

CAPÍTULO I

DISEÑO TEÓRICO

CAPÍTULO I

DISEÑO TEÓRICO

1.1. Introducción

La determinación de la resistencia al esfuerzo cortante de los suelos constituye uno de los puntos fundamentales de toda mecánica de suelos, para ello existen diferentes métodos de cálculo que nos permiten determinar la estabilidad de las obras civiles; entre ellos encontramos: Ensayo de corte directo, pruebas de compresión no confinada, ensayo de triaxial, entre otros. Por otra parte, la plasticidad y la resistencia cortante determinan un comportamiento mecánico de los suelos finos, que se convierte en una propiedad ingenieril de interés científico.

Se han realizados estudios de comparaciones entre ensayos de suelo a nivel internacional, como es el caso del estudio titulado “COMPARACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE RESISTENCIA AL CORTE OBTENIDOS EN LOS ENSAYOS DE CORTE DIRECTO Y TRIAXIAL DE UNA ARENA ARCILLOSA” desarrollado en Colombia en el año 2012; también se desarrolló una “COMPARACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE RESISTENCIA AL ESFUERZO CORTANTE OBTENIDOS EN LOS ENSAYOS DE CORTE DIRECTO Y COMPRESIÓN SIMPLE PARA UNA ARENA MAL GRADADA” desarrollado en Colombia en el 2012. Sin embargo, ninguno relaciona la Plasticidad con los parámetros de resistencia cortante, aunque las consecuencias siempre están reflejadas en el incremento de la presión de poro.

El presente estudio tiene como objetivo analizar, desde una perspectiva teórica y práctica, la incidencia que tiene la plasticidad en los parámetros de resistencia cortante. En efecto las variaciones de la plasticidad existente en los suelos harán sobresalir diferentes parámetros de resistencia cortante, dependiendo si se trata suelos de alta o baja plasticidad y conocer las variaciones en sus resultados.

En cuanto al estudio para determinar la resistencia al cortante de un suelo, proporciona datos y beneficios al momento de realizar diferentes tipos de edificación para así conocer su comportamiento que este tendrá. Es así que, el conocer la resistencia al corte llega a ser

fundamental e indispensable para un análisis que esté relacionado con la estabilidad de una masa de suelo.

1.2. Justificación

Justificación académica

La justificación académica, se centra en el análisis de la incidencia de la plasticidad en los parámetros de la resistencia cortante como son la cohesión y el ángulo de fricción. Este estudio nos permitirá establecer valores de plasticidad de los suelos que alteren significativamente dichos parámetros de resistencia cortante y de esta manera poder estimar valores de cohesión y ángulos de fricción conociendo la plasticidad del suelo. Existen diversas tablas de valores de cohesión y ángulos de fricción, sin embargo, ninguna relaciona la plasticidad de los suelos, es ahí donde radica la importancia de la investigación.

Justificación de la aplicación técnico-práctico

Se justifica en la necesidad de estimar valores de resistencia cortante al tener conocimiento de la plasticidad de los suelos. Los resultados de la presente investigación deben ser versátiles para ser aplicados por otros investigadores, garantizando su aplicabilidad en diferentes contextos, con recomendaciones pertinentes para su uso y sea factible aplicar en el campo de la ingeniería civil.

Justificación e importancia social

La importancia social de la investigación radica en el impacto positivo que pueda generar, al conocer la plasticidad de los suelos se podrá estimar valores de cohesión y ángulos de fricción garantizando seguridad y durabilidad en las obras civiles. Esto no solo mejora la calidad de vida de los habitantes al garantizar una mayor seguridad, sino también a impulsar el desarrollo económico de la región.

1.3. Antecedentes

Los suelos finos causan daños significativos y afectan a todo tipo de obras civiles siendo un problema a nivel mundial, por esta razón es necesario realizar estudios a estos suelos. Teniendo en cuenta que los suelos fallan por esfuerzo cortante al momento que se deslizan

las masas (partículas) la una sobre la otra, es ahí donde existe una falla en el suelo, entonces hay que conocer ese esfuerzo cortante para el cual el suelo va fallar, y es ahí donde radica la importancia de esta investigación.

La determinación de la resistencia al esfuerzo cortante de los suelos constituye uno de los puntos fundamentales en el análisis de suelos, existen diferentes métodos de cálculo que permiten determinar la seguridad de las obras civiles; los cuales podrían ser: ensayo de corte directo, pruebas de compresión no confinada, ensayo triaxial, entre otros.

Alarcón y Terán, 2019, publicaron la tesis de pregrado titulada “variación de los parámetros de resistencia al corte con diferentes grados de saturación en suelos cohesivos en siete distritos de la región Lambayeque – Perú”, cuyo objetivo fue determinar la variación de los parámetros de resistencia al corte con diferentes grados de saturación (parcial y totalmente saturado). Se presenta las variaciones del ángulo de fricción y cohesión, y los determinados tiempos de saturación. La investigación concluye que “la disminución más significativa de los parámetros de resistencia al corte se percibió en los menores intervalos de tiempo de saturación, desde su estado natural hasta las 15 horas, al aumentarse un 22 % en el grado de saturación del suelo, se redujo hasta un 32,77 % en la cohesión y 41,28% en el ángulo de fricción”.

Emilio Mejía y Susan Huaylla, 2021, determinaron la “incidencia de la velocidad de corte para determinar la variabilidad en los parámetros de resistencia cortante en suelo arcilloso”, evalúan el comportamiento de los parámetros de resistencia cortante (cohesión y 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, localizado en Lima - Perú; se concluye que el parámetro de la cohesión se comporta de manera variable, mientras que el ángulo de fricción presenta un comportamiento descendente no lineal.

Almazán, 2022 realizó la “comparación del comportamiento del esfuerzo cortante de los suelos finos determinado mediante la prueba de corte directo drenado y no drenado”, se da a conocer cuál es su comportamiento o la diferencia en las condiciones drenadas y no drenadas mediante el ensayo de corte directo, de los suelos finos en el Distrito 12 de la ciudad de Tarija – Bolivia; en las condiciones consolidadas no drenadas (CU), el ángulo de fricción (Φ) es bastante variable que en las condiciones consolidadas drenadas (CD) y

en algunos puntos es mayor el ángulo de fricción y en otros puntos es menor, esto es debido a la humedad que se encuentra el suelo. La cohesión obtenida en la condición consolidada no drenada (CU) casi en la mayoría de los puntos es mayor a la cohesión de la condición consolidada no drenada. Ya que la fuerza de cohesión de las partículas es mayor en suelos finos secos, que presenten menor grado de humedad.

La investigación realizó un análisis de la incidencia de la plasticidad en los parámetros de la resistencia cortante, a través de la caracterización de las muestras, ensayos de corte directo; estas variaciones de los índices de plasticidad para los diferentes tipos de suelos cohesivos nos muestra la influencia en la cohesión y el ángulo de fricción, que permitirá predecir satisfactoriamente valores próximos de ángulos de fricción y cohesión conociendo los índices de plasticidad de un suelo, basándose en resultados de ensayos realizados.

1.4. Situación problemática

El determinar la resistencia cortante en el suelo es un esfuerzo que resulta al combinar dos esfuerzos principales aplicados en planos perpendiculares en un tercer plano denominado plano de rotura, que será medido mediante algunos parámetros que dependen de características propias del suelo, como lo son; la cohesión (c) y el ángulo de fricción interna (ϕ). Esta resistencia influye con la plasticidad que es una propiedad que los suelos presentan cuando interactúa con el agua, se expresa como un porcentaje de humedad ya que indica la cantidad de agua que reduce la diferencia entre el Límite Líquido (LL) y el Límite Plástico (LP).

En la actualidad no existen investigaciones de una relación directa entre la plasticidad (IP) y los parámetros de resistencia cortante (ϕ y c), donde la presión de poro (u), actúa directamente en la ecuación de falla de Mohr Coulomb, transformándola de acuerdo a la condición que imponen los conceptos de drenado y no drenado determinando los términos de absoluto y efectivos de los parámetros correspondientes. La falta de investigaciones conlleva a la necesidad de formular una relación de forma numérica el nivel de relación que tienen estas propiedades.

En la ciudad de Tarija en estos últimos años, por el crecimiento demográfico de la población ante la necesidad de adquirir nuevos terrenos para construcción de viviendas, apertura de calles y caminos, mismos que pueden contener suelos cohesivos, llegando a ser un potencial problema para las obras civiles que se vayan a realizar en los diferentes barrios de la ciudad de Tarija.

1.4.1. Problema

¿Cómo la incidencia de la plasticidad en suelos finos a través del ensayo bidimensional de corte directo puede mostrar que existe una relación directa entre la cohesión y ángulo de fricción?

1.4.2. Relevancia y factibilidad del problema

Los suelos finos representan un desafío significativo en la construcción de infraestructuras, ya que su comportamiento puede causar daños en estructuras y provocar costosos problemas de mantenimiento.

Tarija cuenta con una gran cantidad de suelos finos por lo que es relevante realizar la investigación para determinar la incidencia de la plasticidad en los parámetros de resistencia cortante (ángulo de fricción y cohesión), y esta investigación tenga un impacto en la construcción, al encontrar índices de plasticidad de los suelos, estos valores nos permitirían tomar medidas preventivas adecuadas y minimizar los riesgos en el diseño y construcción de proyectos.

Los laboratorios de la ciudad de Tarija cuentan con la tecnología y el equipamiento necesarios para realizar este tipo de ensayos, por lo cual es factible de realizar este tipo de investigación sobre el análisis de la incidencia de la plasticidad en los parámetros de la resistencia cortante mediante el ensayo de corte directo, mismas que no requieren una sofisticación instrumental. Esto facilita la recopilación de datos y la comparación de los procedimientos existentes.

Los resultados de la investigación tendrán un impacto práctico con beneficios directos en la industria de la construcción. Esto fomenta el interés y el apoyo para llevar a cabo este trabajo de investigación; siendo esta factible debido a la disponibilidad de suelos cohesivos, tecnología y el impacto práctico que se espera obtener.

1.4.3. 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 presente investigación tiene validez hasta que las propiedades o características del suelo sean modificadas.
- Delimitación espacial: el estudio se centrará en el valle central de Tarija, y se tomarán en cuenta los suelos finos presentes en esta área a través de un muestreo. El predominio de tiempo de trabajo será dentro de un laboratorio de suelos, aunque existen actividades como el muestreo de suelos y los cálculos que serán tanto en campo como en gabinete.

1.5. Objetivos

1.5.1. Objetivo General.

Analizar la incidencia de la plasticidad en los parámetros de la resistencia cortante mediante el ensayo bidimensional de corte directo; para establecer numéricamente valores de plasticidad que puedan alterar significativamente a los parámetros correspondientes y examinar el comportamiento de cohesión, ángulo de fricción y plasticidad en el valle central de Tarija.

1.5.2. Objetivos Específicos.

- Realizar muestreo de suelos cohesivos en diferentes lugares del valle central de Tarija.
- Determinar el número confiable de ensayos que relacionen estas dos propiedades.
- Caracterizar (granulometría, límites líquido y plástico) las muestras de suelos en estudio.
- Establecer criterios de plasticidad a usar según el tipo de suelo.
- Determinar los parámetros de resistencia cortante en función a los índices de plasticidad de suelos cohesivos del valle central de Tarija y sus alrededores.
- Analizar la incidencia de la plasticidad en la cohesión y ángulos de fricción.
- Validar los resultados.

1.6. Formulación de la Hipótesis.

La variación del índice de plasticidad incide directamente en los parámetros de resistencia cortante.

1.7. Operacionalización de las variables.

Se presentan dos variables:

Plasticidad de los finos.

La Plasticidad de los suelos finos está referida al contenido de humedad que tiene un suelo para deformarse al accionar una fuerza externa. Viene medida de acuerdo a la diferencia de la ecuación.

$$IP = LL - LP \quad (1.1)$$

LL = Límite líquido obtenido de forma directa en laboratorio.

LP = Límite plástico obtenido de forma directa en laboratorio.

Parámetros de resistencia cortante (ϕ) y (c)

Son parámetros que dependen de la permeabilidad y la velocidad de aplicación de la carga cuando se realiza el ensayo de corte directo, está considerado en términos absolutos ya que se genera el exceso de la presión de poro mediante la siguiente ecuación.

$$\Delta\sigma = \Delta\sigma' + \Delta u \quad (1.2)$$

Esta ecuación requiere del uso de la ecuación de falla de Mohr Coulomb que de acuerdo a los términos absolutos significan lo siguiente.

$$\sigma_1 = 2c \tan\left(45 + \frac{\phi}{2}\right) + \sigma_3 \tan^2\left(45 + \frac{\phi}{2}\right) \quad (1.3)$$

1.7.1. Conceptualización y Operacionalización de variables

Tabla 1.1: Variable dependiente

Variable	Dimensión	Indicador	Valor/ Acción
Plasticidad de los suelos arcillosos (IP)	Límite líquido	Porcentaje de humedad [%]	Con el equipo de Casagrande
	Límite Plástico	Porcentaje de humedad [%]	Formando rollitos de 3 mm
	Tipo de suelo	Clasificación SUCS	Mediante la carta de Plasticidad
Parámetros de resistencia cortante	Cohesión	Unidades de resistencia [kg/cm ²]	Ensayo de corte directo no drenado
	Ángulo de fricción interna	Grados sexagesimales [°]	Ensayo de corte directo no drenado
	Velocidad de carga	Unidades de velocidad [mm/min]	Ensayo de corte directo no drenado

Fuente: Elaboración propia

1.8. Identificación del tipo de investigación

Se realizará un tipo de investigación correlacional, se refiere a variables que están tributando a un sistema en común pero que entre ellas no hay un nivel de dependencia, sin embargo, por pertenecer a un mismo sistema tienen una relación, para ello se medirá la variabilidad y la relación que exista entre estas variables.

El nivel en que se encuentra la investigación es correlacional, para conocer la relación expresada en factores o porcentajes, comparándolos con una escala se puede aproximar si la relación entre las variables es significativa o no.

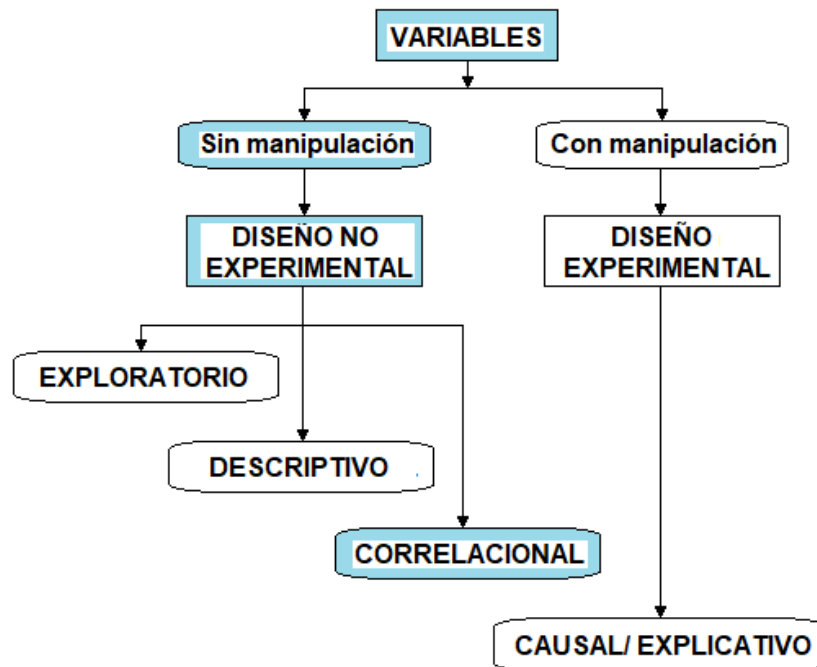
1.9. Procesamiento de la investigación

En el presente proyecto de investigación “Análisis de la incidencia de la plasticidad en los parámetros de la resistencia cortante mediante el ensayo bidimensional de corte directo”, se aplicará la estadística correlacional, cuyo objeto es, a partir de una determinada cantidad de datos (muestra), obtener una conclusión importante acerca de una mayor cantidad de datos (población).

1.10. Alcance de la investigación

La investigación tiene como objetivo principal analizar la incidencia de la plasticidad en los parámetros de resistencia cortante en suelos finos, variables que no muestran dependencia verificada entre ellas, no existe manipulación por parte del investigador ya que la variabilidad de estas depende de otros aspectos; la plasticidad estará en función al tipo de suelo ya sean de alta, media o baja compresibilidad, dependiendo del valor del límite líquido y quedándose con el suelo que cumpla estos valores, por otro lado el ángulo de fricción interna y la cohesión dependen de la saturación y la velocidad de evacuación del agua durante el ensayo.

Figura 1.1: Tipo de investigación



Fuente: Guía criterios de investigación en ingeniería civil, Luis Alberto Yurquina

Esto ubica a la investigación con un “diseño no experimental”, y el nivel de investigación corresponde al tipo “correlacional” ya que se trata de conocer sus características más relevantes del nivel de relacionamiento que tienen estas variables. Por otro lado, el levantamiento de muestras y mediciones será en un tiempo determinado de la investigación (tiempo único), llevando a que la investigación se haga “transeccional”.

CAPÍTULO II

ESTADO DE

CONOCIMIENTO

CAPÍTULO II

ESTADO DE CONOCIMIENTO

2.1. Marco conceptual

2.1.1. Suelo

Suelo en Ingeniería Civil son los sedimentos no consolidados de partículas sólidas fruto de la alteración de las rocas, o los suelos transportados por agentes como el agua, el hielo o el viento, con la contribución de la gravedad como fuerza direccional selectiva y que puede tener, o no materia orgánica. El suelo es un cuerpo natural heterogéneo, es el material de construcción más abundante dentro de las prácticas de la ingeniería civil, y constituye el soporte de las estructuras como edificaciones, vías, puentes, canales, torres, entre otros. Los ingenieros civiles deben estudiar las propiedades del suelo, tales como el origen, la distribución de tamaño de grano, la capacidad de drenar el agua, compresión, resistencia al corte y la capacidad de soporte de carga. (Braja M. Das, 2010)

Figura 2.1: Suelo

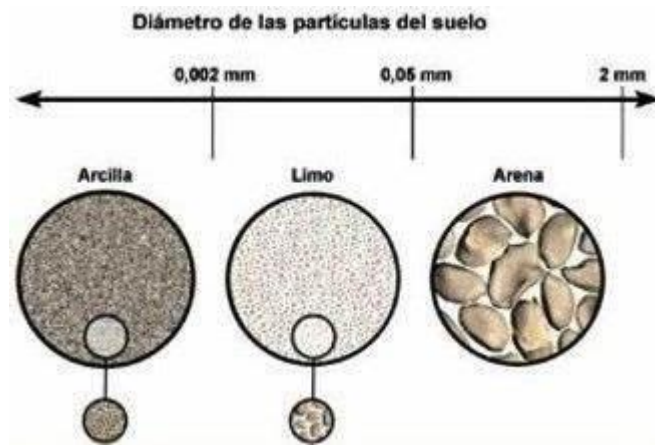


Fuente: Elaboración propia

2.1.2. Suelos finos

Los suelos finos son aquellos en los que el tamaño predominante (más del 50%) es igual a inferior a 0.075 mm (pasan por el tamiz 200 ASTM). Los suelos de grano fino o suelos finos están formados principalmente por limos y minerales de arcilla, como caolinitas, illitas, esmectitas y materia orgánica, entre otros.

Figura 2.2:Suelos finos



Fuente: Elaboración propia

Los suelos de grano fino tienen sus partículas menores que 0.06 mm y tienen forma típicamente escamosa, como los limos y las arcillas. Los óxidos de sulfuros muy finos, y a veces la materia orgánica, pueden estar presentes también. De la mayor importancia en el contexto de ingeniería es la escamación de los minerales arcillosos, que da lugar a áreas superficiales muy grandes. (Roy Whitlow, 1994)

2.1.3. Arcillas

Las arcillas son agregados de partículas microscópicas y submicroscópicas derivadas de la descomposición química que sufren los constituyentes de las rocas. Son suelos plásticos dentro de límites extensos en contenido de humedad y cuando están secos son duros, sin que sea posible despejar polvo de una pasta frotada con los dedos. Tienen además una permeabilidad extremadamente baja. Se da el nombre de arcilla a las partículas sólidas con diámetro menor de 0,005 mm y cuya

masa tiene la propiedad de volverse plástica al ser mezclada con agua. Químicamente es un silicato de alúmina hidratado, aunque en no pocas ocasiones contiene también silicatos de hierro o de magnesio hidratados. La estructura de estos minerales es, generalmente, cristalina y complicada, y sus átomos están dispuestos en forma laminar. (Crespo Villaz, 2004)

De hecho, se puede decir que hay dos tipos clásicos de tales láminas: uno de ellos del tipo silícico y el otro tipo aluminio. (Crespo Villalaz, 2004)

Las bentonitas son arcillas con un alto contenido de montmorillonita. La mayoría de las bentonitas se formaron de la alteración química de cenizas volcánicas. En contacto con el agua, las bentonitas secas se esponjan más que otros tipos de arcillas secas, y saturadas se contraen más también. (Terzaghi & Peck, 1978)

Los minerales arcillosos son los miembros de este grupo de minerales de retícula laminar generalmente encontrados, como resultados del intemperismo sobre rocas que contienen feldespatos y micas. Dependiendo de la distribución de la apilación de las láminas, así como del tipo de iones que proveen la unión de las mismas, se pueden identificar cuatro grupos de minerales de arcillas que son: caolinita, illita, montmorillonita y vermiculita. (Roy Whitlow, 1994)

2.1.4. Limos

Los limos son las fracciones microscópicas del suelo que consisten en fragmentos de cuarzo muy finos y algunas partículas en forma laminar que son fragmentos de minerales micáceos. (Braja M. Das, 2013)

Los limos son suelos de granos finos con poca o ninguna plasticidad, pudiendo ser limo inorgánico como el producido en canteras, o limo orgánico como el que suele encontrarse en los ríos, siendo en este último caso de características plásticas. El diámetro de las partículas de los limos está comprendido entre 0,05 mm y 0,005 mm los limos sueltos y saturados son completamente inadecuados para soportar cargas por medio de zapatas. Su color varía desde gris claro a muy oscuro. La permeabilidad de los limos orgánicos es muy baja y su compresibilidad muy alta. Los limos, de no encontrarse en estado denso, a menudo son considerados como suelos pobres para cimentar. (Crespo Villalaz, 2004)

2.1.5. Tamaño de la partícula

Este método permite, mediante tamizado, determinar la distribución por tamaños de las partículas mayores que 0,075 mm de una muestra de suelo. (ASTM D422 AASHTO T88)

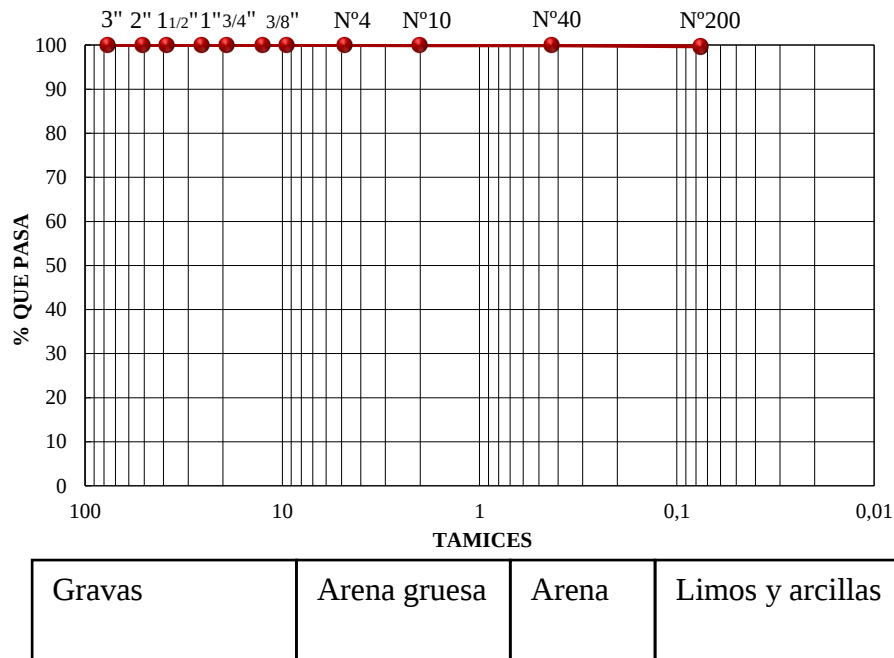
Figura 2.3: Tamaño de la partícula



Fuente: Elaboración propia

La distribución de las partículas por tamaño en una muestra de suelo se expresa mediante un gráfico que relaciona el porcentaje de partículas de tamaño inferior, en peso, con cada diámetro en mm. (Lambe, T. W., & Whitman, R., 1969)

Figura 2.4: Curva granulométrica de un suelo



Fuente: Elaboración propia

El suelo está compuesto por diferentes fracciones de partículas, que se clasifican según su tamaño, varía desde partículas más grandes como grava, arena hasta partículas más pequeñas de limo y arcilla.

Considera que independientemente de su origen, los tamaños de partículas que conforman el suelo pueden variar en un amplio intervalo. Los suelos son generalmente llamados grava, arena, limo o arcilla, dependiendo del tamaño predominante de las partículas dentro del suelo. Para describir los suelos por su tamaño de partícula, varias organizaciones han desarrollado límites de separación de tamaño de suelo. (Braja M. Das, 2013)

Tabla 2.1: Clasificación de suelos según tamaño de partícula

Nombre de la organización	Tamaño del grano (mm)			
	Grava	Arena	Limo	Arcilla
Instituto de Tecnología de Massachusetts (MIT)	>2	2 a 0,06	0,06 a 0,002	<0,002
Departamento de Agricultura de E.U. (USDA)	>2	2 a 0,05	0,05 a 0,002	<0,002
Asociación Americana de Carreteras Estatales y Oficiales del Transporte (AASHTO)	76,2 a 2	2 a 0,075	0,075 a 0,002	<0,002
Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (Cuerpo de Ingenieros del Ejército de E.U., Oficina de Reclamación de E.U., Sociedad Americana para Pruebas y Materiales)	76,2 a 4,75	4,75 a 0,075	Finos p. ej. , limos y arcillas < 0,075	

Fuente: Braja M. Das, 2013

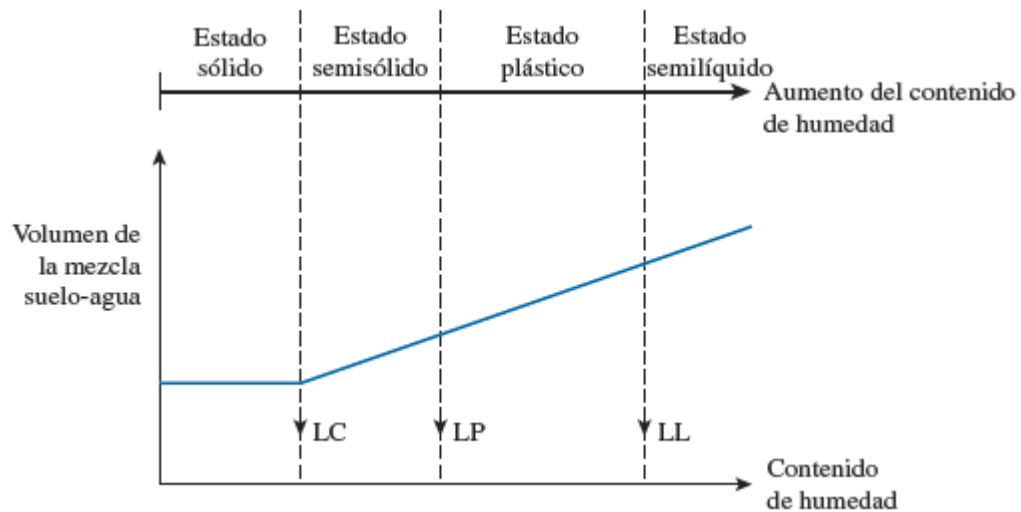
2.1.6. Límites de consistencia

Los límites de Atterberg o límites de consistencia se utilizan para caracterizar el comportamiento de los suelos finos. El nombre de estos es debido al científico sueco Albert Mauritz Atterberg. (1846-1916).

En 1900, un científico sueco llamado Albert Mauritz Atterberg desarrolló un método para describir la consistencia de los suelos de grano fino con diferentes contenidos de humedad. Con un contenido de humedad muy bajo, el suelo se comporta más como un sólido quebradizo. Cuando el contenido de humedad es muy alto, el suelo y el agua pueden fluir como un líquido. Por lo tanto, sobre una base arbitraria, dependiendo del contenido de humedad, la naturaleza del comportamiento del suelo puede ser dividido en cuatro estados básicos: sólido, semisólido, plástico y líquido. (Braja M. Das, 2013)

La consistencia de las arcillas y de otros suelos cohesivos se describe comúnmente con los términos de blando, compacto, resistente y duro. (Terzaghi & Peck, 1978)

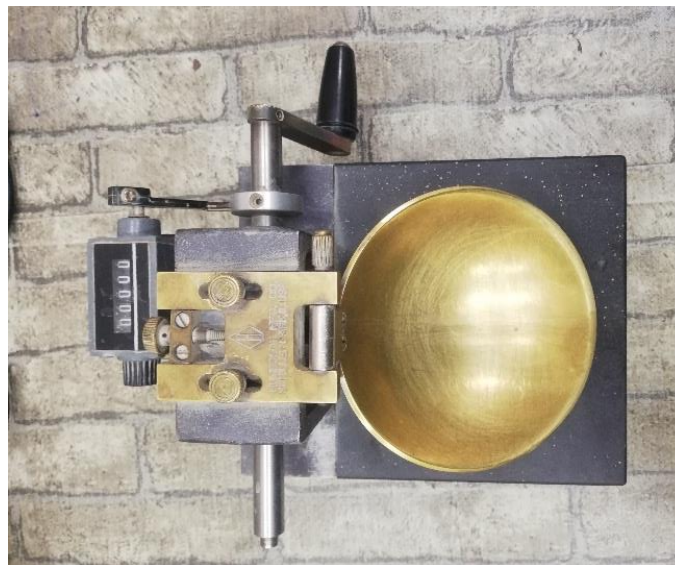
Figura 2.5:Definición de los límites de Atterberg



Fuente: Braja M. Das, 2013

Los límites se basan en el concepto de que en un suelo de grano fino solo pueden existir 4 estados de consistencia según su humedad. Así, un suelo se encuentra en estado sólido, cuando está seco. Al agregársele agua poco a poco va pasando sucesivamente a los estados de semisólido, plástico, y finalmente líquido. Los contenidos de humedad en los puntos de transición de un estado al otro son los denominados límites de Atterberg.

Figura 2.6:Equipo casa grande



Fuente: Elaboración propia

Límite Líquido

El contenido de humedad en el punto de transición del estado plástico al estado líquido. Este método establece el procedimiento para determinar el límite líquido de los suelos, mediante la máquina Casagrande. (ASTM D4318 AASHTO T89)

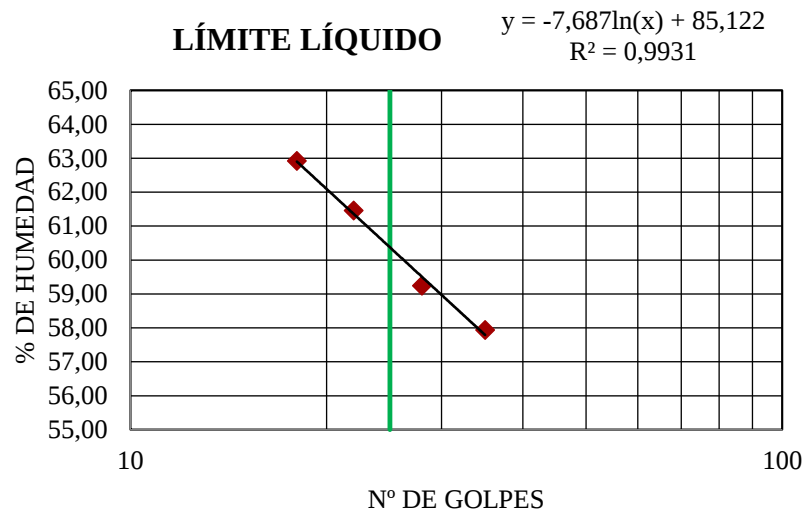
Figura 2.7:Prueba de límite líquido



Fuente: Elaboración propia

El límite líquido, es la humedad expresada como porcentaje de la masa de suelo seco en horno. Corresponde a la humedad necesaria para que una muestra de suelo remoldeada, depositada en el equipo Casagrande y dividida en dos porciones simétricas fluya y entren en contacto 10 mm aplicando 25 golpes.

Figura 2.8:Curva de fluidez para la determinación límite líquido de una arcilla.

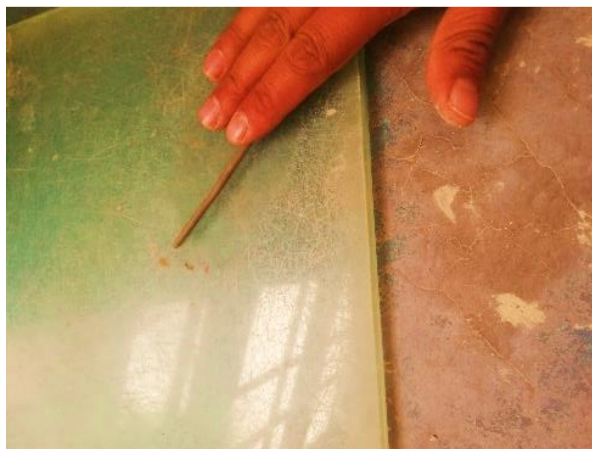


Fuente: Braja M. Das, 2013

Límite Plástico

El contenido de humedad en el punto de transición del estado semisólido al estado plástico. El límite plástico se define como el contenido de humedad, en porcentaje, en el que el suelo al enrollarse en hilos de 3,2 mm de diámetro se desmorona. El límite plástico es el límite inferior del escenario plástico del suelo. La prueba es simple y se realiza mediante rodados repetidos por parte de una masa de suelo de tamaño elipsoidal sobre una placa de vidrio esmerilado. (Braja M. Das, 2013)

Figura 2.9:Límite plástico



Fuente: Elaboración propia

El límite plástico se puede calcular con la siguiente ecuación:

$$LP = \frac{(Ph - Ps)}{Ps} * 100 = \frac{Pw}{Ps} * 100 \quad (2.1)$$

Donde:

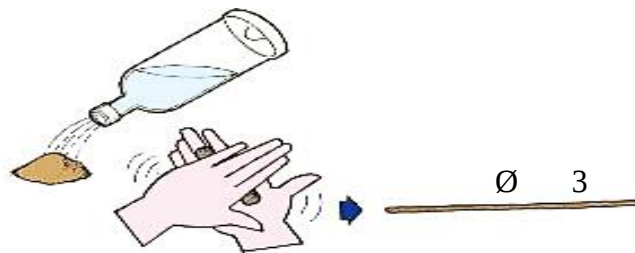
LP = Humedad correspondiente al límite plástico en %.

Ph = Peso de los trocitos de filamentos húmedos en gramos.

Ps = Peso de los trocitos de filamentos secos en gramos.

Pw = Peso del agua contenida en los filamentos pesados en gramos.

Figura 2.10: Ensayo para determinar el límite plástico



Fuente: FAO.org.

Límite de Contracción

El contenido de humedad, expresado en porcentaje, en el que se lleva a cabo la transición del estado sólido al estado semisólido.

Índice de Plasticidad

El índice de plasticidad (PI) es la diferencia entre el límite líquido y el límite plástico de un suelo. Se denomina índice de plasticidad o índice plástico (IP) a la diferencia numérica entre los límites líquido y plástico, e indican el margen de humedad dentro del cual se encuentran en estado plástico tal como lo definen los ensayos. (ASTM D4318 AASHTO T90)

La fórmula del índice plástico es:

$$IP = LL - LP \quad (2.2)$$

Donde:

IP = Índice plástico.

LL = Límite líquido.

LP = Límite plástico.

Figura 2.11:Material límites de consistencia



Fuente: Elaboración propia

2.1.7. Clasificación de los suelos

En Ingeniería, hay dos sistemas de clasificación de suelos:

- AASHTO, American Association of State Highway Officials. Usado en construcción de carreteras.
- SUCS, Sistema Unificado de Clasificación de Suelos. Usado en ingeniería geotécnica.

Sistema de clasificación ASTM D3282 AASHTO M-145

De acuerdo con este tipo, el suelo se clasifica en siete grupos mayores: A-1 al A-7. Los suelos clasificados en los grupos A-1, A-2 y A-3 son materiales granulares, donde 35% o menos de las partículas pasan por la malla N°200. Los suelos de los que más del 35% pasan por la malla N°200 son clasificados en los grupos A-4, A-5, A-6 y A-7.

Índice de grupo: Es un factor de evaluación, que determina la calidad del suelo a través de características similares en grupos de suelos.

$$IG=0.2a+0.005ac+0.01bd \quad (2.3)$$

Donde:

a = % pasa N°200 – 35 % (si % N° 200 > 75, se anota 75, si es <35, se anota 0)

b= % pasa N°200 – 15 % (si % N° 200 > 55, se anota 55, si es <15, se anota 0)

c= LL – 40 % (si LL > 60, se anota 60, si es <40, se anota 0)

d=IP – 10 % (Si IP > 30, se anota 30, si es <10, se anota 0)

Condicionando que cualquier factor que pudiera salir negativo, este se asume con el valor de cero.

Tabla 2.2: Sistema de clasificación de suelos AASHTO

Clasificación general	Materiales granulares (35 % o menos del total de la muestra pasada por el núm. 200)						
	A-1			A-2			
Grupo de clasificación	A-1-a	A-1-b	A-3	A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7
Análisis de tamiz (porcentaje de paso)							
Núm. 10	50 máx.						
Núm. 40	30 máx.	50 máx.	51 mín.				
Núm. 200	15 máx.	25 máx.	10 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.
Características de la fracción de paso núm. 40							
Límite líquido				40 máx.	41 mín.	40 máx.	41 mín.
Índice de plasticidad	6 máx.		NP	10 máx.	10 máx.	11 mín.	11 mín.
Tipos comunes de materiales significativos constituyentes	Fragmentos de roca, grava y arena.		Arena fina	Limo o grava arcilla y arena			
Clasificación general de la subrasante	Excelente a bueno						

Fuente: Fundamentos de Ingeniería Geotécnica, Braja M. Das, 2013

Tabla 2.3: Sistema de clasificación de suelos AASHTO

Clasificación general				
Grupo de clasificación	A-4	A-5	A-6	A-7 A-7-5 A-7-6
Análisis de tamiz (porcentaje de paso)				
Núm. 10				
Núm. 40				
Núm. 200	36 mín.	36 mín.	36 mín.	36 mín.
Características de la fracción de paso núm. 40				
Límite líquido	40 máx.	41 mín.	40 máx.	41 mín.
Índice de plasticidad	10 máx.	10 máx.	11 mín.	11 mín.
Tipos comunes de materiales significativos constituyentes	Suelos limosos		Suelos arcillosos	
Clasificación general de la subrasante	Regular a malo			
Para A-7-5, $PI \leq LL - 30$ Para A-7-6, $PI \geq LL - 30$				

Fuente: Fundamentos de Ingeniería Geotécnica, Braja M. Das, 2013

Sistema de clasificación SUCS ASTM D 2487-00

La clasificación del suelo de acuerdo al SUCS (Sistema Unificado de Clasificación de Suelos ASTM D 2487-00 (Para mayor información consultar norma), basa la clasificación de los suelos para propósitos ingenieriles; mediante el análisis de diferentes parámetros como lo son el límite líquido e índice de plasticidad; a continuación, se describe el procedimiento a seguir para realizar esta clasificación:

Este procedimiento describe un sistema de clasificación de suelos minerales y órgano mineral para propósitos de ingeniería, mediante la determinación en laboratorio del tamaño de partículas, usando características como: el límite líquido e índice de plasticidad que son indispensables para la clasificación como también los coeficientes de gradación y de uniformidad.

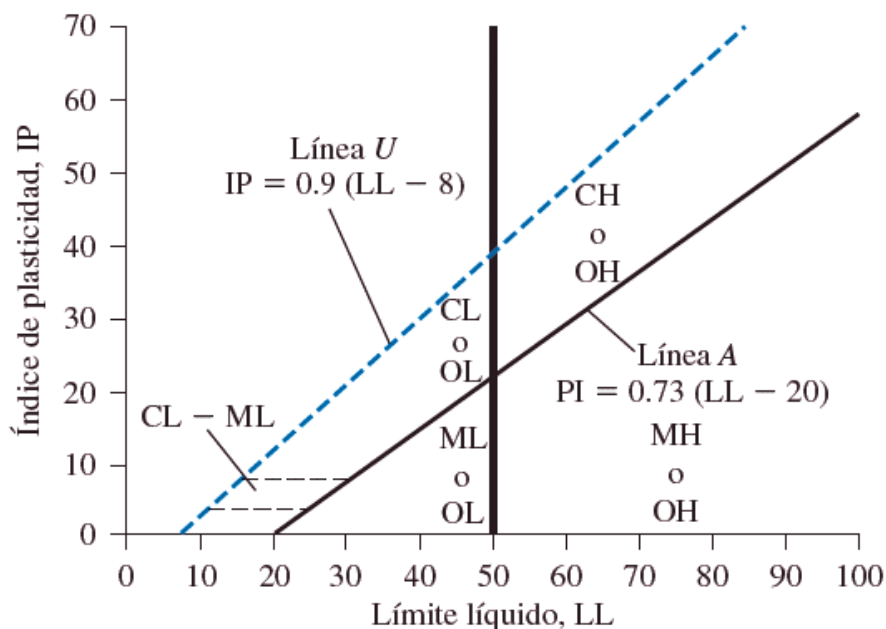
A continuación, se muestra dicha clasificación, junto con los símbolos empleados en la misma, así como una descripción de las propiedades esperables de los grupos diferenciados.

Tabla 2.4: Símbolo y descripción del suelo

Símbolo	G	S	M	C	O	Pt	H	L	W	P
Descripción	Grava	Arena	Limo	Arcilla	Limos orgánicos y arcilla	Turba y suelos altamente orgánicos	Alta plasticidad	Baja plasticidad	Bien graduado	Mal graduado

Fuente: Fundamentos de Ingeniería Geotécnica, Braja M. Das, 2013

Figura 2.12: Grafica de plasticidad



Fuente: Fundamentos de Ingeniería Geotécnica, Braja M. Das, 2013

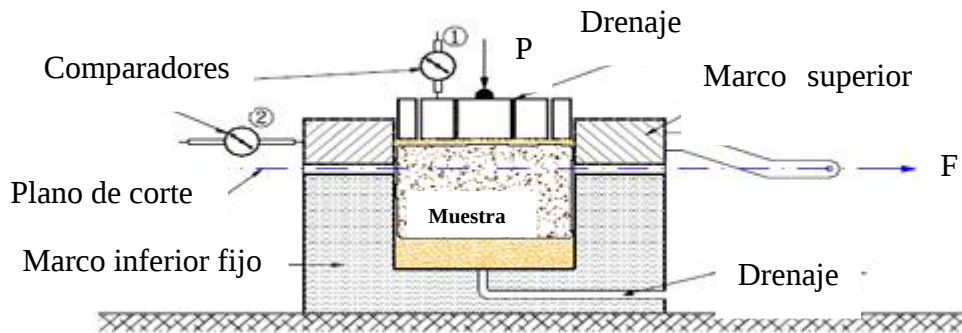
2.1.8. Ensayo de corte directo

El ensayo bidimensional de corte directo es un método en el que una muestra de suelo se somete a un esfuerzo de corte en un solo plano. En este ensayo, la muestra se coloca en una caja dividida horizontalmente, y se aplica una fuerza lateral hasta que el suelo se corta o falla. Este método permite medir la resistencia al corte del suelo, y es clave para obtener parámetros como la cohesión y el ángulo de fricción interna, los cuales son esenciales para evaluar la estabilidad de estructuras como los taludes.

Para realizar el ensayo, una de las mitades se mueve con respecto a la otra mitad y el suelo se rompe a lo largo del plano entre los dos elementos de la caja. El ensayo es más común para obtener la resistencia de los suelos en los estudios de deslizamientos. Este ensayo es simple y económico de realizar, pero presenta los inconvenientes del poco control que se

tiene sobre las condiciones de drenaje, la dificultad para medir presiones de poro y algunos problemas inherentes a los mecanismos de las máquinas que realizan los ensayos.

Figura 2.13: Ensayo de corte directo



Fuente: ingeassas.com

Las ventajas de los ensayos de corte directo son su facilidad de ejecución, la cual permite la realización de una gran cantidad de pruebas en poco tiempo y la posibilidad de realizar ensayos sobre superficies de discontinuidad. El ensayo de corte directo es de uso obligatorio cuando se trabaja a niveles bajos de esfuerzos o si se desea obtener la resistencia a lo largo de las discontinuidades.

En este ensayo, la resistencia al cortante puede medirse en un plano predeterminado, cortando la muestra con una orientación explícita. La superficie de falla es predefinida y no depende de las propiedades del suelo; por esta razón, los valores de resistencia obtenidos, tienden a ser mayores que en los ensayos triaxiales. (Jaime Suarez, 2012)

El ensayo bidimensional de corte directo es más antigua y simple, tiene como objetivo principal la obtención de los parámetros de resistencia mediante la obtención de la envolvente de falla.

Dependiendo del equipo, la prueba de corte puede ser controlada por el esfuerzo o por la deformación unitaria. En las pruebas controladas por el esfuerzo, la fuerza cortante es aplicada en incrementos iguales hasta que el espécimen falla, lo cual tiene lugar a lo largo del plano de separación de la caja de corte. Después de la aplicación de cada incremento de carga, el desplazamiento cortante de la mitad superior de la caja se mide por medio de

un micrómetro horizontal. El cambio de la altura del espécimen (por tanto, el cambio de su volumen) durante la prueba se obtiene a partir de las lecturas del extensómetro que mide el movimiento vertical de la placa superior de caja.

En pruebas controladas por la deformación unitaria se aplica una razón constante de desplazamientos cortante a una mitad de la caja por medio de un motor que actúa a través de engranes. La fuerza cortante resistente del suelo correspondiente a cualquier desplazamiento cortante se mide por medio de un anillo de ensayo horizontal o con una celda de carga. El cambio de volumen durante la prueba se obtiene de manera similar a las pruebas controladas por el esfuerzo. (Braja M. Das, 2013)

Los ensayos de corte directo permiten múltiples variantes como:

- Muestra inalterada o remoldeada a unas condiciones específicas.
- Con tensión controlada.
- Con deformación controlada.
- Con o sin drenaje.
- Con o sin consolidación previa.
- Con velocidad de corte alta o baja.
- Con o sin inundación brusca de la muestra en un determinado estado de tensiones.

(Ignacio Morilla Abad, 2012)

2.1.8.1. Aparato de corte directo

El equipo de corte directo de marca HUMBOLDT modelo HM-2700.3F. Este equipo tiene un rango de velocidad continua desde 0.00001 a 0.49999 in/min (0.0001mm hasta 12.99999 mm/min) por minuto controlado por el motor por etapas. Permite realizar ensayos de muestras cuadradas con dimensiones de 2.5” de lado y una altura de 1”. El rango de velocidad para la aplicación de la fuerza cortante se ajusta rápidamente en forma manual. La fuerza cortante máxima es de 2000 lb (10KN). La fuerza de consolidación máxima es de 2000 lb (10KN). Las mediciones de las posiciones hacia delante y de reserva permite que la prueba cortante residual sea tomada como estándar. La característica de seguridad previene la sobrecarga del sistema de medición de carga. Cumple con normas ASTM D3080.

Figura 2.14:Equipo de Corte Directo



Fuente: Elaboración propia

2.1.8.2. Consideraciones del ensayo de corte directo

El modelo habitual de resistencia del terreno parte de la concepción de que el mismo está formado por pequeñas partículas sólidas independientes entre sí, que pueden transmitir compresión por contacto entre ellos, pero no tracción. El medio así concebido puede soportar tensiones cortantes por rozamiento entre las partículas. Se considera que el rozamiento en este medio obedece la ley de Coulomb, por lo que la resistencia al deslizamiento entre dos planos será mayor cuanto más compresión exista entre dichos planos. (Resistencia de materiales, Universidad de Valladolid, 2014)

Un ensayo bidimensional de corte directo es una prueba de laboratorio utilizada en geotecnia para determinar la resistencia al corte de materiales, como suelos cohesivos o no cohesivos, aplicando una fuerza cortante directa a una muestra de suelo en dos direcciones perpendiculares entre sí.

En resumen, el ensayo bidimensional de corte directo es una herramienta versátil para evaluar la resistencia al corte de una amplia variedad de materiales, desde suelos cohesivos hasta materiales granulares, lo que es fundamental en ingeniería civil y geotécnica

Estos parámetros de resistencia son fundamentales para evaluar la capacidad portante del suelo y el diseño de cimentaciones, taludes y estructuras de contención.

En resumen, el ensayo bidimensional de corte directo permite determinar la resistencia al corte del suelo en dos direcciones perpendiculares, lo que se traduce en valores de cohesión y ángulo de fricción interna a través de la envolvente de falla. Estos resultados son cruciales para el análisis geotécnico y el diseño de estructuras que interactúan con el suelo.

Ventajas

- Se puede realizar a suelos granulares y cohesivos.
- Se realiza a esfuerzo o deformación controlada.
- Rápido y simple, especialmente con arenas.
- En las arcillas se pueden orientar para medir la resistencia al corte en un plano débil.
- Es un ensayo económico.
- La preparación de muestras no es complicada.

Desventajas

- Plano de falla es forzado.
- Cambio en el área de la superficie de deslizamiento.
- Las direcciones principales no se conocen y no es fácil determinar los esfuerzos principales.
- No se puede medir la presión de poros.

2.1.8.3. Corte directo consolidado drenado

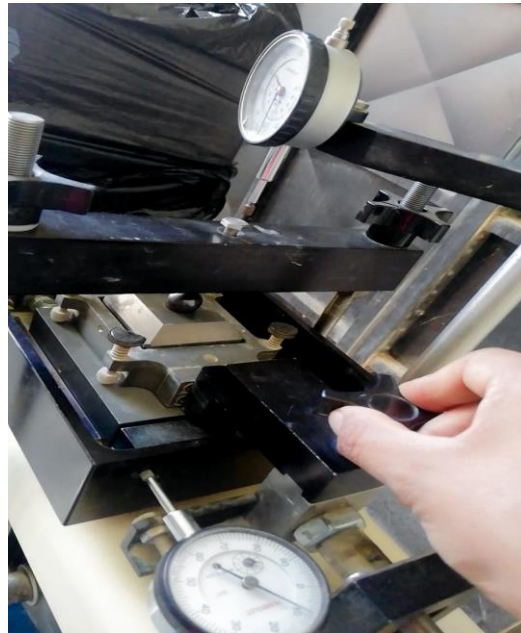
Este método tiene por objeto establecer el procedimiento de ensayo para determinar la resistencia al corte de una muestra de suelo consolidada y drenada, empleando el método de corte directo.

Este ensayo puede realizarse sobre todos los tipos de suelos, con muestras inalteradas y resmoldeadas.

El método de corte directo es apropiado para un ensayo consolidado y drenado; tiene la particularidad de que los recorridos para el drenaje a través de la muestra de ensayo son cortos y permiten mejor y más rápidamente la disipación de las presiones de poros.

El ensayo es utilizable también para la determinación de la máxima resistencia al corte y de la resistencia residual a lo largo de planos conocidos de baja resistencia en el material. (ASTM D3080 T236)

Figura 2.15:Corte directo



Fuente: Elaboración propia

La resistencia drenada es la resistencia del suelo cuando se carga en forma lenta y no se producen presiones de poros en exceso, debidas a la aplicación de la carga. Igualmente, la resistencia drenada se presenta cuando la carga ha estado aplicada por un periodo suficiente de tiempo de tal forma, que el suelo ya ha sido drenado. Una condición no-drenada, con el tiempo puede convertirse en una condición drenada, en la medida que el agua drene.

Basados en el principio de esfuerzos efectivos, la resistencia máxima drenada a la falla sobre cualquier plano en el suelo, no es una función de los esfuerzos totales normales que actúan sobre el plano, sino de la diferencia entre los esfuerzos totales normales y la presión de poros. (Jaime Suarez, 2012)

2.1.8.4. Resistencia cortante

En los problemas de estabilidad de los suelos tales como: estudio de cimentaciones, obras de sostenimiento, taludes, terraplenes; además de la acción combinada de las fuerzas externas y las fuerzas internas que se desarrollan en la masa de suelo que crean esfuerzos horizontales capaces de producir desplazamientos laterales del material, es necesario conocer la resistencia al corte de los suelos.

La resistencia cortante de una masa de suelo es la resistencia interna por área unitaria que la masa de suelo ofrece para resistir la falla y el deslizamiento a lo largo de cualquier plano dentro de él. Los ingenieros deben entender la naturaleza de la resistencia cortante para analizar problemas de estabilidad del suelo, tales como capacidad de carga, estabilidad de taludes y la presión lateral sobre estructuras de retención de tierras. (Braja M. Das 2013)

Cuando se aplican un sistema de fuerzas a un volumen determinado de suelo, se desarrollan tensiones de corte, las cuales implican deformaciones en este. Estas deformaciones son o pueden ser importantes a lo largo de los llamados planos de falla o deslizamiento.

Se puede definir la resistencia al corte de un suelo como la tensión de corte en el plano de falla, en el momento de la falla. La resistencia de un suelo es el mayor esfuerzo al que puede ser sometido.

Figura 2.16: Ensayo corte directo



Fuente: Elaboración propia

La resistencia al corte es el resultado de la resistencia al movimiento entre partículas.

La resistencia de corte se deriva de los siguientes parámetros:

- Resistencia a la fricción entre partículas.
- Cohesión entre partículas.

La cohesión de un suelo y su ángulo de fricción interna, componentes del esfuerzo de corte del mismo, pueden obtenerse de diferentes maneras, y en ella figuran: a) por medio del aparato de corte directo ideado por Arthur Casagrande, y b) por la prueba de compresión triaxial. En el caso de las arcillas, la determinación del esfuerzo de corte de las mismas puede determinarse, además, con la prueba de compresión axial no confinada o con la prueba de la veleta. (Crespo Villalaz, 2004)

2.1.9. Parámetros de resistencia cortante

Los parámetros de resistencia son propiedades características de cada suelo, estos parámetros colaboran a la resistencia al corte de los suelos que son:

Cohesión

La cohesión se puede definir como la adherencia entre las partículas del suelo debido a la atracción entre ellas en virtud de las fuerzas moleculares. (Crespo Villalaz. 2004)

La cohesión es una medida de la cementación o adherencia entre las partículas de suelo. La cohesión en la mecánica de suelos, es utilizada para representar la resistencia al cortante producida por la cementación entre las partículas, mientras que, en la física, este término se utiliza para representar la resistencia a la tensión.

En los suelos eminentemente granulares en los cuales no existe ningún tipo de cementante o material que pueda producir adherencia, la cohesión se supone igual a cero y a estos suelos se les denomina suelos friccionantes o no cohesivos ($c = 0$).

En los suelos no saturados, la tensión debida a la succión del agua en los poros, produce un fenómeno de adherencia entre partículas por presión negativa o fuerzas capilares. Esta cohesión "aparente" desaparece con la saturación. (Jaime Suarez, 2012)

Ángulo de fricción interna

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)

El ángulo de fricción es la representación matemática del coeficiente de rozamiento, el cual es un concepto básico de la física:

$$\text{Coeficiente de rozamiento} = \tan \phi$$

El ángulo de fricción en suelos granulares secos coincide con el ángulo de reposo. Todos los suelos poseen fricción, sin embargo, a los suelos arcillosos con fricción muy baja o despreciable, se les denomina suelos cohesivos: $\Phi = 0$.

El ángulo de fricción (Φ) depende de una gran cantidad de factores; algunos de los más importantes son:

- Tamaño de los granos o partículas. A mayor tamaño de partículas, mayor es Φ .
- Forma de los granos o partículas. Φ es mayor para partículas angulosas.
- Distribución de los tamaños de grano o partículas. En los suelos bien gradados, Φ es mayor que en los suelos uniformes.
- Permeabilidad (Facilidad de drenaje).
- Presión normal o de confinamiento.
- Presión de preconsolidación.

El ángulo de fricción es el resultado de la combinación de todos los factores. Por ejemplo, el ángulo de fricción es mayor al aumentar la densidad, pero si las presiones normales son muy altas, el ángulo de fricción tiende a disminuir. En arcillas, el ángulo de fricción depende de las condiciones de preconsolidación.

Rangos de los ángulos de fricción por diferentes autores

Tabla 2.5: 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 2.6: Cohesión y ángulo de fricción según la clasificación de suelo (SUCS)

Tipo de suelo	Ángulo de rozamiento			Cohesión En Mpa	Observaciones
	Min	Med	Max	-	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
GW	35	38,5	45	-	
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

2.1.10. Estadística

La estadística desempeña un papel fundamental en la realización de comparaciones, ya que proporciona herramientas y técnicas para resumir datos, realizar análisis comparativos, basar decisiones en evidencia sólida, controlar variables y generalizar resultados.

El tratamiento estadístico es un procesamiento de los valores observados de la variable en estudio, que ayuda a buscar la significancia y confiabilidad del proceso investigativo; está constituido por etapas identificadas como: estadística descriptiva y estadística inferencial.

Este proceso es importante ya que ayuda para hacer un análisis e interpretación adecuada de los datos observados; de tal manera se tenga la certeza, precisión y confianza necesaria para la toma de decisiones.

2.1.11. Variables independientes

"La variable independiente es aquella que se considera como la causa o el factor explicativo en un estudio". (Levin, R. & Rubin, D., 2004)

Una variable independiente es aquella que se manipula o se controla en un experimento o estudio para evaluar su efecto sobre la variable dependiente. La variable independiente es considerada la causa o el factor que se está evaluando para ver si produce cambios o diferencias en la variable dependiente. En otras palabras, la variable independiente es la que se controla y se varía sistemáticamente en el estudio, y se espera que produzca diferentes niveles de respuesta en la variable dependiente.

2.1.12. Media

La media es ampliamente utilizada en estadística debido a su simplicidad y capacidad para proporcionar una medida representativa del conjunto de datos, siendo esta el promedio numérico de un conjunto de datos (Murray & Larry, 2009).

La media se define de la siguiente manera:

$$\bar{X} = \sum_{i=1}^n \frac{x_i}{n} = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n} \quad (2.7)$$

Donde:

x_i = Datos.

n = Número de datos.

2.1.13. Mediana

La mediana de un conjunto de números acomodados en orden de magnitud (es decir, en una ordenación) es el valor central o la media de los dos valores centrales (Murray & Larry, 2009).

La mediana se expresa por la fórmula:

$$\text{Mediana} = L_1 + \left(\frac{\frac{N}{2} - (\sum f)_1}{f_{\text{mediana}}} \right) c \quad (2.8)$$

Donde:

L_1 = Frontera inferior de la clase mediana (es decir, de la clase que contiene la mediana).

N = Número de datos (es decir, la frecuencia total).

$(\sum f)_1$ = Suma de las frecuencias de todas las clases anteriores a la clase mediana.

f_{mediana} = Frecuencia de la clase mediana.

c = Amplitud del intervalo de la clase mediana.

2.1.14. Desviación media

La desviación media, o desviación promedio, de un conjunto de N números $X_1, X_2, \dots, X_n$ se abrevia DM (Murray & Larry, 2009).

La desviación media está definida así:

$$\text{Desviación media} = \frac{\sum_{j=1}^N |X_j - \bar{X}|}{N} = \frac{\sum |X - \bar{X}|}{N} \quad (2.9)$$

Donde:

X_j = Datos.

$\bar{X}$ = Media aritmética.

N = Número de datos.

2.1.15. Desviación estándar

La desviación estándar es una medida estadística que cuantifica la dispersión o variabilidad de un conjunto de datos con respecto a su media. Es útil para comprender la dispersión de los valores individuales y evaluar la consistencia o variabilidad de los datos (Murray & Larry, 2009).

La desviación estándar se puede definir como:

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^N (X_j - a)^2}{N}} \quad (2.10)$$

Donde:

a = Es un promedio cualquiera además de la media aritmética

X_j = Datos.

N = Número de datos.

De todas las desviaciones estándar, la mínima es aquella en la que $a = \bar{X}$

2.1.16. Coeficiente de variación

Si la dispersión absoluta es la desviación estándar s y el promedio es la media $\bar{X}$, entonces a la dispersión relativa se le llama coeficiente de variación o coeficiente de dispersión; este coeficiente se denota por CV (Murray & Larry, 2009).

$$\text{Coeficiente de variación (CV)} = \frac{S}{\bar{X}} \quad (2.11)$$

Siempre que $\bar{X} \neq 0$

Donde:

S = Desviación estándar.

$\bar{X}$ = Media aritmética.

Y expresado en porcentaje, es de la siguiente forma:

$$\text{Coeficiente de variación (CV)} = \frac{S}{\bar{X}} * 100 \quad (2.12)$$

Donde:

S = Desviación estándar.

$\bar{X}$ = Media aritmética.

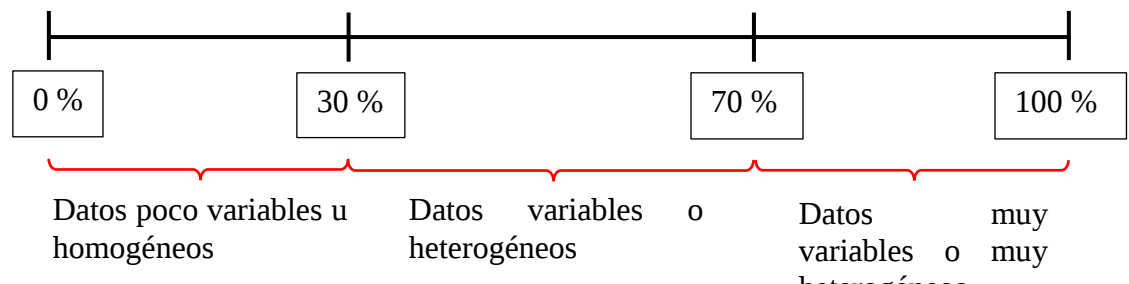
Esta medida es adimensional, por lo tanto, se convierte en un indicador efectivo para comparar dos o más variables distintas o dos o más poblaciones diferentes.

Interpretación del coeficiente de variación

Vargas (2007) nos presenta una forma de interpretar los valores del coeficiente de variación:

- $CV \leq 30\%$, los datos de la muestra son relativamente homogéneos. Por lo tanto, la media es representativa.
- $30\% < CV \leq 70\%$, los datos de la muestra son heterogéneos. Por lo tanto, la media no es representativa.
- $CV > 70\%$, los datos de la muestra son muy variables o heterogéneos. Por lo tanto, la media no es representativa.

Figura 2.17: Interpretación de los valores del coeficiente de variación



Fuente: Vargas, 2007

2.1.17. Prueba de hipótesis

(Martínez, 2012) define a la hipótesis estadística como pruebas de significación que tienen como objeto principal evaluar suposiciones o afirmaciones acerca de los valores estadísticos de la población, denominados parámetros.

(Walpole et al, 2012) definen que, “una hipótesis estadística es una aseveración o conjetura respecto a una o más poblaciones”.

La hipótesis nula y la hipótesis alternativa

(Martínez, 2012) define lo siguiente:

- La hipótesis nula es la que hace referencia al valor del parámetro que se quiere probar como verdadero.
- La hipótesis alternativa o falsa, a aquella que establece que el parámetro puede ser mayor, menor o distinto, de acuerdo con la propuesta hecha en la hipótesis nula.

La estructura de la prueba de hipótesis se establece utilizando el término hipótesis nula, el cual hace referencia a cualquier hipótesis que se desea probar y se denota con H_0 . El rechazo de H_0 conduce a la aceptación de una hipótesis alternativa, que se denota con H_1 (Walpole et al., 2012).

Tipos de error

Existen dos tipos de errores que se pueden presentar al momento de probar una hipótesis.

(Walpole et al, 2012) define lo siguiente:

- El rechazo de la hipótesis nula cuando es verdadera se denomina error tipo I.
- No rechazar la hipótesis nula cuando es falsa se denomina error tipo II.

Figura 2.18: Situaciones posibles al probar una hipótesis estadística

	Ho es verdadera	Ho es falsa
No rechazar Ho	Decisión correcta	Error tipo II
Rechazar Ho	Error tipo I	Decisión correcta

Fuente: Walpole et al, 2012.

Propiedades de una prueba de hipótesis

(Walpole et al, 2012) describe las siguientes propiedades:

- Los errores tipo I y tipo II están relacionados. Por lo general una disminución en la probabilidad de cometer uno da como resultado un incremento en la probabilidad de cometer el otro.
- El tamaño de la región crítica y, por lo tanto, la probabilidad de cometer un error tipo I, siempre se puede reducir ajustando el (los) valor(es) crítico(s).
- Un aumento en el tamaño de la muestra n reducirá α y β de forma simultánea.
- Si la hipótesis nula es falsa, β es un máximo cuando el valor verdadero de un parámetro se aproxima al valor hipotético. Cuanto más grande sea la distancia entre el valor verdadero y el valor hipotético, más pequeña será β .

Nivel de significancia

El nivel de significancia, también conocido como nivel de confianza, es un parámetro utilizado en pruebas de hipótesis estadísticas para tomar decisiones sobre la aceptación o rechazo de una hipótesis nula. Se representa con el símbolo α . El nivel de significancia establece el umbral o límite de probabilidad bajo el cual se rechaza la hipótesis nula.

La preselección de un nivel de significancia α tiene sus raíces en la filosofía de que se debe controlar el riesgo máximo de cometer un error tipo I. Sin embargo, este enfoque no explica los valores del estadístico de prueba que están “cerca” a la región crítica. (Walpole et al, 2012)

Se entiende por nivel de significación a la máxima probabilidad de que se especifique con el fin de hacer mínimo el error tipo I. Generalmente, esta probabilidad se fija antes de escoger la muestra. El nivel de significación se simboliza por α , siendo generalmente del 1%, 5% o 10%, pero se puede usar cualquier nivel, dependiendo del tipo de investigación que se realice. (Martínez, 2012)

Cuando se trabaja con un nivel del 5%, el resultado es significativo; si se emplea el 1%, el resultado es altamente significativo, y si es del 10%, se considera poco significativo.

Procedimiento a seguir en las pruebas de hipótesis

(Martínez, 2012) define los siguientes pasos a seguir para realizar una prueba de hipótesis:

- Formular la hipótesis nula y la alternativa.
- Seleccionar el nivel de significación.
- Conocer o estimar la varianza.
- Determinar la técnica y la prueba estadística.
- Determinar los valores críticos y sus regiones de rechazo.
- Calcular los datos muestrales, utilizando las fórmulas correspondientes.
- Tomar la decisión estadística, de aceptar o rechazar.

2.1.18. Prueba ANOVA

La prueba ANOVA (Análisis de Varianza) es una técnica estadística que se utiliza para comparar las medias de tres o más grupos y determinar si existen diferencias significativas entre ellos. Evalúa la variabilidad dentro de cada grupo y entre los grupos, identificando si al menos uno de ellos es significativamente diferente de los demás.

2.2. 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 AASTHO T89.

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.

2.3. Análisis y posición del investigador

El propósito de la presente investigación es analizar la incidencia de la plasticidad en los parámetros de la resistencia cortante considerando el ensayo de corte directo en suelos

finos, conociendo la caracterización, en función a los diferentes valores del índice de plasticidad realizados en el laboratorio se podrá estimar un ángulo de fricción y cohesión mediante una relación de índices de plasticidad de los suelos.

Todas las estructuras de ingeniería civil deben cimentarse sobre la superficie del terreno natural y por tal razón es de vital importancia un buen estudio de suelos, donde se conozcan con exactitud las propiedades físicas y mecánicas del suelo, a partir de la necesidad de saber que el análisis de esfuerzos sobre un suelo no se limita únicamente a la compresión de su comportamiento bajo esfuerzos de compresión axial. Los suelos, durante su uso estructural también pueden verse sometidos a esfuerzos cortantes, los cuales son de importante consideración. Porque cuando una estructura se apoya en el suelo esta estructura transmite los esfuerzos al suelo de fundación y estos esfuerzos producen deformaciones en el suelo, haciendo que la estructura presente deformaciones.

Por este motivo, se considera importante la demostración del presente ensayo, de tal manera que se pueda estimar valores de cohesión en función a valores de índice de plasticidad.

CAPÍTULO III

RELEVAMIENTO DE

DATOS

CAPÍTULO III

RELEVAMIENTO DE DATOS

3.1. Criterios de diseño metodológico

Es necesario definir los componentes del estudio metodológico para una mayor comprensión e implementación adecuada del trabajo de investigación.

3.1.1. Unidad de muestra

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

Las unidades de estudio son la resistencia y la plasticidad de los suelos finos 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= todos los ensayos de laboratorio de suelos finos.

3.1.3. Muestra

Dado que rara vez se puede medir la totalidad de la población, se opta por elegir una muestra. En el presente proyecto de investigación, la muestra elegida es el suelo fino del Valle Central de Tarija y sus alrededores. El objetivo fundamental de elegir una muestra es permitir estudiar algo sobre la población y sirve como auxiliar para tomar una decisión.

Tamaño de muestra “n”: desconocido

Variable a medir: plasticidad de los suelos finos y los parámetros de resistencia cortante.

3.1.4. Tamaño de muestra

Figura 3.1: Determinación tamaño de muestra

Fases de la investigación	Nombre de los ensayos	Cantidad de ensayos	Ni	σ	Ni σ	fi	ni	ni
Zona de exploración	zona 1	15	15	0,10	1,50	0,097	9,7	10
	zona 2	15	15	0,10	1,50	0,097	9,7	10
	zona 3	15	15	0,10	1,50	0,097	9,7	10
De muestreo NATURAL	Humedad natural	4	4	0,10	0,40	0,026	2,6	3
	Límite líquido (identificación)	4	4	0,10	0,40	0,026	2,6	3
	Límite plástico (identificación)	4	4	0,10	0,40	0,026	2,6	3
Caracterización arcillas	Contenido de humedad	45	45	0,10	4,50	0,290	29,0	30
	Limites de aterberg	45	45	0,10	4,50	0,290	29,0	30
	Granulometría	45	45	0,10	4,50	0,290	29,0	30
Caracterización limos	Contenido de humedad	45	45	0,10	4,50	0,290	29,0	30
	Límites de aterberg	45	45	0,10	4,50	0,290	29,0	30
	Granulometría	45	45	0,10	4,50	0,290	29,0	30
Pruebas finales	Corte directo arcillas	22	22	0,10	2,20	0,142	14,2	15
	Corte directo limos	22	22	0,10	2,20	0,142	14,2	15
Ensayos totales		371			37,10		239	249

error%	5	0,05
NC	95	1,96

n=	109
----	-----

3.2. Plan estratégico de trabajo

Para realizar una investigación, la primera fase consiste en realizar el muestreo del suelo, esta fase es tan importante como cualquier otro ensayo de una investigación, ya que mediante este muestreo de suelos se obtiene muestras representativas que sirven para conocer sus características y propiedades físicas del suelo.

La extracción de muestras puede ser de dos tipos: Alteradas e inalteradas, se dice que una muestra es:

Alterada, este tipo de muestras es cuando no guarda las mismas condiciones en las que se encontraba en el terreno de donde procede y se extrae a medida que se va realizando el muestreo.

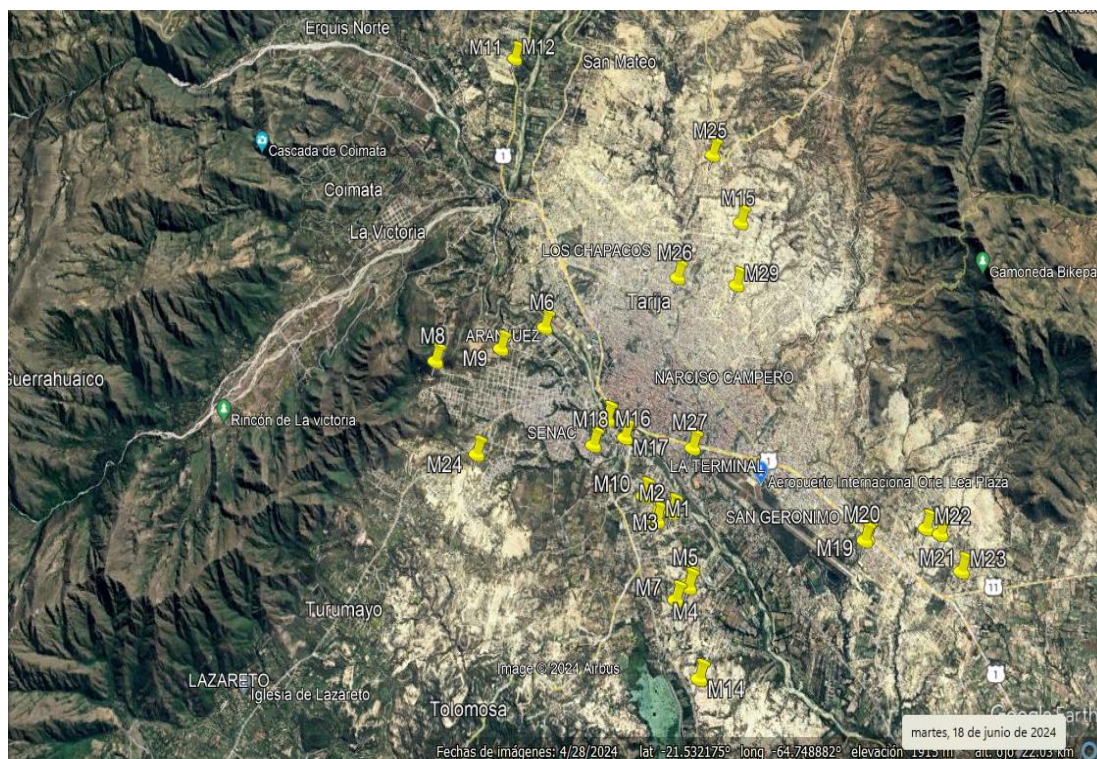
Inalterada, estas muestras son las que conservan, en la mayor medida posible, la estructura y su contenido de humedad para que se presenten las condiciones del campo lo más natural posible.

Para el ensayo de corte directo se trabajó con muestras inalteradas.

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 del Valle Central de Tarija y sus alrededores con el fin de obtener valores más representativos.

Figura 3.2: Ubicación puntos de muestreo



Fuente: Google eart pro

La ubicación de la extracción de las muestras fue determinada por un análisis e inspección de los lugares, verificando personalmente los sitios donde existen grandes yacimientos de suelos arcillosos y limosos, esta selección se la realizó abarcando el valle central de Tarija y sus alrededores. Los sitios de la extracción de las muestras fueron elegidos mediante un proceso de descarte y seleccionando equitativamente la distribución de los sitios en todo el valle central de Tarija, en el análisis de la presente investigación.

Como resultado del análisis y selección de los sitios de la extracción de las muestras, se tiene 15 puntos de estudio con muestras de suelo limoso y 15 muestras de suelo arcilloso.

Coordenadas de las zonas de extracción del suelo pertenecientes a la ciudad de Tarija y alrededores.

Tabla 3.1:Coordenadas de las zonas de extracción

Muestra	Barrio	Ubicación		Muestra	Barrio	Ubicación	
1	Miraflores	Lat. Sur	21,557057	16	German Busch	Lat. Sur	21,540571
		Long. Oeste	64,729725			Long. Oeste	64,739625
2	Miraflores	Lat. Sur	21,556783	17	German Busch	Lat. Sur	21,543531
		Long. Oeste	64,730186			Long. Oeste	64,735956
3	Miraflores	Lat. Sur	21,555693	18	Luis de Fuentes	Lat. Sur	21,544812
		Long. Oeste	64,726619			Long. Oeste	64,742519
4	San Blas	Lat. Sur	21,567469	19	San Jorge II	Lat. Sur	21,559777
		Long. Oeste	64,723634			Long. Oeste	64,687134
5	San Blas	Lat. Sur	21,566936	20	San Jorge II	Lat. Sur	21,560179
		Long. Oeste	64,723693			Long. Oeste	64,68758
6	Aranjuez	Lat. Sur	21,524975	21	Torrecillas	Lat. Sur	21,559168
		Long. Oeste	64,752622			Long. Oeste	64,672146
7	San Blas	Lat. Sur	21,569431	22	Torrecillas	Lat. Sur	21,558291
		Long. Oeste	64,726281			Long. Oeste	64,674976
8	Tabladita	Lat. Sur	21,531023	23	El Portillo	Lat. Sur	21,565043
		Long. Oeste	64,775445			Long. Oeste	64,668537
9	Tabladita	Lat. Sur	21,528733	24	Los Tajibos	Lat. Sur	21,546352
		Long. Oeste	64,761832			Long. Oeste	64,766585
10	Miraflores	Lat. Sur	21,553099	25	Los Laurees	Lat. Sur	21,494143
		Long. Oeste	64,732268			Long. Oeste	64,71572
11	Rancho Norte	Lat. Sur	21,475829	26	Lourdes	Lat. Sur	21,516262
		Long. Oeste	64,759424			Long. Oeste	64,72413
12	Rancho Norte	Lat. Sur	21,475734	27	El Tejar	Lat. Sur	21,545229
		Long. Oeste	64,759502			Long. Oeste	64,721968
13	Padcaya	Lat. Sur	21,88309	28	La Choza	Lat. Sur	21,664303
		Long. Oeste	64,709381			Long. Oeste	64,620454
14	San Jacinto	Lat. Sur	21,581351	29	Constructor	Lat. Sur	21,517651
		Long. Oeste	64,722129			Long. Oeste	64,711615
15	El Trigal	Lat. Sur	21,506575	30	San Isidro	Lat. Sur	21,64793
		Long. Oeste	64,710165			Long. Oeste	64,646996

Fuente: Elaboración propia

3.3.1. Extracción de muestras de suelo

El objetivo es realizar el muestreo adecuado y representativo, para realizar los ensayos en laboratorio y así poder determinar de forma correcta las características y propiedades del suelo.

3.3.2. Material utilizado

El material utilizado para la extracción de muestras fue el siguiente:

- Pala
- Picota
- Bolsas
- Papel fild
- Cincel
- Combo

Figura 3.3: Material para extracción de muestras



Fuente: Elaboración propia

3.3.3. Procedimiento de extracción de muestras de suelo

El procedimiento para la extracción de muestras de suelo se realizó de la siguiente manera:

- Verificación de los puntos
- Limpieza y excavación
- Extracción de las muestras

Figura 3.4: Bancos de muestras



Fuente: Elaboración propia

3.4. Propiedades del suelo en estudio

Los suelos presentan diferentes propiedades, a continuación, se estudian sus propiedades más relevantes en la ingeniería civil.

3.4.1. Ensayo contenido de humedad ASTM D2216

El contenido de humedad, se define como la cantidad de agua que se encuentra dentro de una muestra de suelo y que luego de someterlo a elevadas temperaturas se puede conocer su valor, el mismo que se representa en porcentaje.

Figura 3.5: Colocado de muestra al horno



Fuente: Elaboración propia

Se utilizó el método estandarizado del horno; colocando muestra de suelo natural en tres capsulas previamente identificadas registrando su peso, depositar la muestra dentro de cada capsula para pesar en la balanza de precisión registrando el peso de suelo húmedo más el peso de la capsula. Introducir las capsulas con suelo al horno durante 24 horas. Extraer del horno y pesar, registrando el valor obtenido de peso de suelo seco más peso de la capsula.

Figura 3.6: Ensayo contenido de humedad



Fuente: Elaboración propia

Contenido de humedad natural

Muestra 1: Barrio Miraflores

Tabla 3.2: Contenido de humedad

HUMEDAD NATURAL			
Cápsula	1	2	3
Peso de suelo húmedo + Cápsula [g]	71,22	105,98	93,79
Peso de suelo seco + Cápsula [g]	67,17	99,85	88,64
Peso de cápsula [g]	11,89	12,59	13,82
Peso de suelo seco [g]	55,28	87,26	74,82
Peso del agua [g]	4,05	6,13	5,15
Contenido de humedad [%]	7,33	7,02	6,88
Promedio	7,08		

Fuente: Elaboración propia

Resumen de resultados del contenido de humedad de las muestras estudiadas.

Tabla 3.3: Resumen contenido de humedad natural

Muestra	Contenido de humedad [%]	Muestra	Contenido de humedad [%]
1	7,08	16	7,28
2	7,08	17	7,08
3	7,41	18	8,13
4	13,12	19	11,45
5	13,89	20	10,97
6	8,73	21	5,69
7	17,7	22	12,39
8	12,03	23	11,58
9	6,81	24	7,08
10	2,58	25	5,55
11	19,44	26	12,99
12	8,62	27	9,49
13	24,51	28	20,62
14	11,79	29	18,34
15	8,58	30	7,08

Fuente: Elaboración propia

3.4.2. Análisis granulométrico ASTM D422 AASHTO T88

El suelo fino debe ser lavado por el tamiz N° 200 debido a la presencia de terrones.

Figura 3.7:Ensayo de granulometría



Fuente: Elaboración propia

Pesamos muestra de suelo natural seca, bien triturada.

Colocamos la muestra en una bandeja, dejamos saturando por 24 horas, para realizar el método del lavado, para lograr que pasen todas las partículas que sean de menor tamaño al diámetro del tamiz.

Luego el material retenido en el tamiz N° 200 se dispone en un recipiente para proceder con el secado del mismo por un tiempo de 24 horas.

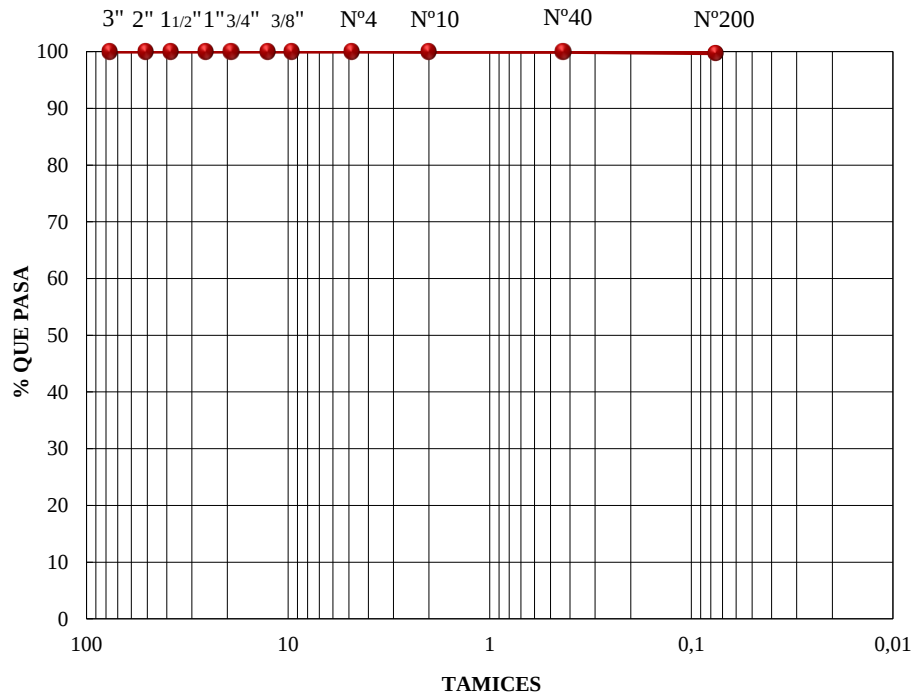
Una vez secado y a temperatura ambiente tamizamos la muestra.

Granulometría

Muestra 1: Barrio Miraflores

Peso total [g] = 2000

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	0,37	0,37	0,02	99,98
Nº40	0,43	0,29	0,66	0,03	99,97
Nº200	0,075	5,07	5,73	0,29	99,71



Resumen de resultados de granulometría de las muestras estudiadas.

Tabla 3.4: Resumen de granulometría

Muestra	Porcentaje que pasa el tamiz			
	Nº 4	Nº 10	Nº 40	Nº 200
1	100	99,98	99,97	99,71
2	100	99,96	99,4	98,42
3	100	100	99,97	99,95
4	100	100	99,93	99,43
5	100	99,67	98,69	96,69
6	100	99,99	98,32	96,14
7	100	100	99,23	92,11
8	100	100	99,96	99,59
9	100	100	95,2	54,97
10	100	100	99,98	99,62
11	100	100	99,96	96,36
12	99,95	99,77	99,48	97,21
13	100	100	99,95	99,24
14	100	99,99	99,97	93,21
15	100	100	99,95	99,93
16	100	100	84,31	63,58
17	100	99,97	99,5	98,94
18	100	100	99,72	94,13
19	100	100	96,99	83,19
20	100	99,99	98,83	97,53
21	100	99,96	87,46	70,21
22	100	99,86	98,54	86,61
23	100	99,766	999,47	98,53
24	100	99,98	98,61	88,11
25	100	100	99,98	98,84
26	100	99,98	99,96	69,38
27	100	99,96	98,59	97,34
28	99,995	99,89	99,39	98,17
29	100	100	99,95	98,65
30	99,8	99,69	98,93	97,68

Fuente: Elaboración propia

3.4.3. 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 3.8: Materiales para la determinación de los límites de consistencia



Fuente: Elaboración propia

Trabajamos una muestra de suelo seco, fracción que pasa la malla N° 40.

Agregamos agua, logrando una pasta manejable eliminando el aire atrapado en la muestra.

Mediante el aparato de Casagrande, cuando el suelo dividido por un ranurador dispuesto dentro de la copa, a medida que se va agregando agua, se va cerrando la ranura aplicando golpes en una superficie de impacto. El límite líquido se alcanza cuando la ranura se cierra por completo después de 25 golpes.

Figura 3.9: 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 3.10: Ensayo límite plástico



Fuente: Elaboración propia

Trabajamos muestra seca que pasa la malla N° 40, agregamos agua hasta obtener una masa suave y manejable.

Con la mano se realizan rollitos de arcilla de tres milímetros de diámetro, comienzan a aparecer pequeños agrietamientos, indicador suficiente de que el suelo ya se encuentra en la humedad del límite buscado.

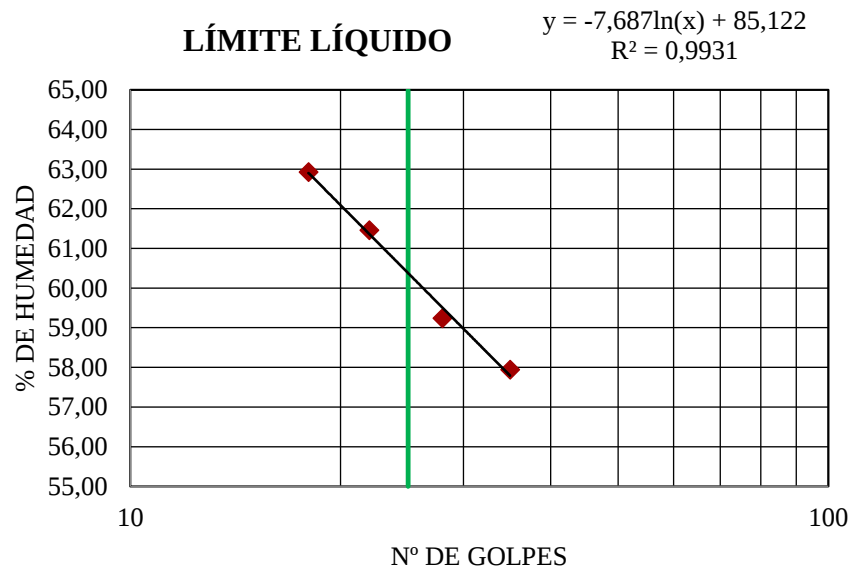
Secar las muestras por 24 horas, registrando sus pesos húmedos y secos.

Límites de Atterberg

Muestra 1: Barrio Miraflores.

Determinación de Límite Líquido

Capsula N°	1	2	3	4
N° de golpes	18	22	28	35
Suelo Húmedo + Cápsula [g]	32,47	34,00	33,78	32,51
Suelo Seco + Cápsula [g]	26,7	26,68	27,69	26,16
Peso del agua [g]	5,77	7,32	6,09	6,35
Peso de la Cápsula [g]	17,53	14,77	17,41	15,2
Peso Suelo seco [g]	9,17	11,91	10,28	10,96
Porcentaje de Humedad [%]	62,92	61,46	59,24	57,94



Límite líquido (LL)	60
Límite plástico (LP)	31
Índice de plasticidad (IP)	29

Luego de realizados los ensayos de límite líquido y plástico en las muestras de suelo, se obtuvo los siguientes resultados:

Tabla 3.5: Resumen límites de Atterberg

Muestra	Límite líquido [%]	Límite plástico [%]	Índice de plasticidad [%]
1	60	31	29
2	43	28	15
3	62	30	32
4	44	21	23
5	47	19	29
6	33	24	10
7	50	25	25
8	57	50	7
9	27	23	5
10	45	28	17
11	31	25	6
12	43	27	16
13	70	44	26
14	33	23	11
15	47	29	18
16	24	13	11
17	37	24	12
18	29	18	10
19	33	23	10
20	40	32	8
21	22	15	7
22	26	19	6
23	39	32	7
24	25	21	4
25	29	14	16
26	23	19	4
27	35	17	18
28	49	26	23
29	43	23	20
30	52	25	27

Fuente: Elaboración propia

3.4.4. Clasificación de los suelos ASTM D2487

Se clasificó las muestras de suelo mediante sistema SUCS, estos describen y clasifican los suelos en base en sus características físicas y mecánicas.

Tabla 3.6: Resumen clasificación de los suelos

Muestra	Clasificación	Muestra	Clasificación
1	MH	16	CL
2	ML	17	CL
3	CH	18	CL
4	CL	19	CL
5	CL	20	ML
6	ML	21	CL
7	CH	22	ML
8	MH	23	ML
9	ML	24	ML
10	ML	25	CL
11	ML	26	ML
12	ML	27	CL
13	MH	28	CL
14	CL	29	CL
15	ML	30	CH

Fuente: Elaboración propia

3.5. Pruebas de corte directo CD (Consolidado Drenado) ASTM D3080

Figura 3.11:Equipo de corte directo

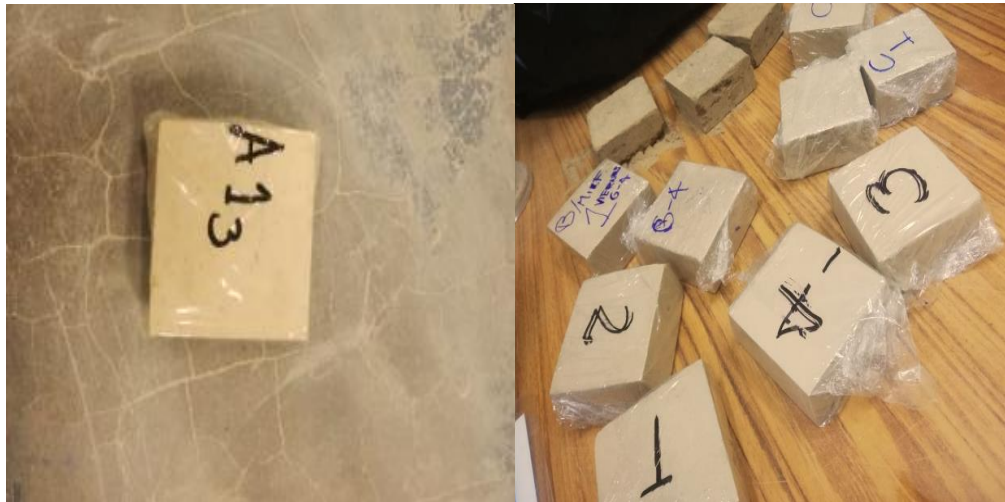


Fuente: Elaboración propia

En primer lugar, se tallaron las muestras de suelo inalteradas 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.

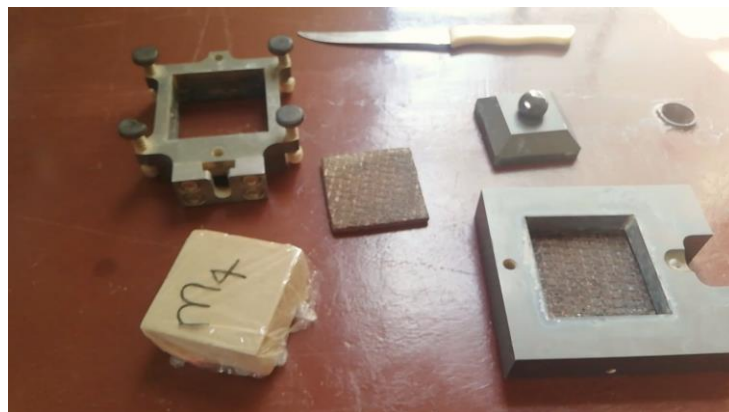
Figura 3.12: Muestras talladas



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 3.13: Caja de corte y accesorios



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.

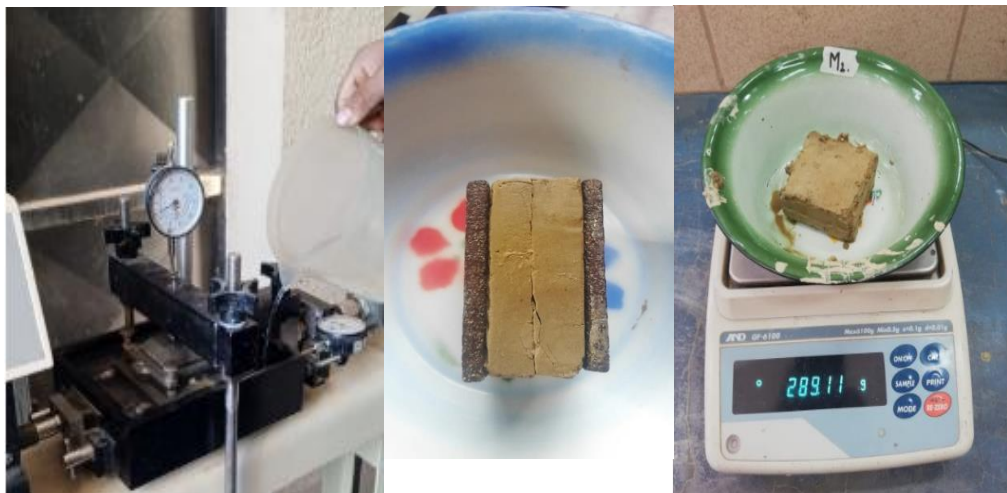
Figura 3.14: Muestra después del ensayo



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 3.15: Ensayo de Corte Directo



Fuente: Elaboración propia

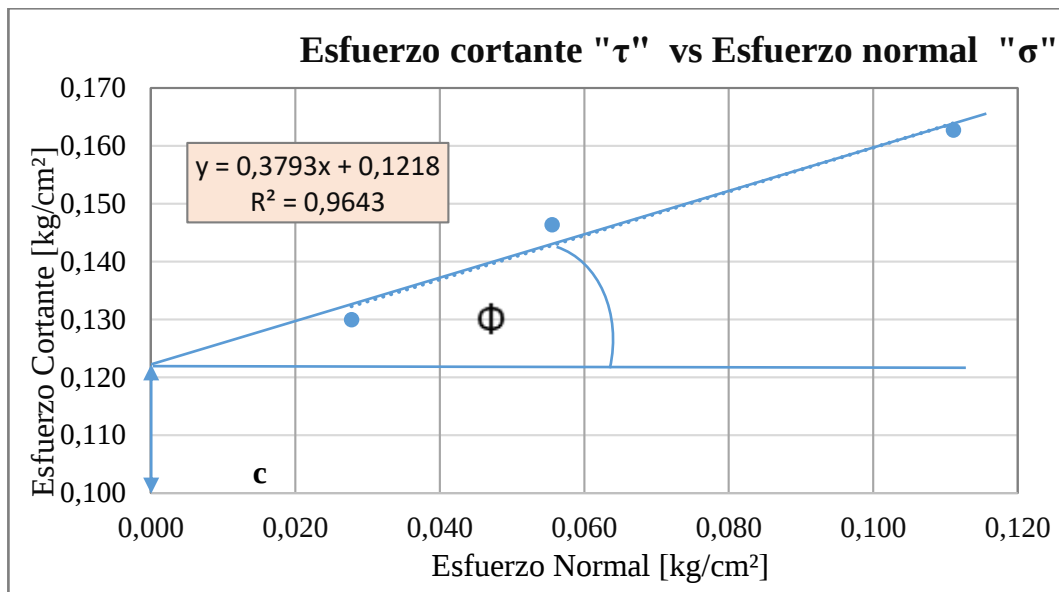
Ensayo de corte directo

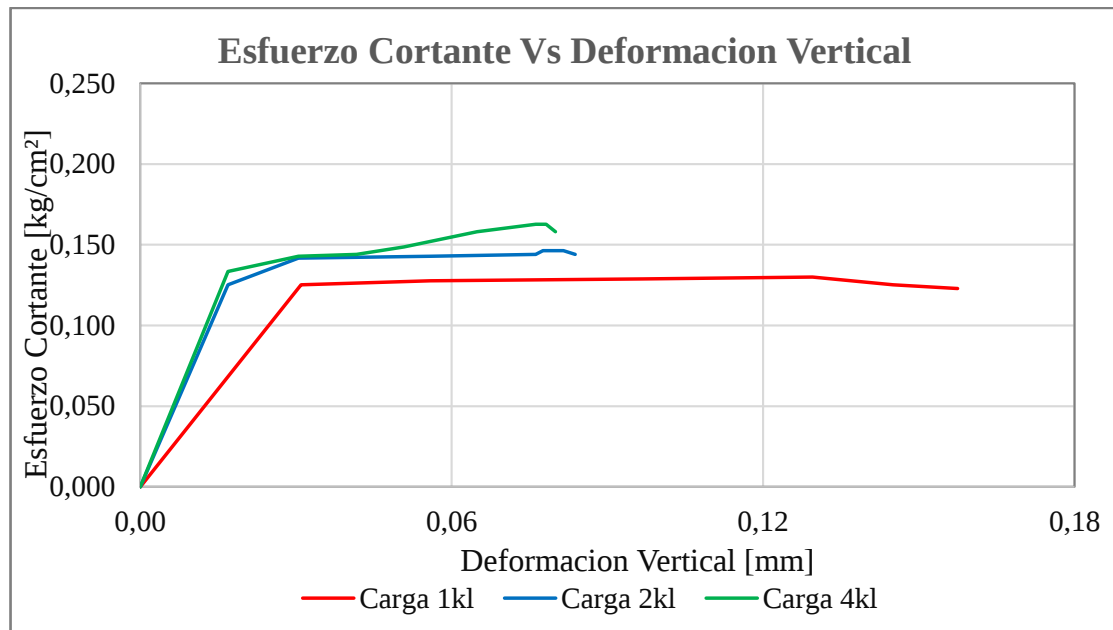
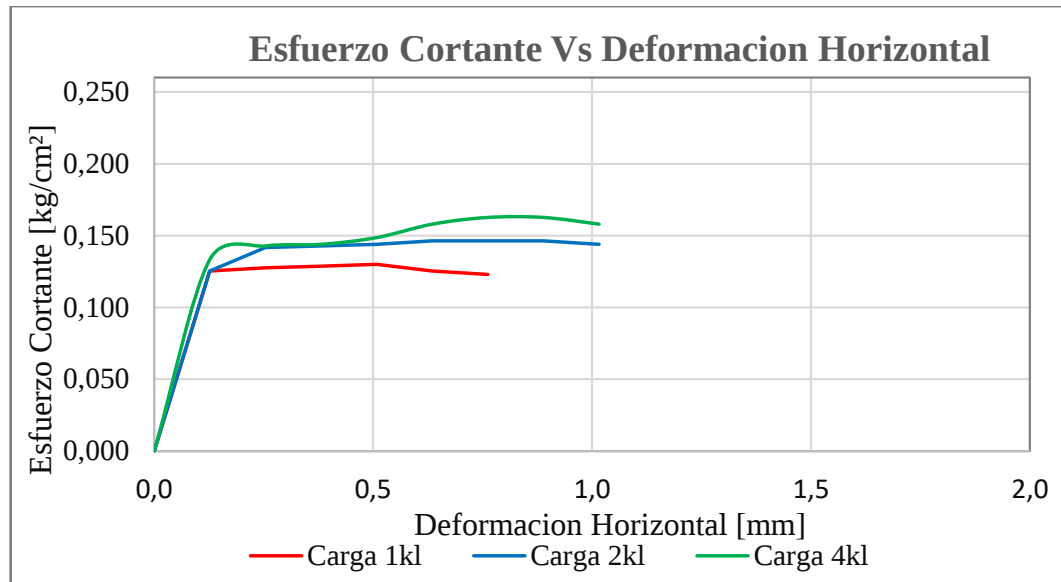
Muestra 5: Barrio San Blas

		Descripción muestra											Ext. Vertical ["] =		0,0001	
		Lado probeta		[cm] =	6	Anillo de prueba		Nº =	1	Ext. Horizontal ["]=			0,001			
		Área probeta		[cm²] =	36,00	Fac. De calibr.		=	-	Condicion 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]	Deformación 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	0,000	0,000	0,000
5	12,20	6,65	6,65	0,80	0,80	1,15	0,127	0,031	0,017	0,017	4,510	4,510	4,805	0,125	0,125	0,133
10	22,00	12,00	12,00	0,90	1,50	2,10	0,254	0,056	0,030	0,030	4,594	5,100	5,606	0,127	0,141	0,155
15	38,10	22,00	16,40	0,95	1,56	1,30	0,381	0,097	0,056	0,042	4,636	5,146	4,931	0,128	0,142	0,137
20	51,00	30,00	20,00	1,00	1,60	1,80	0,508	0,130	0,076	0,051	4,678	5,184	5,353	0,130	0,144	0,148
25	57,10	30,55	25,55	0,80	1,70	2,20	0,635	0,145	0,078	0,065	4,510	5,268	5,690	0,125	0,146	0,158
30	62,00	31,00	30,00	0,70	1,70	2,40	0,762	0,157	0,079	0,076	4,425	5,268	5,858	0,122	0,146	0,162
35		32,10	30,80		1,70	2,40	0,889		0,082	0,078		5,268	5,858		0,146	0,162
40		33,00	31,50		1,60	2,20	1,016		0,084	0,080		5,184	5,690		0,144	0,158

Esfuerzo Normal [kg/cm²]	Esfuerzo de Corte [kg/cm²]
0,028	0,12995
0,056	0,14634
0,111	0,16274

COHESIÓN	ϕ
0,122	20,77





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

Tabla 3.7: Resumen valores de corte directo

Muestra	ϕ [°]	c [kg/cm²]	Muestra	ϕ [°]	c [kg/cm²]
1	24,02	0,128	16	29,64	0,119
2	25,72	0,125	17	26,69	0,126
3	18,32	0,129	18	29,77	0,117
4	26,14	0,127	19	29,64	0,122
5	20,77	0,122	20	27,65	0,124
6	27,65	0,133	21	30,67	0,118
7	23,15	0,129	22	28,45	0,123
8	27,10	0,117	23	27,62	0,124
9	31,56	0,118	24	33,40	0,119
10	27,38	0,132	25	28,59	0,126
11	30,03	0,115	26	32,79	0,116
12	26,55	0,122	27	31,05	0,121
13	25,72	0,139	28	28,98	0,128
14	30,67	0,121	29	28,85	0,124
15	28,85	0,125	30	18,94	0,133

Fuente: Elaboración propia

CAPÍTULO IV

ANÁLISIS DE

RESULTADOS

CAPÍTULO IV

ANÁLISIS DE RESULTADOS

El análisis de los resultados obtenidos mediante los ensayos realizados en el laboratorio, estos se ordenaron según el índice de plasticidad para limos y arcillas para analizar la influencia en los parámetros de corte directo.

4.1. Planteamiento de datos observados

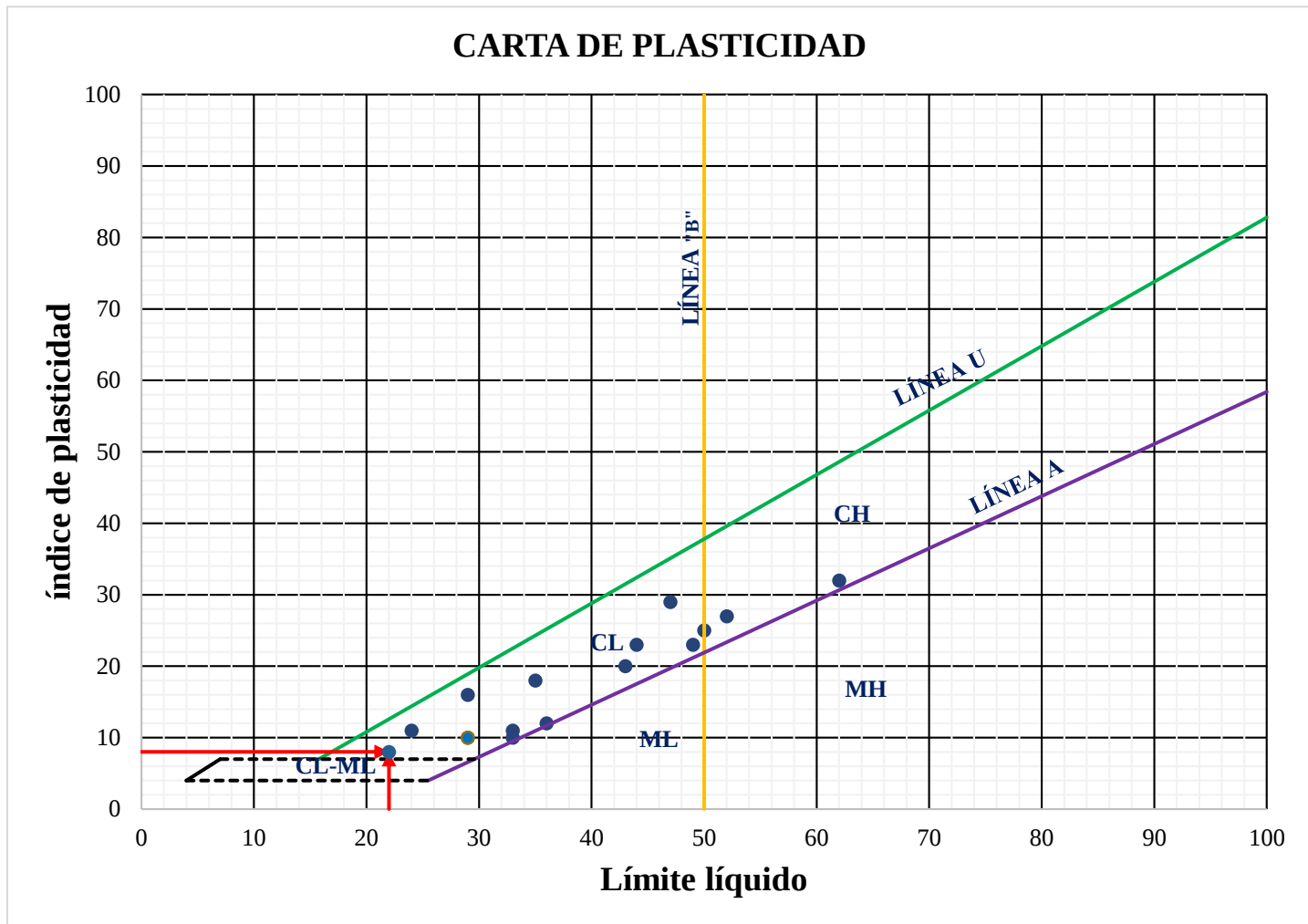
La tabla 4.1 muestra un resumen de las propiedades físicas y mecánicas de suelos arcillosos.

Tabla 4.1:Resumen de resultados de arcilla

Arcillas						
Muestra	Límite líquido	Límite plástico	Índice de plasticidad	Clasificación	ϕ [°]	c [kg/cm ²]
21	22	15	7	CL	30,67	0,118
18	29	18	10	CL	29,77	0,117
19	33	23	10	CL	29,64	0,122
14	33	23	11	CL	30,67	0,121
16	24	13	11	CL	29,64	0,119
17	37	24	12	CL	26,69	0,126
25	29	14	16	CL	28,59	0,126
27	35	17	18	CL	31,05	0,121
29	43	23	20	CL	28,85	0,124
4	44	21	23	CL	26,14	0,127
28	49	26	23	CL	28,98	0,128
7	50	25	25	CH	23,15	0,129
30	52	25	27	CH	18,94	0,133
5	47	19	29	CL	20,77	0,122
3	62	30	32	CH	18,32	0,129

Fuente: Elaboración propia

Figura 4.1:Ubicación de las arcillas en la carta de plasticidad



Fuente: Elaboración propia

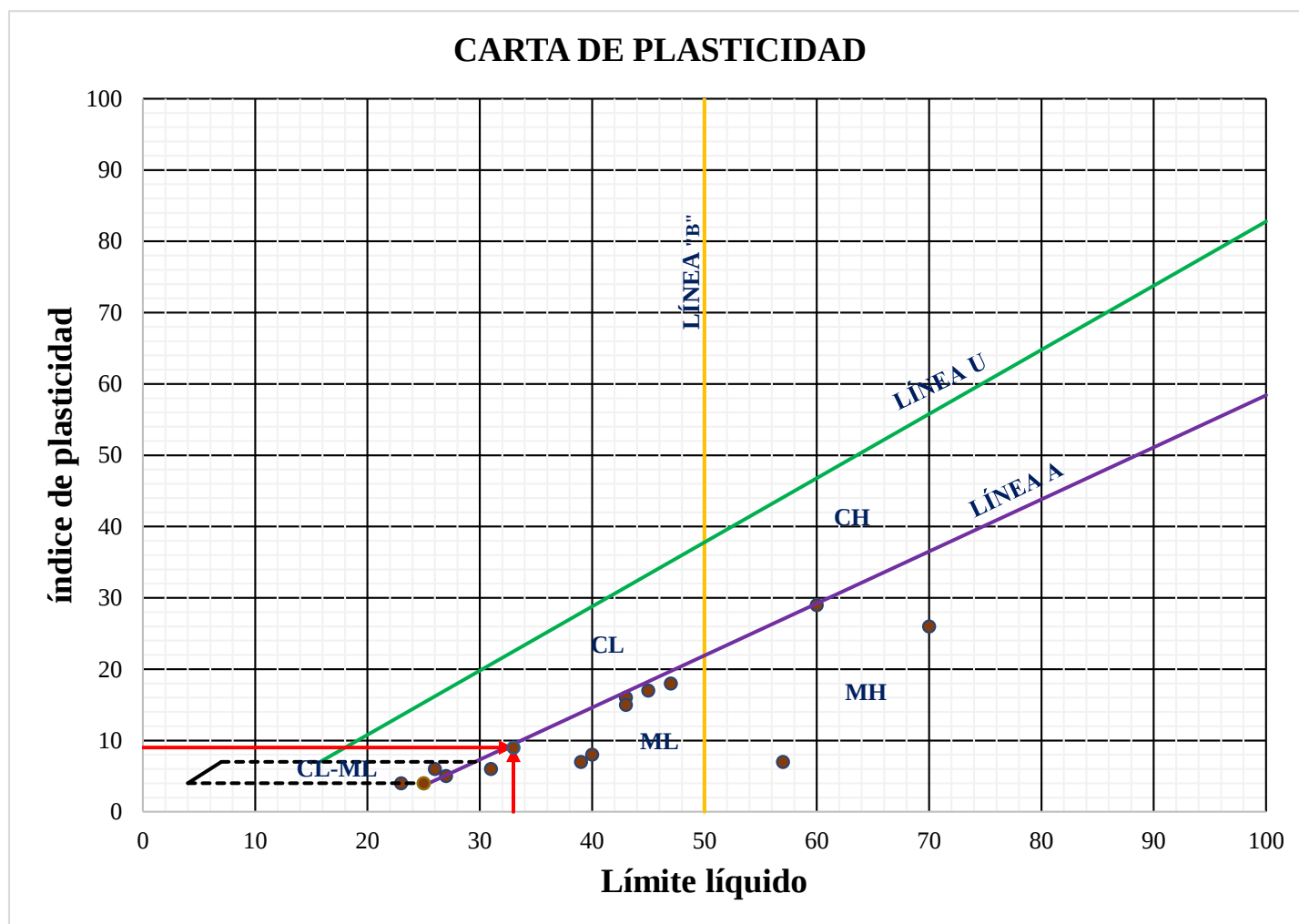
La tabla 4.2 muestra un resumen de las propiedades físicas y mecánicas de suelos limosos.

Tabla 4.2:Resumen de resultados de limos

Limos						
Muestra	Límite líquido	Límite plástico	Índice de plasticidad	Clasificación	ϕ [°]	c [kg/cm²]
24	25	21	4	ML	33,40	0,119
26	23	19	4	ML	32,79	0,116
9	27	23	5	ML	31,56	0,118
11	31	25	6	ML	30,03	0,115
22	26	19	6	ML	28,45	0,123
8	57	50	7	MH	27,10	0,117
23	39	32	7	ML	27,62	0,124
20	40	32	8	ML	27,65	0,124
6	33	24	10	ML	27,65	0,133
2	43	28	15	ML	25,72	0,125
12	43	27	16	ML	26,55	0,122
10	45	28	17	ML	27,38	0,132
15	47	29	18	ML	28,85	0,125
13	70	44	26	MH	25,72	0,139
1	60	31	29	MH	24,02	0,128

Fuente: Elaboración propia

Figura 4.2:Ubicación de los limos en la carta de plasticidad



Fuente: Elaboración propia

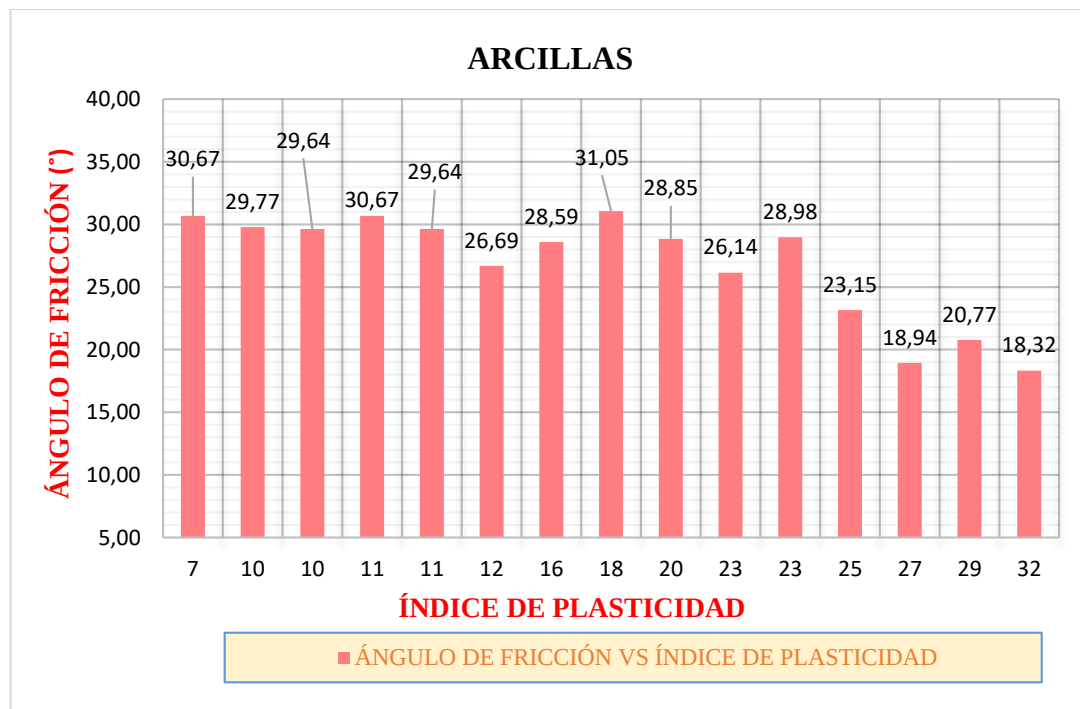
4.2. Análisis preliminar

Se procesa los datos observados mediante planillas y gráficos cuyo objetivo es la funcionalidad y descripción de las características y comportamiento correspondiente.

4.2.1. Comportamiento de los ángulos de fricción según el índice de plasticidad

Se realizará el análisis se realizará en función de las variables de ángulo de fricción e índice de plasticidad.

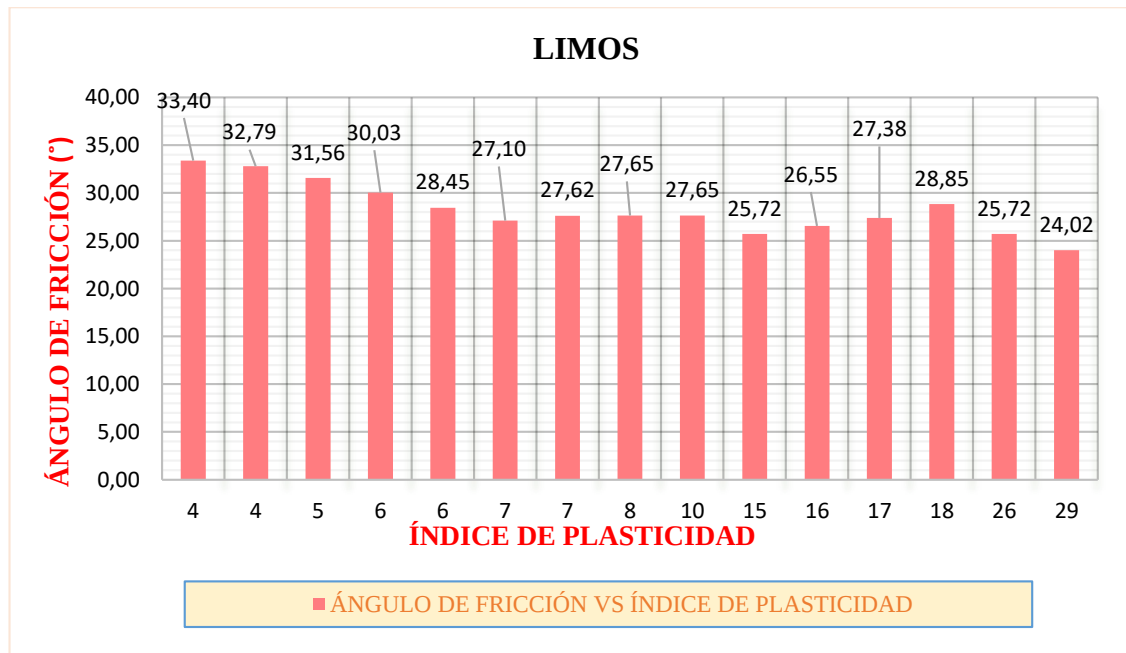
Figura 4.3: Comportamiento ángulos de fricción en arcillas



Fuente: Elaboración propia

La figura 4.3 muestra el comportamiento de los ángulos de fricción con respecto a sus índices de plasticidad de alta, media y baja en 15 muestras de suelos. Estas presentan un coeficiente de variación del índice de plasticidad de 7 a 32, donde se observa un rango en valores de ángulos de fricción de 31,05 ° como valor máximo y un 18,32 ° como valor mínimo.

Figura 4.4:Comportamiento ángulos de fricción en limos



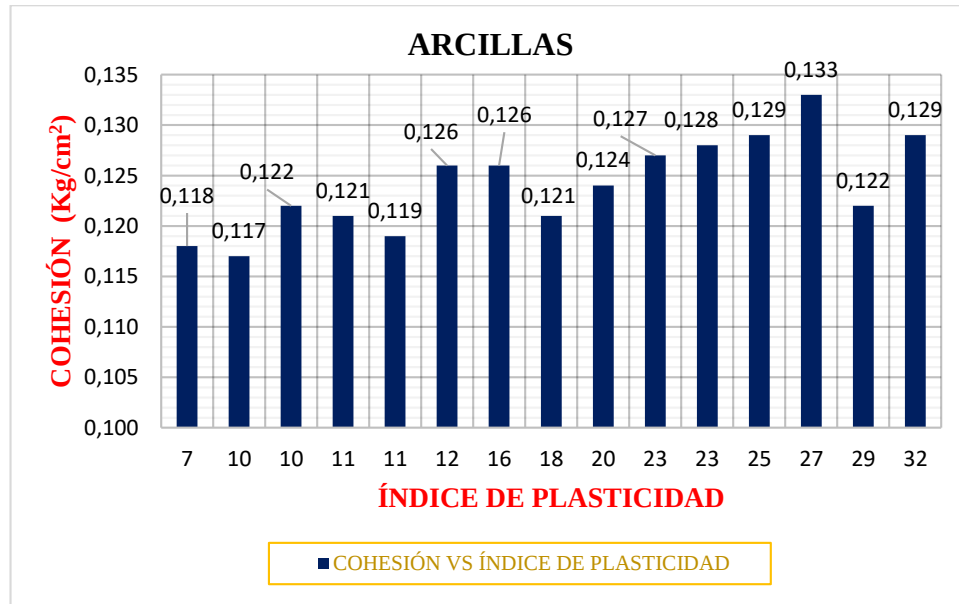
Fuente: Elaboración propia

Los valores de los ángulos de fricción mostrados en la figura 4.4 se deben a la variación del índice de plasticidad entre 4 a 29 en 15 muestras de suelos limosos, que nos permite apreciar una variación en ángulos de fricción de 33,40 ° como valor máximo y 24,02 ° como valor mínimo.

4.2.2. Comportamiento de la cohesión según los índices de plasticidad

Como segundo análisis, se realizará en función a las variables de cohesión e índices de plasticidad para suelos limosos y arcillosos.

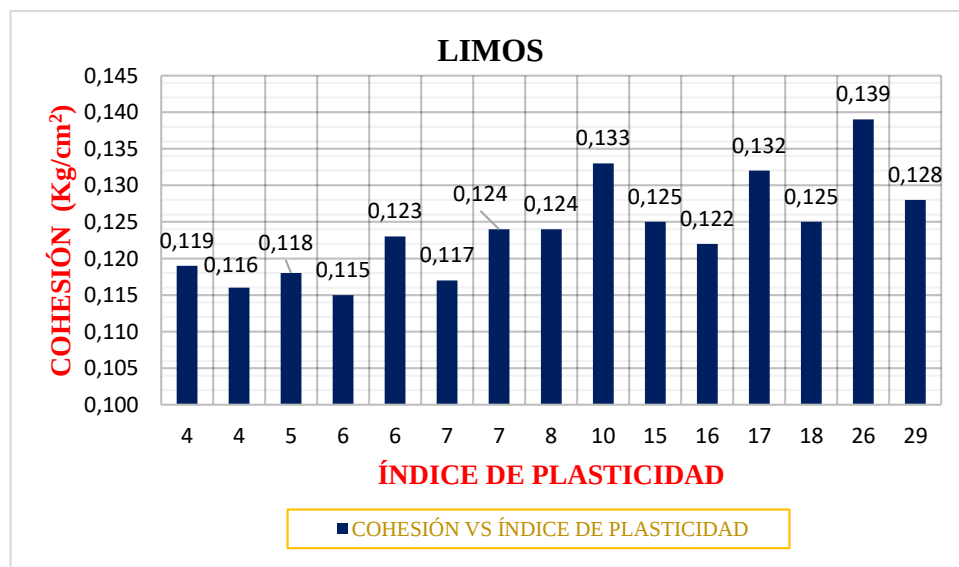
Figura 4.5: Comportamiento de la cohesión en arcillas



Fuente: Elaboración propia

De 15 muestras de arcillas en estudio se obtuvo como resultados valores en los índices de plasticidad entre 7 y 32 presentadas en la figura 4.5 donde se aprecia del índice de plasticidad en los valores de la cohesión con un rango 0,133 kg/cm² como valor máximo y un 0,117 kg/cm² como valor mínimo.

Figura 4.6: Comportamiento de la cohesión en limos



Fuente: Elaboración propia

Como resultados de 15 muestras de suelos limosos en estudio se tiene una variación del índice de plasticidad de 4 hasta 29 según se presenta en la figura 4.6 con valores de cohesión de 0,139 kg/cm² como valor máximo y un 0,115 kg/cm² como valor mínimo.

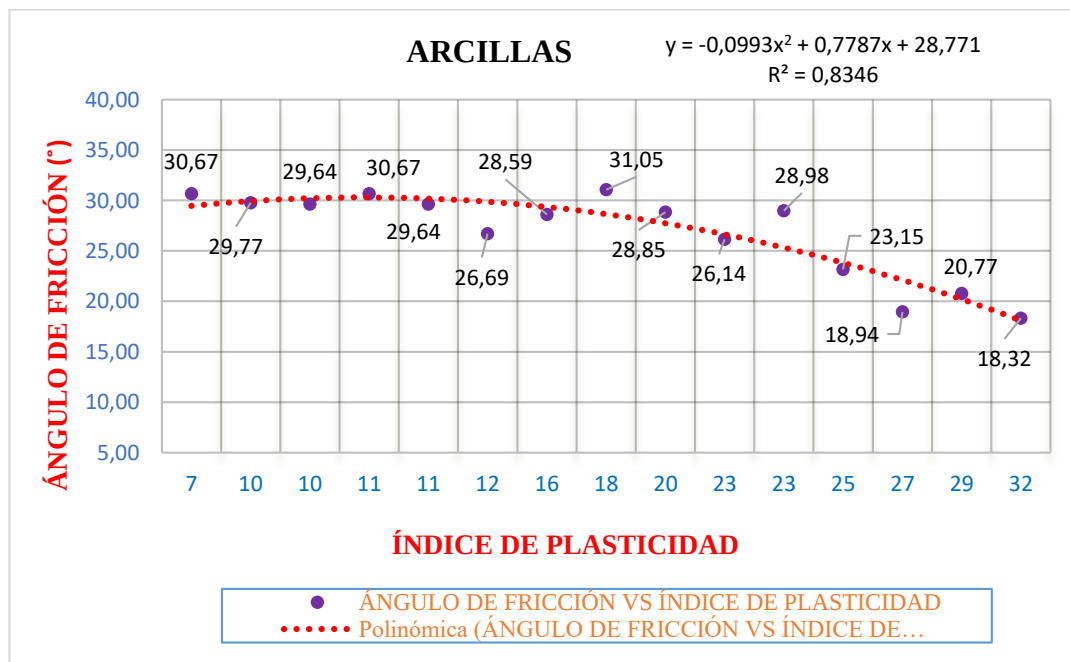
4.3. Análisis de la incidencia de la plasticidad

En este apartado se obtendrán parámetros de índice de plasticidad que influyen significativamente en los parámetros de corte directo en arcillas y limos.

4.3.1. Análisis del índice de plasticidad en arcillas

Se graficó los valores del ángulo de fricción y cohesión en función de la plasticidad para determinar su comportamiento en las arcillas.

Figura 4.7:Ángulos de fricción vs índices de plasticidad en arcillas

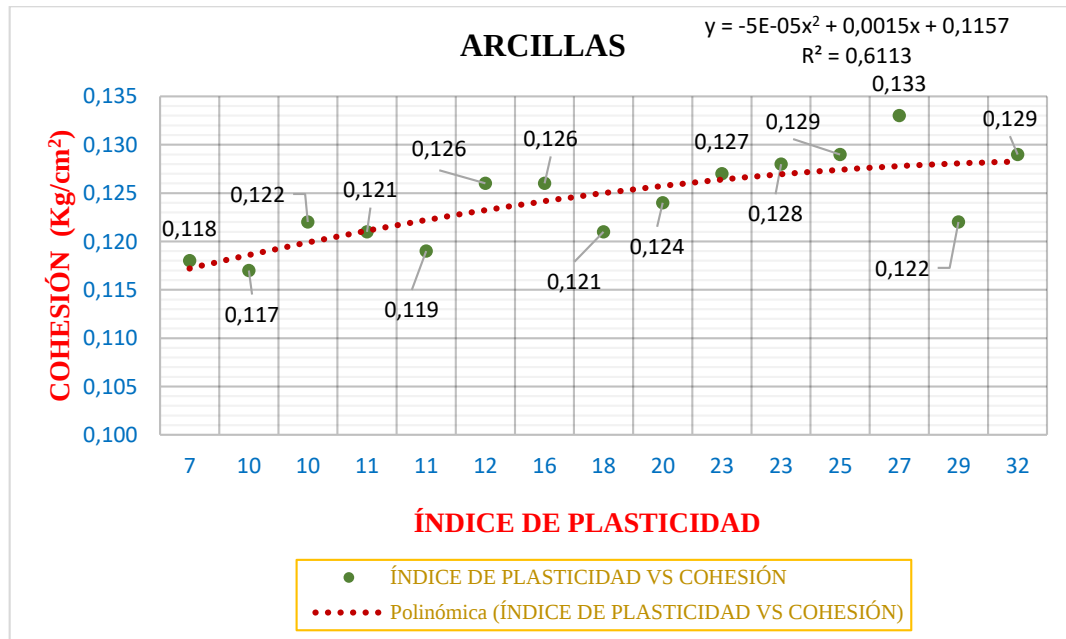


Fuente: Elaboración propia

La figura 4.7 muestra los valores de los ángulos de fricción en las arcillas con respecto al índice de plasticidad, a mayor índice de plasticidad menores valores de ángulos de fricción. El comportamiento matemáticamente se ajusta a una línea de tendencia polinómica.

Existe una relación entre ambas variables, a medida que el ángulo de fricción aumenta con incrementos en el tamaño de partículas, por tanto, el índice de plasticidad alto implica la presencia de partículas finas, lo que da como resultado un ángulo de fricción bajo, a medida que va reduciendo el índice de plasticidad se obtiene valores de ángulos de fricción más elevados.

Figura 4.8: Cohesión vs índice de plasticidad en arcillas



Fuente: Elaboración propia

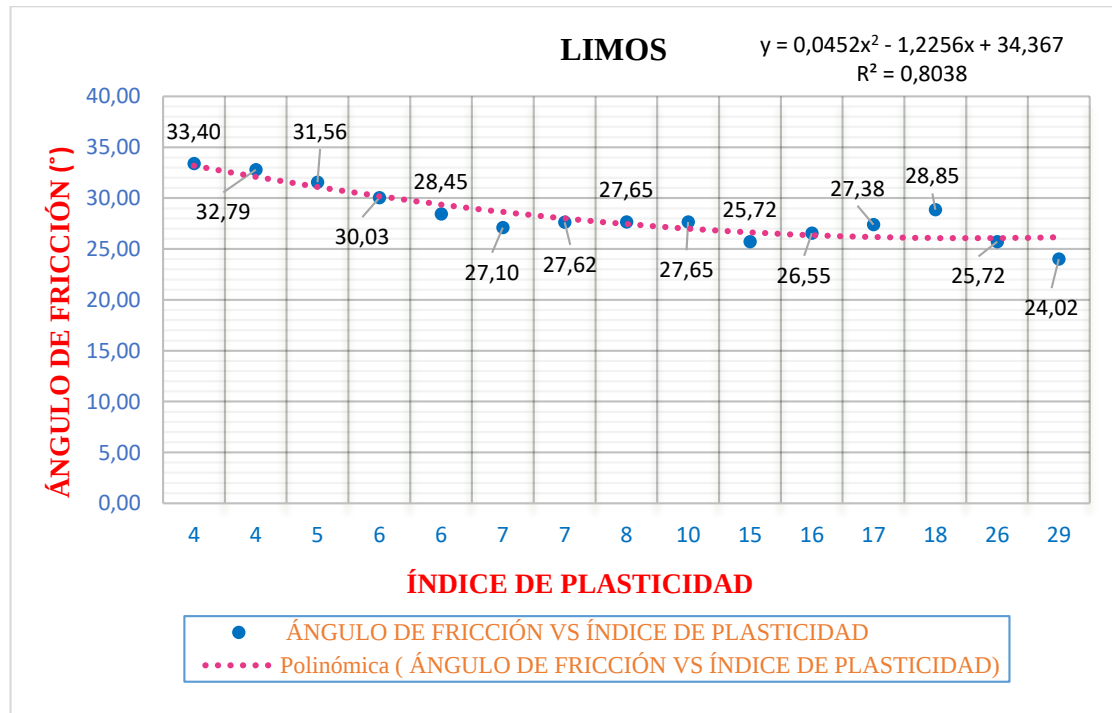
En la figura 4.8 se puede observar que los valores de cohesión van ascendiendo a medida que van aumentando los índices de plasticidad. El comportamiento matemáticamente se ajusta a una línea de tendencia polinómica.

Existe una relación directa entre el índice de plasticidad y la cohesión en suelos arcillosos, de manera que en valores altos de índice de plasticidad será mayor la cohesión entre las partículas del suelo. Los suelos arcillosos de alta plasticidad generan mayores valores de cohesión comparados con las arcillas de baja plasticidad. Es decir que los suelos arcillosos presentan una baja permeabilidad, pero una alta cohesión. Donde el índice de plasticidad viene siendo la diferencia entre el límite líquido y el límite plástico de un suelo, por lo tanto, a mayor diferencia obtendremos mayores valores de cohesión.

4.3.2. Análisis de la incidencia de la plasticidad en limos

Se graficó los valores del ángulo de fricción y cohesión en función de la plasticidad para determinar su comportamiento en limos.

Figura 4.9:Ángulos de fricción vs índice de plasticidad en limos

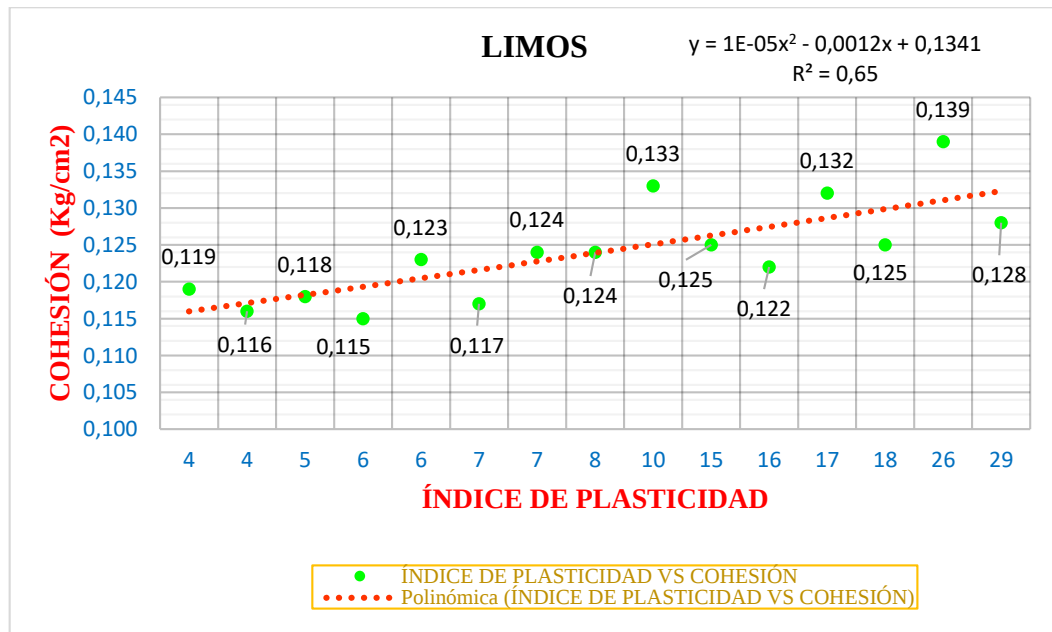


Fuente: Elaboración propia

Los valores ángulos de fricción mostrados en la figura 4.9 van descendiendo a medida que aumenta el índice de plasticidad de los limos generando una línea de tendencia descendente que se ajusta matemáticamente a una ecuación polinómica.

El índice de plasticidad tiene una incidencia importante en el ángulo de fricción de los suelos limosos, cuando se presentan valores elevados en los índices de plasticidad obtendremos menores valores de ángulos de fricción. Esto debido al alto contenido de partículas finas que inciden directamente en la estabilidad y resistencia del suelo.

Figura 4.10: Cohesión vs índice de plasticidad en limos



Fuente: Elaboración propia

En la figura 4.10 la cohesión tiende a aumentar a medida que el índice de plasticidad aumenta, se ajusta a una línea de tendencia polinómica que va ascendiendo conforme va aumentando el índice de plasticidad de los limos. Es decir, a mayores índices de plasticidad en un suelo limoso se generan mayores valores de cohesión, debido a la predominancia de partículas finas de arcilla sobre las de limo, además que los suelos limosos son considerados de una categoría intermedia entre los arenosos y los arcillosos pues poseen algo de plasticidad y cohesión debido a que en su composición tienen algo de arcilla.

Se generan picos en medio de la gráfica debido a que la cohesión aumenta considerablemente en suelos limosos con bastante presencia de arcilla.

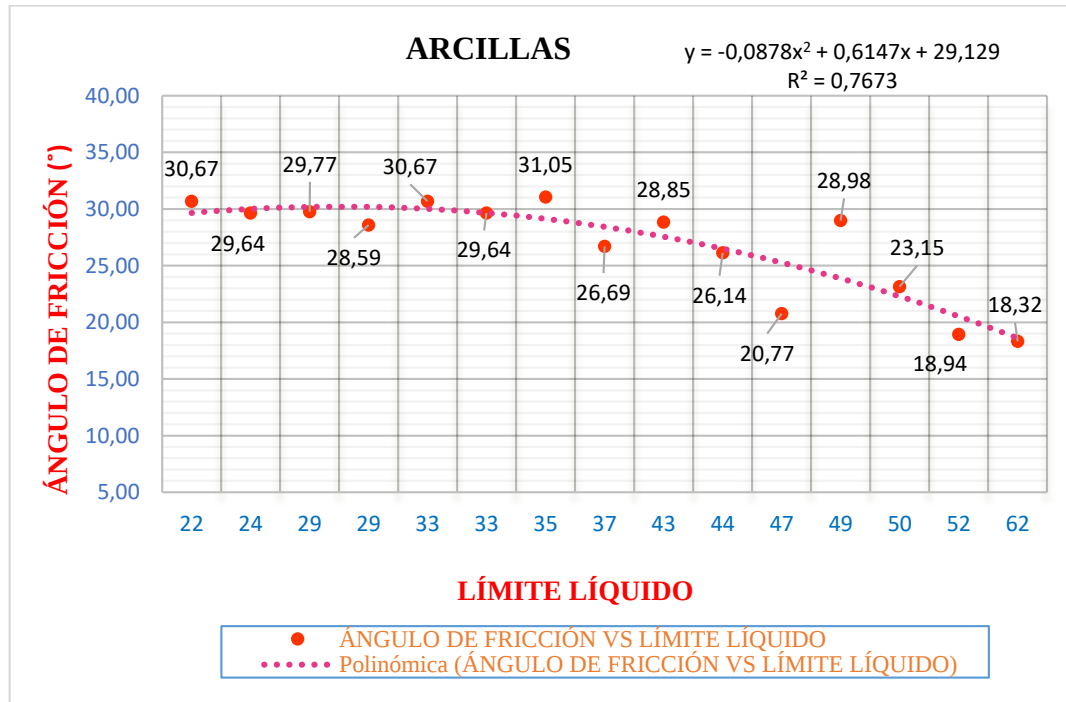
4.4. Análisis de la incidencia del límite líquido

En esta sección se obtendrán parámetros de límite líquido que influyen significativamente en los parámetros de corte directo en arcillas y limos.

4.4.1. Análisis del límite líquido en arcillas

Se graficó los valores del ángulo de fricción y cohesión en función del límite líquido para determinar su comportamiento en arcillas.

Figura 4.11: Ángulo de fricción vs límite líquido en arcillas



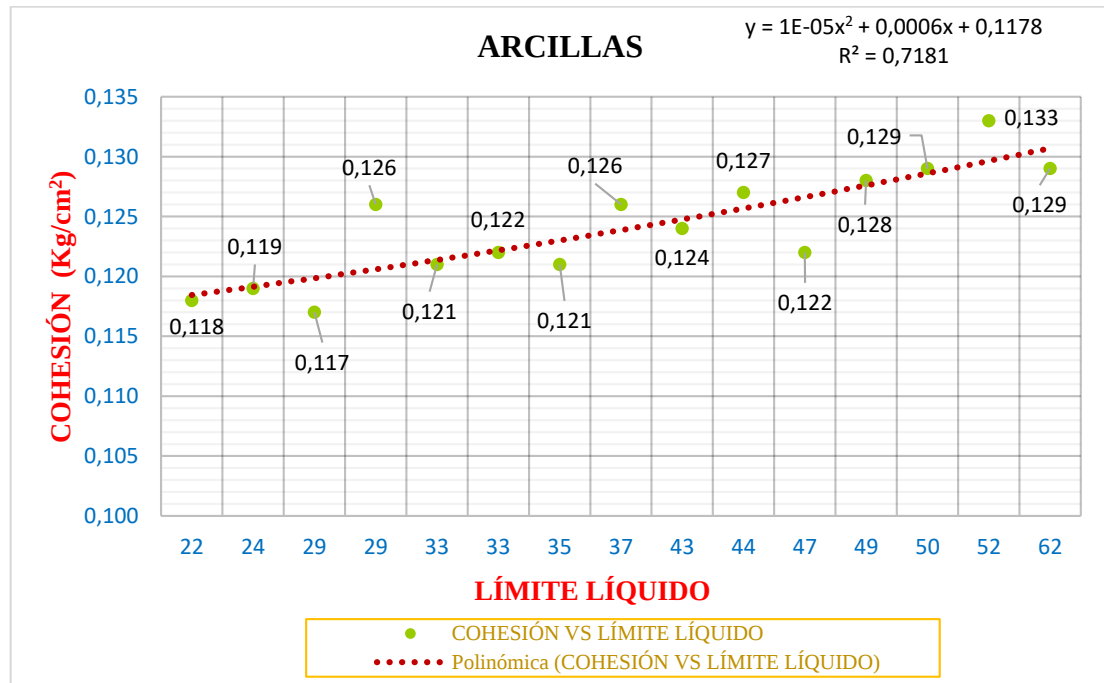
Fuente: Elaboración propia

La figura 4.11 presenta una tendencia descendente de los valores de ángulos de fricción, a medida que aumenta el límite líquido reducen los ángulos en las arcillas, generando una línea de tendencia polinómica descendente.

La relación entre el límite líquido y el ángulo de fricción en arcillas es significativa debido a que el ángulo de fricción drenado disminuye con el aumento del límite líquido por tanto el ángulo de fricción tiende a disminuir a medida que el límite líquido aumenta generando un comportamiento inversamente proporcional en valores de ángulos de fricción en función a valores de límite líquido.

En general el ángulo de fricción interna de los suelos puede variar con los cambios o porcentajes de humedad de los suelos, especialmente en los suelos arcillosos en relación al límite líquido.

Figura 4.12: Cohesión vs límite líquido en arcillas



Fuente: Elaboración propia

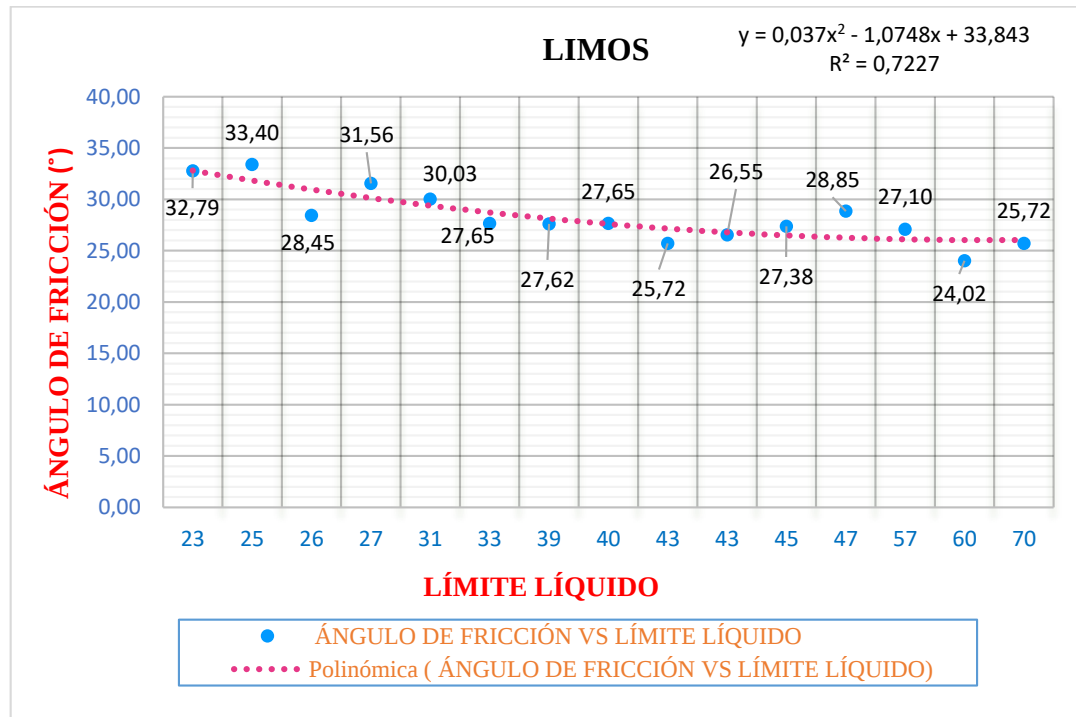
La figura 4.12 muestra que los valores de cohesión en las arcillas aumentan conforme va aumentando el límite líquido, dando como resultado una línea de tendencia polinómica ascendente, siendo directamente proporcional en ambos parámetros.

El límite líquido está estrechamente relacionado con la cohesión del suelo arcilloso, este parámetro es crucial para medir la cohesión potencial de un suelo, ya que la cohesión dependerá de la humedad presente en el suelo, el límite líquido es un indicador clave de la capacidad del suelo para mantener su cohesión, a la vez es fundamental para comprender la resistencia y el comportamiento del suelo, ya que un pequeño aumento en la humedad sobre este parámetro puede destruir la cohesión del suelo y la capacidad de resistir fuerzas de corte.

4.4.2. Análisis del límite líquido en limos

Se grafican valores de ángulos de fricción y cohesión en función del límite líquido para determinar su comportamiento en limos.

Figura 4.13: Ángulo de fricción vs límite líquido en limos

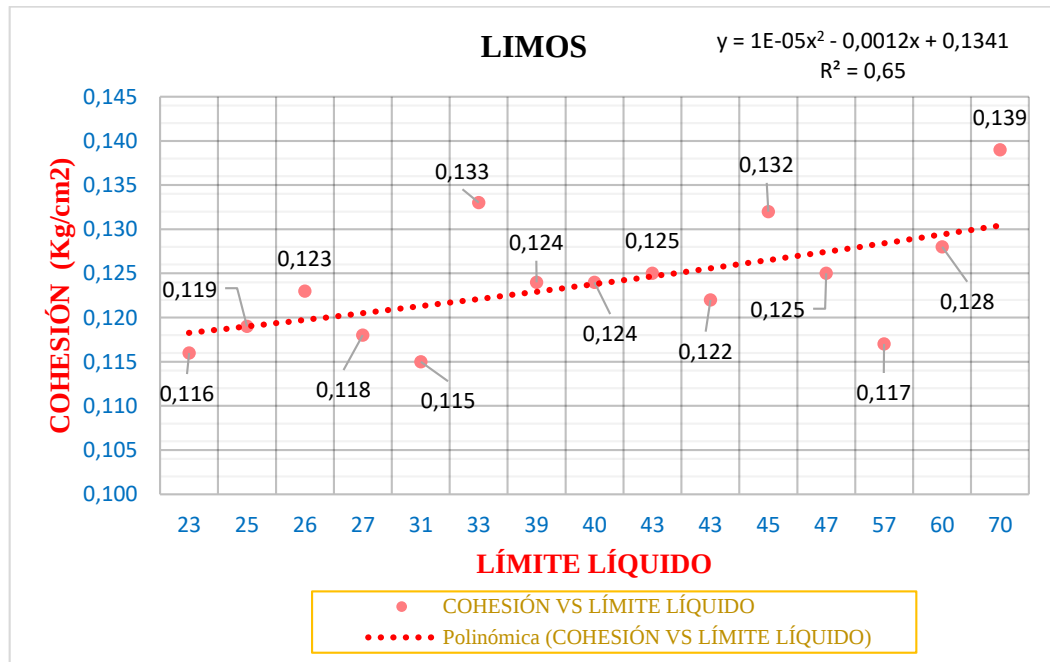


Fuente: Elaboración propia

En la figura 4.13 se observa que a mayor límite líquido generan menores ángulos de fricción, matemáticamente se ajusta a una línea de tendencia polinómica descendente.

El límite líquido influye en el ángulo de fricción en los suelos limosos, cuanto mayor es el límite líquido, menor es el ángulo de fricción del suelo debido a que un límite líquido alto implica una mayor proporción de partículas finas en el suelo, estas se atraen entre si reduciendo la fricción interna generando una menor resistencia al corte.

Figura 4.14: Cohesión vs límite líquido en limos



Fuente: Elaboración propia

Los valores de cohesión mostrados en la figura 4.14 van ascendiendo a medida que aumenta el límite líquido generando una línea de tendencia ascendente que se ajusta matemáticamente a una ecuación polinómica.

El límite líquido tiene una influencia significativa en la cohesión de un suelo limoso, cuanto mayor sea el límite líquido tiende en algunos casos a reducir la cohesión debido a la presencia de un suelo con bastante presencia de limo ya que los limos tienen poca cohesión misma que varía según el contenido de humedad, y se generan mayores valores de cohesión en suelos limosos cuando estos tengan presencia de arcilla.

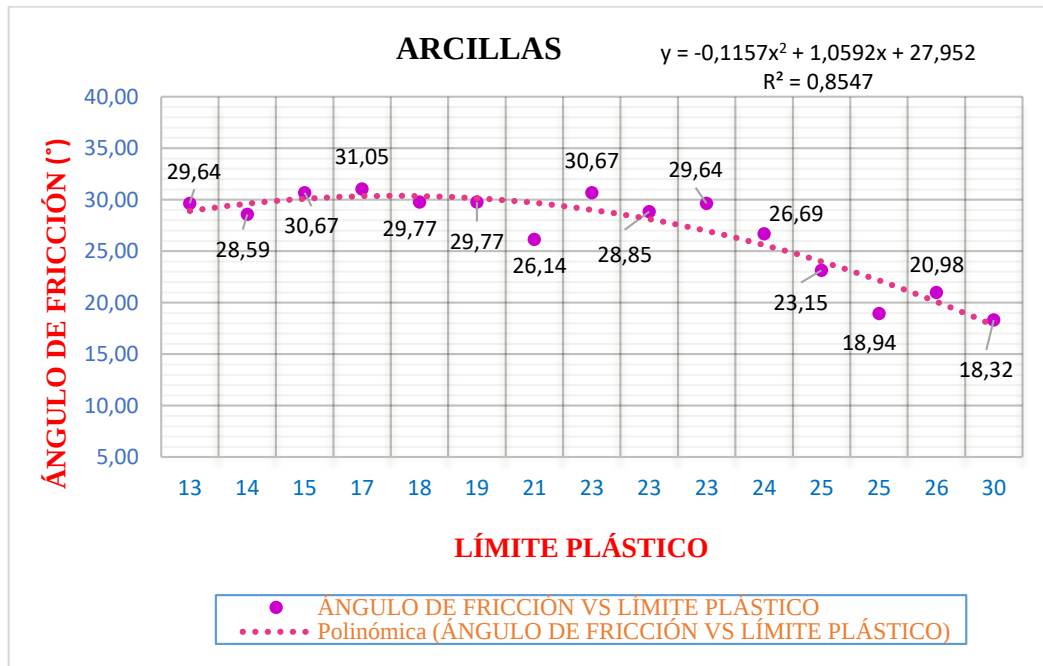
4.5. Análisis de la incidencia del límite plástico

En esta sección se obtendrán parámetros de límite plástico que influyen significativamente en los parámetros de corte directo en arcillas y limos.

4.5.1. Análisis del límite plástico en arcillas

Están dibujados gráficamente los valores del ángulo de fricción y cohesión en función del límite plástico para determinar su comportamiento en arcillas.

Figura 4.15: Ángulo de fricción vs límite plástico en arcillas

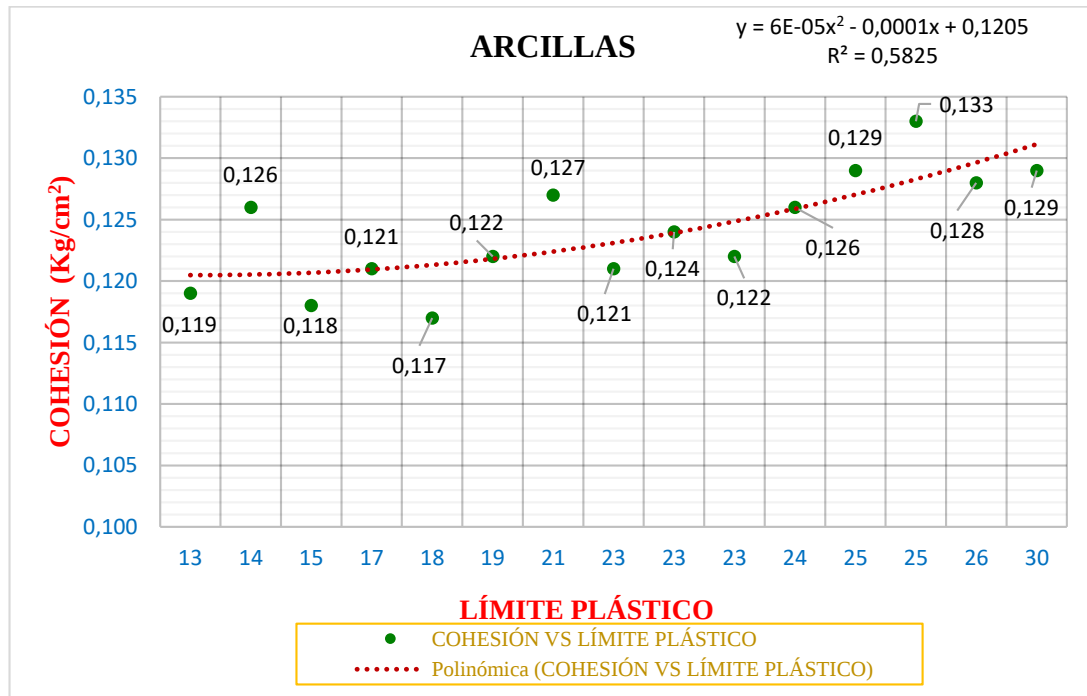


Fuente: Elaboración propia

Los valores de ángulo de fricción mostrados en la figura 4.15 van descendiendo a medida que aumenta el límite plástico generando una línea de tendencia descendente que se ajusta matemáticamente a una ecuación polinómica.

El límite plástico tiene una influencia significativa en los ángulos de fricción de los suelos arcillosos, aumentan los ángulos para valores de límite plástico entre 13 a 23, se puede considerar que tenemos suelos con mayor presencia de partículas finas, cuando aumenta la plasticidad y los ángulos reducen se presentan suelos arcillosos con presencia de limos.

Figura 4.16: Cohesión vs límite plástico en arcillas



Fuente: Elaboración propia

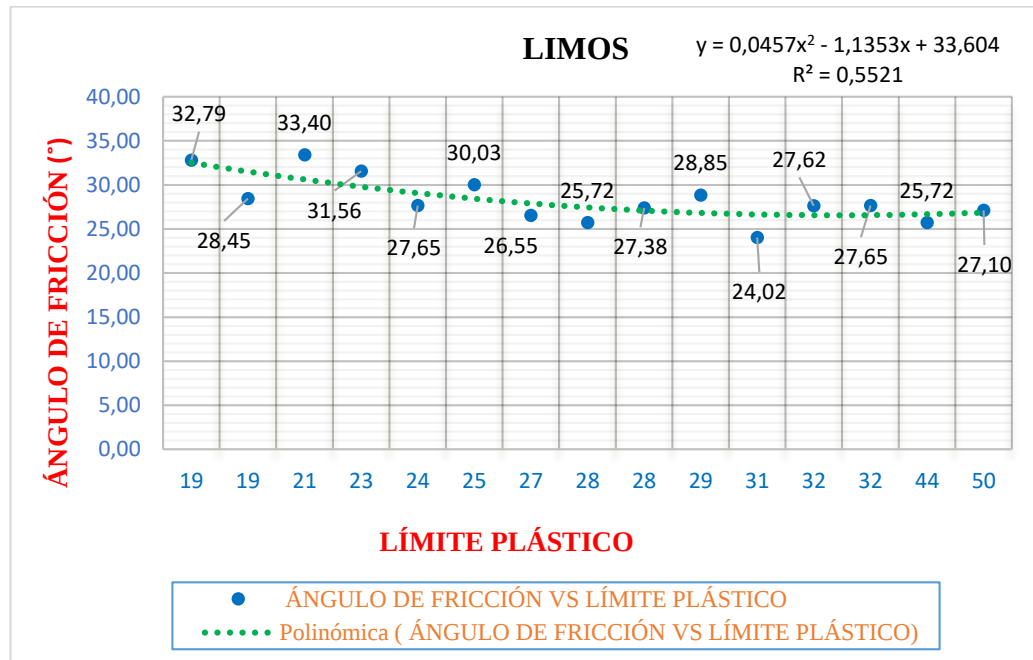
La figura 4.16 muestra que los valores de cohesión en las arcillas aumentan conforme va aumentando el límite plástico, dando como resultado una línea de tendencia polinómica ascendente.

La cohesión aumenta en rangos menores en comparación con los anteriores análisis, no se tiene un comportamiento proporcional, ya que la cohesión también aumenta en ciertos casos cuando el límite plástico reduce, dependiendo del tipo de arcilla y el contenido de arcilla que esta se encuentre presente en la muestra. El límite plástico es un indicador importante de la cohesión entre las partículas de arcilla.

4.5.2. Análisis del límite plástico en limos

Se graficó los valores del ángulo de fricción y cohesión en función del límite plástico para determinar su comportamiento en limos.

Figura 4.17: Ángulo de fricción vs límite plástico en limos

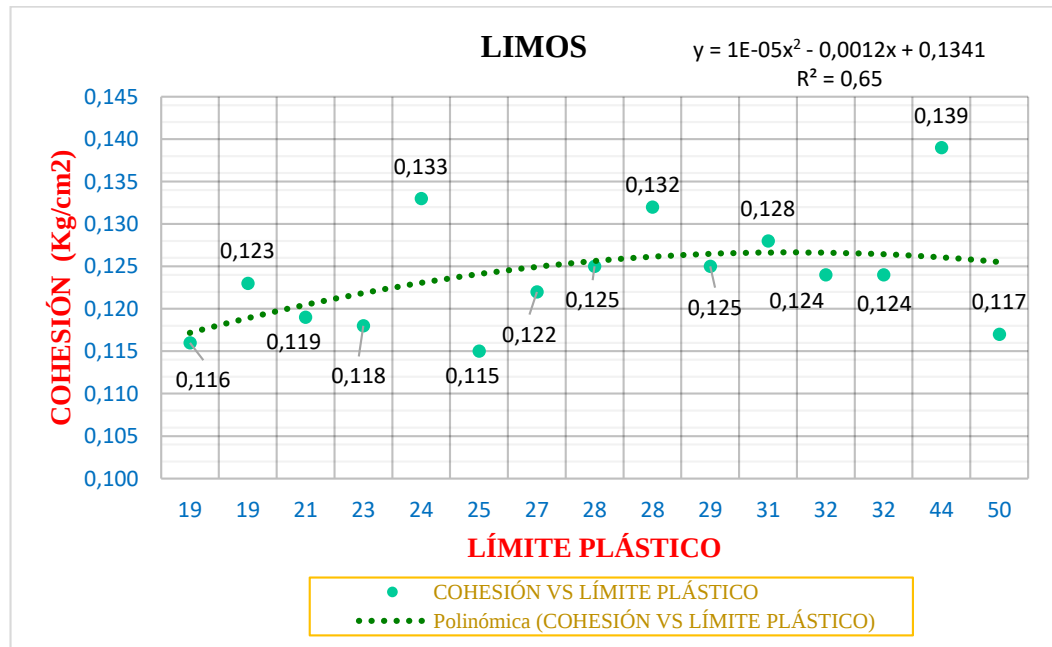


Fuente: Elaboración propia

Los valores de ángulo de fricción mostrados en la figura 4.17 se mantienen generando una línea de tendencia polinómica, esto se debe a que cuando se presentan suelos limosos el ángulo de fricción tiende a aumentar cuando se tienen valores elevados de plasticidad.

Cuando los valores de plasticidad son bajos y los ángulos aumentan se debe a la presencia de arcilla en la muestra de suelo limoso lo cual genera este comportamiento, a mayor límite plástico de un suelo limoso, aumenta su ángulo de fricción debido a la mayor cohesión entre las partículas.

Figura 4.18: Cohesión vs límite plástico en limos

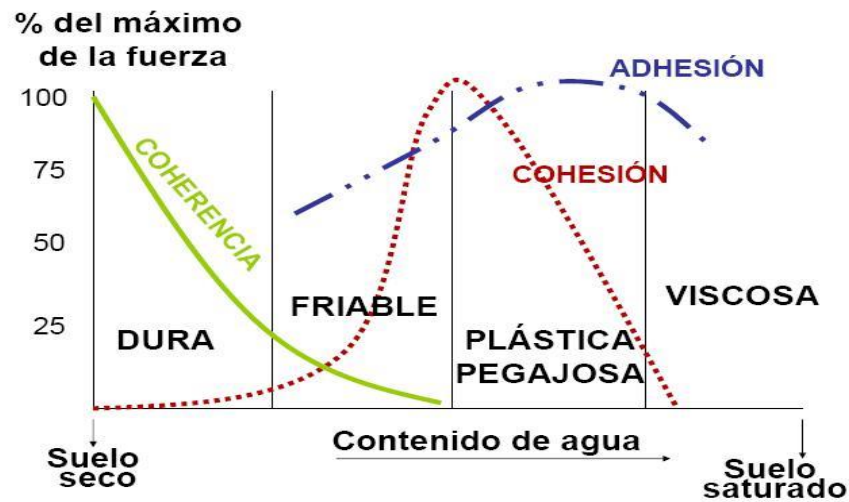


Fuente: Elaboración propia

Los valores de cohesión mostrados en la figura 4.18 se mantienen a medida que aumenta el límite plástico, matemáticamente se ajusta a una línea de tendencia polinómica.

Cuando el límite plástico es mayor, aumenta el rango de humedades en el cual el suelo limoso aumenta la cohesión mínimamente, indica que el suelo puede mantener su cohesión en un rango más amplio de contenidos de humedad, lo cual es deseable para aplicación de ingeniería.

Figura 4.19: Comportamiento de la cohesión en suelos limosos



Fuente: Apuntes de Geotecnia con Énfasis en Laderas: La Consistencia del Suelo

4.6. Análisis estadístico

En este apartado se muestra una serie de datos en estudio para analizarlos e interpretarlos para su mejor comprensión y poder saber que tan confiables son los resultados de los ensayos realizados.

Los datos obtenidos en la recopilación de la información se encuentran entremezclados, unidos tan solo por la secuencia en que fueron obtenidos o anotados, analizarlos en esta secuencia no es conveniente debido que los suelos limosos se comportan de manera diferente a los arcillosos, es por ello que el segundo paso de estadística es la organización de los datos, a fin de simplificar el análisis y poder sacar interpretaciones correctas.

El análisis nos mostrará las semejanzas y las diferencias entre los datos obtenidos, así como las variaciones que se tienen entre sí.

Tabla 4.3: Resumen de datos

Muestra	Límite líquido	Límite plástico	Índice de plasticidad	Clasificación	ϕ [°]	c [kg/cm ²]	Índice de grupo
1	60	31	29	MH	24,02	0,128	20
2	43	28	15	ML	25,72	0,125	11
3	62	30	32	CH	18,32	0,129	21
4	44	21	23	CL	26,14	0,127	14
5	47	19	29	CL	20,77	0,122	17
6	33	24	10	ML	27,65	0,133	8
7	50	25	25	CH	23,15	0,129	16
8	57	50	7	MH	27,10	0,117	11
9	27	23	5	ML	31,56	0,118	4
10	45	28	17	ML	27,38	0,132	12
11	31	25	6	ML	30,03	0,115	8
12	43	27	16	ML	26,55	0,122	11
13	70	44	26	MH	25,72	0,139	20
14	33	23	11	CL	30,67	0,121	8
15	47	29	18	ML	28,85	0,125	13
16	24	13	11	CL	29,64	0,119	6
17	37	24	12	CL	26,69	0,126	9
18	29	18	10	CL	29,77	0,117	8
19	33	23	10	CL	29,64	0,122	8
20	40	32	8	ML	27,65	0,124	8
21	22	15	7	CL	30,67	0,118	7
22	26	19	6	ML	28,45	0,123	8
23	39	32	7	ML	27,62	0,124	8
24	25	21	4	ML	33,40	0,119	8
25	29	14	16	CL	28,59	0,126	10
26	23	19	4	ML	32,79	0,116	7
27	35	17	18	CL	31,05	0,121	11
28	49	26	23	CL	28,98	0,128	15
29	43	23	20	CL	28,85	0,124	13
30	52	25	27	CH	18,94	0,133	17

Fuente: Elaboración propia

4.7. Análisis estadístico en arcillas

El tratamiento estadístico es un procesamiento de los valores observados de la variable en estudio para las muestras arcillosas, que ayuda a buscar la significancia y confiabilidad del proceso investigativo; está constituido por etapas identificadas como: estadística descriptiva y estadística inferencial.

Tabla 4.4: Resumen de datos para arcillas

Muestra	Límite líquido	Límite plástico	Índice de plasticidad	Clasificación	ϕ [°]	c [kg/cm ²]	Índice de grupo
3	62	30	32	CH	18,32	0,129	21
4	44	21	23	CL	26,14	0,127	14
5	47	19	29	CL	20,77	0,122	17
7	50	25	25	CH	23,15	0,129	16
14	33	23	11	CL	30,67	0,121	8
16	24	13	11	CL	29,64	0,119	6
17	37	24	12	CL	26,69	0,126	9
18	29	18	10	CL	29,77	0,117	8
19	33	23	10	CL	29,64	0,122	8
21	22	15	7	CL	30,67	0,118	7
25	29	14	16	CL	28,59	0,126	10
27	35	17	18	CL	31,05	0,121	11
28	49	26	23	CL	28,98	0,128	15
29	43	23	20	CL	28,85	0,124	13
30	52	25	27	CH	18,94	0,133	17

Fuente: Elaboración propia

4.7.1. Estadística descriptiva en arcillas

En esta sección se procesaron los datos observados mediante planillas y gráficos cuyo objetivo es la funcionalidad y descripción de las características y comportamiento correspondiente a los suelos arcillosos.

Variable índice de plasticidad

Distribución de frecuencias

IP máximo=32%

IP mínimo=7%

Rango= $IP\ max - IP\ min$

Rango =25

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

n=15

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

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

NC = 5clases

Ancho de clase = $Rango/NC$

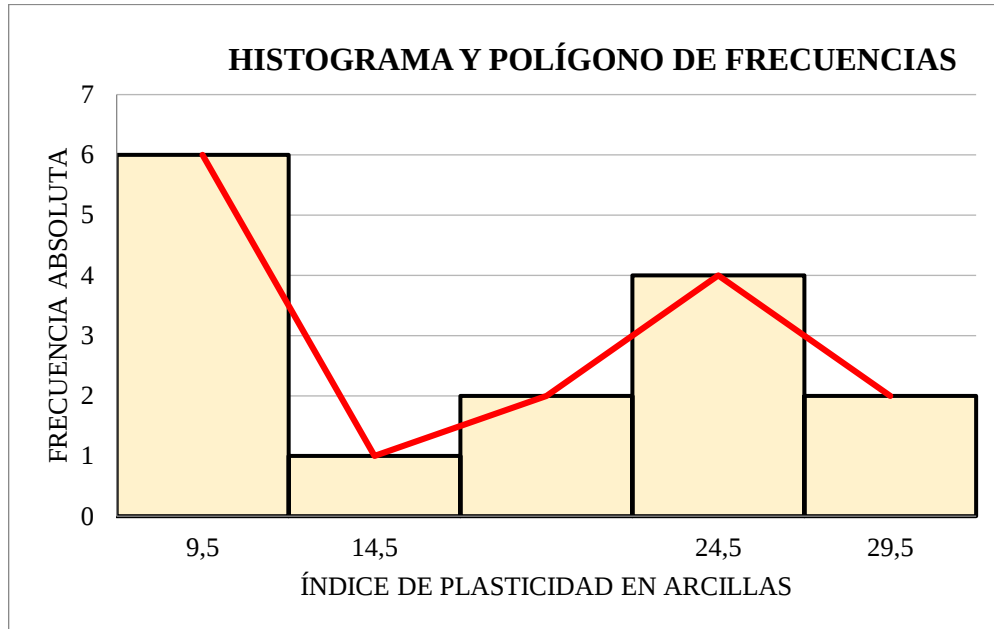
Ancho de clase =5

Tabla 4.5: Distribución de frecuencias IP en arcilla

Intervalo de clase	Marca de clase	Frecuencia absoluta	Frecuencia acumulada	Frecuencia relativa [%]	Frecuencia relativa acumulada [%]
[7 - 12[	9,5	6	6	40	40
[12 - 17[	14,5	1	7	6,667	46,667
[17 - 22[	19,5	2	9	13,333	60,000
[22 - 27[	24,5	4	13	26,667	86,667
[27 - 32[	29,5	2	15	13,333	100,000
		15			

Fuente: Elaboración propia

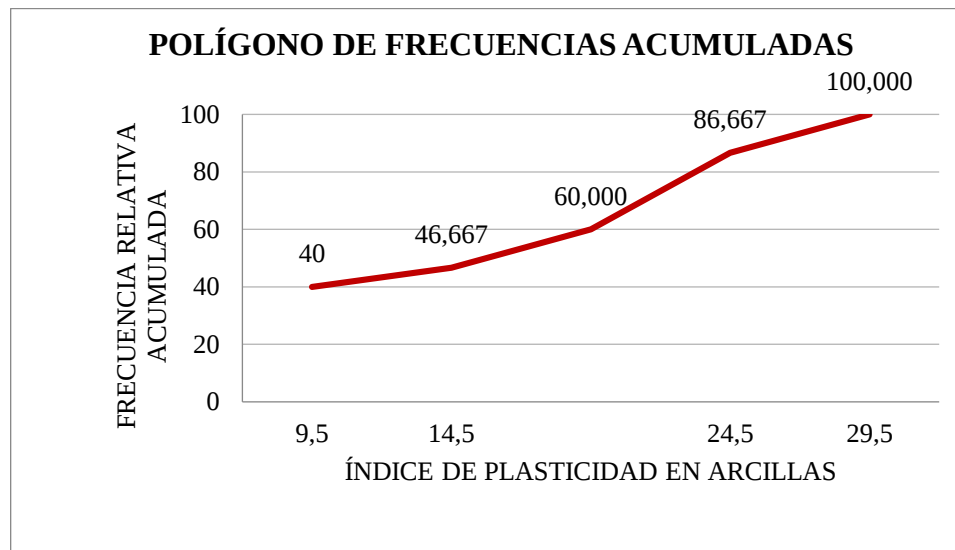
Figura 4.20: Histograma y polígono de frecuencias variable IP en arcillas



Fuente: Elaboración propia

El histograma presenta forma multimodal, existe una pendiente descendente que indica una disminución de frecuencias acumuladas, un pico en la gráfica debido a la variabilidad en la frecuencia de los valores del índice de plasticidad en las arcillas.

Figura 4.21: Polígono de frecuencias acumuladas variable IP en arcillas



Fuente: Elaboración propia

Curva de acumulación ascendente, nos muestra que existe una concentración de datos distribuidos con valores por bajo de los 9,5 % del índice de plasticidad con alta frecuencia.

Variable cohesión

Distribución de frecuencias

Valor máximo=0,133%

Valor mínimo=0,117%

Rango= *Valor max – Valor min*

Rango =0,016

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

n =15

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

NC =4,906975163por lo tanto se adopta el inmediato superior

NC = 5clases

Ancho de clase =Rango/NC

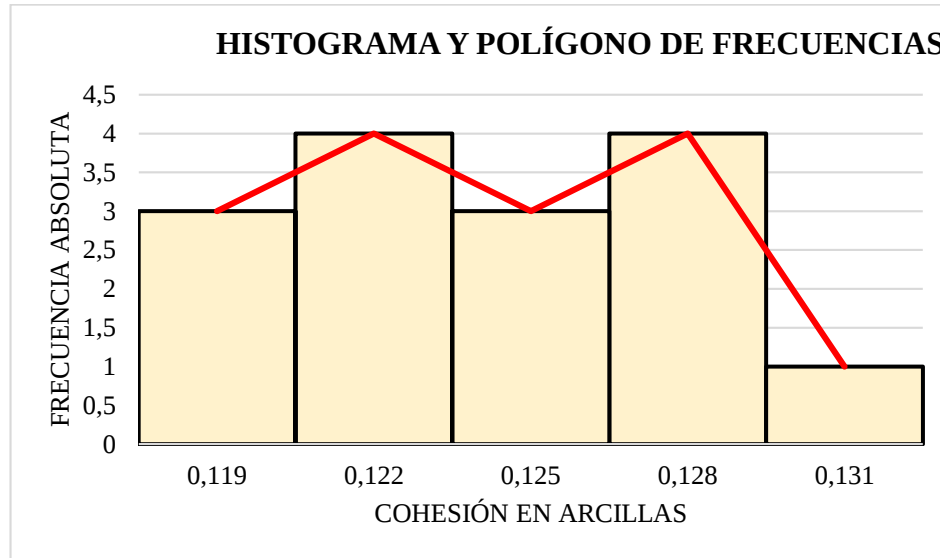
Ancho de clase =0,0032

Tabla 4.6: Distribución de frecuencias Cohesión en arcillas

Intervalo de clase	Marca de clase	Frecuencia absoluta	Frecuencia acumulada	Frecuencia relativa [%]	Frecuencia relativa acumulada [%]
[0,117 - 0,1202[	0,119	3	3	20,0	20,0
[0,1202 - 0,1234[	0,122	4	7	26,7	46,7
[0,1234 - 0,1266[	0,125	3	10	20,0	66,7
[0,1266 - 0,1298[	0,128	4	14	26,7	93,3
[0,1298 - 0,133[	0,131	1	15	6,7	100,0
		15			

Fuente: Elaboración propia

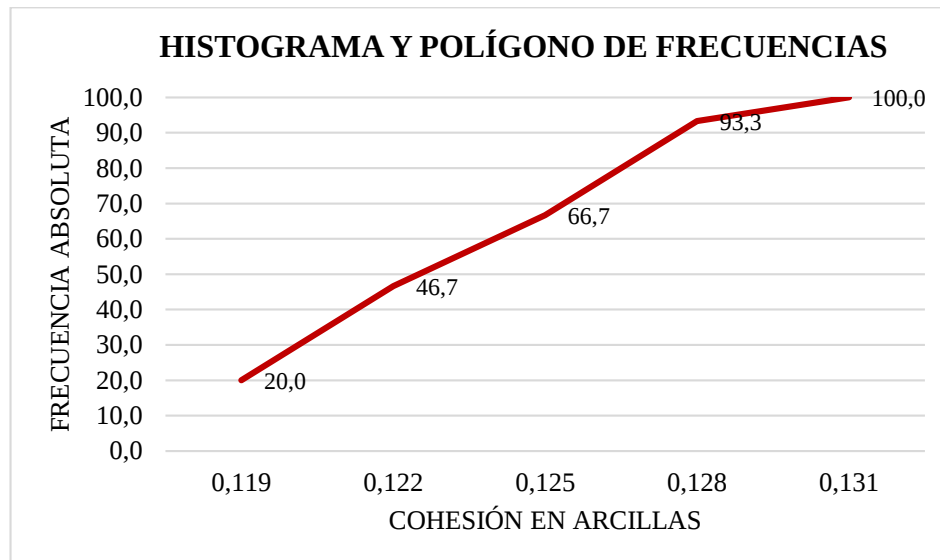
Figura 4.22: Histograma y polígono de frecuencias cohesión en arcillas



Fuente: Elaboración propia

El histograma presenta forma multimodal, existen dos picos en la gráfica debido a la variabilidad de la frecuencia de los valores de cohesión en las arcillas, el polígono de frecuencias nos permite fácilmente comparar las proporciones de datos entre conjuntos.

Figura 4.23: Histograma y polígono de frecuencias variable cohesión en arcillas



Fuente: Elaboración propia

Curva de acumulación ascendente, muestra los datos distribuidos uniformemente, no existe una alta concentración de valores en un rango, es decir se distribuyen en porcentajes similares.

Variable ángulos de fricción

Distribución de frecuencias

Valor máximo=31%

Valor mínimo=18%

Rango= *Valor max – Valor min*

Rango =13

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

n=15

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

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

NC = 5clases

Ancho de clase =Rango/NC

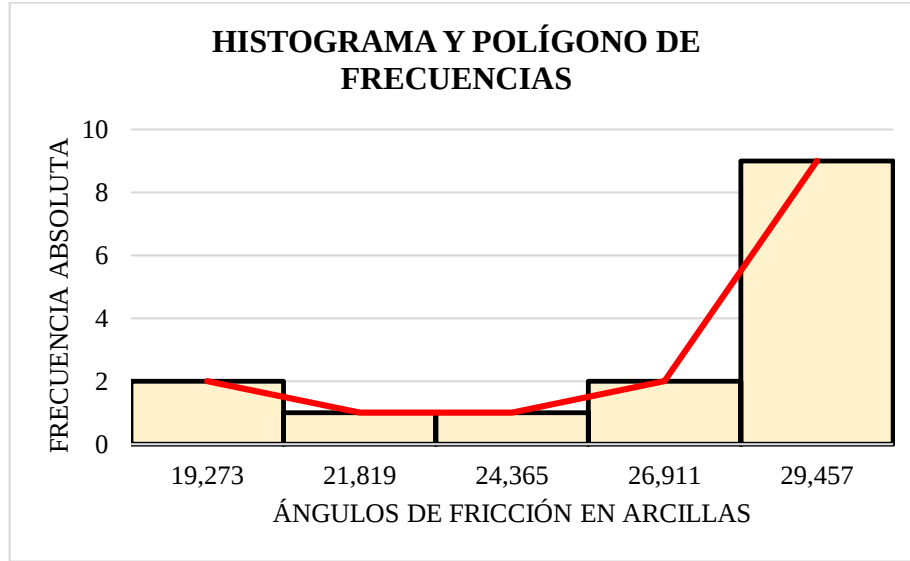
Ancho de clase =2,546

Tabla 4.7: Distribución de frecuencias ángulos de fricción en arcillas

Intervalo de clase	Marca de clase	Frecuencia absoluta	Frecuencia acumulada	Frecuencia relativa [%]	Frecuencia relativa acumulada [%]
[18 - 20,546[	19,273	2	2	13,33	13,33
[20,546 - 23,092[	21,819	1	3	6,67	20,00
[23,092 - 25,638[	24,365	1	4	6,67	26,67
[25,638 - 28,184[	26,911	2	6	13,33	40,00
[28,184 - 30,73[	29,457	9	15	60,00	100,00
		15			

Fuente: Elaboración propia

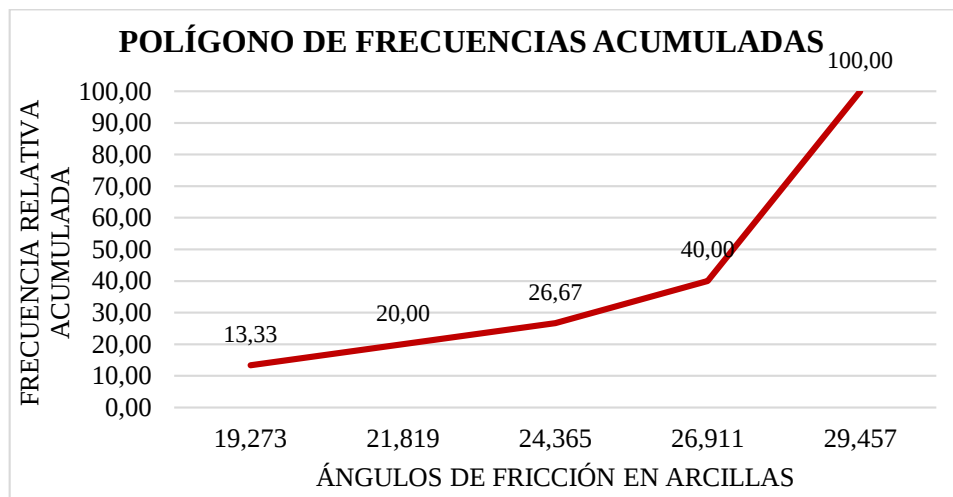
Figura 4.24: Histograma y polígono de frecuencias variable ϕ en arcillas



Fuente: Elaboración propia

El histograma muestra alta frecuencia en los ángulos con valores cercanos a 29°, generando un polígono de frecuencias sesgado a la derecha, debido a la mayor tendencia de datos.

Figura 4.25: Polígono de frecuencias acumuladas variable ϕ en arcillas



Fuente: Elaboración propia

La figura muestra una pendiente ascendente que indica un aumento en las frecuencias acumuladas uniformemente hasta un 40 %, existiendo una mayor acumulación de datos en los ángulos entre 26° a 29°.

4.7.2. Medidas de tendencia central en arcillas

Tabla 4.8: Medidas de tendencia central variable IP en arcillas

Valores medios			Medidas de dispersión		
Mediana	Media	Moda	Rango	Varianza	Desviación estandar
18,000	18,267	10,000	25,000	63,352	7,959

Fuente: Elaboración propia

Tabla 4.9: Medidas de tendencia central variable Cohesión en arcillas

Valores medios			Medidas de dispersión		
Mediana	Media	Moda	Rango	Varianza	Desviación estandar
0,1240	0,1241	0,1220	0,0160	0,0000214	0,0046

Fuente: Elaboración propia

Tabla 4.10: Medidas de tendencia central variable ϕ

Valores medios			Medidas de dispersión		
Mediana	Media	Moda	Rango	Varianza	Desviación estandar
28,850	26,791	30,670	12,730	19,211	4,383

Fuente: Elaboración propia

Cada una de estas medidas proporciona una perspectiva diferente del centro de los datos, y la elección de cuál usar puede depender del contexto y de las características de los datos.

4.8. Análisis estadístico para los limos

Tabla 4.11:Resumen de datos para limos

Muestra	Límite líquido	Límite plástico	Índice de plasticidad	Clasificación	ϕ [°]	c [kg/cm ²]	Índice de grupo
1	60	31	29	MH	24,02	0,128	20
2	43	28	15	ML	25,72	0,125	11
6	33	24	10	ML	27,65	0,133	8
8	57	50	7	MH	27,10	0,117	11
9	27	23	5	ML	31,56	0,118	4
10	45	28	17	ML	27,38	0,132	12
11	31	25	6	ML	30,03	0,115	8
12	43	27	16	ML	26,55	0,122	11
13	70	44	26	MH	25,72	0,139	20
15	47	29	18	ML	28,85	0,125	13
20	40	32	8	ML	27,65	0,124	8
22	26	19	6	ML	28,45	0,123	8
23	39	32	7	ML	27,62	0,124	8
24	25	21	4	ML	33,40	0,119	8
26	23	19	4	ML	32,79	0,116	7

Fuente: Elaboración propia

4.8.1. Estadística descriptiva en limos

El tratamiento estadístico es un procesamiento de los valores observados de la variable en estudio para las muestras limosas, que ayuda a buscar la significancia y confiabilidad del proceso investigativo; está constituido por etapas identificadas como: estadística descriptiva y estadística inferencial.

Variable Índice de plasticidad

Distribución de frecuencias

IP máximo=29%

IP mínimo=4%

Rango= $IP \max - IP \min$

Rango =25

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 clases

Ancho de clase = Rango/NC

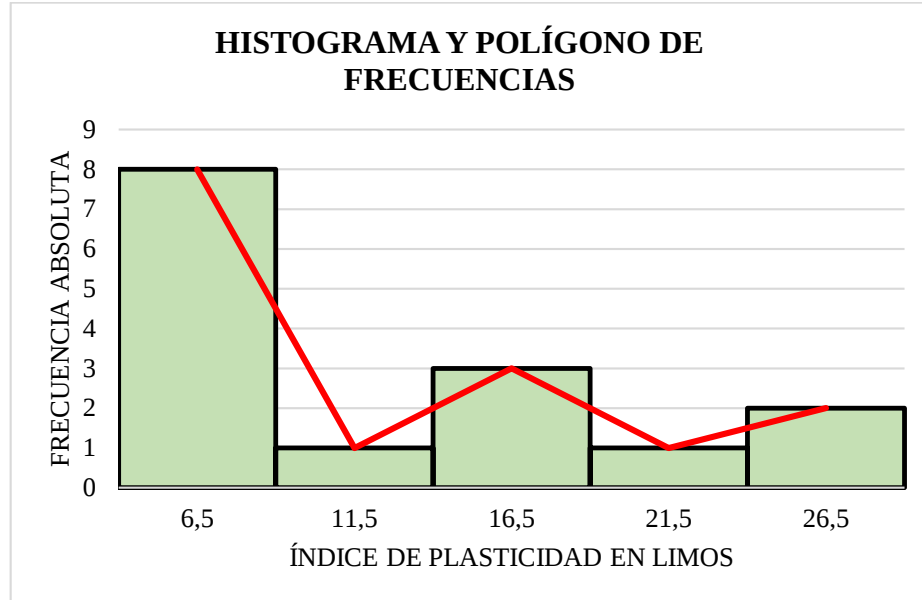
Ancho de clase = 5

Tabla 4.12: Tabla de distribución de frecuencias IP en limos

Intervalo de clase	Marca de clase	Frecuencia absoluta	Frecuencia acumulada	Frecuencia relativa [%]	Frecuencia relativa acumulada [%]
[4 - 9[	6,5	8	8	53,333	53,333
[9 - 14[	11,5	1	9	6,667	60,000
[14 - 19[	16,5	3	12	20,000	80,000
[19 - 24[	21,5	1	13	6,667	86,667
[24 - 29[	26,5	2	15	13,333	100,000
		15			

Fuente: Elaboración propia

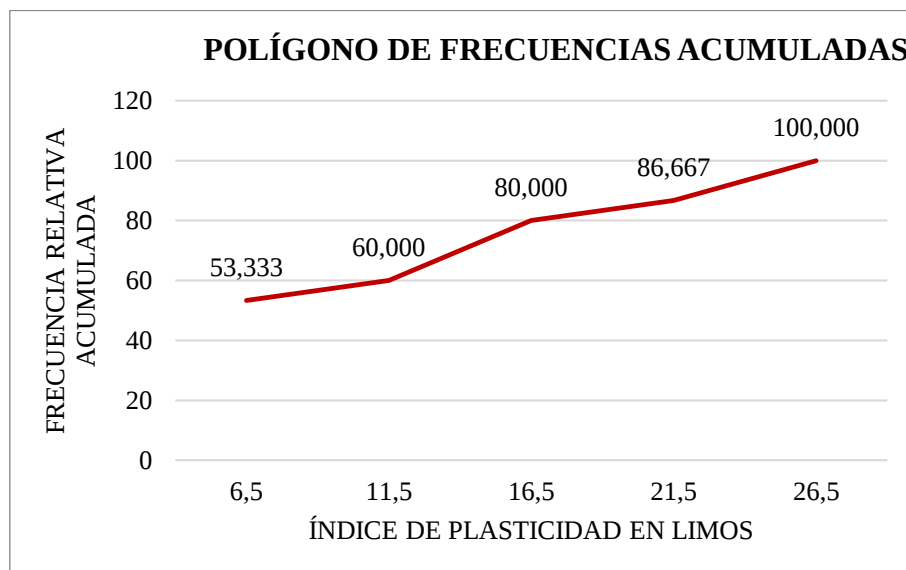
Figura 4.26: Histograma y polígono de frecuencias variable IP en limos



Fuente: Elaboración propia

Muestra la distribución de los datos en los diferentes intervalos, donde se identifica un patrón con una mayor frecuencia con valores próximos a 6,5 % en valores del índice de plasticidad, generando un polígono sesgado a la izquierda.

Figura 4.27: Polígono de frecuencias acumuladas variable IP en limos



Fuente: Elaboración propia

Polígono de frecuencias con una pendiente ascendente, con una mayor acumulación de frecuencias entre los intervalos por debajo de los 6 % del índice de plasticidad.

Variable Cohesión

Distribución de frecuencias

Valor máximo=0,139%

Valor mínimo=0,115%

Rango= *Valor max – Valor min*

Rango =0,024

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

n =15

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

NC =4,906975163por lo tanto se adopta el inmediato superior

NC = 5clases

Ancho de clase =Rango/NC

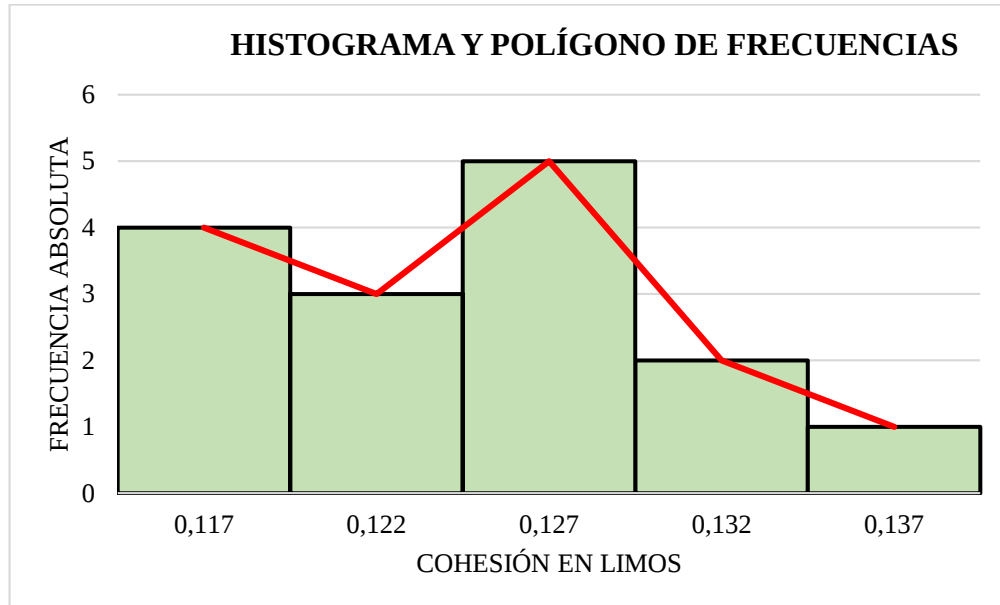
Ancho de clase =0,0048

Tabla 4.13: Distribución de frecuencias valores de Cohesión en limos

Intervalo de clase	Marca de clase	Frecuencia absoluta	Frecuencia acumulada	Frecuencia relativa [%]	Frecuencia relativa acumulada [%]
[0,115 - 0,120[	0,117	4	4	26,7	26,7
[0,120 - 0,125[	0,122	3	7	20,0	46,7
[0,125 - 0,129[	0,127	5	12	33,3	80,0
[0,129 - 0,134[	0,132	2	14	13,3	93,3
[0,134 - 0,139[	0,137	1	15	6,7	100,0
		15			

Fuente: Elaboración propia

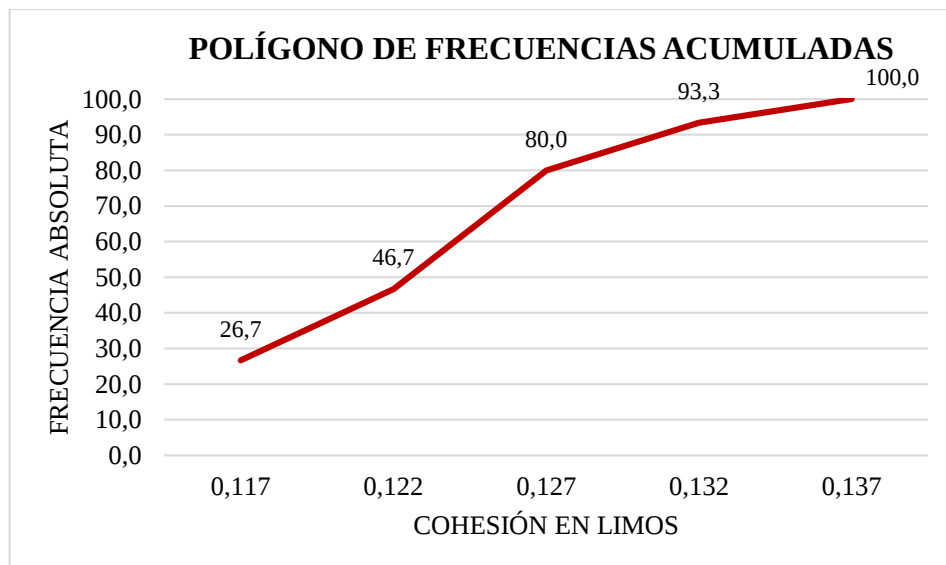
Figura 4.28: Histograma y polígono de frecuencias variable Cohesión en limos



Fuente: Elaboración propia

Existe mayor frecuencia en el intervalo 0,127 debido a la mayor concentración de datos dando lugar a un pico; generando un polígono que se aproxima a una campana, dando una visión clara de la distribución de los datos.

Figura 4.29: Polígono de frecuencias acumuladas variable Cohesión en limos



Fuente: Elaboración propia

Se puede visualizar una distribución acumulativa de los datos entre los rangos de 0,127 y 0,132 del valor de cohesión de los limos, siendo esto un patrón importante, generando así una vista clara y continua de la distribución de los datos.

Variable Ángulos de Fricción

Distribución de frecuencias

Valor máximo=33%

Valor mínimo=24%

Rango= *Valor max – Valor min*

Rango =9

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 clases

Ancho de clase = Rango/NC

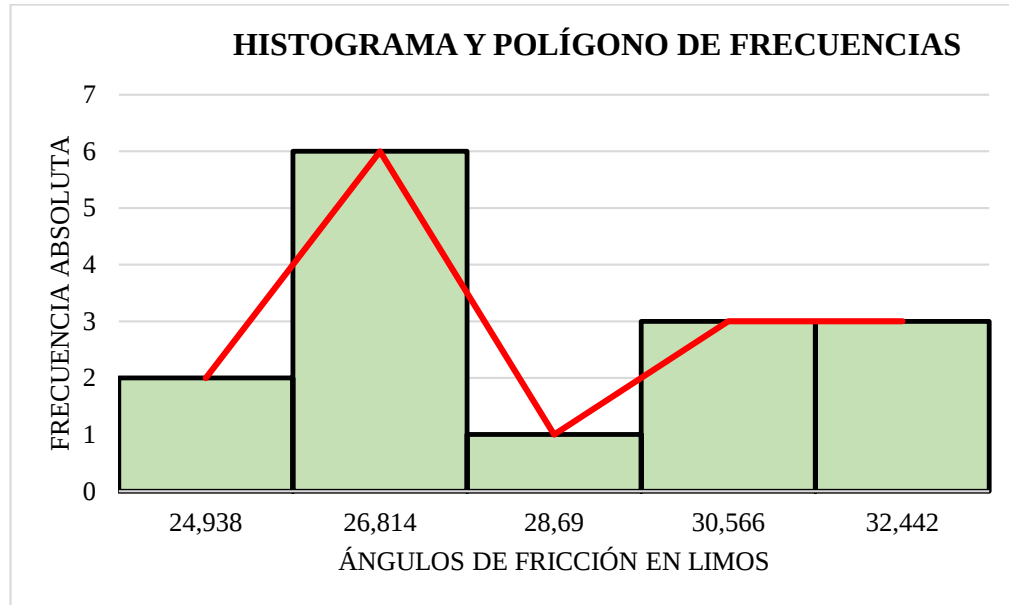
Ancho de clase =1,876

Tabla 4.14: Distribución de frecuencias valores de ϕ en limos

Intervalo de clase	Marca de clase	Frecuencia absoluta	Frecuencia acumulada	Frecuencia relativa [%]	Frecuencia relativa acumulada [%]
[24 - 25,876[	24,938	2	2	13,33	13,33
[25,876 - 27,752[	26,814	6	8	40,00	53,33
[27,752 - 29,628[	28,69	1	9	6,67	60,00
[29,628 - 31,504[	30,566	3	12	20,00	80,00
[31,504 - 33,38[	32,442	3	15	20,00	100,00
		15			

Fuente: Elaboración propia

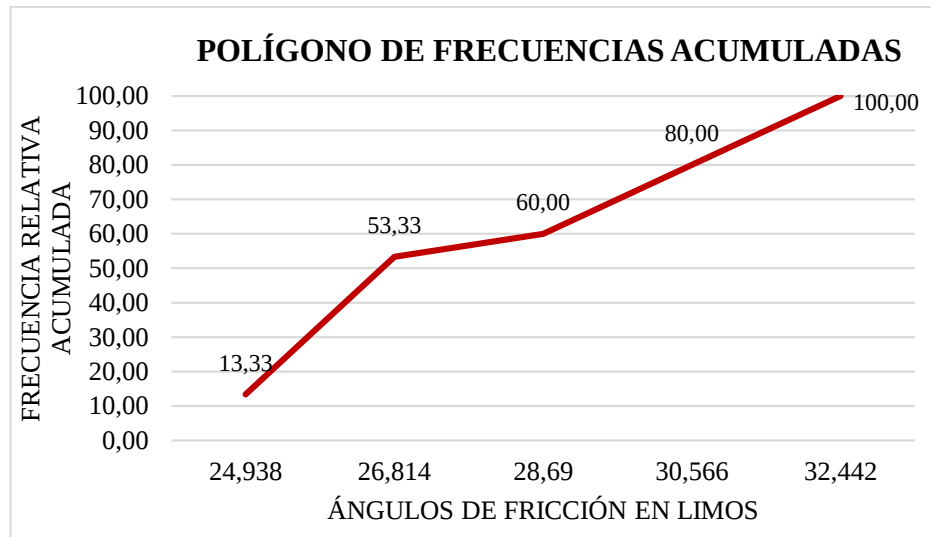
Figura 4.30: Histograma y polígono de frecuencias variable ϕ en limos



Fuente: Elaboración propia

Presenta una distribución simétrica con un sesgo a la derecha, con una alta concentración de datos con ángulos próximos a 26,814° generando un pico en el polígono de frecuencias.

Figura 4.31: Polígono de frecuencias acumuladas variable ϕ en limos



Fuente: Elaboración propia

Se nos presenta una mayor acumulación de datos entre los valores 24,938° y 26,814° del ángulo de fricción, seguidamente la gráfica va aumentando gradualmente, ayudando a comprender mejor como se distribuyen a lo largo del rango de intervalos.

4.8.2. Medidas de tendencia central en limos

Tabla 4.15: Medidas de tendencia central variable IP en limos

Valores medios			Medidas de dispersión		
Mediana	Media	Moda	Rango	Varianza	Desviación estandar
8,000	11,867	4,000	25,000	63,552	7,972

Fuente: Elaboración propia

Tabla 4.16: Medidas de tendencia central variable Cohesión en limos

Valores medios			Medidas de dispersión		
Mediana	Media	Moda	Rango	Varianza	Desviación estandar
0,1240	0,1240	0,1240	0,0240	0,0000463	0,0068

Fuente: Elaboración propia

Tabla 4.17: Medidas de tendencia central variable ϕ en limos

Valores medios			Medidas de dispersión		
Mediana	Media	Moda	Rango	Varianza	Desviación estandar
27,650	28,299	27,650	9,380	7,029	2,651

Fuente: Elaboración propia

Cada una de estas medidas proporciona una perspectiva diferente del centro de los datos, y la elección de cuál usar puede depender del contexto y de las características de los datos. Estas medidas son útiles para tener una idea general de dónde se concentran los datos en un conjunto.

4.9. Estadística inferencial

En este apartado se realizará un análisis de las variables, Índice de Plasticidad, Cohesión y Ángulos de fricción, mediante un análisis de varianza; mediante la prueba ANOVA para determinar si existen diferencias significativas entre los métodos. Donde se determina el valor de F y el p-valor. El valor de F te indicará si existen diferencias significativas entre los grupos, mientras que el p-valor nos permitirá determinar la significancia estadística de estas diferencias.

Para la interpretación de los resultados, si el valor de p es menor que el nivel de significancia establecido (0.05), puedes rechazar la hipótesis nula y concluir que al menos una variable es significativamente diferente de las otras variables, caso contrario no habría evidencia suficiente para rechazar la hipótesis nula.

4.9.1. Prueba de hipótesis “arcillas”

La prueba de hipótesis establece una hipótesis nula H_0 y alternativa H_1 .

Formulamos las hipótesis estadísticas

H_0 : La variación del índice de plasticidad, no inciden directamente en los parámetros de resistencia cortante.

H_1 : La variación del índice de plasticidad, incide directamente en los parámetros de resistencia cortante.

Tabla 4.18: Prueba ANOVA en arcillas

Arcilla	Cálculo de error de eficiencia		
	Índice de plasticidad	Cohesión	Ángulo de fricción
	[%]	[c]	ϕ [°]
1	7	0,118	30,67
2	10	0,117	29,77
3	10	0,122	29,64
4	11	0,121	30,67
5	11	0,119	29,64
6	12	0,126	26,69
7	16	0,126	28,59
8	18	0,121	31,05
9	20	0,124	28,85
10	23	0,127	26,14
11	23	0,128	28,98
12	25	0,129	23,15
13	27	0,133	18,94
14	29	0,122	20,77
15	32	0,129	18,32
SUMA	274	1,862	401,87
CANTIDAD	15	15	15
MEDIA	18	0,124133333	26,7913333
VARIANZAS	63,352	0,000	19,211
SUMA TOTAL X	678		
N	45		

Fuente: Elaboración propia

Tabla 4.19: Resumen de datos para arcillas

Fuente de variación	Suma de cuadrados	gl	Media de cuadrados	F	Valor crítico
Entre grupos	5564,805067	2	2782,403	101,101	3,21994229
Intragrupos	1155,881006	42	27,521		
SCTotal	6720,686073	44			

Fuente: Elaboración propia

F	>	f crítico
101,10	>	3,22E+00
α	>	p-valor
0,05	>	0,00

Interpretación

Si $F > f$ crítico se rechaza la hipótesis nula

Si $\alpha > p$ -valor se rechaza la hipótesis nula.

Si F es muy grande en comparación con el valor crítico, significa que el factor en estudio tiene un efecto enorme sobre la variable y la diferencia entre los grupos es muy significativa.

Dado que F es desproporcionadamente mayor que el valor crítico, concluimos que las diferencias observadas entre los grupos definidos por este factor son estadísticamente significativas y proporcionan evidencia estadística muy sólida de la importancia de este factor.

4.9.2. Prueba de hipótesis “limos”

La prueba de hipótesis establece una hipótesis nula H_0 y alternativa H_1 .

Formulamos las hipótesis estadísticas

H_0 : La variación del índice de plasticidad, no inciden directamente en los parámetros de resistencia cortante.

H_1 : La variación del índice de plasticidad, incide directamente en los parámetros de resistencia cortante.

Tabla 4.20:Prueba ANOVA en limos

Item	CÁLCULO DE ERROR DE EFICIENCIA		
	Índice de plasticidad	Cohesión	Ángulo de fricción
	[%]	[c]	ϕ [°]
1	4	0,119	33,40
2	4	0,116	32,79
3	5	0,118	31,56
4	6	0,115	30,03
5	6	0,123	28,45
6	7	0,117	27,10
7	7	0,124	27,62
8	8	0,124	27,65
9	10	0,133	27,65
10	15	0,125	25,72
11	16	0,122	26,55
12	17	0,132	27,38
13	18	0,125	28,85
14	26	0,139	25,72
15	29	0,128	24,02
SUMA	178	1,86	424,49
CANTIDAD	15	15	15
MEDIA	12	0,124	28,2993333
VARIANZA S	63,552	0,000	7,029
SUMA TOTAL X	604		
N	45		

Tabla 4.21:Resumen de datos para arcillas

Fuente de variación	Suma de cuadrados	gl	Media de cuadrados	F	Valor crítico
Entre grupos	6008,860813	2	3004,43	127,701	3,2199
Intragrupos	988,1370747	42	23,527		
SCTotal	6996,997888	44			

Fuente: Elaboración propia

F	>	f critico
127,70	>	3,22E+00
α	>	p-valor
0,05	>	0,00

Si $F > f$ crítico se rechaza la hipótesis nula

Si $\alpha > p$ -valor se rechaza la hipótesis nula.

Si F es un valor muy elevado en comparación al crítico muestra que el factor que se ha estudiado tiene un impacto enorme sobre la variable y la diferencia entre grupos son altamente significativas.

Con un F tan desproporcionalmente superior al valor crítico, concluimos que las diferencias observadas entre los grupos definidos por el factor son estadísticamente significativas y muestra una evidencia estadística muy sólida y confiable sobre la importancia del factor.

4.10. Especificación técnica propia

Los resultados muestran que se ha realizado un buen análisis estadístico y que sus conclusiones sobre el efecto del factor son muy confiables, asegurando de haber cumplido con los requerimientos para el ANOVA como son la normalidad, homogeneidad de varianzas.

Una vez realizado el análisis a los resultados de las diferentes muestras tanto de arcillas como limos con sus correspondientes valores de índices de plasticidad de acuerdo a los comportamientos en los diferentes gráficos se rescata que, la plasticidad de suelos cohesivos influye en los parámetros de resistencia cortante, logrando establecer valores de plasticidad que nos permitan asumir valores de ángulos de fricción y cohesión.

Tabla 4.22: Valores de ángulos de fricción y cohesión para arcillas

Arcillas		
Índice de plasticidad	ϕ [°]	c [kg/cm²]
7 a 10	31 a 29	0, 118 a 0,122
11 a 23	29 a 26	0,121 a 0,127
23 a 32	26 a 18	0,128 a 0,133

Fuente: Elaboración propia

Tabla 4.23: Valores de ángulos de fricción y cohesión para limos

Limos		
Índice de plasticidad	ϕ [°]	c [kg/cm²]
4 a 6	33 a 30	0,119 a 0,123
7 a 16	30 a 26	0,118 a 0,125
17 a 30	26 a 24	0,125 a 0,139

Fuente: Elaboración propia

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y

RECOMENDACIONES

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

- ❖ Se realizaron las respectivas extracciones de muestras de suelos finos del Valle Central de Tarija y alrededores
- ❖ Con los resultados obtenidos mediante la caracterización se clasificaron en 12 muestras de suelo ML, 3 muestras de suelo MH, 12 muestras de suelo CL y 3 muestras de suelo CH según el sistema de clasificación unificado (SUCS).
- ❖ Se establecieron criterios de plasticidad de los suelos, en arcillas con valores de LL de 22% a 62%, LP de 15% a 30%, IP de 7% a 32% y en limos con valores de LL 25% a 60%, LP 21% a 31%, IP 4% a 29%, para abarcar un mayor campo de estudio y tener un mejor análisis.
- ❖ Se determinaron parámetros de resistencia cortante en función al índice de plasticidad de los suelos finos, para ello se realizaron ensayos a 30 muestras diferentes donde al realizar diferentes comparaciones se analizó la incidencia de la plasticidad tanto en limo como en arcillas estableciendo los siguientes rangos como representativos:
- ❖ En arcillas con índices de plasticidad entre 7 a 32 existen variaciones de sus ángulos de fricción de $31,05^\circ$ a $18,32^\circ$ mientras que en las cohesiones tienden a aumentar en sus valores desde $0,117 \text{ kg/cm}^2$ a $0,133 \text{ kg/cm}^2$.
- ❖ En el caso de los limos con índices de plasticidad entre 4 a 29 se denota una variación en relación a sus ángulos de fricción de entre $24,02^\circ$ a $33,40^\circ$, en las cohesiones sus valores tienden a aumentar considerablemente desde $0,115 \text{ kg/cm}^2$ hasta $0,139 \text{ kg/cm}^2$.
- ❖ Mediante el ensayo de corte directo se determinaron valores de cohesión en arcillas entre $0,118 \text{ kg/cm}^2$ a $0,129 \text{ kg/cm}^2$, en limos entre $0,124 \text{ kg/cm}^2$ a $0,120 \text{ kg/cm}^2$ y valores de ángulos de fricción en arcillas entre $30,67^\circ$ a $18,32^\circ$, en limos entre $32,91^\circ$ a $30,67^\circ$, valores dentro de los rangos de la tabla de referencia de Ignacio Morilla Abad, 2012.
- ❖ Existe incidencia de la plasticidad en los parámetros de resistencia cortante, ya que a mayor plasticidad genera mayores valores en cohesión tanto en suelos arcillosos y

limosos, sin embargo, los ángulos de fricción disminuyen cuando la plasticidad aumenta, esto debido a la mayor presencia de partículas finas.

- ❖ En base a los resultados estadísticos obtenidos, se da el cumplimiento a la hipótesis planteada mediante la cual se validan los datos de la investigación, mismos que pueden ser usados para futuras investigaciones.

5.2. Recomendaciones

- ❖ Es recomendable verificar bien los valores cuando se trabaje con muestras que cuenten con alto contenido de humedad natural ya que estas nos mostrarían ángulos por debajo de los rangos establecidos.
- ❖ Se recomienda realizar una futura investigación abarcando un solo tipo de suelo ya sea CL, CH, ML o MH, con esto se lograría un análisis mucho más delicado y minucioso con una mejor tendencia en valores tanto en cohesión como en ángulos de fricción.
- ❖ Implementar investigaciones haciendo variar los contenidos de humedad natural en las probetas de ensayo para corte directo.
- ❖ Evaluar el posible efecto que pueda causar al variar la velocidad en los parámetros de resistencia cortante en el ensayo de corte directo.

