuste.

Referencias

- [1] G. Alarcón y J. Terán, Variación de los parámetros de resistencia al corte con diferentes grados de saturación en suelos cohesivos en siete distritos de la región Lambayeque, Lambayeque: Universidad San Martín de Porres, 2019.
- [2] E. Palacios y C. Reyes, Análisis comparativo de los parámetros de resistencia al corte de muestras alteradas e inalteradas en suelos de la zona norte del cantón Santa Elena para establecer rangos de variación de los resultados, Santa Elena: Universidad Estatal Península de Santa Elena, 2023.
- [3] Ministerio de Obras Públicas y Comunicaciones, MOP-001F-2002 Especificaciones generales para la construcción de caminos y puentes, Ecuador, 2002.
- [4] K. J. Peña Rojas y I. K. Pérez Ballen, Comparación de los parámetros de resistencia al corte obtenido por medio de los ensayos de corte directo y triaxial para una arena arcillosa (SC), Bucaramanga: Universidad Pontificia Bolivariana, 2015.
- [5] V. A. Aguirre Mejía y S. E. Yépez Andino, Manual de laboratorio para los ensayos de propiedades físicas y mecánicas de los suelos, Quito: Universidad Politécnica Salesiana, 2019.
- [6] Departamento de Mecánica Estructural, Análisis de tamaño de partículas por tamizado en agregado fino y grueso y determinación de material más fino que el tamiz no. 200 (75 μ m) en agregado mineral por lavado, El Salvador: Universidad Centroamericana José Simeón Cañas, 2008.
- [7] R. Gibbs, M. Matthews y D. Link, «The relationship between sphere size and settling velocity.,» Journal of Sedimentary Petrology, vol. 41, 1971.

- [8] B. Das, Fundamentos de ingeniería geotécnica, Cengage Learning, 2014.
- [9] Y. Cienfuegos Gallardo , Y. Villca, A. Montalvo, M. Paredes y M. Taype, «Densidad aparente del suelo método de la parafina,» Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa, Peru, 2018.
- [10] ASTM International, «Métodos de prueba estándar para Gravedad específica de los sólidos del suelo por picnómetro de agua,» vol. Volumen IV, n° D854-14, pp. 1 - 3, 2014.
- [11] ASTM International, «Métodos de Ensayo Normalizado para Las Características de Compactación de Suelos en Laboratorio Usando Una Energía Modificada (56,000 Pie-lbf/Pie³ (2,700 kN-m/m³)),» vol. Volumen IV, n° D 1557 - 12, pp. 2 - 5, 2012.
- [12] J. Serrano Méndez, Interpretación de los resultados del ensayo de corte directo en arcillas consolidadas, Cartagena: Universidad Politécnica de Cartagena, 2017.
- [13] ASTM International, «Método de Prueba Estándar para Corte Directo de Suelo bajo Condiciones de Drenaje Consolidadas,» vol. Volumen IV, n° D 3080 - 11, pp. 17 - 19, 2011.
- [14] C. Crespo Villalaz, Mecánica de suelos y cimentaciones, México, Quinta Edición ed., Monte Rey: Limusa, 1980.
- [15] G. Duque Escobar y C. E. Escobar, *Geomecánica*, Colombia: Universidad Nacional de Colombia, 2016.