

CAPÍTULO I

DISEÑO TEÓRICO

CAPITULO I

DISEÑO TEÓRICO

1.1 Introducción

En el ámbito de la ingeniería geotécnica, la mejora de suelos ha sido una práctica fundamental para garantizar la estabilidad y seguridad de las estructuras. Entre los diversos tipos de suelos, los arcillosos presentan desafíos particulares debido a sus propiedades físicas y mecánicas, como su baja capacidad portante, alta plasticidad y considerable variabilidad en condiciones de humedad. Estas características pueden afectar negativamente el comportamiento estructural de edificaciones e infraestructuras construidas sobre ellos.

Ante estos retos, se han desarrollado múltiples técnicas de mejoramiento de suelos, que incluyen tanto métodos tradicionales como alternativas más sostenibles e innovadoras. Una de estas alternativas es el uso de materiales reciclados, como el ladrillo molido, el cual ha despertado creciente interés debido a su disponibilidad, bajo costo y potencial para mejorar las propiedades mecánicas del suelo, contribuyendo a su vez a la reducción de residuos de construcción y demolición.

El presente trabajo de investigación tiene como objetivo analizar el efecto de la adición de ladrillo molido en suelos arcillosos, específicamente en los parámetros de resistencia cortante, como la cohesión y el ángulo de fricción interna. A través de ensayos de laboratorio y análisis comparativos, se busca determinar en qué medida este aditivo puede mejorar el comportamiento mecánico del suelo, y evaluar su viabilidad como material estabilizante.

La importancia de este estudio radica no solo en la posibilidad de optimizar técnicas de estabilización de suelos, sino también en la promoción de prácticas más sostenibles en la ingeniería civil. Al reutilizar residuos de construcción, se contribuye a la economía circular y al desarrollo de soluciones técnicas con menor impacto ambiental.

Finalmente, los resultados obtenidos podrán servir como base para futuras investigaciones y aplicaciones en proyectos de infraestructura donde se requiera mejorar la resistencia y estabilidad de suelos arcillosos, especialmente en zonas con alta disponibilidad de residuos cerámicos.

1.2 Justificación

Justificación académica

La presente investigación se justifica académicamente por su aporte al campo de la ingeniería geotécnica, particularmente en el estudio del mejoramiento de suelos mediante el uso de materiales alternativos, el uso de ladrillo molido como aditivo estabilizante representa una línea de investigación innovadora que combina la ingeniería de suelos con principios de sostenibilidad y aprovechamiento de residuos. En el contexto de los suelos arcillosos, caracterizados por su baja resistencia al corte, alta plasticidad y comportamiento variable frente a los cambios de humedad, se hace indispensable desarrollar soluciones que permitan mejorar sus propiedades mecánicas y, con ello, garantizar la estabilidad de las estructuras cimentadas sobre ellos.

Asimismo, los resultados de esta investigación pueden enriquecer otras investigaciones relacionadas a la ingeniería civil, promoviendo el pensamiento crítico y la investigación aplicada orientada a la solución de problemas reales en el ámbito de la construcción y el desarrollo urbano sostenible.

Justificación de la aplicación técnico-práctico

Desde el punto de vista técnico-práctico, el estudio del comportamiento mecánico de los suelos arcillosos modificados con materiales alternativos, como el ladrillo molido, responde a una necesidad creciente de encontrar soluciones sostenibles, económicas y eficientes para la mejora de terrenos en obras de ingeniería civil. La incorporación de este material puede modificar las propiedades geotécnicas del suelo, mejorando parámetros fundamentales como la resistencia al corte, la cohesión y el ángulo de fricción interna, lo cual repercute directamente en el desempeño estructural del suelo tratado.

Justificación e importancia social

La presente investigación adquiere relevancia social al proponer una alternativa sostenible y económica para mejorar las condiciones del suelo en proyectos de infraestructura, especialmente en zonas donde predominan suelos arcillosos con baja resistencia. Estos suelos, al no ofrecer condiciones óptimas para la construcción, pueden generar obras inestables, costosas y con alto riesgo de deterioro, lo que impacta negativamente en las comunidades, tanto en términos de seguridad como de desarrollo económico y social.

1.3 Antecedentes

Aunque existen diversos estudios sobre estabilización de suelos con cal, cemento u otros aditivos tradicionales, el análisis específico del ladrillo cerámico reciclado aplicado a suelos arcillosos y sus efectos sobre los parámetros de resistencia cortante aún es limitado, especialmente en contextos locales o regionales.

Lopez y Ortíz, 2018, publicaron la tesis de grado titulada “estabilización de suelos arcillosos con cal para el tratamiento de la subrasante”, consistió en definir las propiedades físicas del suelo como la resistencia al esfuerzo cortante, contenido humedad, compactación y la plasticidad que adquirió el suelo al ser mezclado con cal, agregando porcentajes de cal de 0 a 8%, en intervalos de 2% a las muestras de suelo. Para luego, determinar su resistencia al corte (CBR). El presente trabajo de tesis tiene como objetivo principal, determinar las ventajas técnicas de la estabilización de las subrasantes arcillosas con cal.

Mejía, Medin y Huaylla, 2021 investigaron la “Incidencia de la velocidad de corte para determinar la variabilidad en los parámetros de resistencia cortante en suelo arcilloso” que evalúa el comportamiento de los parámetros de resistencia cortante, parámetro de cohesión y parámetro de ángulo de fricción, de una arcilla de alta plasticidad ante el incremento de la velocidad de corte en el ensayo de corte directo consolidado drenado (ASTM D3080). El enfoque de la investigación es cuantitativo y de tipo experimental, desarrollándose ensayos de laboratorio para determinar las propiedades físicas y los parámetros de resistencia cortante. Se llevó a cabo tres ensayos de corte directo

consolidado drenado a velocidades de corte de 0,25 mm/min, 0,50 mm/min y 1,00 mm/min. Se obtuvo parámetros de cohesión de 0,25 kg/cm², 0,24 kg/cm² y 0,51 kg/cm² y parámetros de ángulo de fricción igual a 21,8°, 20,1° y 13,2° ante la aplicación de velocidades de corte de 0,25 mm/min, 0,50 mm/min y 1,00 mm/min respectivamente. Los esfuerzos normales aplicados fueron 0,55 kg/cm², 1,10 kg/cm² y 2,20 kg/cm² en los tres ensayos de corte directo consolidado drenado. Al realizar la comparación de los parámetros de resistencia cortante, tomando como referencia los valores obtenidos a una velocidad de corte de 0,25 mm/min, se concluye que el parámetro de cohesión se comporta de manera variable, debido a que se reduce en 4% ante la aplicación de una velocidad de corte de 0,50 mm/min y se incrementa en 104% ante la aplicación de una velocidad de corte de 1,00 mm/min; mientras que el parámetro de ángulo de fricción presenta un comportamiento descendente no lineal, debido a que se reduce en 7,80% ante la aplicación de una velocidad de corte de 0,50 mm/min.

1.4 Planteamiento del problema

1.4.1 Situación problemática

El deterioro prematuro de las carreteras en todo el mundo, genera un gran problema en costos- tiempo, por esta razón es necesario realizar nuevos estudios para poder garantizar su vida útil de las mismas, mejorando su estructura, específicamente en la rasante, este problema afecta de gran manera en la ciudad de Tarija por su diversidad de clima y tipos de suelo en el medio local.

El ladrillo molido puede mejorar los parámetros de resistencia cortante en el suelo, dependiendo de varios factores como la composición del suelo, la cantidad de ladrillo molido utilizada y el tipo de carga aplicada.

Los parámetros de resistencia cortante de un suelo se refieren a su capacidad para soportar cargas sin sufrir deformaciones excesivas. Los suelos arcillosos tienden a tener una baja capacidad portante debido a su alta plasticidad y baja resistencia.

Al no realizar esta investigación quedaremos con la incertidumbre de no saber los porcentajes de ladrillo molido y que beneficios aporta su implementación en los parámetros de resistencia cortante.

El estudio de este trabajo proporcionará datos sobre el procedimiento al incorporar ladrillo molido y qué impactos tiene en la resistencia al corte de un suelo arcilloso de la ciudad de Tarija.

1.4.2 Formulación del problema

¿De qué manera se puede verificar los efectos en los parámetros en la resistencia cortante que tiene el ladrillo molido adicionado a suelos arcillosos?

1.4.3 Relevancia y factibilidad del problema

El análisis de los efectos del ladrillo molido en suelos arcillosos cobra gran importancia en el contexto actual de la ingeniería civil, donde la mejora de suelos problemáticos y la gestión de residuos de construcción se han convertido en prioridades tanto técnicas como ambientales. Los suelos arcillosos, debido a su alta plasticidad, baja resistencia al corte y comportamiento inestable ante cambios de humedad, representan un riesgo considerable para la estabilidad de estructuras y pavimentos. Por ello, se hace necesario implementar técnicas de estabilización eficientes y sostenibles.

El uso de ladrillo molido como estabilizante ofrece una alternativa innovadora que responde a dos desafíos clave: por un lado, la necesidad de mejorar las propiedades mecánicas del suelo; y por otro, la urgencia de reutilizar residuos de la construcción y demolición, que representan una carga ambiental significativa en muchas ciudades. Esta investigación es relevante no solo desde el punto de vista técnico, sino también social, ambiental y económico, ya que promueve la economía circular y puede aplicarse en zonas con recursos limitados.

Además, al enfocar el estudio en los parámetros de resistencia cortante particularmente la cohesión y el ángulo de fricción interna, se contribuye directamente al conocimiento necesario para el diseño seguro y eficiente de cimentaciones, estructuras de contención, terraplenes y otras obras de infraestructura.

1.4.4 Delimitación temporal y espacial del problema

La delimitación temporal y espacial establece los límites en términos de tiempo y espacio

dentro de los cuales se llevará a cabo el presente trabajo de investigación.

Delimitación temporal: la ejecución de la investigación abarca todas las etapas desde la obtención de muestras hasta la presentación y sustentación de la tesis.

Delimitación espacial: la zona de estudio corresponde al distrito de Cercado, de la ciudad de Tarija, Bolivia, donde se ha identificado la presencia de suelos arcillosos residuales con deficiencias mecánicas que afectan la estabilidad de construcciones.

1.5 Objetivos

1.5.1 Objetivo General.

Analizar los efectos de la adición ladrillo molido considerando los parámetros de resistencia cortante en un suelo arcilloso; de tal manera, determinar si mejoran dichos parámetros de resistencia cortante en una arcilla de media a baja plasticidad del barrio Tarijeños en progreso.

1.5.2 Objetivos específicos.

- Caracterizar las propiedades físicas y mecánicas de un suelo arcilloso mediante ensayos de laboratorio.
- Realizar la dosificación con porcentajes variables de ladrillo molido a un suelo arcilloso.
- Realizar ensayos de corte directo.
- Comparar los resultados obtenidos entre el suelo natural y las mezclas estabilizadas, identificando las variaciones en los parámetros de resistencia cortante según el porcentaje de ladrillo molido incorporado.
- Determinar el porcentaje óptimo de ladrillo molido que proporcione mejora en la resistencia cortante de un suelo arcilloso.

1.6 Formulación de la Hipótesis

La adición de ladrillo molido en diferentes proporciones mejora significativamente los parámetros de resistencia cortante de los suelos arcillosos.

1.7 Operacionalización de las variables

Identificación y conceptualización de variables.

Se observa que existen dos variables, la cantidad de ladrillo molido dependiente y los parámetros de la resistencia cortante independiente

1.7.1 Conceptualización de la variable independiente

Tabla 1. Variable

Conceptualización	Concepto	Dimensión	indicador	Valor /Acción
Cantidad de ladrillo molido	Referido a pequeñas cantidades que serán combinadas con una masa constante de suelo	Ladrillo molido	%	Demolición del ladrillo que pase tamiz 4
		Masa de suelo	g	Pesaje de una masa constante por cada % de ladrillo molido

Fuente: Elaboración propia

1.7.2 Conceptualización de la variable dependiente

Conceptualización	Concepto	Dimensión	Indicador	Valor /Acción
Parámetros de resistencia cortante	Se refiere al ángulo de fricción interna y cohesión obtenidos mediante ensayo de resistencia cortante; drenado y no drenado	Cohesión drenada	Kg/cm ²	Ensayo de resistencia cortante, saturada y drenada con variación de carga vertical
		Fricción drenada	Kg/cm ²	
		Cohesión no drenada		Ensayo de resistencia cortante, saturada y no saturada consolidación de carga vertical
		Fricción drenada.		

1.8 Diseño metodológico

Pertenece a nivel de diseño causal explicativa, con comparación entre grupos (muestras) tratadas con distintos porcentajes de ladrillo molido y un grupo control (suelo natural sin tratar).

1.9 Alcance de la investigación y trabajo

La investigación cuenta con dos variables que es el valor del porcentaje de ladrillo molido

y otra los parámetros de resistencia cortante; se categoriza como un pre experimento por el bajo control y condiciones del laboratorio de suelos el valor de la capacidad cortante en tal sentido corresponde al nivel de diseño experimental causal explicativa por lo cual también se manipulan deliberadamente, una variable independiente para observar su efecto sobre una o más variables dependientes, de tal, manera se podrá encontrar valores de los parámetros de resistencia cortante para un suelo arcilloso clasificado en A-6.

Se evaluarán mezclas de suelo arcilloso natural con diferentes porcentajes de ladrillo molido con el objetivo de determinar si dicho residuo de construcción puede actuar como un estabilizante eficaz y poder analizar los efectos en los parámetros de resistencia cortante como la cohesión y el ángulo de fricción, encontrando un óptimo. Las muestras serán recolectadas del barrio Tarijeños en progreso de la ciudad de Tarija, misma que tiene presencia de suelos arcillosos problemáticos.

Una vez determinado el porcentaje óptimo de ladrillo molido, se procederá a evaluar de manera detallada las mejoras que esta adición genera en el comportamiento del suelo. Esta evaluación incluirá el análisis de parámetros geotécnicos clave, tales como la plasticidad, la compactación, los parámetros de resistencia cortante y esfuerzos de resistencia cortante. Asimismo, se compararán los valores obtenidos con las propiedades del suelo natural para cuantificar el impacto de la estabilización. Con ello, se busca establecer con precisión el grado de mejora alcanzado y definir la viabilidad técnica del uso de ladrillo molido como material alternativo en la estabilización de suelos arcillosos.

CAPÍTULO II

ESTADO DE

CONOCIMIENTO

CAPÍTULO II

ESTADO DE CONOCIMIENTO

2.1 Marco conceptual

2.1.1 Investigación subsuelo y método de mejoramiento del terreno

Antes de construir cualquier obra de ingeniería se necesita investigar las condiciones del subsuelo del sitio propuesto para determinar si es adecuado y establecer su capacidad para soportar la estructura propuesta evitando esfuerzos y deformaciones indebidos. En el caso de obras construidas con suelo, también se necesita verificar si el material de relleno es adecuado y seleccionar el método de construcción más apropiado. (Mecánica de suelos, Peter L. Berry-David Reid, pág. 358)

2.2 Clasificación y descripción de los suelos

Las características físicas y la apariencia de un suelo granular dependen principalmente de la distribución del tamaño de las partículas en el depósito de suelo. En un suelo arcilloso ellas dependen de la adherencia del tipo stiction y la plasticidad, propiedades que están asociadas con su composición mineralógica y su contenido de humedad, y también de su textura natural o macroestructura. Por tanto, la fracción granular de un depósito de suelo se clasifica de acuerdo con su distribución de tamaños de las partículas, en tanto que la fracción arcillosa se clasifica de acuerdo a sus características de plasticidad con los parámetros conocidos como límites de Atterberg. (Mecánica de suelos, Peter L. Berry-David Reid, pág. 34)

Figura 2.1: Clasificación de los suelos



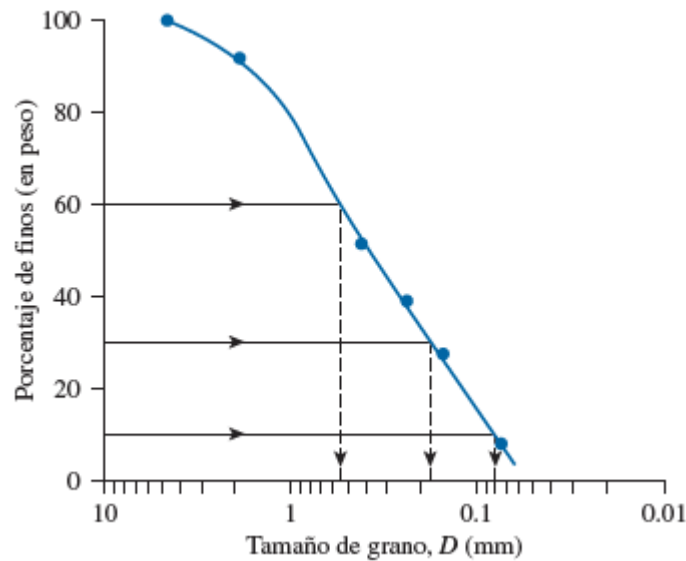
Fuente: Elaboración propia.

2.3 Distribución de tamaños de las partículas

La distribución de tamaños de las partículas en una masa de suelo se representa usualmente con la curva de gradación o la curva de distribución de tamaños de las partículas, en la cual el porcentaje de partículas inferiores a un tamaño en particular se representa en función de este tamaño en escala logarítmica. (Mecánica de suelos, Peter L. Berry-David Reid, pág. 34)

En cualquier masa de suelo, los tamaños de los granos varían en gran medida. Para clasificar apropiadamente un suelo, se debe conocer su distribución granulométrica. La distribución granulométrica de un suelo de grano grueso se determina por lo general mediante un análisis granulométrico con mallas. Para un suelo de grano fino, la distribución granulométrica se puede obtener por medio del análisis del hidrómetro. (Braja M. Das, 2010, pág. 2)

Figura 2.2: Análisis granulométrico

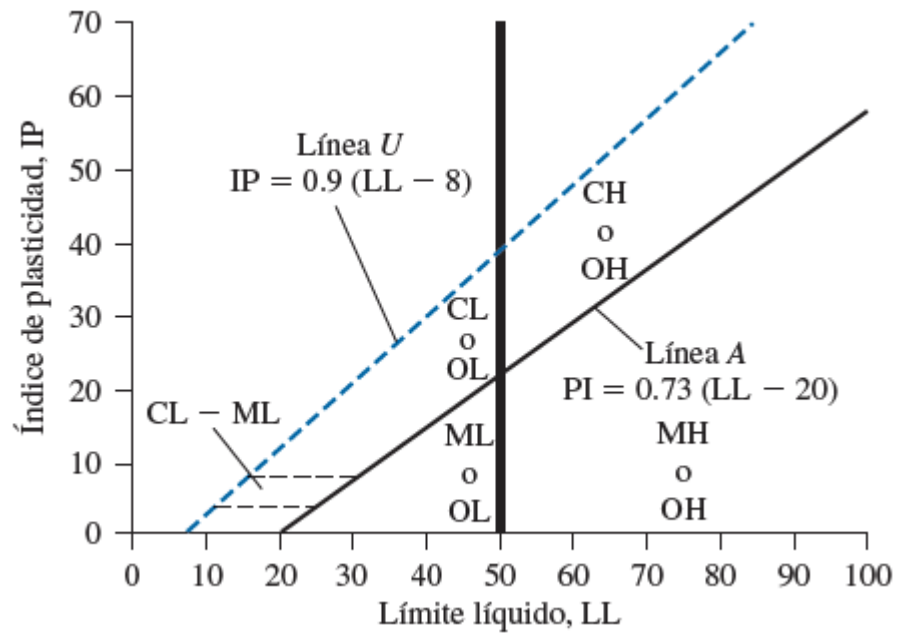


Fuente: Braja M. Das, 2010, pàg. 3.

2.4 Consistencia de las arcillas y límites de Atterberg

Una de las características más importantes de las arcillas es su plasticidad. La magnitud de la plasticidad que presenta una arcilla natural depende de su composición mineralógica y contenido de humedad. Además, la consistencia de una arcilla natural varía de acuerdo con el contenido de humedad, desde un estado sólido en condición seca, pasando por un estado semisólido para bajos contenidos de humedad en que el suelo se desmorona y no presenta plasticidad, pasando también por un estado plástico para altos contenidos de humedad, hasta llegar finalmente a un estado esencialmente líquido para contenidos de humedad muy altos. (Mecánica de suelos, Peter L. Berry-David Reid, pág. 38)

Figura 2.3: Gráfica de plasticidad.



Fuente: Braja M. Das, 2010, pág. 20.

El contenido de humedad para el cual la consistencia cambia de un estado a otro varía de una arcilla a otra, dependiendo de la cantidad y del tipo de mineral de arcilla presente. Puesto que la humedad es una propiedad que se mide fácilmente, se desarrolló un método de clasificación de las arcillas basado en estos contenidos de humedad límites. (Mecánica de suelos, Peter L. Berry-David Reid, pág. 38)

Figura 2.4: Determinación del límite líquido



Fuente: Elaboración propia

Atterberg consideraba que la plasticidad del suelo quedaba determinada por el límite líquido y por la cantidad máxima de una cierta arena, que podía ser agregada al suelo, estando este con el contenido de agua correspondiente al límite líquido, sin que perdiera por completo su plasticidad.

Figura 2.5: Determinación de límite plástico



Fuente: Elaboración propia

Además, encontró que la diferencia entre los valores de los límites de plasticidad, llamada

índice plástico, se relacionaba fácilmente con la cantidad de arena añadida, siendo de más fácil determinación, por lo que sugirió su uso, en lugar de la arena, como segundo parámetro para definir la plasticidad. (Mecánica de suelos, Juárez Badillo, pág. 129)

$$I_p = LL - LP$$

2.5 Clasificación de suelos

2.5.1 Sistema Unificado de Clasificación de Suelos

El sistema cubre los suelos gruesos y los finos, distinguiendo ambos por el cribado a través de la malla 200; las partículas gruesas son mayores que dicha malla y las finas, menores. Un suelo se considera grueso si más del 50% de sus partículas son gruesas, y fino, si más de la mitad de sus partículas, en peso, son finas. (Mecánica de suelos, Juárez Badillo, pág. 153)

El símbolo de cada grupo está formado por dos letras mayúsculas, que son las iniciales de los nombres ingleses de los suelos más típicos de ese grupo.

- a) Gravas y suelos en que predominen éstas. Símbolo genérico G (gravel).
- b) Arenas y suelos arenosos. Símbolo genérico S (sand).

Las gravas y las arenas se separan con la malla N°4, de manera que un suelo pertenece al grupo genérico G, si más del 50% de su fracción gruesa (retenida en la malla 200) no pasa la malla N°4, y es del grupo genérico S, en caso contrario.

Las gravas y arenas se subdividen en cuatro tipos:

1. Material prácticamente limpio de finos, bien graduado. Símbolo W (well graded).
En combinación con los símbolos genéricos, se obtienen los grupos GW y SW.
2. Material prácticamente limpio de finos, mal graduado. Símbolo P (poorly graded).
En combinación con los símbolos genéricos, da lugar a los grupos GP y SP.
3. Material con cantidad apreciable de finos no plásticos. Símbolo M (del sueco mo y mjala). En combinación con los símbolos genéricos, da lugar a los grupos GM y SM.
4. Material con cantidad apreciable de finos plásticos. Símbolo C (clay). En combinación con los símbolos genéricos, da lugar a los grupos GC y SC.

También en este caso el Sistema considera a los suelos agrupados, formándose el símbolo de cada grupo por dos letras mayúsculas, elegidas con un criterio similar al usado para los suelos gruesos, y dando lugar a las siguientes divisiones:

- a) Limos inorgánicos, de símbolo genérico M (del sueco mo y mjala).
- b) Arcillas inorgánicas, de símbolo genérico C (clay).
- c) Limos y arcillas orgánicas, de símbolo genérico O (organic).

Cada uno de estos tres tipos de suelos se subdividen, según su límite líquido, en dos grupos. Si este es menor de 50%, es decir, si son suelos de compresibilidad baja o media, se añade al símbolo genérico la letra L (low compressibility), obteniéndose por esta combinación los grupos ML, CL y OL. Los suelos finos con límite mayor que 50%, o sea de alta compresibilidad, llevan tras el símbolo genérico de letra H (high compressibility), teniéndose así los grupos MH, CH y OH. (Mecánica de suelos, Juárez Badillo, pág. 155)

Figura 2.6: Identificación de suelos



Fuente: [Claves para la Clasificación de suelos - InfoAgronomo](#)

2.6 Compactación de suelos

Compactación es el término que se utiliza para describir el proceso de densificación de un material mediante medios mecánicos; el incremento de densidad se obtiene al disminuir el contenido de aire en los vacíos en tanto se mantiene el contenido de humedad aproximadamente constante. (Mecánica de suelos, Peter L. Berry-David Reid, pág. 379)

Figura 2.7: Compactación del suelo



Fuente: Elaboración propia

Se entiende por compactación de los suelos el mejoramiento artificial de sus propiedades mecánicas por medios mecánicos. (Mecánica de suelos, Juárez Badillo, pág. 575)

La importancia de la compactación de los suelos estriba en el aumento de resistencia y disminución de capacidad de deformación que se obtienen al sujetar el suelo a técnicas convenientes que aumenten peso específico seco, disminuyendo sus vacíos. (Mecánica de suelos, Juárez Badillo, pág. 575)

El objetivo principal de la compactación es mejorar las propiedades ingenieriles del material en todos o en algunos de los siguientes aspectos:

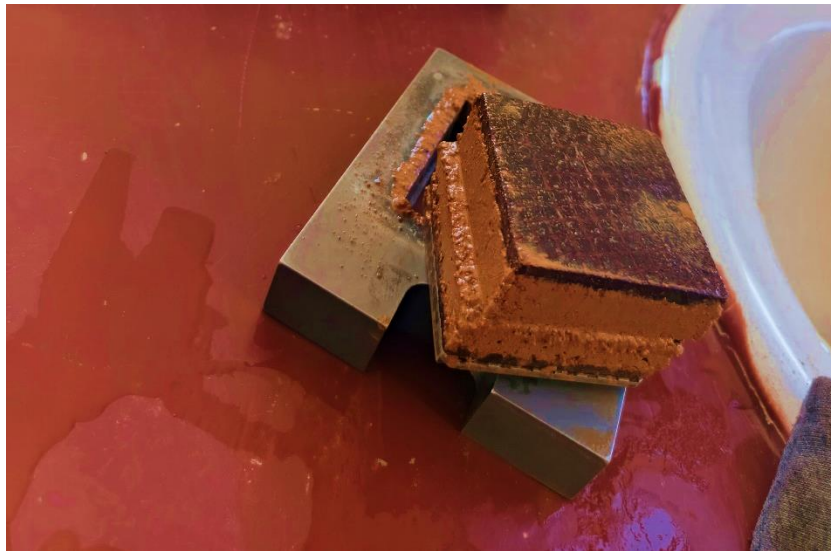
- a) Aumentar la resistencia al corte y, por consiguiente, mejorar la estabilidad de terraplenes y la capacidad de carga de cimentaciones y pavimentos.
 - b) Disminuir la compresibilidad y, por consiguiente, reducir la permeabilidad.
 - c) Disminuir la relación de vacíos y, por consiguiente, reducir la permeabilidad.
 - d) Reducir el potencial de expansión, contracción o expansión por congelamiento.
- (Mecánica de suelos, Peter L. Berry-David Reid, pág. 379)

2.7 Resistencia al corte

La resistencia al corte de un suelo determina factores tales como la estabilidad de un talud, la capacidad de carga admisible para una cimentación y el empuje de un suelo contra un muro de contención. El conocimiento de la resistencia al corte es requisito indispensable para cualquier análisis relacionado con la estabilidad de una masa de suelo. (Mecánica de suelos, Peter L. Berry-David Reid, pág. 182)

Los valores de las resistencias pueden obtenerse recordando que las arcillas, al igual que las arenas, son materiales básicamente friccionantes, por lo que dichas resistencias pueden obtenerse analizando los planos críticos de falla. (Mecánica de suelos, Juárez Badillo, pág. 505)

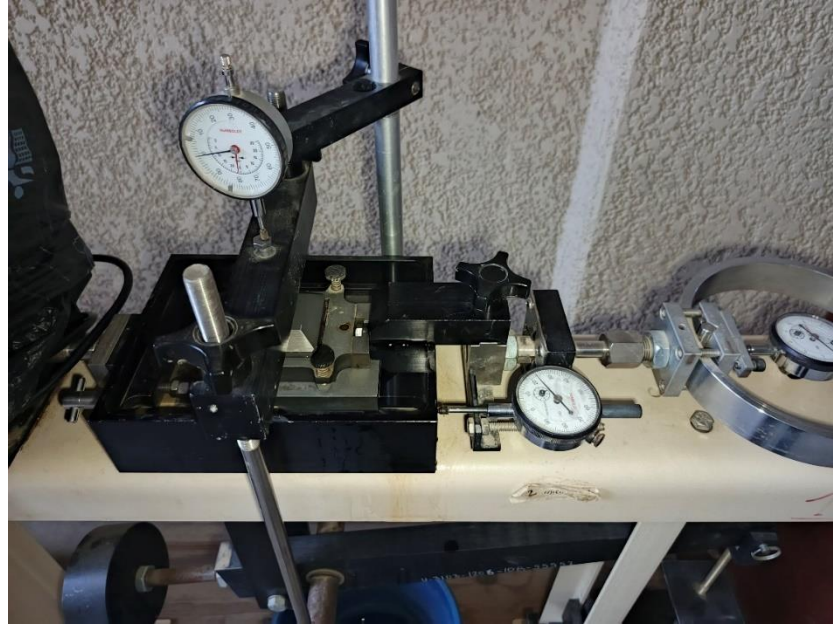
Figura 2.8: Resistencia al corte



Fuente: Elaboración propia.

2.8 Ensayo de corte directo

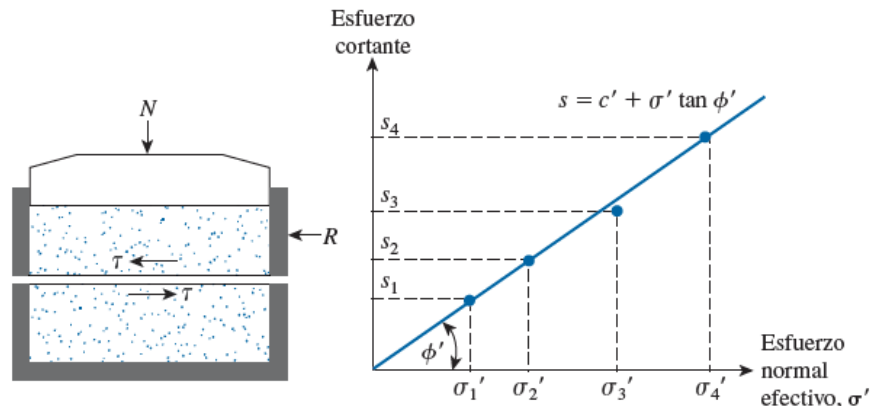
Figura 2.9: Corte directo



Fuente: Elaboración propia.

La figura muestra los principales detalles del aparato de corte directo, en el cual la muestra de suelo se introduce en un molde dividido horizontalmente en dos mitades. Se aplica luego a la muestra una fuerza normal N mediante una placa de carga y luego de fijar la mitad superior del molde, se corta la muestra en un plano horizontal mediante la aplicación de una fuerza cortante S . El movimiento vertical de la muestra durante el corte se mide por medio de un deformímetro que se apoya sobre la placa superior. (Mecánica de suelos, Peter L. Berry-David Reid, pág. 182)

Figura 2.10: Prueba de corte directo y diagrama esquemático.



Fuente: Braja M. Das, 2010, pág. 48.

2.9 Parámetros de resistencia cortante

Cohesión

Es la máxima resistencia del suelo a la tensión. Resulta de la compleja interacción de muchos factores, como la adherencia coloidal de la superficie de las partículas, la tensión capilar de las películas de agua, la atracción electrostática de las superficies cargadas, las condiciones de drenaje y el historial de esfuerzos. Sólo existe verdaderamente cohesión en el caso de arcillas que tienen contacto de canto con cara entre sus partículas. Los suelos o terrenos no plásticos de grano fino pueden exhibir una cohesión aparente cuando están en condiciones de saturación parcial.

El valor de cohesión que se utiliza al diseñar depende directamente de las condiciones de drenaje bajo la carga impuesta, así como del método de prueba que se emplee para calcularlo, por lo que todo se debe evaluar cuidadosamente. (Taller Lombardi, 2009, pág. 16)

Ángulo de fricción

El ángulo de fricción interna es un valor de convenio introducido para simplificar, y se le considera constante, aunque no lo es. El ángulo de fricción interna depende de la uniformidad de las partículas del suelo, del tamaño y forma de los granos y de la presión normal. (Crespo Villalaz. 2004)

Rangos de los ángulos de fricción por diferentes autores

Tabla 2.1: Rangos de ángulos de fricción para suelos

Tipo de suelos	$\phi'_{cs} (^\circ)$	$\phi'_p (^\circ)$	$\phi'_r (^\circ)$
Grava	30-35	35-50	
Mezclas de grava y arena con Suelos de grano fino	28-33	30-40	
Arena	27-37	32-50	
Limo o arena limosa	24-32	27-35	
Arcillas	15-30	20-30	5-15

Fuente: soil mechanics fundamentals by Muni Budhu Wiley Blackwell, 2015

Tabla 2.2: Resumen de datos estadísticos de cohesión y ángulo de fricción según la clasificación de suelo (SUCS)

Tipo de suelo	Ángulo de rozamiento			Cohesión En Mpa	Observaciones
	Min	Med	Max		
GW	35	38,5	45	-	Los valores indicados son de tipo medio y suelen corresponder a muestras naturales. Los valores más altos pertenecen a muestras con baja humedad consolidadas y poco alteradas mientras que los más bajos corresponden a muestras saturadas poco consolidadas o sueltas y bastante alteradas
GP	32	37	43	0,0-0,1	
GM	34	38	42	0,0-0,3	
GC	28	33,5	38	-	
SW	30	36	41	-	
SP	29	35	40	0,0-0,2	
SM	27	32,5	38	0,1-0,3	
SM-SC	26	31	36	0,1-0,4	
SC	25	29,5	34	0,1-0,4	
ML	27	30	33	0,1-0,3	
ML-CL	23	28	31	0,2-0,5	
CL	20	25	29	0,2-0,7	
MH	23	27	30	0,1-0,4	
CH	13	19	25	0,2-0,8	

Fuente: Ignacio Morilla Abad, 2012

2.10 Ladrillo Molido

El ladrillo molido es un material obtenido al triturar o pulverizar ladrillos cerámicos generalmente provenientes de restos de construcción o demolición hasta lograr partículas de diferentes granulometrías, según el uso que se requiera.

En ingeniería civil y geotecnia, el ladrillo molido se emplea como material de estabilización o aditivo para mejorar las propiedades de ciertos suelos, especialmente los arcillosos. Sus componentes cerámicos aportan beneficios como:

- Reducción de la plasticidad del suelo.
- Mejora en la compactación, aumentando la densidad máxima.
- Disminución de la humedad óptima requerida.
- Incremento de la resistencia y estabilidad del material tratado.

Además, su uso contribuye a la sostenibilidad, ya que permite reutilizar residuos de construcción, disminuyendo el impacto ambiental y apoyando prácticas de economía circular.

Las partículas de ladrillo molido suelen presentar formas angulares, subangulares e irregulares, resultado del proceso de trituración del material cerámico. Estas formas, con bordes marcados y superficies rugosas, favorecen el intertrabado y la compactación al mezclarse con el suelo, mejorando así sus propiedades geotécnicas.

En cambio, el polvo de ladrillo es mucho más fino, casi como una harina cerámica, por lo que actúa más como un relleno o material que modifica la plasticidad, pero no aporta el mismo efecto mecánico de interbloqueo que las partículas más grandes del ladrillo molido.

2.11 Marco Normativo

Determinación en laboratorio del contenido de humedad del suelo ASTM D2216.

Análisis granulométrico por tamizado ASTM D422 AASTHO T88.

Determinación del límite líquido de los suelos ASTM D4318 AASTHOCT89.

Determinación del límite plástico e índice de plasticidad ASTM D4318 AASHTO T90.

Determinación de la resistencia al corte método de corte directo CD (Consolidado Drenado) ASTM D3080 AASHTO T236.

CAPÍTULO III

RELEVAMIENTO DE

DATOS

CAPÍTULO III

RELEVAMIENTO DE DATOS

3.1 Criterios de diseño metodológico

Es imprescindible delinear los elementos del análisis metodológico para facilitar una mejor comprensión y ejecución apropiada de la investigación.

3.1.1 Unidad de muestra

Se denomina como unidad de estudio, aquel elemento que nos brindará la información necesaria:

Ensayo de *laboratorio de suelos*

Las unidades de estudio son la *resistencia* y el porcentaje de ladrillo molido adicionado a un suelo arcilloso del barrio Tarijeños en progreso de la ciudad de Tarija.

3.1.2 Población

La caracterización de los suelos, tiene una lista extensa de ensayos, que se realizan en un laboratorio de suelos.

$N = \text{todos los ensayos de laboratorio de suelos.}$

3.1.3 Muestra

Los ensayos de laboratorio de suelos finos

Lista de ensayos que se deben realizar son los siguientes:

Ensayos de contenido de humedad

Ensayos de granulometría

Ensayos de límites de Atterberg

Ensayos de compactación

Ensayos de corte directo

Tamaño de muestra “n”: desconocido

3.2 Enfoque de trabajo

La primera etapa de una investigación es el muestreo del suelo, que es igual de importante que cualquier otro ensayo. Este muestreo proporciona muestras representativas, las cuales se utilizan para determinar las propiedades y características físicas del suelo.

La toma de muestras puede clasificarse en dos categorías. Se afirma que una muestra es:

Este tipo de muestra, alterada, ocurre cuando no se conservan las mismas condiciones en las que estaba en el terreno de origen y se extrae a medida que se va llevando a cabo el muestreo.

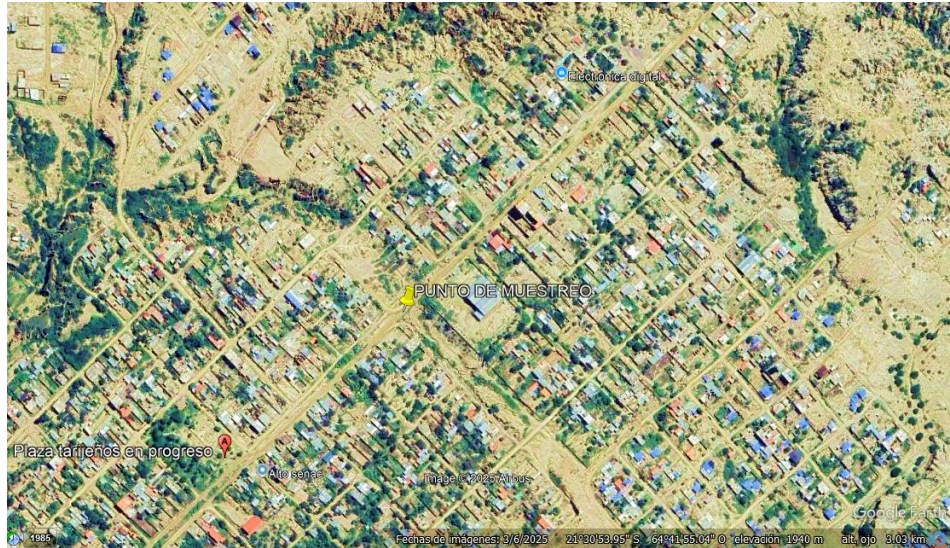
Estas muestras, sin alteraciones, son las que mantienen la estructura y el contenido de humedad en su máxima expresión para que se den las condiciones del campo lo más naturales posible.

Se utilizaron muestral alteradas para el ensayo de corte directo.

3.3 Determinación de la zona de muestreo

A propósito de tener una mejor representación de muestras, se optó por realizar un muestreo no aleatorio en la ciudad de Tarija con el fin de obtener un suelo arcilloso representativo. Se optó por trabajar en el barrio Tarijeños en progreso considerando que es un punto representativo ya que por este barrio pasa la segunda circunvalación además que representa una zona en crecimiento poblacional.

Figura 3.1: Ubicación punto de muestreo



Fuente: Google eart pro

Se determinó la localización de la extracción de las muestras mediante un análisis e inspección de los lugares, lo que incluyó una verificación in situ de las áreas donde hay depósitos extensos de suelos arcillosos. Esta selección se llevó a cabo en la ciudad de Tarija, específicamente en el barrio Tarijeños en progreso. El lugar de extracción se llevó a cabo eligiendo un área en expansión poblacional y a través de un procedimiento de descarte. Este suelo está presente en diversas áreas de la ciudad de Tarija, lo que le otorga relevancia a esta investigación.

Figura 3.2: Muestra única



Fuente: Google eart pro

Tabla 3.1: Coordenadas de las zonas de extracción del suelo

Muestra	Barrio	Ubicación		Ubicación
		Lat. Sur	-21,515466	21°30'50.26"
1	Tarijeños en Progreso	Long. Oeste	-64,699485	64°41'57.14"

Fuente: Elaboración propia

3.3.1 Extracción de muestras de suelo

La meta es hacer el muestreo apropiado y representativo para ejecutar las pruebas de laboratorio y, por ende, poder establecer correctamente las propiedades y características del terreno.

Figura 3.3: Extracción de muestras



Fuente: Elaboración propia

3.3.2 Extracción de muestras de suelo

La obtención de muestras de suelo se llevó a cabo de la siguiente forma:

- Comprobación de los puntos
- Excavar y limpiar
- Obtención de las muestras

Figura 3.4: Banco de muestras



Fuente: Elaboración propia

3.4 Adición de ladrillo molido

Tras realizar la clasificación inicial del suelo arcilloso natural, se incorporaron diferentes porcentajes de ladrillo molido 4%, 8%, 12%, 16% y 20% con el fin de analizar su efecto en las propiedades del material. Luego de cada adición, las muestras fueron nuevamente clasificadas para identificar los cambios en su comportamiento y determinar en qué medida el ladrillo molido contribuye a mejorar sus características geotécnicas. Este procedimiento permitió evaluar la evolución de parámetros como la plasticidad, la compactación y la estructura del suelo tratado, proporcionando una visión más precisa del potencial del ladrillo molido como agente estabilizador.

3.5 Caracterización de suelos

Los suelos poseen diversas características físicas, químicas y mecánicas que influyen directamente en su comportamiento y desempeño en obras de ingeniería civil. A continuación, se examinan las propiedades más relevantes desde el punto de vista ingenieril, tales como la textura, la estructura, la densidad, la humedad, la cohesión, el ángulo de fricción interna, la permeabilidad y la capacidad de carga. Estas propiedades determinan aspectos fundamentales como la estabilidad de taludes, la resistencia al esfuerzo cortante, la deformabilidad y la capacidad de soportar cargas estructurales. El conocimiento detallado de estas características es esencial para el diseño y construcción de cimentaciones, terraplenes, pavimentos, muros de contención y otras estructuras. Por lo tanto, el estudio del suelo no solo permite evaluar su aptitud para determinados usos, sino también prevenir posibles fallos estructurales o asentamientos diferenciales que puedan comprometer la seguridad y funcionalidad de una obra.

3.5.1 Ensayo contenido de humedad ASTM D2216

El contenido de humedad del suelo se refiere a la proporción de agua presente en los poros del suelo en relación con su peso seco. Esta propiedad se determina mediante un procedimiento de secado en horno, donde la muestra de suelo es expuesta a altas temperaturas (generalmente 105–110 °C) hasta alcanzar un peso constante. La pérdida de masa durante este proceso corresponde al agua evaporada, lo que permite calcular el contenido de humedad como un porcentaje respecto al peso seco del suelo. Esta

característica es fundamental en ingeniería geotécnica, ya que influye directamente en el comportamiento mecánico del suelo, incluyendo su resistencia, plasticidad y capacidad de soporte.

Figura 3.5: Determinación de contenido de humedad.



Fuente: Elaboración propia

Para calcular el contenido de humedad de las muestras, se utilizó el método estandarizado del horno. Las muestras se pusieron en tres cápsulas y se introdujeron en el horno durante 24 horas; se anotaron los pesos de tara, tara con suelo seco y tara con suelo húmedo.

Muestra 1: Contenido de humedad suelo natural

Tabla 3.2: Contenido de humedad natural

HUMEDAD NATURAL			
Cápsula	1	2	3
Peso de suelo húmedo + Cápsula [g]	53,92	48,67	63,78
Peso de suelo seco + Cápsula [g]	51,75	46,66	61,09
Peso de cápsula [g]	12,44	12,43	12,67
Peso de suelo seco [g]	39,31	34,23	48,42
Peso del agua [g]	2,17	2,01	2,69
Contenido de humedad [%]	5,52	5,87	5,56
PROMEDIO	5,65		

Fuente: Elaboración propia

Muestra 2: Adición del 16% de ladrillo molido

Tabla 3.3: Contenido de humedad con adición de ladrillo molido.

HUMEDAD NATURAL			
Cápsula	1	2	3
Peso de suelo húmedo + Cápsula [g]	64,50	71,00	74,00
Peso de suelo seco + Cápsula [g]	60,00	66,10	69,00
Peso de cápsula [g]	12,55	12,85	12,94
Peso de suelo seco [g]	47,45	53,25	56,06
Peso del agua [g]	4,50	4,90	5,00
Contenido de humedad [%]	9,48	9,20	8,92
PROMEDIO	9,20		

Fuente: Elaboración propia

A continuación, se presenta tabla de resultado de contenido de humedad del presente estudio.

Tabla 3.4: Resultados de contenidos de humedad

% Ladrillo molido	Contenido de humedad
0%	5,65
4%	8,87
8%	7,36
12%	6,65
16%	9,2
20%	5,69

Fuente: Elaboración propia

3.5.2 Análisis granulométrico ASTM D422 AASHTO T88

Análisis granulométrico del suelo arcilloso mediante lavado.

Figura 3.6: Lavado de suelo



Fuente: Elaboración propia

Tomamos una muestra de suelo natural previamente seca y finamente triturada. Posteriormente, la colocamos en una bandeja y la dejamos en proceso de saturación durante 24 horas, con el fin de aplicar el método de lavado y permitir que las partículas más finas atraviesen el tamiz correspondiente. El material que queda retenido en el tamiz N° 200 se recoge cuidadosamente en un recipiente y se somete a un proceso de secado durante 24 horas. Finalmente, una vez que el material está completamente seco y a temperatura ambiente, procedemos a realizar el tamizado de la muestra para su posterior análisis.

Granulometría

Muestra 1: Suelo Natural

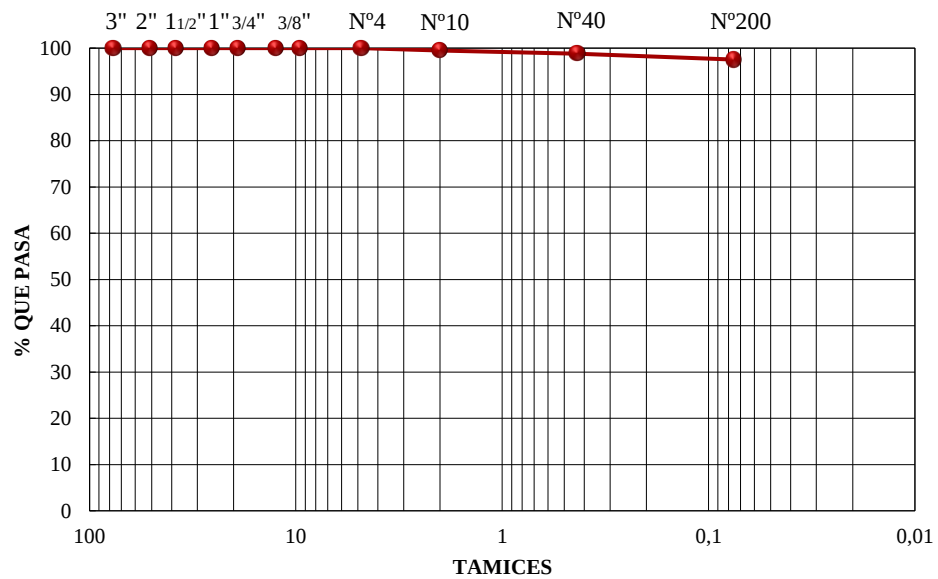
Peso total [g] = 3.000,00

Tabla 3.5: Granulometría suelo natural

Tamices	Tamaño	Peso Ret. [g]	Ret. Acum [g]	% Ret	% Que Pasa
3"	76,2	0,00	0,00	0,00	100,00
2"	50,8	0,00	0,00	0,00	100,00
1 1/2"	38,1	0,00	0,00	0,00	100,00
1"	25,4	0,00	0,00	0,00	100,00
3/4"	19,05	0,00	0,00	0,00	100,00
1/2"	12,5	0,00	0,00	0,00	100,00
3/8"	9,5	0,00	0,00	0,00	100,00
N°4	4,8	0,00	0,00	0,00	100,00
N°10	2	16,2	16,20	0,54	99,46
N°40	0,43	19,6	35,80	1,19	98,81
N°200	0,075	39	74,80	2,49	97,51

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.7: Gráfica de granulometría suelo natural



Fuente: Elaboración propia.

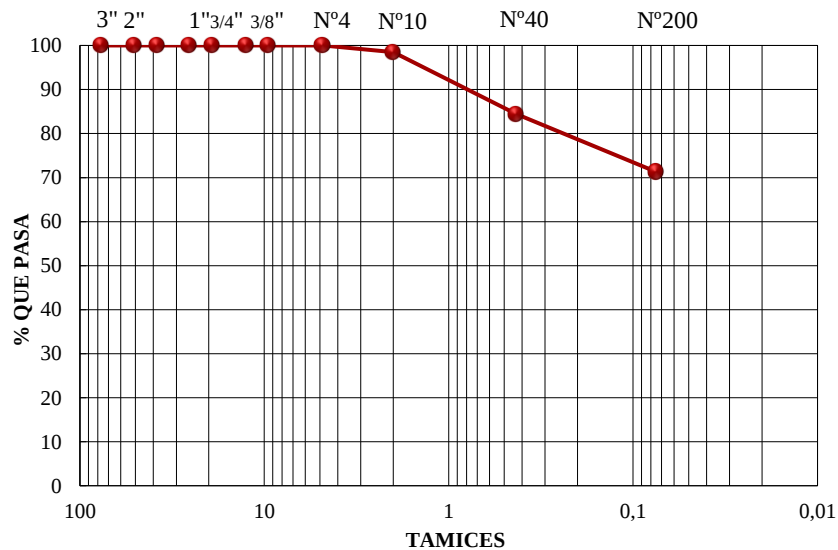
Muestra 2: Adición del 16% de ladrillo molido.

Tabla 3.6: Granulometría con adición del 16% de ladrillo molido

Peso Total [g]		1.000,00			
Tamices	Tamaño	Peso Ret. [g]	Ret. Acum [g]	% Ret	% Que Pasa
3"	76,2	0,00	0,00	0,00	100,00
2"	50,8	0,00	0,00	0,00	100,00
1 1/2"	38,1	0,00	0,00	0,00	100,00
1"	25,4	0,00	0,00	0,00	100,00
3/4"	19,05	0,00	0,00	0,00	100,00
1/2"	12,5	0,00	0,00	0,00	100,00
3/8"	9,5	0,00	0,00	0,00	100,00
Nº4	4,8	0,00	0,00	0,00	100,00
Nº10	2	15,06	15,06	1,51	98,49
Nº40	0,43	140,54	155,60	15,56	84,44
Nº200	0,075	131,19	286,79	28,68	71,32

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.8: Gráfica de granulometría con adición del 16% de ladrillo molido.



Fuente: Elaboración propia.

Resumen de los resultados obtenidos en los ensayos de granulometría realizados a las muestras analizadas. Se presentan los porcentajes de distribución de tamaños de

partículas, identificando las fracciones gruesas, medias y finas. Estos datos permiten evaluar la textura y composición del material, así como su clasificación según las normas técnicas aplicables.

Tabla 3.7: Granulometrías

% Ladrillo molido	Nº Tamiz - % Pasa		
	Nº 10	Nº 40	Nº 200
4%	99,88	99,42	98,34
8%	98,65	90,46	76,98
12%	98,52	86,8	72,84
16%	98,49	84,44	71,32
20%	98,61	82,13	68,62
Suelo Natural	99,46	98,81	97,51

Fuente: Elaboración propia

3.5.3 Determinación del límite líquido y límite plástico ASTM D4318

Límite líquido

Es el contenido de humedad expresado en porcentaje, que divide a los estados líquido y plástico del suelo.

Figura 3.9: Materiales para la determinación de los límites de consistencia



Fuente: Elaboración propia

Se trabajó con una muestra de suelo seco correspondiente a la fracción que pasa por la malla N° 40. Posteriormente, se añadió agua hasta obtener una pasta homogénea y manejable, eliminando cuidadosamente el aire atrapado. Utilizando el aparato de Casagrande, se colocó la muestra en la copa y se realizó una ranura con el ranurador; al incrementar gradualmente el contenido de agua, la ranura comenzó a cerrarse al aplicar golpes sobre una superficie de impacto. El límite líquido se determinó en el momento en que la ranura se cerró completamente después de 25 golpes.

Figura 3.10: Ensayo límite líquido



Fuente: Elaboración propia

Límite plástico

Es el contenido de humedad en porcentaje que divide a los estados plástico y semisólido del suelo.

Figura 3.11: Ensayo límite plástico



Fuente: Elaboración propia

Se trabajó con una muestra de suelo seco que pasa completamente por la malla N° 40, a la cual se le agregó agua gradualmente hasta obtener una masa suave, homogénea y fácilmente manejable. Con la mano se elaboraron rollitos de arcilla de aproximadamente tres milímetros de diámetro; en el momento en que comenzaron a aparecer pequeños agrietamientos en su superficie, se consideró que el suelo había alcanzado la humedad correspondiente al límite buscado. Finalmente, las muestras se dejaron secar durante un periodo de 24 horas, registrando cuidadosamente sus pesos en estado húmedo y seco para el análisis posterior.

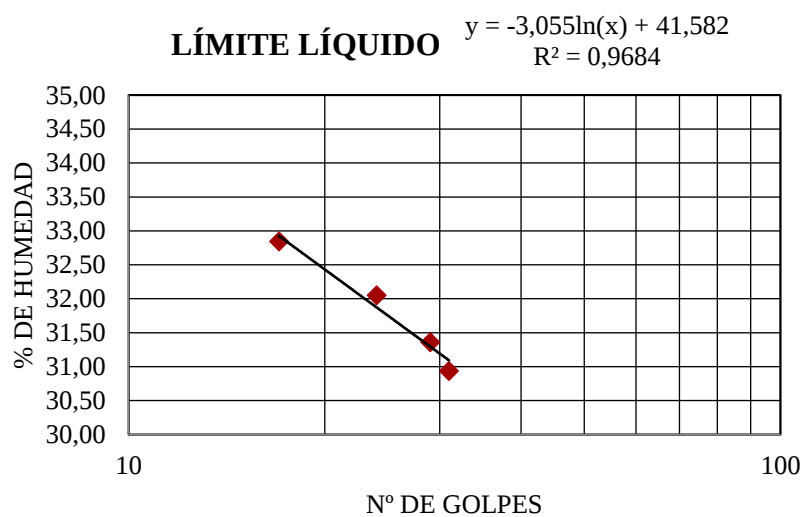
Límites de Atterberg

Muestra 1: Suelo Natural.

Tabla 3.8: Límite líquido suelo natura

Capsula N°	1	2	3	4
N° de golpes	17	24	29	31
Suelo Húmedo + Cápsula [g]	29,17	29,03	29,88	31,61
Suelo Seco + Cápsula [g]	25,8	25,78	26,28	27,91
Peso del agua [g]	3,37	3,25	3,60	3,70
Peso de la Cápsula [g]	15,54	15,64	14,80	15,95
Peso Suelo seco [g]	10,26	10,14	11,48	11,96
Porcentaje de Humedad [%]	32,85	32,05	31,36	30,94

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.12: Gráfica de límite líquido

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.9: Límite plástico suelo natural

Cápsula	1	2	3
Peso de suelo húmedo + Cápsula [g]	17,14	14,44	16,57
Peso de suelo seco + Cápsula [g]	16,97	14,27	16,38
Peso de cápsula [g]	15,93	13,31	15,32
Peso de suelo seco [g]	1,04	0,96	1,06
Peso del agua [g]	0,17	0,17	0,19
Contenido de humedad [%]	16,35	17,71	17,92

Fuente: Elaboración propia

Límite Líquido (LL)
32
Límite Plástico (LP)
17
Indice de plasticidad (IP)
14
Indice de Grupo (IG)
10

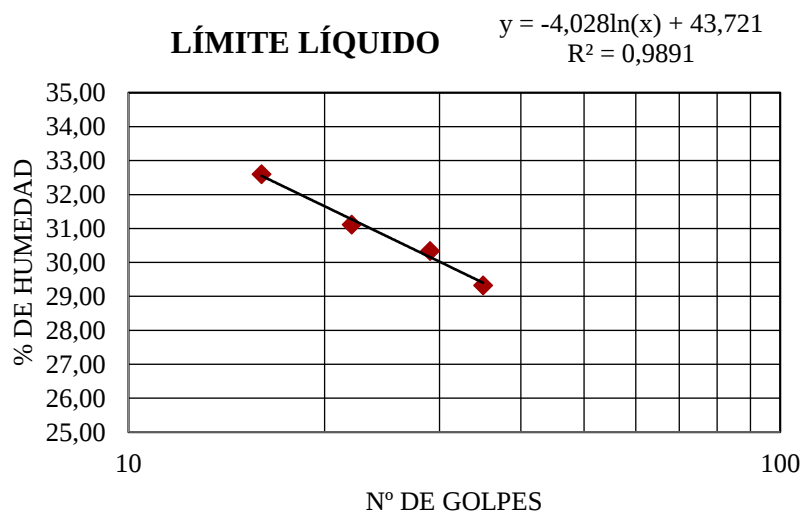
Muestra 2: Adición del 16% de ladrillo molido.

Tabla 3.10: Límite líquido con adición del 16% de ladrillo

Capsula N°	1	2	3	4
N° de golpes	16	22	29	35
Suelo Húmedo + Cápsula [g]	29,01	29,17	26,09	29,52
Suelo Seco + Cápsula [g]	25,75	26,03	23,39	26,3
Peso del agua [g]	3,26	3,14	2,70	3,22
Peso de la Cápsula [g]	15,75	15,94	14,49	15,32
Peso Suelo seco [g]	10	10,09	8,9	10,98
Porcentaje de Humedad [%]	32,60	31,12	30,34	29,33

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.13: Grafica de límite líquido con 16% de ladrillo



Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.11: Límite plástico con adición del 16% de ladrillo

Cápsula	1	2	3
Peso de suelo húmedo + Cápsula [g]	17,10	17,39	16,13
Peso de suelo seco + Cápsula [g]	16,93	17,15	15,82
Peso de cápsula [g]	16,00	15,84	14,15
Peso de suelo seco [g]	0,93	1,31	1,67
Peso del agua [g]	0,17	0,24	0,31
Contenido de humedad [%]	18,28	18,32	18,56

Fuente: Elaboración propia

Límite Líquido (LL)
31
Límite Plástico (LP)
18
Índice de plasticidad (IP)
12
Índice de Grupo (IG)
8

Luego de realizar de manera cuidadosa y siguiendo los procedimientos establecidos los ensayos de límite líquido y límite plástico en las muestras de suelo seleccionadas, se obtuvieron los siguientes resultados. Estos ensayos permitieron determinar las propiedades de consistencia del material, así como su comportamiento frente a variaciones en el contenido de humedad. Los valores obtenidos constituyen una base fundamental para la clasificación del suelo y la evaluación de sus características de plasticidad y estabilidad.

Tabla 3.12: Planilla resumen límites de Atterberg

% Ladrillo molido	Límite líquido	Límite plástico	Índice de plasticidad	Índice de grupo
4%	33	20	13	9
8%	32	17	15	10
12%	31	17	14	9
16%	31	18	12	8
20%	30	17	13	8
Suelo Natural	32	17	14	10

Fuente: Elaboración propia

3.5.4 Clasificación de los suelos ASTM D2487

Las muestras de suelo fueron clasificadas utilizando el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS), el cual permite describir y categorizar los diferentes tipos de suelo en función de sus características físicas y mecánicas. Este sistema considera aspectos como la granulometría, los límites de consistencia y la plasticidad del material, proporcionando una identificación precisa y estandarizada. Gracias a esta clasificación, es posible determinar el comportamiento del suelo frente a cargas, su capacidad de compactación y su idoneidad para distintos tipos de obras geotécnicas o de ingeniería civil.

Tabla 3.13: Planilla resumen clasificación de los suelos

% Ladrillo molido	Clasificación
4%	CL
8%	CL
12%	CL
16%	CL
20%	CL
Suelo Natural	CL

Fuente: Elaboración propia

3.6 Ensayo de Compactación

Se realizaron ensayos de compactación tanto con muestras de suelo natural como con muestras modificadas mediante la adición de ladrillo molido, con el propósito de analizar el efecto de este material en las propiedades del suelo. Estos ensayos permitieron determinar la densidad máxima seca alcanzable y el contenido de humedad óptimo correspondiente para cada mezcla, siguiendo los procedimientos establecidos en las normas de ensayo. Los resultados obtenidos proporcionan información valiosa sobre la mejora de las características mecánicas del suelo y su comportamiento frente a la compactación, aspectos fundamentales para su aplicación en proyectos de ingeniería y construcción.

Figura 3.1: Ensayo de compactación



Fuente: Elaboración propia

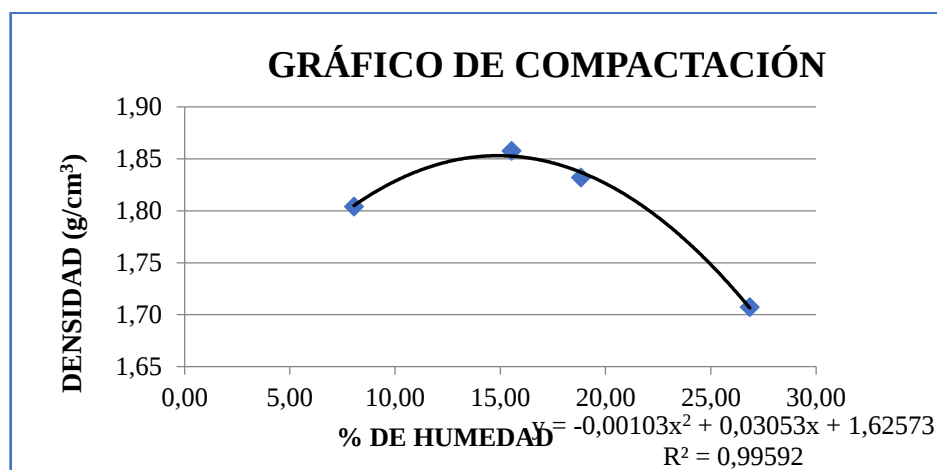
Muestra 1: Suelo Natural

Tabla 3.14: Compactación suelo natural

Nº de capas	5	5	5	5
Nº de golpes por capa	25	25	25	25
Peso suelo húmedo + molde	6040,2	6226,4	6255,4	6244,6
Peso del molde	4198,4	4198,4	4198,4	4198,4
Peso suelo húmedo	1841,8	2028	2057	2046,2
Volumén de la muestra	944,83	944,83	944,83	944,83
Densidad suelo húmedo [g/cm³]	1,95	2,15	2,18	2,17
Cápsula Nº	1	3	4	2
Peso suelo húmedo + capsula	82,32	87,77	87,79	96,7
Peso suelo seco + cápsula	77,71	78,36	76,79	79,78
Peso del agua	4,61	9,41	11	16,92
Peso de la cápsula	20,44	17,81	18,38	16,75
Peso suelo seco	57,27	60,55	58,41	63,03
Contenido de humedad [%h]	8,05	15,54	18,83	26,84
Densidad suelo seco [g/cm³]	1,80	1,86	1,83	1,71

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.2: Gráfico de compactación suelo natural



Fuente: Elaboración propia

Densidad Máx.	1,85	gr/cm³
Hum. Óptima	14,82	%

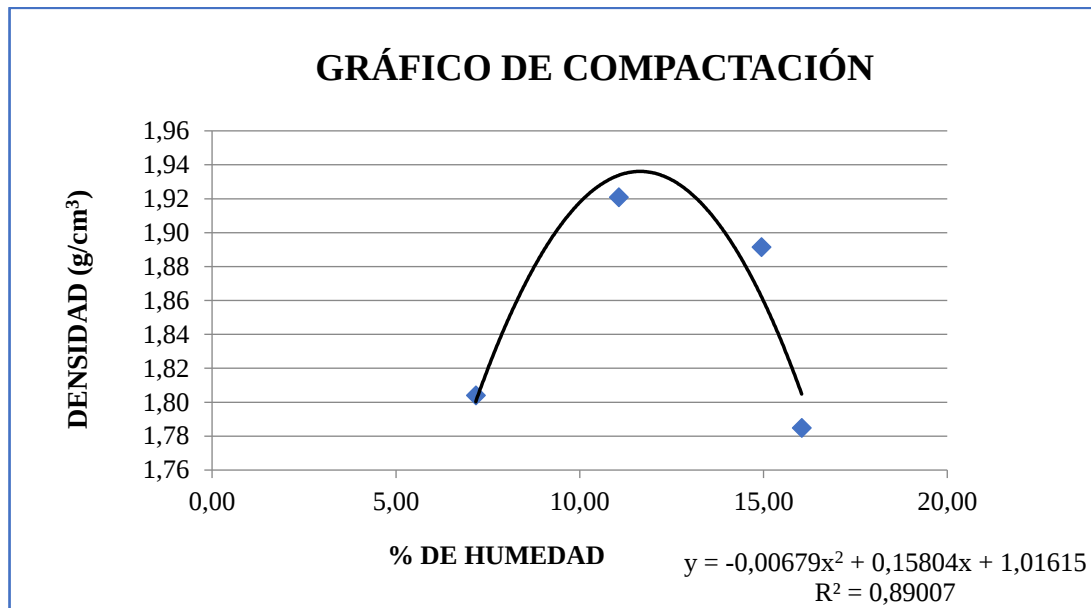
Muestra 2: Adición del 16% de ladrillo.

Tabla 3.15: Compactación con la adición del 16% de ladrillo

Nº de capas	5	5	5	5
Nº de golpes por capa	25	25	25	25
Peso suelo húmedo + molde	6025	6214	6252,6	6155,2
Peso del molde	4198,4	4198,4	4198,4	4198,4
Peso suelo húmedo	1826,6	2015,6	2054,2	1956,8
Volumen de la muestra	944,83	944,83	944,83	944,83
Densidad suelo húmedo [g/cm³]	1,93	2,13	2,17	2,07
Cápsula Nº	1	3	4	2
Peso suelo húmedo + capsula	85,2	85,51	81,13	83,67
Peso suelo seco + cápsula	80,71	79,08	72,76	73,29
Peso del agua	4,49	6,43	8,37	10,38
Peso de la cápsula	18,08	20,93	16,75	8,58
Peso suelo seco	62,63	58,15	56,01	64,71
Contenido de humedad [%h]	7,17	11,06	14,94	16,04
Densidad suelo seco [g/cm³]	1,80	1,92	1,89	1,78

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.3: Gráfica de compactación con adición del 16% de ladrillo molido



Fuente: Elaboración propia

Densidad Máx.	1,94	gr/cm ³
Hum. Óptima	11,64	%

La tabla que se muestra a continuación sintetiza minuciosamente los resultados obtenidos en las pruebas de compactación llevadas a cabo. En ella, se incorporan los valores de la densidad seca máxima y del contenido óptimo de humedad que se encontraron para cada una de las muestras analizadas. Esta información posibilita la comparación entre el suelo natural y el suelo modificado, proporcionando una base técnica para analizar su potencial de compactación y su posible uso en proyectos de construcción e ingeniería.

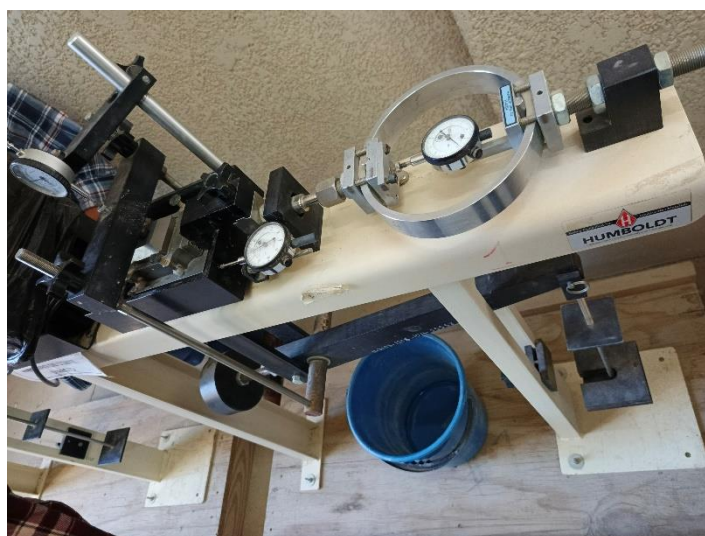
Tabla 3.16: Valores obtenidos de los ensayos de compactación

Condición de muestra	Densidad máxima	Humedad Óptima
Unidades	[g/cm ³]	[%]
Suelo natural	1,85	14,82
4% ladrillo molido	1,92	11,35
8% ladrillo molido	1,92	11,17
12% ladrillo molido	1,91	11,55
16% ladrillo molido	1,94	11,64
20% ladrillo molido	1,9	12,25

Fuente: Elaboración propia

3.7 Pruebas de corte directo CD (Consolidado Drenado) ASTM D3080

Figura 3.4: Equipo de corte directo



Fuente: Elaboración propia

En primer lugar, se tallaron las muestras de suelo alteradas o compactadas ya sean de suelo natural, y adición de porcentajes de ladrillo molido según las dimensiones de la caja de corte directo.

Se procedió a tomar las mediciones correspondientes para el cálculo del área de la muestra, además del peso de la muestra tallada antes del ensayo.

Figura 3.5: Moldeado de muestras



Fuente: Elaboración propia

Una vez colocada la muestra en la caja de corte, es necesario dejar la muestra saturando durante 24 horas con una carga definida.

Figura 3.6: Verificación del equipo de corte directo.



Fuente: Elaboración propia

En cuanto consolide la muestra se prepara para el ensayo de corte.

No olvidar escurrir el agua para iniciar el ensayo, un aspecto clave es ajustar los extensómetros a cero para empezar a medir la deformación durante el ensayo de corte directo.

Figura 3.7: Muestra después del ensayo



Fuente: Elaboración propia

Finalmente se retira la muestra de la caja de corte con sumo cuidado en un plato para posteriormente determinar pesos y llevar al horno para determinar el contenido de humedad de la muestra durante el ensayo.

Figura 3.8: Lecturación del ensayo de corte directo

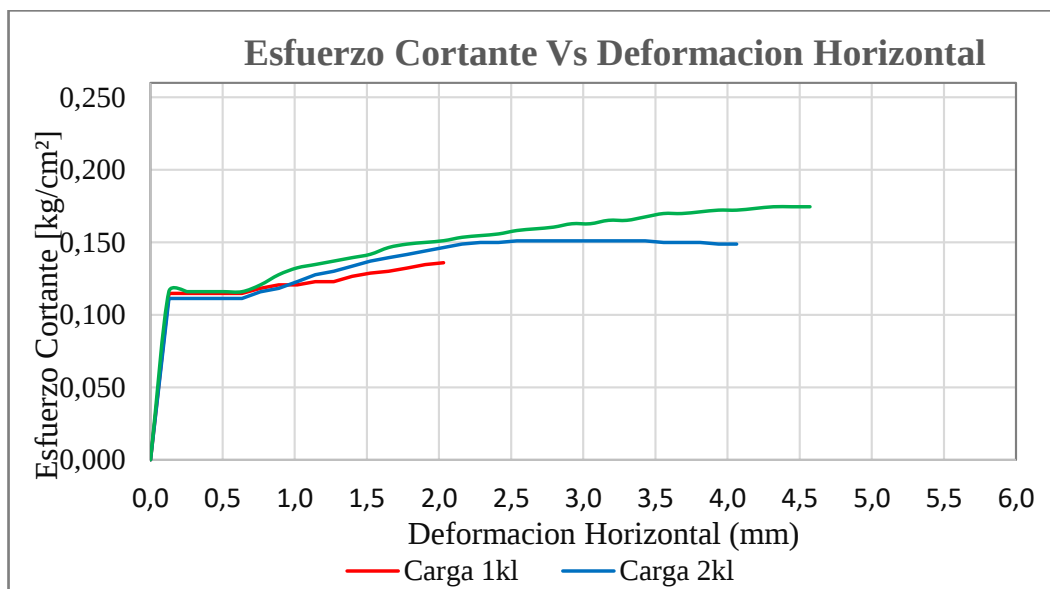
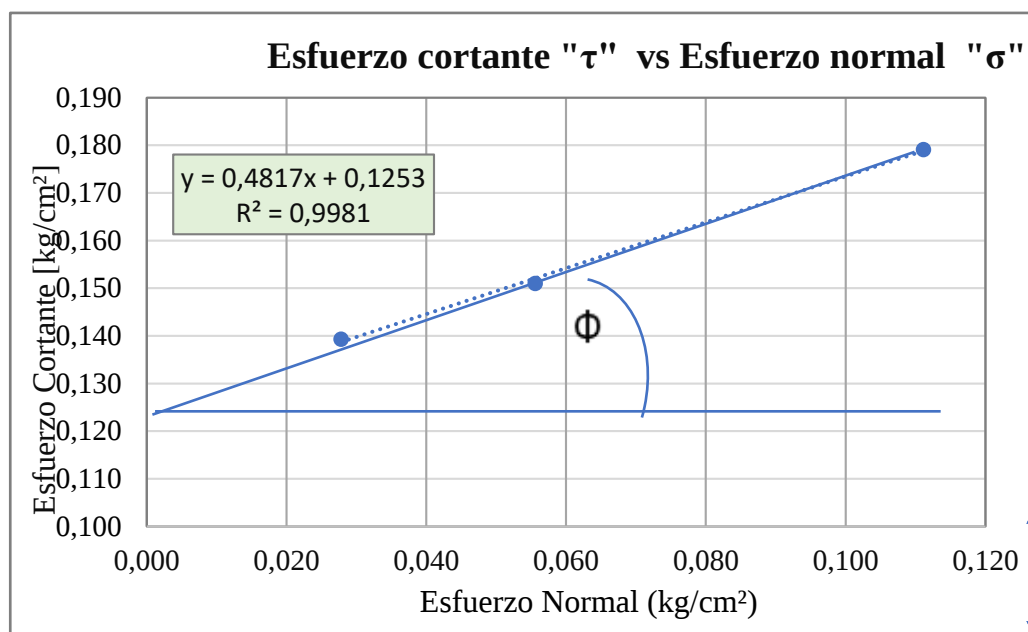


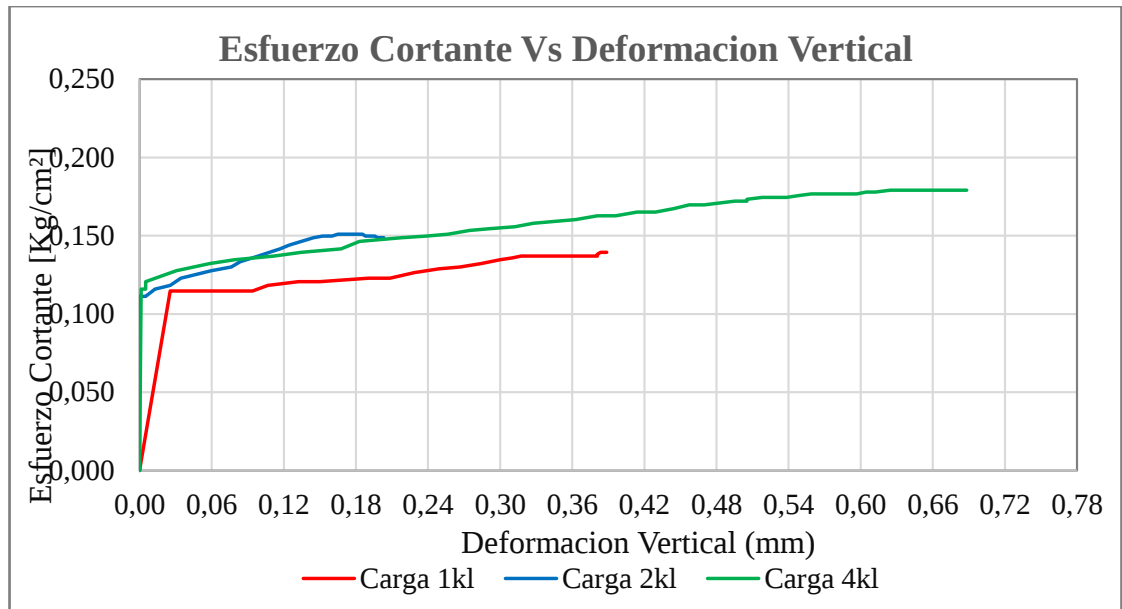
Fuente: Elaboración propia

Muestra 1: Suelo Natural

	DESCRIPCIÓN MUESTRA											Ext. Vertical ["] =		0,0001		
	LADO PROBETA			[cm] = 6		ANILLO DE PRUEBA			Nº = 1			Ext. Horizontal ["]=		0,001		
	ÁREA PROBETA			[cm ²] = 36,00		FAC. DE CALIBR.			= -			Condición de ensayo		CD		
	ALTURA PROBETA			[cm] = 2,5								Tipo de suelo		CL		
	CARGA APLICADA			[kg] = -		(1,00),(2,00),(4,00)			Kg							
Lectura Horizontal	Lectutra Ext. Vertical			Lectura de anillo de carga			Deformación Horizontal [mm]	Deformacion Vertical [mm]			Fuerza cortante [Kg]			Esfuerzo cortante [Kg/cm²]		
	1,00	2,00	4,00	1,00	2,00	4,00		1,00	2,00	4,00	1,00	2,00	4,00	1,00	2,00	4,00
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,0000	0,0000	0,0000
5	10,00	0,00	0,50	0,35	0,20	0,40	0,127	0,025	0,000	0,001	4,130	4,004	4,172	0,1147	0,1112	0,1159
10	16,00	0,00	1,00	0,35	0,20	0,40	0,254	0,041	0,000	0,003	4,130	4,004	4,172	0,1147	0,1112	0,1159
15	32,00	0,00	1,00	0,35	0,20	0,40	0,381	0,081	0,000	0,003	4,130	4,004	4,172	0,1147	0,1112	0,1159
20	35,00	0,00	2,00	0,35	0,20	0,40	0,508	0,089	0,000	0,005	4,130	4,004	4,172	0,1147	0,1112	0,1159
25	37,00	2,00	2,00	0,35	0,20	0,40	0,635	0,094	0,005	0,005	4,130	4,004	4,172	0,1147	0,1112	0,1159
30	42,00	5,00	2,00	0,50	0,40	0,60	0,762	0,107	0,013	0,005	4,257	4,172	4,341	0,1182	0,1159	0,1206
35	52,00	10,00	12,00	0,60	0,50	0,90	0,889	0,132	0,025	0,030	4,341	4,257	4,594	0,1206	0,1182	0,1276
40	59,00	13,50	23,00	0,60	0,70	1,10	1,016	0,150	0,034	0,058	4,341	4,425	4,763	0,1206	0,1229	0,1323
45	75,00	23,50	31,00	0,70	0,90	1,20	1,143	0,191	0,060	0,079	4,425	4,594	4,847	0,1229	0,1276	0,1346
50	82,00	30,00	44,00	0,70	1,00	1,30	1,270	0,208	0,076	0,112	4,425	4,678	4,931	0,1229	0,1300	0,1370
55	90,00	33,00	53,00	0,85	1,15	1,40	1,397	0,229	0,084	0,135	4,552	4,805	5,015	0,1264	0,1335	0,1393
60	98,00	38,80	66,00	0,95	1,30	1,50	1,524	0,249	0,099	0,168	4,636	4,931	5,100	0,1288	0,1370	0,1417
65	105,00	42,50	72,00	1,00	1,40	1,70	1,651	0,267	0,108	0,183	4,678	5,015	5,268	0,1300	0,1393	0,1463
70	112,00	46,00	86,00	1,10	1,50	1,80	1,778	0,284	0,117	0,218	4,763	5,100	5,353	0,1323	0,1417	0,1487
75	118,00	49,00	94,00	1,20	1,60	1,85	1,905	0,300	0,124	0,239	4,847	5,184	5,395	0,1346	0,1440	0,1499
80	122,00	53,00	101,00	1,25	1,70	1,90	2,032	0,310	0,135	0,257	4,889	5,268	5,437	0,1358	0,1463	0,1510
85	125,00	57,00	108,00	1,30	1,80	2,00	2,159	0,318	0,145	0,274	4,931	5,353	5,521	0,1370	0,1487	0,1534
90	150,00	60,00	115,00	1,30	1,85	2,05	2,286	0,381	0,152	0,292	4,931	5,395	5,563	0,1370	0,1499	0,1545
95	150,00	63,00	123,00	1,35	1,85	2,10	2,413	0,381	0,160	0,312	4,973	5,395	5,606	0,1381	0,1499	0,1557
100	151,00	65,00	129,00	1,40	1,90	2,20	2,540	0,384	0,165	0,328	5,015	5,437	5,690	0,1393	0,1510	0,1581

105	153,00	66,00	136,00	1,40	1,90	2,25	2,667	0,389	0,168	0,345	5,015	5,437	5,732	0,1393	0,1510	0,1592
110	155,00	67,00	143,00	1,40	1,90	2,30	2,794	0,394	0,170	0,363	5,015	5,437	5,774		0,1510	0,1604
115	157,00	68,50	150,00	1,40	1,90	2,40	2,921	0,399	0,174	0,381	5,015	5,437	5,858		0,1510	0,1627
120	158,00	68,50	156,00	1,40	1,90	2,40	3,048	0,401	0,174	0,396	5,015	5,437	5,858		0,1510	0,1627
125	158,00	70,00	163,00	1,40	1,90	2,50	3,175	0,401	0,178	0,414	5,015	5,437	5,943		0,1510	0,1651
130	158,00	71,50	169,00	1,40	1,90	2,50	3,302	0,401	0,182	0,429	5,015	5,437	5,943		0,1510	0,1651
135	158,50	73,00	175,00	1,40	1,90	2,60	3,429	0,403	0,185	0,445	5,015	5,437	6,027		0,1510	0,1674
140	158,50	74,00	180,00	1,40	1,85	2,70	3,556	0,403	0,188	0,457	5,015	5,395	6,111		0,1499	0,1698
145	159,00	75,00	185,00	1,40	1,85	2,70	3,683	0,404	0,191	0,470	5,015	5,395	6,111		0,1499	0,1698
150	160,00	77,00	190,00	1,40	1,85	2,75	3,810	0,406	0,196	0,483	5,015	5,395	6,154		0,1499	0,1709
155	160,00	78,00	195,00	1,40	1,80	2,80	3,937	0,406	0,198	0,495	5,015	5,353	6,196		0,1487	0,1721
160	160,50	80,00	199,00	1,35	1,80	2,80	4,064	0,408	0,203	0,505	4,973	5,353	6,196		0,1487	0,1721
165	161,00		199,00	1,35		2,85	4,191	0,409		0,505	4,973		6,238			0,1733
170	162,00		204,00	1,30		2,90	4,318	0,411		0,518	4,931		6,280			0,1744
175			208,00			2,90	4,445			0,528			6,280			0,1744
180			212,00			2,90	4,572			0,538			6,280			0,1744
185			216,00			2,95				0,549			6,322			0,1756
190			220,00			3,00				0,559			6,364			0,1768
195			223,00			3,00				0,566			6,364			0,1768
200			226,00			3,00				0,574			6,364			0,1768
205			230,00			3,00				0,584			6,364			0,1768
210			235,00			3,00				0,597			6,364			0,1768
215			238,00			3,05				0,605			6,406			0,1780
220			241,00			3,05				0,612			6,406			0,1780
225			246,00			3,10				0,625			6,449			0,1791
230			248,00			3,10				0,630			6,449			0,1791
235			251,00			3,10				0,638			6,449			0,1791
240			256,00			3,10				0,650			6,449			0,1791
245			260,00			3,10				0,660			6,449			0,1791
250			263,00			3,10				0,668			6,449			0,1791
255			266,00			3,10				0,676			6,449			0,1791
260			269,00			3,10				0,683			6,449			0,1791
265			271,00			3,10				0,688			6,449			0,1791





Esfuerzo Normal Kg/cm ²	Esfuerzo de Corte Kg/cm ²
0,028	0,13932
0,056	0,15103
0,111	0,17913

COHESIÓN	Φ
0,125	25,72

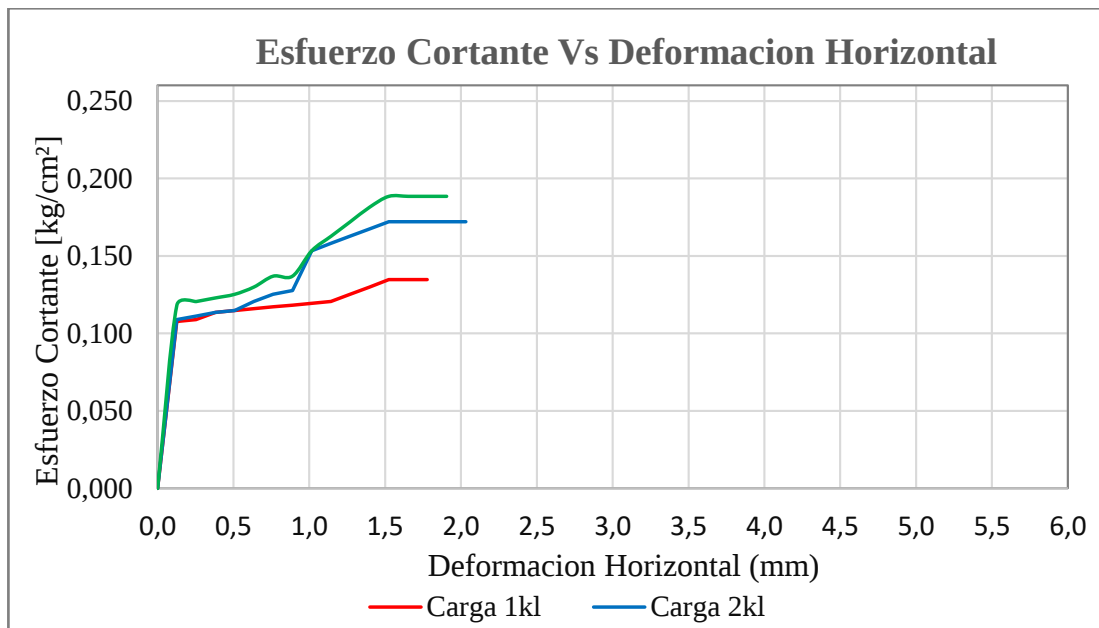
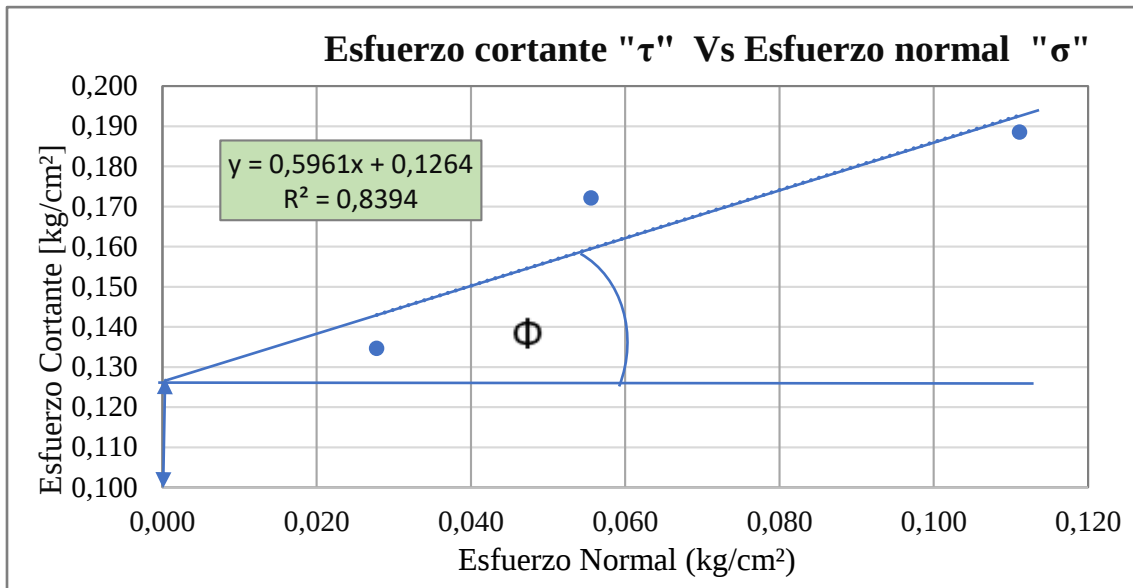
σ_n	τ_f
Kg/cm ²	Kg/cm ²
0,2778	0,1393
0,5556	0,1510
1,1111	0,1791

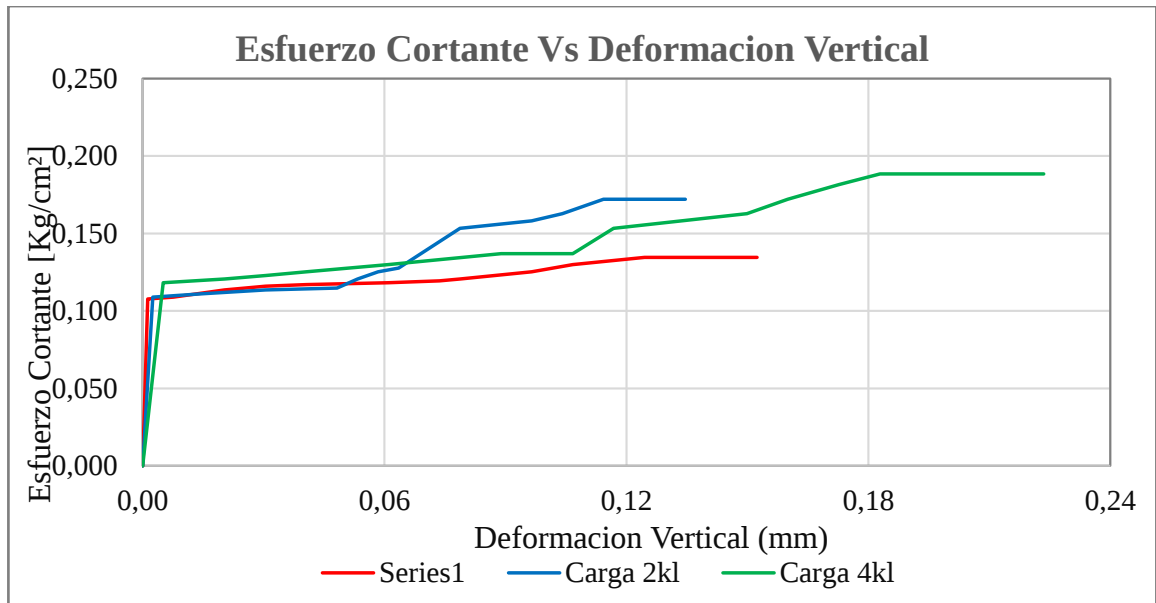
τ_{max}
= 0,1791 Kg/cm ²
FS = 1,5
τ_{ult} = 0,1194 Kg/cm ²

Ensayo de corte directo

Muestra 2: Adición del 16 % de ladrillo molido

	Descripción de la muestra											Ext. Vertical ["] =			0,0001			
	Lado probeta			[cm] =	6		Anillo prueba			Nº =	1			Ext. Horizontal ["]=			0,001	
	Área probeta			[cm ²] =	36,00		Fac. de calibración			=	-			Condicion de ensayo			CD	
	Altura probeta			[cm] =	2,5		Peso específico			18,5	[KN/cm³]		Tipo de suelo			CL		
	Carga aplicada			[kg] =	-		(1,00),(2,00),(4,00)				Kg							
Lectura Horizontal	Lectutra Ext. Vertical			Lectura de anillo de carga			Deformación Horizontal [mm]	Deformacion Vertical [mm]			Fuerza cortante [Kg]			Esfuerzo cortante [Kg/cm²]				
	1,00	2,00	4,00	1,00	2,00	4,00		1,00	2,00	4,00	1,00	2,00	4,00	1,00	2,00	4,00		
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,0000	0,0000	0,0000		
5	0,50	1,00	2,00	0,05	0,10	0,50	0,127	0,001	0,003	0,005	3,877	3,920	4,257	0,1077	0,1089	0,1182		
10	3,00	6,00	8,00	0,10	0,20	0,60	0,254	0,008	0,015	0,020	3,920	4,004	4,341	0,1089	0,1112	0,1206		
15	8,00	12,00	12,00	0,30	0,30	0,70	0,381	0,020	0,030	0,030	4,088	4,088	4,425	0,1136	0,1136	0,1229		
20	10,00	19,00	16,00	0,35	0,35	0,80	0,508	0,025	0,048	0,041	4,130	4,130	4,510	0,1147	0,1147	0,1253		
25	12,00	21,00	24,00	0,40	0,60	1,00	0,635	0,030	0,053	0,061	4,172	4,341	4,678	0,1159	0,1206	0,1300		
30	16,00	23,00	35,00	0,45	0,80	1,30	0,762	0,041	0,058	0,089	4,215	4,510	4,931	0,1171	0,1253	0,1370		
35	24,00	25,00	42,00	0,50	0,90	1,30	0,889	0,061	0,064	0,107	4,257	4,594	4,931	0,1182	0,1276	0,1370		
40	29,00	31,00	46,00	0,55	2,00	2,00	1,016	0,074	0,079	0,117	4,299	5,521	5,521	0,1194	0,1534	0,1534		
45	31,00	38,00	59,00	0,60	2,20	2,40	1,143	0,079	0,097	0,150	4,341	5,690	5,858	0,1206	0,1581	0,1627		
50	38,00	41,00	63,00	0,80	2,40	2,80	1,270	0,097	0,104	0,160	4,510	5,858	6,196	0,1253	0,1627	0,1721		
55	42,00	43,00	68,00	1,00	2,60	3,20	1,397	0,107	0,109	0,173	4,678	6,027	6,533	0,1300	0,1674	0,1815		
60	49,00	45,00	72,00	1,20	2,80	3,50	1,524	0,124	0,114	0,183	4,847	6,196	6,786	0,1346	0,1721	0,1885		
65	54,00	47,00	78,00	1,20	2,80	3,50	1,651	0,137	0,119	0,198	4,847	6,196	6,786	0,1346	0,1721	0,1885		
70	60,00	49,00	82,00	1,20	2,80	3,50	1,778	0,152	0,124	0,208	4,847	6,196	6,786	0,1346	0,1721	0,1885		
75		51,00	88,00		2,80	3,50	1,905		0,130	0,224		6,196	6,786		0,1721	0,1885		
80		53,00			2,80		2,032		0,135			6,196			0,1721			





Esfuerzo Normal Kg/cm ²	Esfuerzo de Corte Kg/cm ²
0,028	0,13464
0,056	0,17210
0,111	0,18849

COHESIÓN	Φ
0,126	30,80

σ_n	τ_f
Kg/cm ²	Kg/cm ²
0,2778	0,1346
0,5556	0,1721
1,1111	0,1885

$\tau_{max} =$	0,1885	Kg/cm ²
FS =	1,5	
$\tau_{ult} =$	0,1257	Kg/cm ²

A continuación, se presenta tabla resumen de los valores de corte directo de las diferentes muestras ensayadas.

Tabla con valores de acuerdo a la adición de ladrillo molido

Tabla 3.17: Resultados de ensayos de corte directo con diferentes porcentajes de adición de ladrillo molido.

% Ladrillo molido	Cohesión	Ángulo de fricción	τ_{max}	τ_{ult}
0%	0,125	25,72	0,1791	0,119
4%	0,108	23,58	0,1569	0,105
8%	0,105	22,86	0,1522	0,101
12%	0,112	24,02	0,1627	0,108
16%	0,118	36,41	0,1967	0,1311
20%	0,101	28,72	0,1627	0,108

Fuente: Elaboración propia

Tabla de resultados con 16% de adición de ladrillo molido

Tabla 3.18: Resultados de corte directo con adición del 16% de ladrillo molido

16% Ladrillo molido	Ensayo N°	Cohesión	Ángulo de fricción	τ_{max}	τ_{ult}
	1	0,111	22,71	0,1569	0,105
	2	0,119	27,65	0,1768	0,1179
	3	0,118	36,41	0,1967	0,1311
	4	0,136	37,41	0,2236	0,1491
	5	0,117	29,25	0,1791	0,1194
	6	0,124	26,97	0,1815	0,121
	7	0,13	27,92	0,1908	0,127
	8	0,118	27,51	0,1768	0,118
	9	0,126	30,8	0,1885	0,126
	10	0,124	30,54	0,1885	0,126
	11	0,123	32,55	0,1955	0,13
	12	0,119	31,93	0,1885	0,126
	13	0,119	35,62	0,2002	0,133
	14	0,129	33,04	0,2002	0,133
	15	0,125	30,03	0,1862	0,124

Fuente: Elaboración propia

CAPÍTULO IV

ANÁLISIS DE

RESULTADOS

CAPÍTULO IV

ANÁLISIS DE RESULTADOS

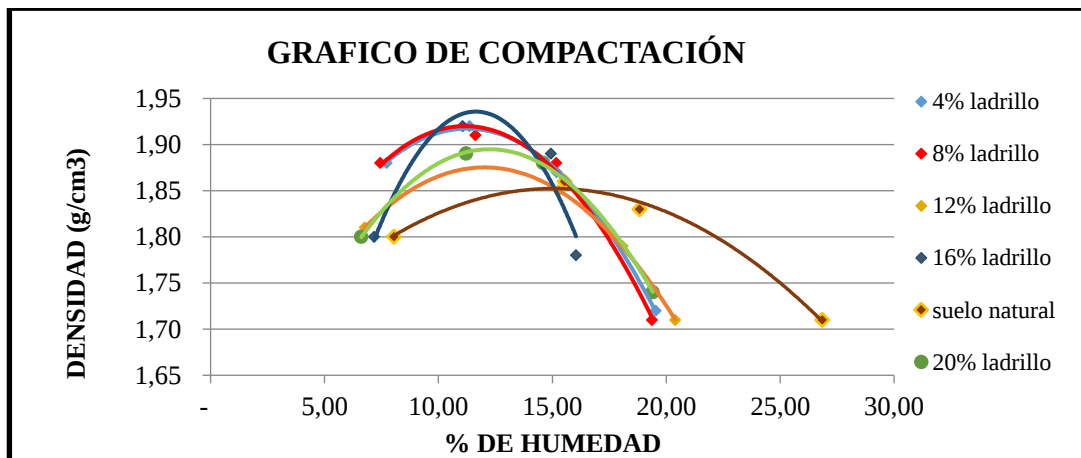
4.1 Análisis cualitativo

En este capítulo se presentan y analizan los resultados obtenidos a partir del desarrollo experimental y/o la aplicación de los métodos descritos en la metodología. El propósito principal es interpretar los datos recolectados, compararlos con los objetivos planteados y determinar si las hipótesis formuladas al inicio de la investigación se cumplen. A través del análisis de los resultados, se busca comprender el comportamiento de las variables estudiadas, identificar tendencias, relaciones y posibles desviaciones, así como discutir los factores que pudieron influir en los resultados obtenidos. De esta manera, se establece una base sólida para las conclusiones y recomendaciones que se expondrán en los capítulos posteriores.

4.2 Resultados del ensayo de compactación

Mediante los ensayos realizados con diferentes porcentajes de adición de ladrillo molido, se verificó el mejor aprovechamiento es con el 16%.

Figura 4.1: Gráficos de compactación



Fuente: Elaboración propia.

4.3 Presentación de resultados a analizar

En primera instancia, se presentan los resultados obtenidos a partir del análisis de la arcilla natural, así como de las mezclas elaboradas con diferentes porcentajes de ladrillo molido adicionado. Este apartado tiene como objetivo comparar el comportamiento de la arcilla pura frente a las muestras modificadas, con el fin de evaluar cómo la incorporación del material cerámico influye en las propiedades físicas y mecánicas del suelo. De esta manera, se busca identificar las variaciones más significativas en los parámetros estudiados, tales como la cohesión y ángulo de fricción, permitiendo establecer tendencias y determinar el efecto del ladrillo molido en la mejora o modificación de las características de la arcilla natural.

Tabla 4.1: Resumen de resultados de arcilla

% Ladrillo molido	Cohesión	Ángulo de fricción	τ_{max}	τ_{ult}
0%	0,125	25,72	0,1791	0,119
4%	0,108	23,58	0,1569	0,105
8%	0,105	22,86	0,1522	0,101
12%	0,112	24,02	0,1627	0,108
16%	0,118	36,41	0,1967	0,1311
20%	0,101	28,72	0,1627	0,108

Fuente: Elaboración propia

Seguidamente, se llevará a cabo un análisis detallado de las muestras que contienen una adición del 16 % de ladrillo molido al suelo natural, con el propósito de evaluar su comportamiento frente a las propiedades del material sin aditivo. Este estudio permitirá determinar si dicho porcentaje representa el contenido óptimo de ladrillo molido que mejora las condiciones del suelo en términos de estabilidad, resistencia y plasticidad. Además, se realizará una comparación de los resultados obtenidos con los valores de las demás mezclas evaluadas, con el fin de establecer si el 16 % proporciona un equilibrio adecuado entre desempeño técnico y viabilidad práctica. Finalmente, se elaborará una conclusión que justifique, con base en los resultados experimentales y el análisis económico, si la incorporación de este porcentaje de ladrillo molido resulta no solo técnicamente efectiva, sino también económicamente conveniente para su posible

aplicación en obras de ingeniería civil.

Tabla 4.2: Resultados con la adición del 16 % de ladrillo molido

16% Ladrillo molido	Ensayo N°	Cohesión	Ángulo de fricción	τ_{max}	τ_{ult}
	1	0,111	22,71	0,1569	0,105
	2	0,119	27,65	0,1768	0,1179
	3	0,118	36,41	0,1967	0,1311
	4	0,136	37,41	0,2236	0,1491
	5	0,117	29,25	0,1791	0,1194
	6	0,124	26,97	0,1815	0,121
	7	0,13	27,92	0,1908	0,127
	8	0,118	27,51	0,1768	0,118
	9	0,126	30,8	0,1885	0,126
	10	0,124	30,54	0,1885	0,126
	11	0,123	32,55	0,1955	0,13
	12	0,119	31,93	0,1885	0,126
	13	0,119	35,62	0,2002	0,133
	14	0,129	33,04	0,2002	0,133
	15	0,125	30,03	0,1862	0,124

Fuente: Elaboración propia

4.4 **Análisis preliminar**

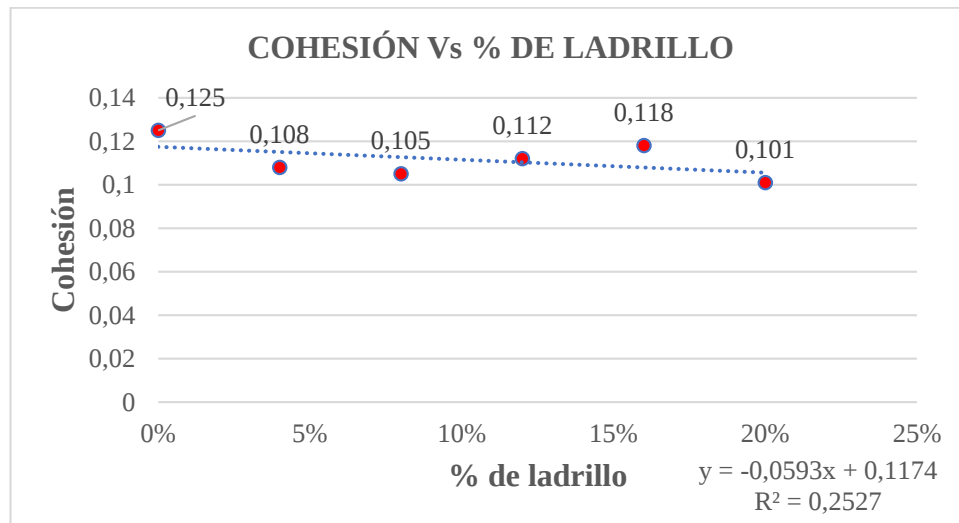
Se observan los valores obtenidos de cohesión, ángulo de fricción interna y esfuerzos cortantes máximos y últimos (τ_{max} y τ_{ult}) para diferentes porcentajes de adición de ladrillo molido al suelo natural. Los resultados permiten identificar la influencia del material adicionado sobre el comportamiento resistente del suelo.

4.4.1 **Análisis según los diferentes porcentajes de ladrillo molido adicionado a muestra de arcilla**

Inicialmente, la muestra de suelo natural (0 % de ladrillo molido) presenta una cohesión de 0,125 kg/cm² y un ángulo de fricción de 25,72°, con valores de esfuerzo cortante máximo y último de 0,1791 y 0,119 kg/cm², respectivamente. Al incorporar pequeñas proporciones de ladrillo molido (4 % y 8 %), se observa una disminución progresiva tanto

en la cohesión como en el ángulo de fricción, lo que indica una ligera pérdida de la resistencia al corte del suelo, posiblemente debido a una alteración en la estructura original y a la falta de una adecuada interacción entre las partículas de arcilla y los fragmentos finos del ladrillo molido

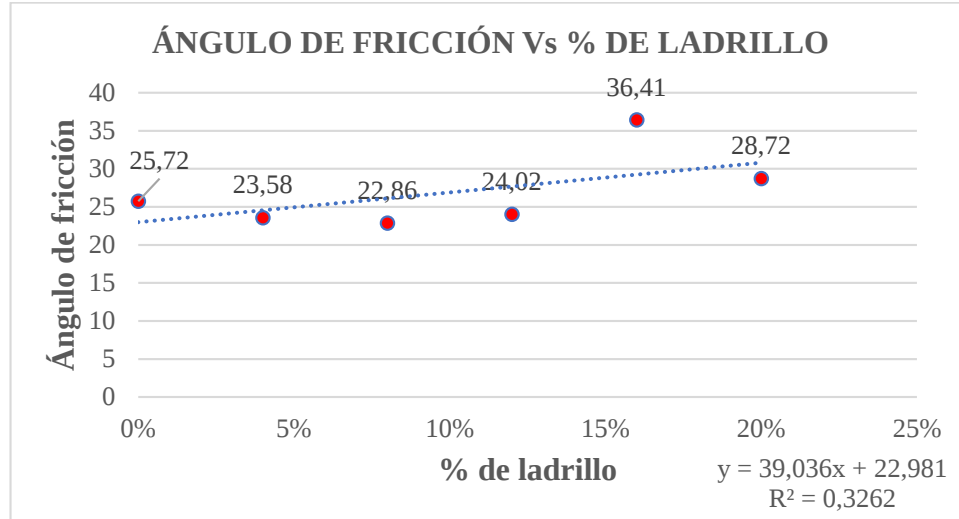
Figura 4.1: Valores de cohesión con % de ladrillo



Fuente: Elaboración propia

Sin embargo, al incrementar la adición al 12 %, se evidencia una recuperación parcial de la resistencia, aumentando la cohesión a 0,112 kg/cm² y el ángulo de fricción a 24,02°. Este comportamiento sugiere que a dicho porcentaje comienza a generarse una mejor distribución de partículas y un efecto de relleno más favorable dentro de la matriz del suelo.

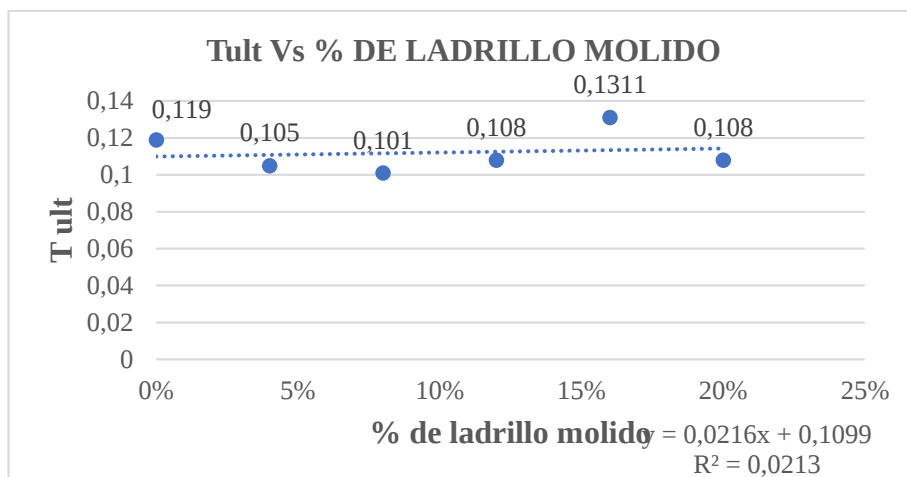
Figura 4.2: Ángulos de fricción con % de ladrillo



Fuente: Elaboración propia

El cambio más notable se presenta con el 16 % de adición, donde la cohesión alcanza 0,118 kg/cm² y el ángulo de fricción se eleva considerablemente hasta 36,41°, reflejando una mejora significativa en la capacidad de resistencia al corte ($\tau_{\max}=0,1967$ kg/cm² y $\tau_{\text{ult}}=0,1311$ kg/cm²). Este incremento sugiere una óptima interacción entre el suelo y las partículas cerámicas, que contribuyen al aumento de la fricción interna y al refuerzo de la estructura del material.

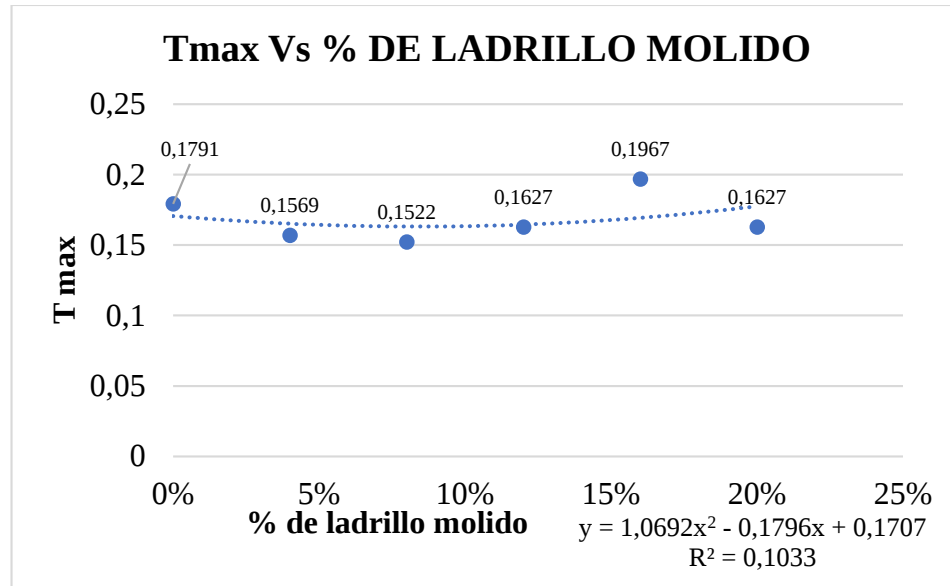
Figura 4.3: τ_{ult} en función a % de ladrillo molido



Fuente: Elaboración propia

Por otro lado, cuando el contenido de ladrillo molido se incrementa hasta un 20 %, se observa nuevamente una reducción en la cohesión (0,101 kg/cm²) y en los valores de esfuerzo cortante, mientras que el ángulo de fricción disminuye a 28,72°. Este comportamiento indica que un exceso de ladrillo molido puede generar discontinuidades en la masa del suelo, afectando negativamente su comportamiento mecánico.

Figura 4.4: $\tau_{\max}$ en función a % de ladrillo



Fuente: Elaboración propia.

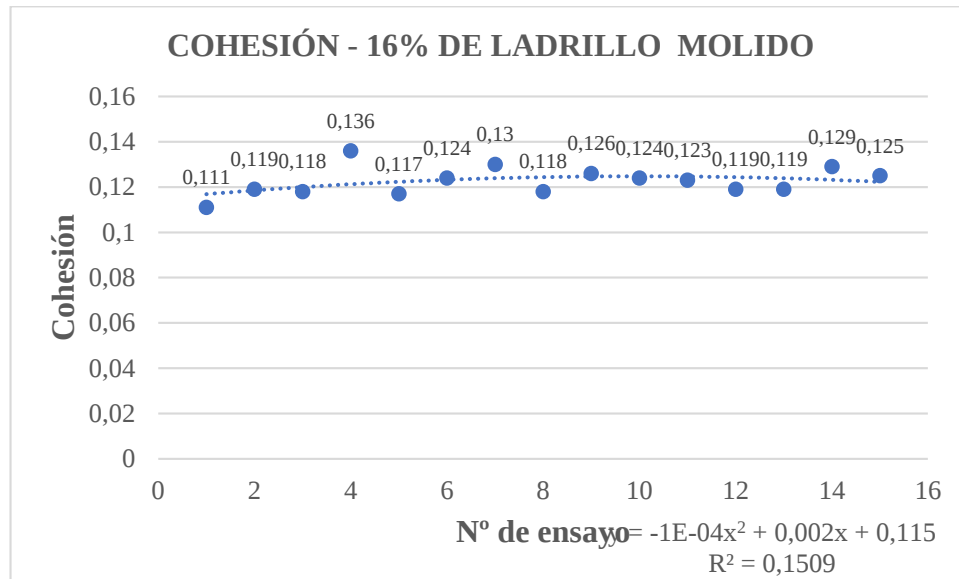
En conclusión, los resultados muestran que la adición del 16 % de ladrillo molido representa el porcentaje óptimo, ya que proporciona los valores más altos de resistencia al corte y mejora sustancialmente las propiedades de fricción y cohesión del suelo. Además, este porcentaje podría considerarse económicamente viable, dado que logra un refuerzo efectivo sin requerir una cantidad excesiva de material adicionado.

4.4.2 Análisis de resultados – Suelo con 16 % de ladrillo molido

En la tabla se muestran los resultados obtenidos para las quince muestras de suelo natural con una adición del 16 % de ladrillo molido, donde se registraron los valores de cohesión, ángulo de fricción interna y esfuerzos cortantes máximos ($\tau_{\max}$) y últimos (τ_{ult}). Estos

parámetros permiten evaluar la consistencia de los resultados y determinar la variabilidad del comportamiento mecánico del suelo modificado.

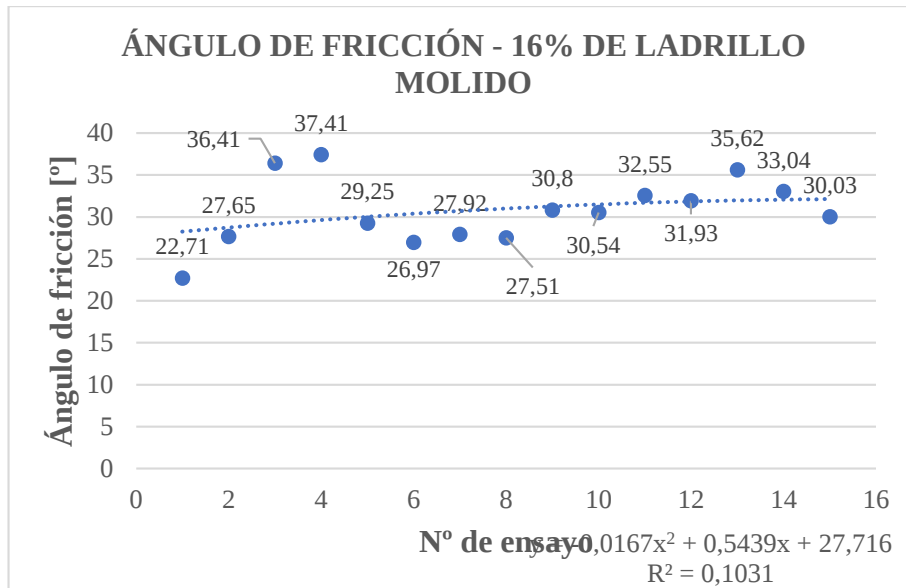
Figura 4.5: Valores de cohesión con adición del 16% de ladrillo molido



Fuente: Elaboración propia.

Los valores de cohesión oscilan entre 0,111 y 0,136 kg/cm², con un promedio de **0,122** kg/cm², lo que refleja una buena uniformidad en las condiciones del material. La ligera variación observada se asocia a diferencias naturales en la compactación de las muestras o a la distribución no completamente homogénea del ladrillo molido dentro de la mezcla. En general, estos valores indican que el suelo tratado mantiene una cohesión adecuada, reforzada parcialmente por la presencia del material cerámico finamente triturado, que actúa como agente estabilizador.

Figura 4.6: Valores de ángulo de fricción con 16% de ladrillo molido



Fuente: Elaboración propia.

Respecto al ángulo de fricción interna, los resultados muestran un rango entre 22,71° y 37,41°, con un promedio aproximado de 30,5°. Se aprecia un incremento significativo respecto al suelo natural, evidenciando que la incorporación del ladrillo molido mejora la fricción entre partículas, especialmente en los ensayos donde se alcanzan valores superiores a 35°. Este aumento se debe a la textura rugosa y angular del material cerámico, que contribuye a un mejor entrelazamiento y resistencia al deslizamiento entre las partículas del suelo.

En cuanto a los esfuerzos cortantes, los valores de $\tau_{\max}$ varían entre 0,1569 y 0,2236 kg/cm², mientras que τ_{ult} oscila entre 0,105 y 0,1491 kg/cm². Ambos parámetros muestran una tendencia ascendente coherente con el incremento del ángulo de fricción y la cohesión, alcanzando sus máximos valores en los ensayos 4 y 13, donde se obtiene la mejor combinación de resistencia al corte. Esto confirma que, bajo las condiciones de compactación y contenido de agua controladas, la adición del 16 % de ladrillo molido genera una mejora sustancial en la capacidad de soporte del suelo.

En términos generales, los resultados demuestran que el 16 % de ladrillo molido representa un porcentaje adecuado para optimizar las propiedades mecánicas del suelo, logrando una mejora notable en los parámetros de resistencia al corte. Además, la dispersión limitada de los datos indica una buena reproducibilidad de los ensayos, lo que refuerza la confiabilidad de los resultados obtenidos. Desde un punto de vista técnico y económico, este porcentaje resulta favorable, ya que proporciona un aumento significativo en la resistencia sin requerir una proporción excesiva de material estabilizante, lo que lo convierte en una alternativa viable para la estabilización de suelos en aplicaciones geotécnicas y de ingeniería civil.

4.5 Análisis cuantitativo

El análisis cuantitativo es un enfoque de investigación que utiliza datos numéricos y métodos estadísticos para medir, explicar y generalizar fenómenos.

Los resultados obtenidos nos permitirán interpretar el fenómeno estudiado de manera objetiva, identificar patrones y generalizar conclusiones a las muestras en estudio.

4.5.1 Estadística descriptiva

El análisis estadístico realizado permite identificar las principales características y variaciones de los datos relacionados con valores de cohesión y ángulos de fricción, aportando información clave para la toma de decisiones y la formulación de conclusiones precisas.

Tabla 4.3: Valores de cohesión y ángulos de fricción para análisis estadístico

Arcilla con adición del 16% de ladrillo molido				
Muestra	ϕ [°]	c [kg/cm²]	$\tau_{\max}$	τ_{ult}
1	22,71	0,111	0,157	0,105
2	27,65	0,119	0,177	0,118
3	36,41	0,118	0,197	0,131
4	37,41	0,136	0,224	0,149
5	29,25	0,117	0,179	0,119
6	26,97	0,124	0,182	0,121
7	27,92	0,130	0,191	0,127
8	27,51	0,118	0,177	0,118
9	30,80	0,126	0,189	0,126
10	30,54	0,124	0,189	0,126
11	32,55	0,123	0,196	0,130
12	31,93	0,119	0,189	0,126
13	35,62	0,119	0,200	0,133
14	33,04	0,129	0,200	0,133
15	30,03	0,125	0,186	0,124

Fuente: Elaboración propia

4.5.2 Análisis estadístico valores de cohesión

En este apartado se presenta el análisis estadístico de los valores de cohesión obtenidos a partir de los ensayos realizados. El objetivo es evaluar la variabilidad de los datos y determinar su comportamiento representativo dentro del conjunto de muestras analizadas. Mediante el uso de herramientas estadísticas descriptivas, se identifican medidas de tendencia central y dispersión que permiten interpretar de manera cuantitativa las propiedades de cohesión del material. Este análisis proporciona una base sólida para la comparación entre resultados y para la validación de los parámetros geotécnicos empleados en el diseño y la evaluación del terreno.

Variable Cohesión

Distribución de frecuencias

Cohesión máxima= 0,136

Cohesión mínima= 0,111

Rango= $c_{\max} - c_{\min}$

Rango = 0,025

Número de clases = $NC = 1 + 3,322 \log(n)$

n= 15

$NC = 1 + 3,322 \log(15)$

$NC = 4,906975$ por lo tanto se adopta el inmediato superior

$NC = 5$ clases

Ancho de clase = Rango/NC

Ancho de clase = 0,005

Tabla 4.4: Tabla de distribución de frecuencias

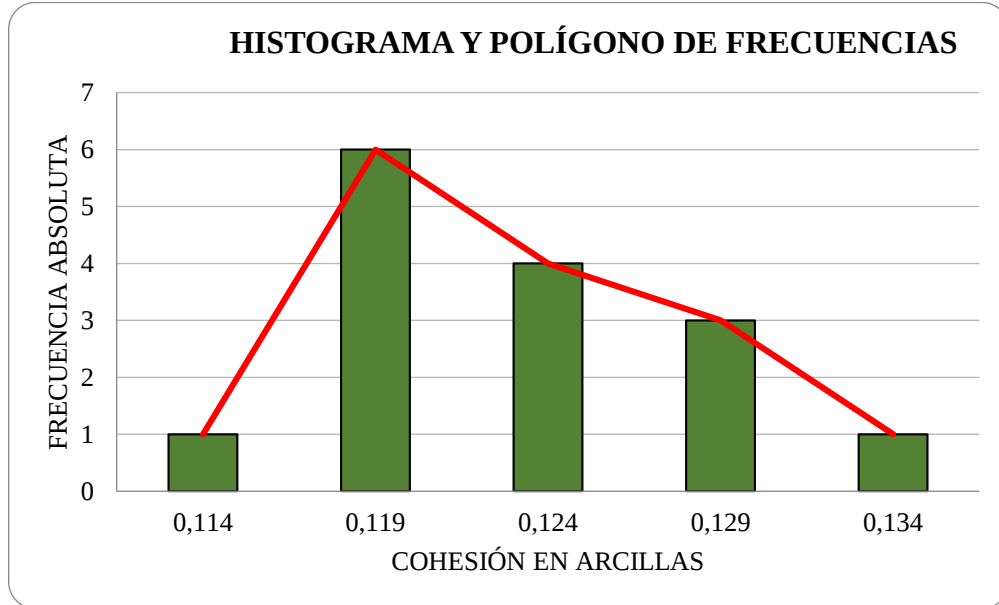
Intervalo de clase	Marca de clase	Frecuencia absoluta	Frecuencia acumulada	Frecuencia relativa [%]	Frecuencia relativa acumulada [%]
[0,111 - 0,116[	0,114	1	1	6,7	6,7
[0,116 - 0,121[	0,119	6	7	40,0	46,7
[0,121 - 0,126[	0,124	4	11	26,7	73,3
[0,126 - 0,131[	0,129	3	14	20,0	93,3
[0,131 - 0,136[	0,134	1	15	6,7	100,0
		15			

Fuente: Elaboración propia

La tabla muestra la distribución de frecuencias de un conjunto de 15 valores de cohesión, organizados en cinco intervalos de clase que van desde 0,111 hasta 0,136.

Cada intervalo tiene asociada su marca de clase, frecuencia absoluta, frecuencia acumulada, frecuencia relativa y frecuencia relativa acumulada.

Figura 4.7: Histograma y polígono de frecuencias

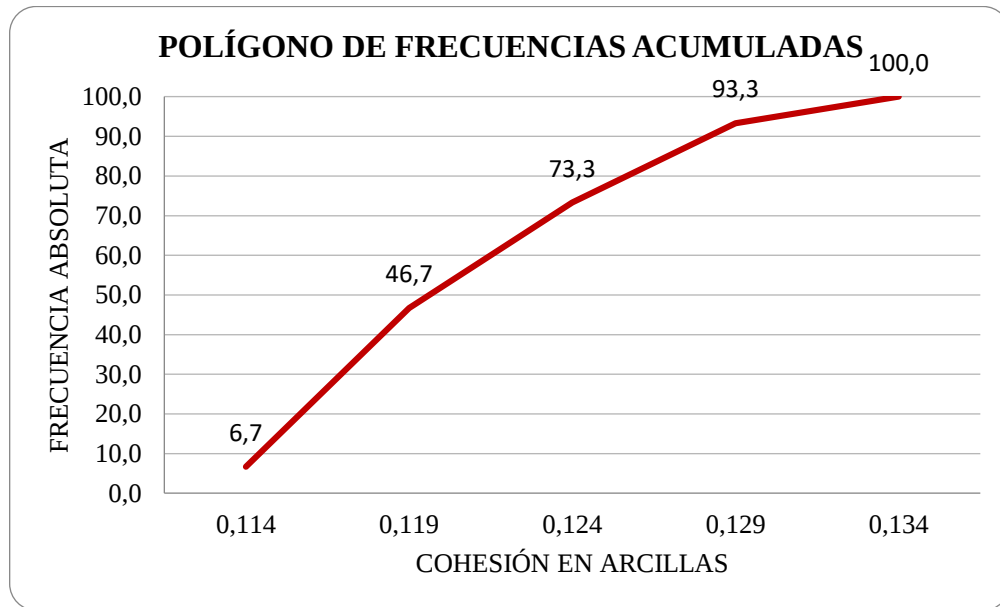


Fuente: Elaboración propia

La mayor concentración se encuentra en los intervalos centrales, mientras que los extremos presentan frecuencias bajas. Esto sugiere que la distribución tiene una forma aproximadamente simétrica, con ligera tendencia hacia valores medios.

Los valores de cohesión se distribuyen en un rango estrecho (0,111 a 0,136), lo que indica baja variabilidad en el conjunto de datos. Este comportamiento puede interpretarse como una homogeneidad del material analizado, donde las propiedades de cohesión son relativamente uniformes en las muestras evaluadas.

Figura 4.8: Polígono de frecuencias acumuladas



Fuente: Elaboración propia

La frecuencia acumulada alcanza el total de 15 muestras, confirmando que todos los datos se encuentran dentro de los intervalos definidos. A partir del tercer intervalo ([0,121 – 0,126[), ya se ha acumulado el 73,3 % de los datos, lo cual indica una concentración importante en los valores intermedios.

Los valores de cohesión se encuentran concentrados principalmente entre 0,116 y 0,126, donde se ubican las mayores frecuencias. El intervalo [0,116 – 0,121[presenta la frecuencia más alta, con 6 observaciones (40% del total), lo que sugiere que este rango representa el valor más común o modal de la muestra.

Variable Ángulo de fricción

Distribución de frecuencias

Ángulo máximo= 31,05

Ángulo mínimo= 18,32

Rango= $\phi \text{ max} - \phi \text{ min}$

Rango = 13

$$\text{Número de clases} = NC = 1 + 3,322 \log(n)$$

$$n = 15$$

$$NC = 1 + 3,322 \log(15)$$

$NC = 4,907$ por lo tanto se adopta el inmediato superior

$$NC = 5 \text{ clases}$$

$$\text{Ancho de clase} = \text{Rango}/NC$$

$$\text{Ancho de clase} = 2,546$$

Tabla 4.5: Tabla de distribución de frecuencias

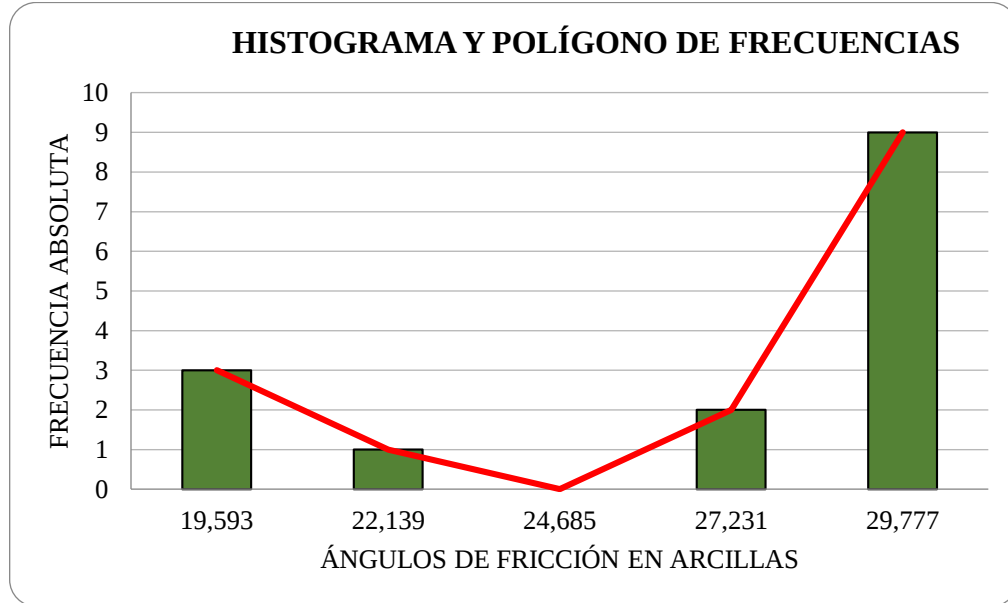
Intervalo de clase	Marca de clase	Frecuencia absoluta	Frecuencia acumulada	Frecuencia relativa [%]	Frecuencia relativa acumulada [%]
[18,32 - 20,866[	19,593	3	3	20,00	20,00
[20,866 - 23,412[	22,139	1	4	6,67	26,67
[23,412 - 25,958[	24,685	0	4	0,00	26,67
[25,958 - 28,504[	27,231	2	6	13,33	40,00
[28,504 - 30,05[	29,777	9	15	60,00	100,00
		15			

Fuente: Elaboración propia

La tabla presenta la distribución de frecuencias de 15 datos, organizados en cinco intervalos de clase que van desde 18,32 hasta 30,05.

Cada intervalo muestra su marca de clase, la frecuencia absoluta, la frecuencia acumulada, así como las frecuencias relativas (en %) y frecuencias relativas acumuladas.

Figura 4.9: Histograma y polígono de frecuencias



Fuente: Elaboración propia

Los valores se concentran principalmente en el último intervalo $[28,504 - 30,05[$, que contiene 9 observaciones, equivalente al 60 % del total. Esto indica una alta concentración de datos en los valores superiores del rango.

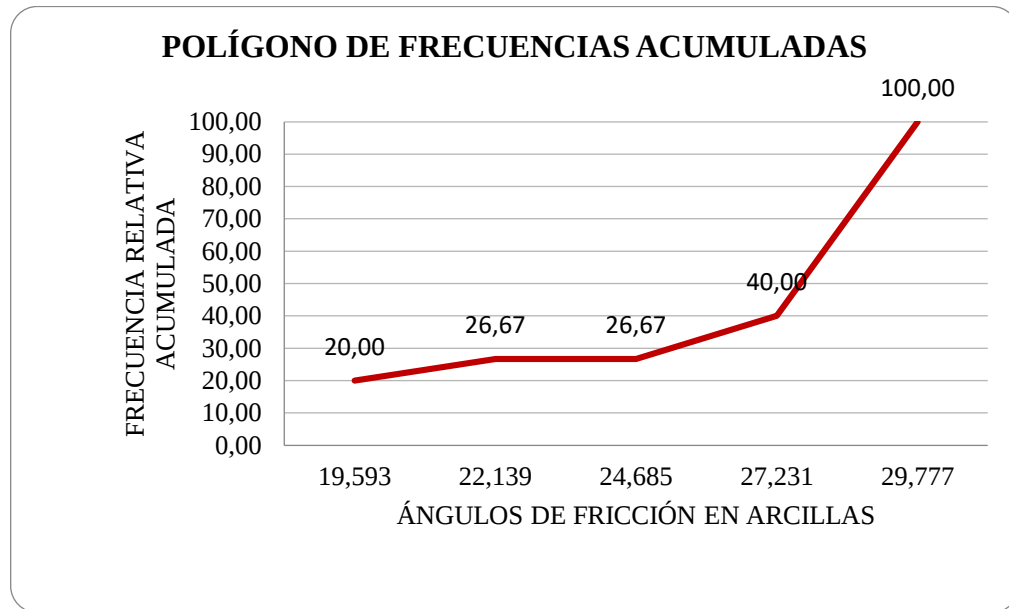
La presencia de un intervalo con frecuencia nula ($[23,412 - 25,958[$) evidencia un vacío en esa zona de los valores.

La distribución es asimétrica positiva (sesgo a la derecha), ya que la mayor parte de los datos se agrupan en los intervalos con valores más altos.

El análisis estadístico muestra una marcada tendencia ascendente en los valores, con predominio en el intervalo $[28,504 - 30,05[$.

La distribución no es uniforme, presentando una acumulación significativa en los valores superiores y una baja frecuencia en los intervalos intermedios, lo que sugiere una posible heterogeneidad del conjunto de datos o la influencia de factores que aumentan la variable medida.

Figura 4.10: Polígono de frecuencias acumuladas



Fuente: Elaboración propia

La frecuencia acumulada muestra un crecimiento progresivo hasta alcanzar las 15 observaciones totales.

Hasta el cuarto intervalo ($[25,958 - 28,504[$) solo se ha acumulado el 40 %, lo que refuerza que la mayoría de los datos se encuentran en la parte alta de la distribución.

El rango total de los valores abarca aproximadamente 11,73 unidades (de 18,32 a 30,05).

El hecho de que el 60 % de las observaciones se concentren en el último intervalo sugiere que los valores tienden a incrementarse significativamente en la muestra.

Esto podría indicar una mejora en las propiedades del material o un incremento progresivo de la variable analizada.

4.6 Análisis general

El presente estudio permitió evaluar los efectos de la adición de ladrillo molido en suelos arcillosos, enfocándose en los parámetros de resistencia cortante y características geotécnicas del material. Tras realizar ensayos con distintos porcentajes de ladrillo molido, se determinó que el 16% constituye el porcentaje óptimo para mejorar significativamente las propiedades del suelo.

La incorporación de este porcentaje mostró una reducción en la plasticidad y en el índice de grupo, lo que indica un comportamiento más estable y manejable del suelo. Además, los ensayos de compactación revelaron un aumento en la densidad máxima y una humedad óptima más favorable, reflejando una mejora en la compactabilidad y la estructura del suelo tratado.

En términos de resistencia cortante, la adición de ladrillo molido al 16% produjo incrementos notables tanto en los parámetros de cohesión y ángulo de fricción interna como en los esfuerzos cortantes, evidenciando un aumento general de la capacidad del suelo para soportar cargas y deformaciones sin fallar. Esto confirma que el ladrillo molido no solo actúa como material de relleno, sino que también contribuye a reforzar la integridad estructural del suelo arcilloso, ofreciendo una alternativa sostenible y eficaz para la estabilización de suelos en proyectos de ingeniería civil.

En conclusión, la investigación demuestra que la adición de ladrillo molido mejora de manera integral las propiedades geotécnicas de los suelos arcillosos, especialmente su resistencia al corte, consolidándose como una técnica viable y ambientalmente responsable para la optimización de suelos en infraestructura civil.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y

RECOMENDACIONES

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 CONCLUSIONES

- De acuerdo con el objetivo planteado, se analizó el comportamiento de los parámetros de resistencia cortante en un suelo arcilloso con la adición de diferentes porcentajes de ladrillo molido, con el fin de determinar su efecto en arcillas de media a baja plasticidad de la ciudad de Tarija. Los resultados obtenidos evidenciaron que la incorporación de ladrillo molido mejora significativamente los parámetros de resistencia cortante, reflejándose en una reducción de la cohesión (c) como el aumento del ángulo de fricción interna (ϕ) en comparación con el suelo natural.
- El análisis estadístico y experimental permitió identificar que el porcentaje óptimo de adición es del 16 %, ya que en este punto se alcanzaron los valores máximos de resistencia, mostrando una mejor compactación y una estructura más estable del suelo. A partir de este contenido, los valores tienden a estabilizarse o disminuir levemente, lo cual indica un límite de mejora efectiva.
- En síntesis, la adición controlada de ladrillo molido constituye una alternativa viable y sostenible para mejorar las propiedades mecánicas de suelos arcillosos de la región, contribuyendo tanto al aprovechamiento de residuos de construcción como al desarrollo de soluciones geotécnicas más resistentes y ambientalmente responsables para la ciudad de Tarija.
- Dado el buen desempeño obtenido, se recomienda considerar el uso del ladrillo molido en proyectos de mejoramiento de suelos, como plataformas, subrasantes o caminos rurales de la ciudad de Tarija, especialmente donde se requiera una solución económica y sostenible.

5.2 RECOMENDACIONES

- Se recomienda emplear un 16 % de ladrillo molido como adición óptima para mejorar los parámetros de resistencia cortante en suelos arcillosos de media a baja compresibilidad, dado que este porcentaje proporciona el mejor equilibrio entre cohesión y ángulo de fricción interna.
- Es importante tamizar y controlar el tamaño de las partículas del ladrillo molido antes de su incorporación, ya que una granulometría adecuada favorece una mejor interacción entre las partículas del suelo y el material estabilizante.
- Se recomienda realizar una mezcla uniforme del ladrillo molido con el suelo, garantizando una distribución homogénea del aditivo en toda la muestra o superficie tratada para obtener resultados consistentes en campo.
- Para futuras investigaciones, se sugiere realizar ensayos de consolidación, CBR (California Bearing Ratio) y pruebas de durabilidad, con el fin de evaluar de forma más completa el comportamiento mecánico y la resistencia a largo plazo del suelo estabilizado.

