



**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**  
**SEDE QUITO**

**CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL**

**ANÁLISIS DE LA VARIACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE RESISTENCIA AL  
CORTE DE ARENAS REMOLDEADAS, CON DIFERENTES CONTENIDOS DE  
HUMEDAD, MEDIANTE EL ENSAYO DE CORTE DIRECTO**

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

**AUTORES:** Cinthya Patricia Enriquez Recalde  
Luis Ángel Robles Vargas

**TUTOR:** Juan Pablo Tarambís Rodríguez

Quito – Ecuador  
2024

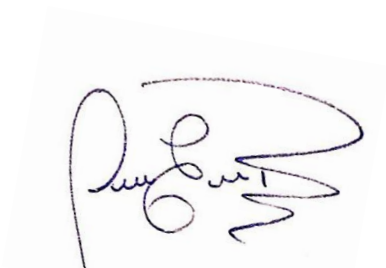
## **CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN**

Nosotros, Cinthya Patricia Enriquez Recalde con documento de identificación N° 1727211078 y Luis Ángel Robles Vargas con documento de identificación N° 0850876285; 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, 12 de agosto del 2024

Atentamente,



---

Cinthya Patricia Enriquez Recalde  
1727211078



---

Luis Ángel Robles Vargas  
0850876285

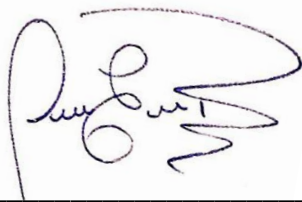
## **CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**

Nosotros, Cinthya Patricia Enriquez Recalde con documento de identificación N° 1727211078 y Luis Ángel Robles Vargas con documento de identificación N° 0850876285; 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 de arenas remoldeadas, con diferentes contenidos de humedad, mediante el ensayo de Corte Directo”, el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniera e Ingeniero 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, 12 de agosto del 2024

Atentamente,



---

Cinthya Patricia Enriquez Recalde  
1727211078



---


Luis Ángel Robles Vargas  
0850876285

## 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 DE ARENAS REMOLDEADAS, CON DIFERENTES CONTENIDOS DE HUMEDAD, MEDIANTE EL ENSAYO DE CORTE DIRECTO, realizado por Cinthya Patricia Enriquez Recalde con documento de identificación N° 1727211078 y Luis Ángel Robles Vargas con documento de identificación N° 0850876285, 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, 12 de agosto del 2024

Atentamente,



---

Ing. Juan Pablo Tarambís Rodríguez, MSc.  
1715336879

# ANÁLISIS DE LA VARIACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE RESISTENCIA AL CORTE DE ARENAS REMOLDEADAS, CON DIFERENTES CONTENIDOS DE HUMEDAD, MEDIANTE EL ENSAYO DE CORTE DIRECTO

## ANALYSIS OF THE VARIATION OF THE CUT RESISTANCE PARAMETERS OF REMOLDED SANDS, WITH DIFFERENT MOISTURE CONTENT, THROUGH THE DIRECT CUT TEST

Cintha Enriquez – Recalde<sup>1</sup>, Luis Robles – Vargas<sup>2</sup>, Juan Tarambis – Rodríguez<sup>3</sup>

### Resumen

El presente proyecto expone la identificación de los parámetros de resistencia al corte en suelos arenosos de la provincia de Pichincha, bajo las variaciones de humedades establecidas entre el 5% y 20%. Para el desarrollo del estudio se determinaron las propiedades físicas del suelo y posteriormente se llevaron a cabo una serie de ensayos de laboratorio para evaluar la resistencia al corte de las muestras de arena alteradas pertenecientes a tres sectores de Pichincha.

Se centró primordialmente en la evaluación de aspectos fundamentales, tales como el ángulo de fricción interna y la cohesión, considerando las características geotécnicas específicas de los suelos de la zona. Además, se determinó que a medida que aumenta el contenido de humedad y densidad seca, estas pueden incidir en la resistencia al corte del material.

Los resultados obtenidos fueron examinados meticulosamente mediante correlaciones simples, con el fin de determinar una tendencia a partir de variables independientes “contenido de humedad y densidad seca” resultantes de los ensayos realizados previamente.

**Palabras Clave:** arena, compactación, resistencia, corte directo, humedad, cohesión, ángulo de fricción interna.

### Abstract

This project exposes the identification of shear resistance parameters in sandy soils in the province of Pichincha, under moisture variations established between 5% and 20%. To develop the study, the physical properties of the soil were determined and subsequently a series of laboratory tests were carried out to evaluate the shear resistance of the altered sand samples belonging to three sectors of Pichincha.

It focused primarily on the evaluation of fundamental aspects, such as the angle of internal friction and cohesion, considering the specific geotechnical characteristics of the soils in the area. In addition, it is considered that as the moisture content and dry density increase, these may affect the shear resistance of the material.

The results obtained were meticulously examined using simple correlations, to determine a trend from the independent variables “moisture content and dry density” resulting from the tests previously carried out.

**Keywords:** sand, compaction, resistance, direct shear, moisture, cohesion, angle of internal friction.

---

<sup>1</sup>Estudiante de la carrera de Ingeniería Civil – Universidad Politécnica Salesiana – Quito, Ecuador

<sup>2</sup>Estudiante de la carrera de Ingeniería Civil – Universidad Politécnica Salesiana – Quito, Ecuador

<sup>3</sup>Docente de Ingeniería Civil – Universidad Politécnica Salesiana – Quito, Ecuador

Autor para correspondencia: [cenriquez@est.ups.edu.ec](mailto:cenriquez@est.ups.edu.ec) , [lroblesv@est.ups.edu.ec](mailto:lroblesv@est.ups.edu.ec)

## 1. Introducción

Se define como resistencia al corte a la capacidad interna de un suelo para resistir la falla y el deslizamiento a lo largo de cualquier superficie, considerando la resistencia por unidad de área que debe sostener la masa del terreno [1]. Siendo un parámetro fundamental en la ingeniería civil, ya que determina la estabilidad y el comportamiento de los suelos frente a las fuerzas cortantes. La variación de la humedad en los suelos puede tener un impacto significativo en sus propiedades mecánicas. Este fenómeno es especialmente relevante en suelos granulares como las arenas, cuyo comportamiento puede cambiar drásticamente con la cantidad de agua presente en ellos.

Al momento que se llevaron a cabo los ensayos con muestras de arena compactadas previamente preparadas con distintos contenidos de humedad, se permitió evaluar la variación del ángulo de fricción interna ( $\phi$ ) y la cohesión ( $c$ ) en función de dicho parámetro, además de las propiedades físicas obtenidas a partir de las relaciones fundamentales del material, entre las principales, el peso específico en condiciones naturales, gravedad específica y el contenido de humedad.

Los resultados posibilitaron comprender de mejor manera el comportamiento resistente de estos suelos granulares, para su posible aplicación en rellenos de muros de contención, rellenos compactados y en mejoramientos de suelos para distintas densidades que fueron analizadas.

Según Das, el hecho de trabajar con parámetros en estado natural no garantiza que, en el caso de exposición al agua, tal que el suelo pueda alcanzar altos grados de saturación, se pueda alcanzar una resistencia del suelo capaz de soportar las cargas a las que esté sometido [1].

Los parámetros de resistencia al corte son cruciales para los análisis de estabilidad de taludes, comparando los esfuerzos efectivos movilizados con la resistencia al corte (conocidos como esfuerzos efectivos) para asignar un Factor de seguridad "FS". [2]

$$\left\{ FS = \frac{\tau_f}{\tau_{mov}} \right\} \begin{array}{l} > 1; obra estable \\ = 1; ocurre la falla del talud \\ < 1; no tiene significado físico \end{array}$$

En condiciones no saturadas, la expresión de esfuerzos movilizados se aumenta por presiones de aire y agua en los poros,  $u_a, u_w$ , respectivamente, más el parámetro que expresa la ganancia de resistencia en función del aumento de la succión  $tg\phi^b$ .

$$\tau_{mov} = \frac{c'}{FS} + (\sigma - u) * \frac{tg\phi'}{FS} + (u_a - u_w) * \frac{tg\phi^b}{FS} \quad (1)$$

El tipo de envolvente de resistencia cambia según el tipo de análisis, el momento crítico y la cantidad de parámetros requeridos.

**Tabla 1.** Análisis de la situación crítica mediante el ensayo de Corte Directo para suelos no saturados

Prueba de laboratorio	Situación crítica	Tipo de análisis	Parámetros y envolvente de resistencia
Corte directo	Final de la construcción (no drenado en suelos compactados)	Esfuerzos efectivos	$c', \phi', u$ $\tau = c' + (\sigma - u) * tg\phi'$

Los ensayos necesarios para la investigación están descritos en la Tabla 2.

**Tabla 2.** Ensayos de Laboratorio

	Ensayos	Norma
1	Contenido de humedad	ASTM D 2216
2	Gravedad específica	ASTM D 854-14
3	Densidad natural	ASTM D 4531
4	Granulometría	ASTM D 422
5	Clasificación SUCS	ASTM D 2487
6	Proctor Modificado	ASTM D 1557
7	Corte directo	ASTM D 3080

## 2. Materiales y Métodos

### 2.1. Materiales

#### 2.1.1. Ubicación

Se han seleccionado cuatro sitios de la Provincia de Pichincha, los cuales se pueden apreciar en la tabla 3.

**Tabla 3.** Sitios de los materiales extraídos de la Provincia de Pichincha

N° Muestra	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 4
Sitio	Cantón Pedro Vicente Maldonado, Parroquia "La Celica"	Sendero "Tres Cascadas del Atacazo", Guamaní	Cascada "7 cascadas", Lloa	San Fernando de Guamaní



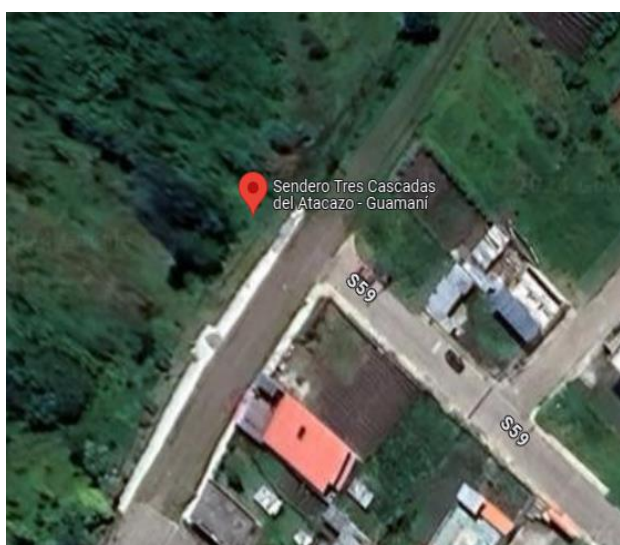
**Figura 3.** La cascada "7 cascadas", Lloa



**Figura 1.** Cantón Pedro Vicente Maldonado, Parroquia "La Celica"



**Figura 4.** San Fernando de Guamaní



**Figura 2.** Sendero "Tres Cascadas del Atacazo", Guamaní

## 2.2. Metodología

El proyecto se llevó a cabo mediante investigación experimental, aprovechando varios ensayos que fueron evaluados.

Con el propósito de la extracción de muestras se siguieron los pasos establecidos en la norma ASTM D4220 [3], la cual se aplica mediante la ejecución de calicatas.

Para la determinación de las propiedades de resistencia al corte de distintos lugares, se llevó a cabo la extracción de las muestras en los lugares previamente descritos. En el caso de la muestra inalterada, se talló un bloque de 30x30 cm, a 1.50 m de profundidad, obtenido del sector San Fernando de Guamaní, el cual fue protegido de manera apropiada, mediante la utilización de un material de embalaje para preservar su contenido de humedad natural.

Una vez que se obtuvo las muestras de suelos granulares, fueron llevadas al laboratorio de la Universidad Politécnica Salesiana, para su respectiva evaluación.

## 2.3. Ensayos de laboratorio

Gracias a los laboratorios de la Universidad Politécnica Salesiana sede Quito, campus Sur, se llevaron a cabo las prácticas necesarias para la identificación de los parámetros del suelo.

Como guía se utilizó el manual de Aguirre y Yépez [4], además de las normas correspondientes para la ejecución de los ensayos.

### 2.3.1. Contenido de humedad

El espécimen de prueba es secado en un horno a temperatura de  $(110 \pm 5^\circ\text{C})$  hasta peso constantes. La pérdida de peso durante el secado se considera como agua. El contenido de agua es calculado usando el peso de agua y el peso del espécimen en seco [5].

Una vez retirado el material del horno, permitir que el material y el recipiente se enfríen a temperatura ambiente. Determinar la masa del material y del recipiente secados.

Para el cálculo del contenido de humedad se emplea la siguiente fórmula:

$$w = \left[ \frac{M_{cws} - M_{cs}}{M_{cs} - M_c} \right] * 100 = \frac{M_w}{M_s} * 100 \quad (2)$$

Donde:

- $w$  = contenido de humedad, %
- $M_{cws}$  = masa del recipiente y el espécimen húmedo, g.
- $M_{cs}$  = masa del recipiente y el peso del espécimen secado, g.
- $M_c$  = masa del recipiente, g.
- $M_w$  = masa del agua ( $M_w = M_{cws} - M_{cgs}$ ), g.
- $M_s$  = masa de las partículas sólidas ( $M_s = M_{cgs} - M_c$ ), g.



Figura 5. Ensayo de Contenido de Humedad



Figura 6. Muestras en estado seco, para el ensayo de Contenido de Humedad

### 2.3.2. Gravedad específica

Este método de ensayo cubre la determinación de la gravedad específica de los sólidos del suelo que pasan por el tamiz de 4.75 mm (No.4), mediante un picnómetro de agua [6].

Para la práctica se utilizó la norma ASTM D 854-14 [7], siguiendo el Método B para muestras secas en horno, ya que es un procedimiento efectivo para evaluar la resistencia al corte de suelos al garantizar la eliminación de humedad y aire atrapado. El uso de técnicas de eliminación de aire, como el calor y la aspiración, mejora los resultados.

Cuando no se agita correctamente los vacíos, el aire queda atrapado entre las partículas de suelo y agua, lo que causa una reducción en el peso [8].

La gravedad específica se calcula mediante la siguiente formula:

$$G_s = \frac{M_s}{M_{pwt} - (M_{pwt} - M_s)} \quad (3)$$

Donde:

- $G_s$  = gravedad específica de las partículas sólidas presentes en el suelo.
- $M_s$  = Masa de los sólidos
- $M_{pwt}$  = Masa total del picnómetro junto con el agua a la temperatura de ensayo.

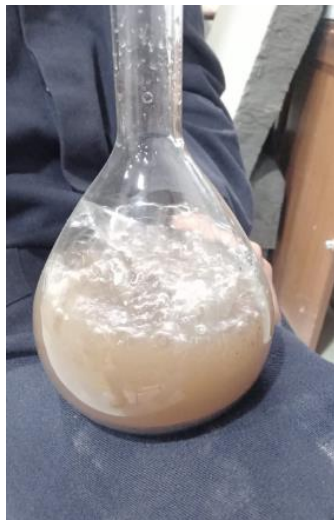


Figura 7. Ensayo de Gravedad específica por el método del picnómetro.

### 2.3.3. Densidad Natural

Este ensayo se realizó respecto a la norma ASTM D4531, el método de cera de parafina comprende la determinación de la densidad a granel de muestras no alterados o piezas irregulares de arena húmeda y productos de arena comprimida [9]. La densidad original del suelo posee un impacto considerable en la capacidad de los suelos granulares para retener agua, por lo cual, existen métodos para alcanzar una densidad ideal en este tipo de suelos [10].

### 2.3.4. Granulometría

Para la realización de esta práctica se utilizó la norma ASTM D422, que abarca la determinación cuantitativa de la distribución de los tamaños de las partículas de los suelos. La clasificación del tamaño de partículas mayores que 75  $\mu\text{m}$  se efectúa por tamizado, mientras que para partículas menores que 75  $\mu\text{m}$  es determinada por un proceso de sedimentación, usando un hidrómetro para asegurar los datos necesarios [11].



Figura 8. Ensayo de Granulometría por tamizado mecánico

### 2.3.5. Clasificación SUCS (Sistema Unificado de Clasificación de Suelos)

Mediante el ensayo de granulometría según la norma ASTM D422 [11], se calculan los porcentajes de grava, arena y finos, de modo que se logre catalogar por medio de la siguiente tabla de clasificación de suelos para la asignación de nombres y símbolos mediante los ensayos de laboratorio.

### 2.3.6. Ensayo de Proctor Modificado

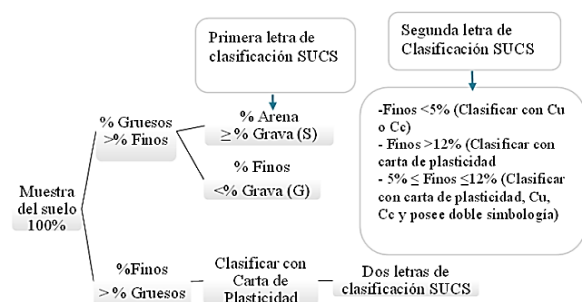


Figura 9. Procedimiento para Clasificación SUCS [17]

Enriquez & Robles / Análisis de la variación de los Parámetros de Resistencia al Corte de Arenas Remoldeadas, con diferentes contenidos de Humedad, mediante el Ensayo de Corte Directo.

Para la realización del ensayo se tomó como guía la norma ASTM D1557 [12]. Para el remoldeo de las densidades de las muestras de arenas, se empleó el Método A, que consiste en compactar el suelo en un molde de cuatro pulgadas de diámetro, aplicando veinticinco golpes por capa en un total de cinco capas.



Figura 10. Ensayo de Proctor Modificado

### 2.3.7. Ensayo de Corte Directo en Muestras de Suelos Granulares Compactadas

Para la realización del ensayo se tomó como guía la norma ASTM D3080 [13]. Se realizaron un total de cincuenta y cuatro ensayos de corte directo, de las muestras de arena con cinco diferentes contenidos de humedad de los sectores de La cascada “7 Cascadas” en Lloa, San Fernando de Guamaní y el Cantón Pedro Vicente Maldonado Parroquia “La Celica”, mientras que la del Sendero “Tres Cascadas del Atacazo” en Guamaní solamente se logró con cuatro humedades, porque a medida que el contenido de humedad aumentaba, el espécimen perdía consistencia.

La preparación de los especímenes de ensayo se realizó mediante muestras reconstituidas, ya que, al tratarse de suelos no cohesivos, no era posible tallar la muestra a partir del material compactado mediante el método Proctor Modificado.

Para la colocación en los moldes metálicos de la caja de corte directo, disponibles en el laboratorio de geotécnica de la Universidad Politécnica Salesiana, se utilizaron medidas de

10x10x2.3 cm en concordancia con las dimensiones de la caja de corte.

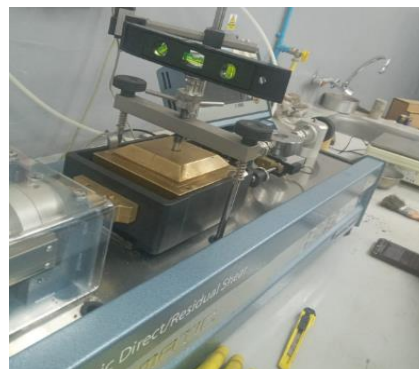


Figura 11. Ensayo de Corte Directo en arenas

Se determinó el peso de cada muestra, tomando en cuenta el peso del molde metálico.

Posteriormente, se colocó el espécimen en la caja de corte y se ajustaron parámetros como carga axial, tiempo y velocidad.

Por último, el esfuerzo normal que se aplicaron a las muestras de suelo granular fueron de 50,100 y 200 kPa. Las velocidades dependerán del tipo de material que contengan, establecidas en la Tabla 4.

Tabla 4. Tiempo mínimo de permanencia del suelo

Clasificación D2487	Tiempo mínimo de Permanencia, h	de
SW, SP	No requiere	
SM	3	
SC, ML, CL	18	
MH, CH	36	

## 3. Resultados y Discusión

En el siguiente apartado, se presentan los resultados de los ensayos realizados, mediante los cuales más adelante se realiza un análisis comparativo.

### 3.1. Granulometría

En las siguientes tablas y figuras se pueden observar los resultados obtenidos de los ensayos de Granulometría.

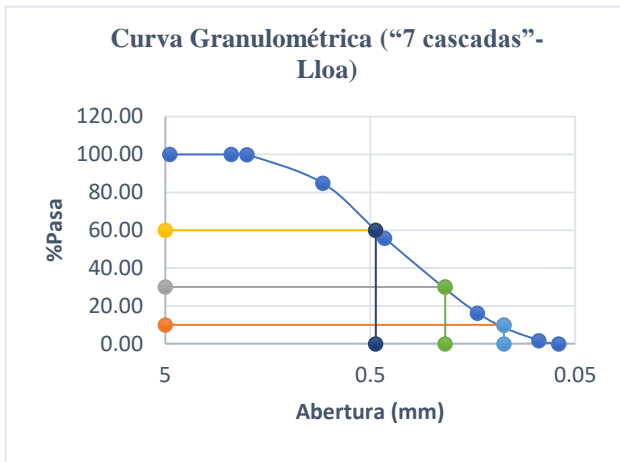


Figura 12. Curva Granulométrica – “7 cascadas”, Lloa

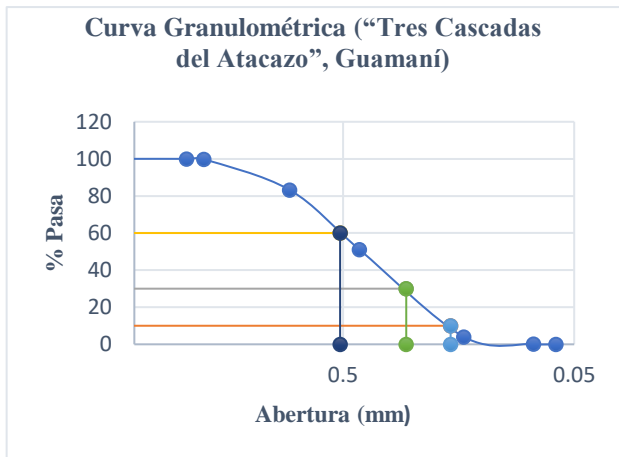


Figura 13. Curva Granulométrica - “Tres Cascadas del Atacazo”, Guamaní

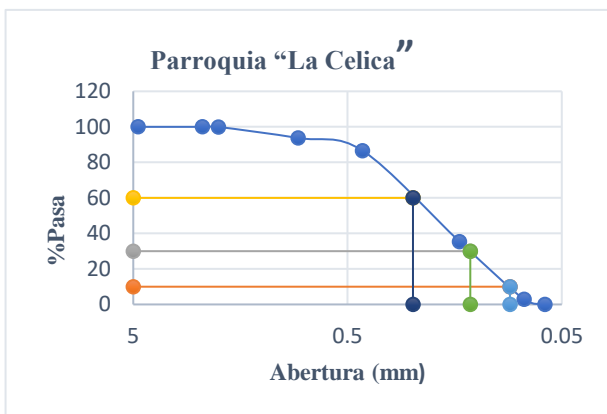


Figura 14. Curva Granulométrica – Parroquia “La Celica”

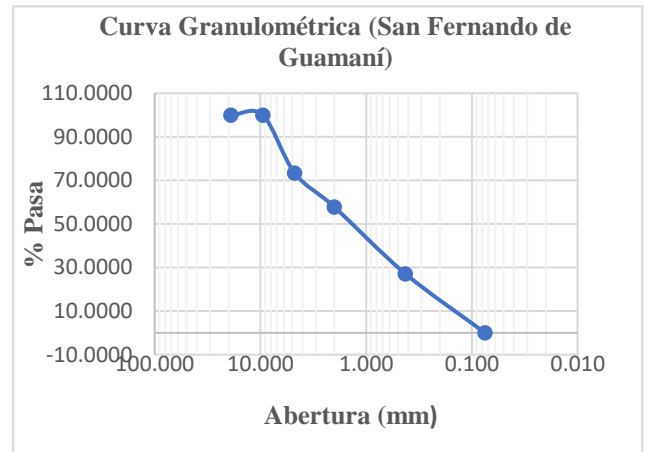


Figura 15. Curva Granulométrica – San Fernando de Guamaní

Las conclusiones extraídas se derivaron del análisis granulométrico por tamizado de lavado, conforme a la norma ASTM D422 [11], y se clasificaron según el Sistema Unificado de Clasificación de suelos (SUCS) siguiendo la norma ASTM D2487 [14]. Con los datos obtenidos de las cuatro muestras, se identificó que el suelo corresponde a “arena mal graduada” con la simbología “SP”. Esta clasificación se determinó mediante el diagrama de flujo, observando que los porcentajes pasantes por el tamiz 200 son inferiores al 5%, mientras que los porcentajes pasantes por los tamices 40 y N°4 superan el 50%, además, La simbología “SP” se corroboró mediante los cálculos de los coeficientes de uniformidad y curvatura, basados en los tamaños de las partículas correspondientes al 60%, 30% y 10% de material pasante. A continuación, se presentan los cálculos detallados para cada muestra:

Tabla 5. Resultados finales del ensayo de granulometría y clasificación SUCS - Lloa

LLOA	
Abertura D60	0.47 mm
Abertura D30	0.22 mm
Abertura D10	0.11 mm
Coefficiente de uniformidad “Cu”	4.2727
Coefficiente de curvatura “Cc”	0.9362
Asignación del símbolo	<b>SP</b>

**Tabla 6.** Resultados finales del ensayo de granulometría y clasificación SUCS - Atacazo

<b>ATACAZO</b>	
Abertura D60	0.5149 mm
Abertura D30	0.27 mm
Abertura D10	0.17 mm
Coefficiente de uniformidad "Cu"	3.0288
Coefficiente de curvatura "Cc"	0.8328
Asignación del símbolo	<b>SP</b>

**Tabla 7.** Resultados finales del ensayo de granulometría y clasificación SUCS – La Celica

<b>LA CELICA</b>	
Abertura D60	0.25 mm
Abertura D30	0.13 mm
Abertura D10	0.09 mm
Coefficiente de uniformidad "Cu"	2.7778
Coefficiente de curvatura "Cc"	0.7511
Asignación del símbolo	<b>SP</b>

**Tabla 8.** Resultados finales del ensayo de granulometría y clasificación SUCS – San Fernando de Guamaní

<b>SAN FERNANDO</b>	
Abertura D60	6.2178 mm
Abertura D30	0.4202 mm
Abertura D10	0.3902 mm
Coefficiente de uniformidad Cu	6.0987
Coefficiente de curvatura "Cc"	0.4178
Asignación del símbolo	<b>SP</b>

### 3.2. Resultados de los ensayos de Contenido de Humedad

Se llevaron a cabo los ensayos de contenido de humedad, los resultados obtenidos son los siguientes:

**Tabla 9.** Resultados del porcentaje de Contenido de Humedad

<b>Sitio</b>	<b>% Contenido de Humedad</b>
"7 cascadas", Lloa	39.97
"Tres Cascadas del Atacazo", Guamaní	29.78
Parroquia "La Celica"	17.60
San Fernando de Guamaní	36.17

### 3.3. Resultados de los ensayos de Gravedad Específica

Como producto de la práctica, se obtuvieron los resultados presentes en la tabla a continuación:

**Tabla 10.** Resultados de los ensayos de Gravedad Específica

<b>Sitio</b>	<b>Gravedad Específica (Gs)</b>
"7 cascadas", Lloa	2.64
"Tres Cascadas del Atacazo", Guamaní	2.67
Parroquia "La Celica"	2.65
San Fernando de Guamaní	2.65

Los resultados obtenidos de los ensayos de gravedad específica para las muestras provenientes de los distintos sitios analizados, con valores obtenidos entre 2.64 y 2.67 demuestran que los materiales granulares poseen una densidad adecuada. Esto indica que las arenas tienen buenas propiedades físicas.

### 3.4. Resultados de la Densidad Natural

**Tabla 11.** Resultados del ensayo de Densidad Natural

Sitio	Densidad Natural gr/cm <sup>3</sup>
“7 cascadas”, Lloa	1.69
“Tres Cascadas del Atacazo”, Guamaní	1.80
Parroquia “La Celica”	1.70
San Fernando de Guamaní	1.72

Densidades entre 1.69 y 1.80 gr/cm<sup>3</sup>, indican una moderada densidad natural. Estas arenas podrían requerir técnicas adicionales de compactación para aplicaciones que demanden una resistencia alta y estabilidad.

En el caso de la muestra “Tres Cascadas del Atacazo”, presenta una densidad adecuada con menor porosidad y buenas condiciones en estado natural.

### 3.5. Resultados del ensayo de Relaciones Fundamentales

**Tabla 12.** Resultados de los ensayos de Relaciones Fundamentales

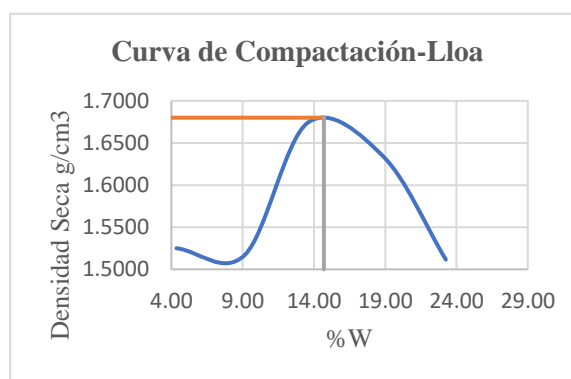
Sitio	Peso Esp. Seco KN/m <sup>3</sup>	Relación de vacíos (e)	Porosidad (n)	%Grado de Saturación (S)
Lloa	11.86	1.18	0.54	89.14
Atacazo	13.59	0.93	0.48	85.60
La Celica	14.20	0.83	0.45	56.18
San Fernando	12.37	1.10	0.52	87.13

Se logra apreciar que existe una relación inversa entre el peso específico seco y la relación de vacíos. Los resultados obtenidos indican que los sitios estudiados presentan diferentes características. La Celica presenta un suelo con el menor grado de saturación, por lo que posee

condiciones más secas en comparación con los otros sitios, en cambio Lloa, contiene el mayor grado de saturación. Atacazo y San Fernando, tienen grados de saturación relativamente altos, lo que refleja condiciones semejantes en términos de esta propiedad física.

### 3.6. Resultados del ensayo de Proctor Modificado

Se realizaron ensayos de Proctor Modificado según la norma ASTM D1557 [12], cuatro ensayos totalizando dieciocho puntos de análisis con contenidos de agua del 5%, 10%, 15% y 20%. Las muestras de arena fueron compactadas para la obtención de densidades distintas a las naturales, buscando representar condiciones de suelos diferentes a las arenas extraídas del río. Las irregularidades del suelo hicieron que algunas muestras, como la de San Fernando de Guamaní, no se analicen con contenido de humedad del 5% debido a su estado seco, dificultando su compactación en el ensayo de Proctor modificado. Otras muestras, como las de Lloa, presentan humedades superiores al 20% para generar la curva de compactación. Con las densidades y contenidos de humedad obtenidos mediante este ensayo, se procedió a la realización del análisis de corte directo.



**Figura 16.** Curva de compactación- “7 cascadas”, Lloa

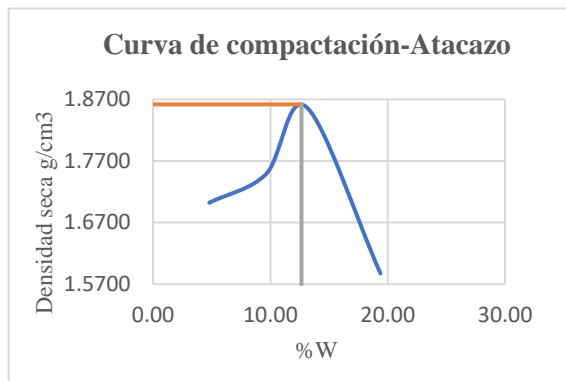


Figura 17. Curva de – Atacazo

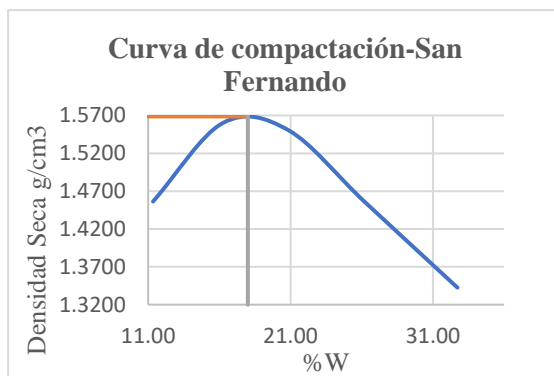


Figura 18. Curva de compactación- San Fernando

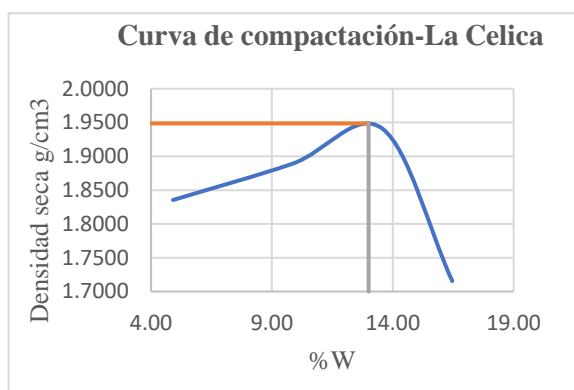


Figura 19. Curva de compactación- La Celica

### 3.6.1. Resultado de análisis de la densidad seca máxima, humedad óptima y grado de compactación

Se obtuvieron dieciocho puntos  $\rho_d$  (densidades secas) mediante Proctor modificado, con el objetivo de determinar el grado de compactación en sitio, aplicando la siguiente fórmula:

$$R = \frac{\rho_{d\text{campo}}}{\rho_{d\text{máx}}} * 100 \quad (4)$$

Según la norma ecuatoriana de obras públicas (MOP-001F-2002) [15], el grado de compactación debe ser no inferior al 90-95%, dependiendo de las labores de obra. Sin embargo, debido a que el suelo de los sitios seleccionados en estado natural, no se encuentra compactado, las muestras ensayadas no cumplen con esta normativa, como se observa en la siguiente tabla:

Tabla 13. Relación de las densidades con respecto a la humedad y grado de compactación de los distintos sitios.

Muestra	$\rho_{d\text{campo}}$	$\rho_{d\text{máx}}$	Grado de compactación %	Humedad natural %
Lloa	1.21	1.68	72	39.97
Atacazo-Guamaní	1.39	1.86	74	29.78
La Celica	1.45	1.95	74	17.60
San Fernando-Guamaní	1.26	1.57	80	36.17

A mayor contenido de humedad se obtienen densidades mayores hasta alcanzar el valor óptimo, sin embargo, si sigue aumentando la humedad, la densidad vuelve a descender.

### 3.7. Resultados del ensayo de Corte Directo

La clasificación del suelo permite estimar el tiempo de falla mínima y determinar parámetros conforme a la norma ASTM D 3080-04 [16]. Clasificadas como arenas mal graduadas, las muestras se ensayaron con la máquina “SHEARMATIC 27-WF2180” para obtener parámetros de resistencia mediante corte directo, con las siguientes especificaciones:

Tabla 14. Parámetros para el uso de la máquina de Corte Directo en arenas

Parámetros	Valores
tf (tiempo de falla mínimo) min	15
Desplazamiento lateral relativo (df) mm	15
Velocidad de desplazamiento mm/min	1

Mediante los datos previos de la Tabla 14, se reconstituyeron las muestras con dimensiones de 10cmx10cmx2.3cm, utilizando el peso específico húmedo de la arena correspondiente a cada punto de la curva de compactación. Los ensayos se realizaron bajo esfuerzos normales de

50, 100 y 200 KPa dando como resultado, un total de 54 ensayos de corte directo para los 18 puntos de densidad que se obtuvieron en el ensayo de compactación Proctor modificado con las muestras de los sitios seleccionados.

Los resultados obtenidos permitieron determinar la cohesión y el ángulo de fricción interna mediante gráficas de tendencias lineales ajustando los esfuerzos normales con los esfuerzos cortantes. Los parámetros resistentes de corte mediante gráficas de tendencia se obtienen con la ayuda de software, en este caso "Microsoft Excel 365", por ser uno de las herramientas de análisis más comunes y sencillas de utilizar, ya que estima de forma rápida y fácil la ecuación lineal de la gráfica de tendencia relacionados con los esfuerzos y así, interpretar la pendiente de la ecuación como el ángulo de fricción, calculado con la función arco tangente de la diferencia de dos puntos en el eje y, es decir, la distancia o altura entre dichos puntos, con respecto a la distancia entre los puntos correspondientes en el sentido x. Además, la intersección de la tendencia lineal con el eje de las ordenadas permite determinar el valor de la cohesión.

Los resultados de las correlaciones se analizan mediante gráficos que representan las tendencias; los coeficientes de determinación, correlación y las ecuaciones del modelo están resumidos en tablas.

### 3.7.1. Análisis de la cohesión y ángulo de fricción respecto a la humedad –Lloa y Guamaní

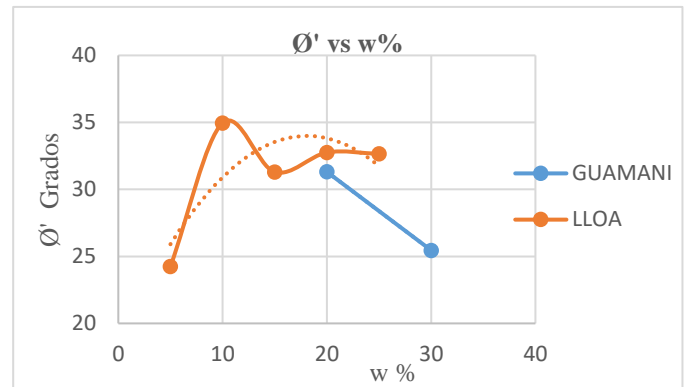


Figura 20. Correlaciones Ø' vs w% - Lloa y Guamaní

Tabla 16. Correlaciones simples de ángulo de fricción interna vs humedad

Ecuación	Coef. Determ	Coef. Corre.
$\phi = -0.04 * w^2 + 1.71 * w + 18.56$	0.61	0.78

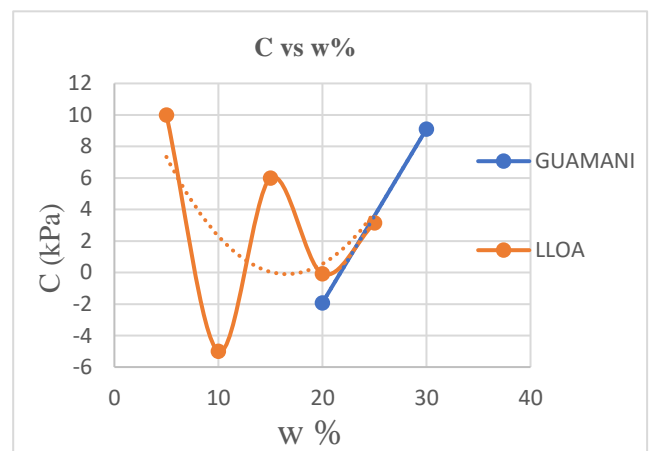


Figura 21. Correlaciones c vs w% - Lloa y Guamaní

Tabla 17. Correlaciones simples de cohesión vs humedad

Ecuación	Coef. Determ	Coef. Corre.
$c = -0.06 * w^2 - 1.84 * w + 15.14$	0.26	0.51

### 3.7.2. Análisis Lloa-Esfuerzos de corte

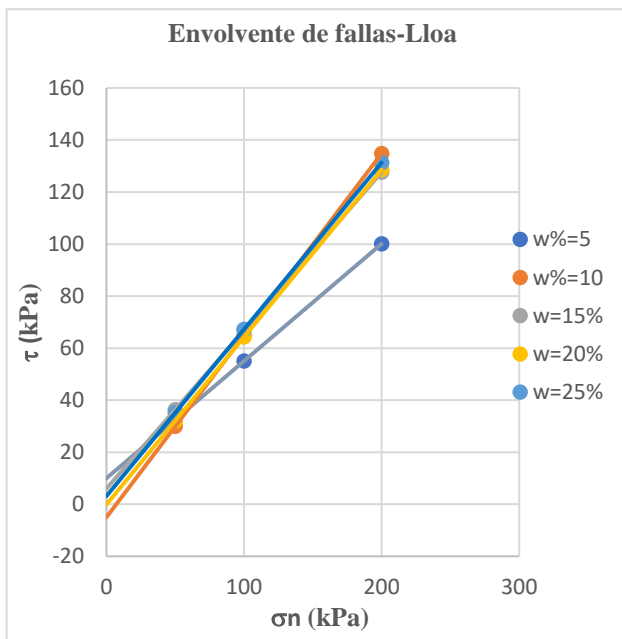


Figura 22. Envolverte de fallas - Lloa

**Tabla 18.** Parámetros de resistencia al corte - Lloa

w%	5	10	15	20	25
$\phi$ (°)	24.2526	34.9527	31.2983	32.7532	32.6517
$c$ (KPa)	10	-5	6	-0.0831	3.1438

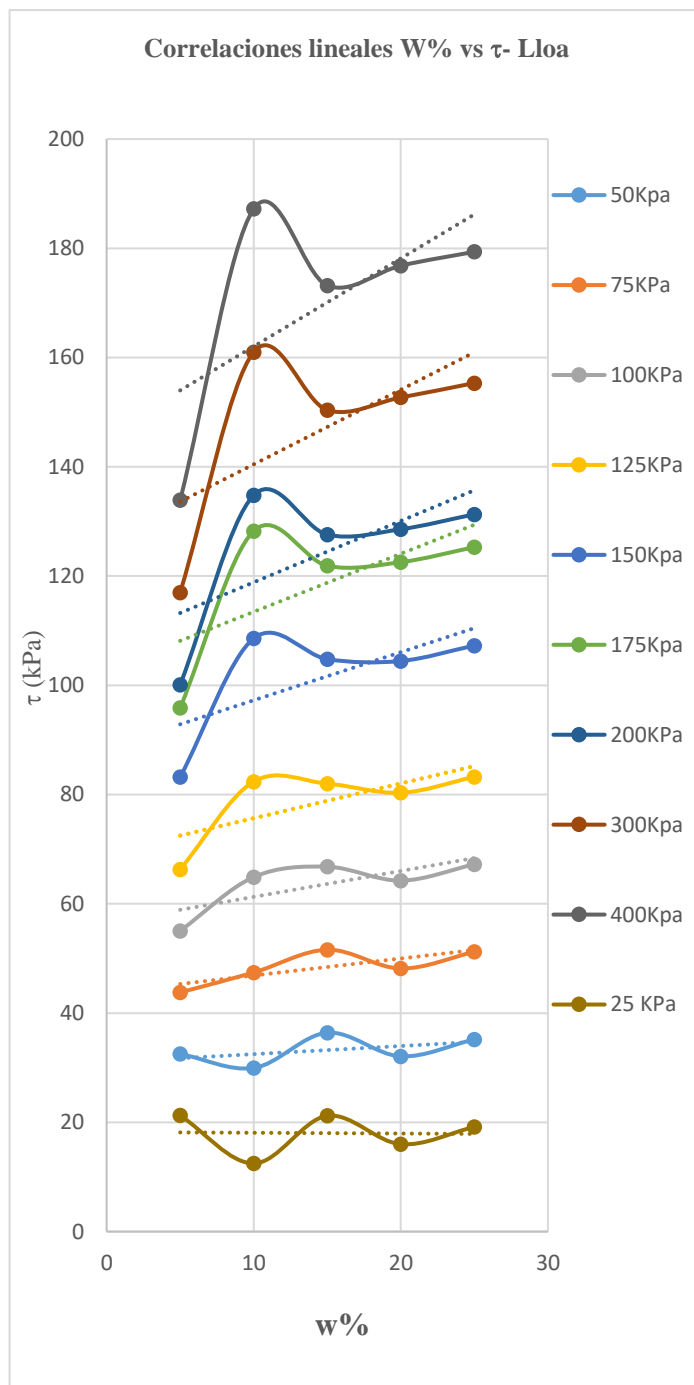


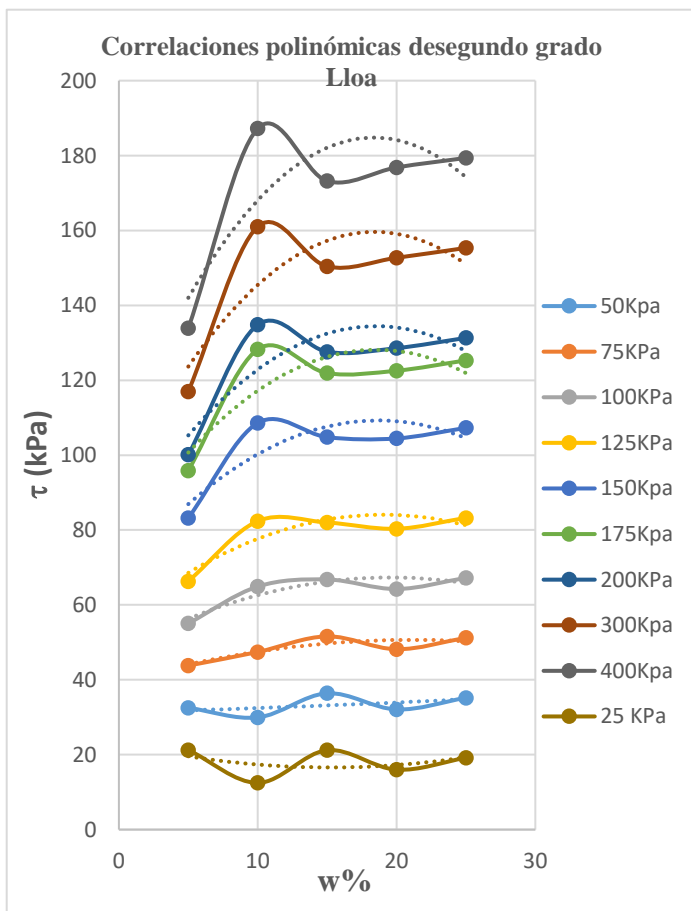
Figura 23. Correlaciones Lineales: W% vs resistencia al corte

**Tabla 19.** Correlaciones lineales simples-Lloa

$\sigma$ KPa	Ecuación	Coef. Determ.	Coef. Corre.
25	$\tau = -0.0135 * w + 18.222$	0.001	0.03
50	$\tau = 0.149 * w + 30.993$	0.21	0.46
75	$\tau = 0.3114 * w + 43.765$	0.5	0.7
100	$\tau = 0.4738 * w + 56.536$	0.57	0.75
125	$\tau = 0.6363 * w + 69.307$	0.5	0.71
150	$\tau = 0.8799 * w + 88.464$	0.44	0.66
175	$\tau = 1.0627 * w + 102.83$	0.42	0.64
200	$\tau = 1.1236 * w + 107.62$	0.41	0.64
300	$\tau = 1.3673 * w + 126.78$	0.38	0.62
400	$\tau = 1.6109 * w + 145.93$	0.37	0.61

**Tabla 20.** Correlaciones polinómicas de segundo grado-Lloa.

$\sigma$ KPa	Ecuación	Coef. Determ.	Coef. Corre.
25	$\tau = 0.03 * w^2 - 0.8 * w + 23.21$	0.12	0.36
50	$\tau = 0.002 * w^2 - 0.1 * w + 31.29$	0.21	0.46
75	$\tau = -0.03 * w^2 + 1.1 * w + 39.37$	0.74	0.86
100	$\tau = -0.1 * w^2 + 2.03 * w + 47.44$	0.81	0.9
125	$\tau = -0.08 * w^2 + 3 * w + 55.52$	0.77	0.88
150	$\tau = -0.12 * w^2 + 4.5 * w + 67.63$	0.73	0.85
175	$\tau = -0.15 * w^2 + 5.5 * w + 76.72$	0.7	0.84
200	$\tau = -0.16 * w^2 + 5.9 * w + 79.75$	0.7	0.83
300	$\tau = -0.2 * w^2 + 7.35 * w + 91.86$	0.67	0.82
400	$\tau = -0.24 * w^2 + 8.8 * w + 104$	0.66	0.81



**Figura 24.** Correlaciones polinómicas: W% vs resistencia al corte

De la figura 23 a la figura 24 se visualiza el comportamiento de los esfuerzos cortantes respecto a la humedad mostrándose análogas a las curvas de compactación que se obtienen del ensayo de Proctor Modificado, deduciendo que, a mayor densidad seca, mayor esfuerzo cortante, también se puede considerar el análisis de una elevada rigidez para los suelos compactados con contenido de humedad del lado seco del óptimo y baja rigidez para suelos compactados del lado húmedo del óptimo.

El segundo análisis se enfoca al comportamiento de las curvas para las cargas establecidas de 50KPa, 100KPa y 200KPa y a la estimación de siete esfuerzos axiales intermedios con el objetivo de establecer una visualización mejor respecto a las variaciones de las curvas al aumentar las presiones, se observa que a mayor esfuerzo normal la curva es más pronunciada a comparación con la carga de 25KPa.

Utilizando correlaciones lineales y polinómicas simples, se determinó que una tendencia de segundo grado es la más adecuada, ya que se ajusta mejor a los datos y muestra un comportamiento similar a las curvas de esfuerzo-humedad a excepción de las cargas de 25KPa y

50KPa que no presentan una correlación aceptable.

### 3.7.3. Análisis San Fernando de Guamaní – Esfuerzos de corte

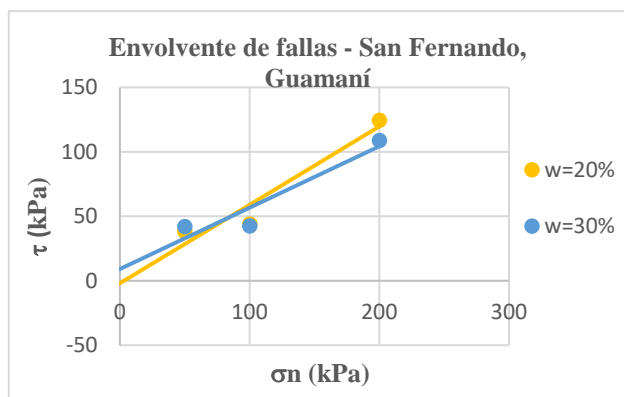


Figura 25. Envoltorio de fallas – San Fernando, Guamaní

Tabla 21. Parámetros de resistencia al corte – San Fernando, Guamaní

w%	20	30
f (°)	31.3121	25.4544
c (KPa)	-1.92	9.1076

## 4. Conclusiones

La variación de los parámetros de resistencia al corte de las arenas compactadas con diferentes contenidos de humedad se debe a la interacción entre las partículas del suelo y el agua. A medida que el contenido de agua aumenta, la resistencia al corte varía por el efecto lubricante en concordancia con la densidad alcanzada con dicha humedad.

La reducción de los parámetros de resistencia al corte en suelos granulares con bajos niveles de humedad se explica por la ausencia de una película de agua que funcione como lubricante entre las partículas, sin embargo, un exceso de agua produce también el descenso de la resistencia al corte; en suelos compactados la humedad óptima permite alcanzar mejores resultados en las propiedades mecánicas del suelo. En el caso de arenas la cohesión es muy baja o nula, dependiendo de las condiciones de humedad y presión.

De los tres esfuerzos normales aplicados durante el ensayo de corte directo, junto con la estimación de siete esfuerzos adicionales, se evidencia que las presiones intermedias presentan una variación y dispersión de los esfuerzos cortantes que se ajustan adecuadamente con los contenidos de humedad en tendencias polinómicas, con coeficientes de correlación no inferiores a 0.83, en cambio, para las presiones bajas y mayores se obtienen coeficientes de correlación relativamente bajos mostrándose un comportamiento semejante a las curvas compactación.

De los 54 ensayos de corte directo realizados, se analizaron 21 para la determinación de los parámetros de resistencia al corte. Estos ensayos incluyeron todas las humedades de Lloa, así como los contenidos de humedad del 20% y 30% de Guamaní. Las tres humedades restantes de la muestra de Guamaní, junto con los 12 cortes de La Celica y Atacazo, fueron descartados debido a inconvenientes técnicos en la máquina de corte directo, la cual generaba resultados no fiables para el análisis de resistencia al corte.

A través de las gráficas de tendencias lineales y polinómicas de cohesión y ángulo de fricción interna para las muestras de Lloa y Guamaní, se observa un ajuste adecuado de la humedad en relación con los parámetros de resistencia al corte. Se destaca que, para las humedades elevadas, del 20% al 30%, se evidencia una disminución en el ángulo de fricción interna para ambas muestras analizadas, por otra parte, la cohesión muestra un incremento en las mismas condiciones de humedad.

En cuanto al análisis de los parámetros de resistencia al corte, específicamente “cohesión-ángulo de fricción interna” en relación con la humedad, se concluye que estas arenas compactadas no resultan adecuadas para aplicaciones en campo. Esto se debe a que los resultados de los análisis previos no muestran una curva análoga a la curva de compactación, salvo en la gráfica que correlaciona el ángulo de fricción interna con el contenido de humedad. Además, no existe una relación aceptable entre

la cohesión y la humedad, evidenciando un coeficiente de correlación que no refleja un buen ajuste. Asimismo, al trabajar con dos niveles de humedad en la muestra de Guamaní, no se logra una correlación en base a datos representativos.

## Referencias

- [1] B. Das, Fundamentos de Ingeniería Geotécnica, México, 2015.
- [2] M. G. Denise, Estabilidad de Taludes, Bogotá: LEMOINE, 2015.
- [3] ASTM, Artist, *Prácticas estándar para Conservación y transporte de muestras del suelo*. [Art]. ASTM, 2014.
- [4] V. Aguirre y S. Yépez, Artists, *Manual de laboratorio para los ensayos de propiedades físicas y mecánicas de los suelos*. [Art]. Universidad Politécnica Salesiana, 2019.
- [5] ASTM, «Método de prueba estándar para Determinación en Laboratorio de contenido de agua (humedad) de Suelos y Rocas en relación a su masa,» ASTM International, 2006.
- [6] ASTM, «Métodos de prueba estándar para Gravedad específica de los sólidos».
- [7] ASTM, Artist, *Gravedad específica de los sólidos del suelo por picnómetro*. [Art]. 2014.
- [8] A. Alex y T. Sandy, Artists, *Parámetros de resistencia al corte en muestras de suelos del cantón Quito, utilizando la caja de Corte Directo en condiciones de humedad natural y saturada*. [Art]. Universidad Politécnica Salesiana, 2024.
- [9] ASTM, Artist, *Método de Ensayo Estándar para Densidad a Granel de Turba y Productos de Turba*. [Art]. ASTM International, 1996.
- [10] R. M, S. P y T. J, THE EFFECT OF DENSITY ON WATER RETENTION PROPERTIES OF FIELD SOILS, European Journal of Soil Science, 1973.
- [11] ASTM, Artist, *Método de Ensayo Estándar para el Análisis Granulométrico*. [Art]. ASTM International, 2007.
- [12] ASTM, Artist, *Método de Ensayo Normalizado para Las Características de Compactación de Suelos en Laboratorio Usando Una Energía Modificada (56.000 ft-lb/ft<sup>3</sup> (2.700 kN-mm<sup>3</sup>))1*. [Art]. ASTM International, 2021.
- [13] ASTM, Artist, *Método de prueba estándar para la prueba de cizallamiento directo de suelos en condiciones de drenaje consolidado*. [Art]. ASTM International, West Conshohoken, 2011.
- [14] ASTM, Artist, *Práctica Estándar para la Clasificación de Suelos para Propósitos de Ingeniería (Sistema de Calsificación Unificada de Suelos)*. [Art]. ASTM, 2011.
- [15] M. D. O. P. Y. C. M.-0.-F. 2002, Especificaciones generales para la construcción de caminos y puentes, Quito, 2002.
- [16] ASTM, Artist, *Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidates Drained Conditions*. [Art]. ASTM, 2003.
- [17] N. Y y J. K, «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,» Quito, 2021.
- [18] M. d. O. P. y. C. M.-0.-F. 2002, Especificaciones Generales para la construcción de caminos y puentes, Quito, 2002.