

# **CAPÍTULO I**

## **DISEÑO TEÓRICO Y METOLÓGICO**

## **CAPÍTULO I**

### **DISEÑO TEÓRICO Y METODOLÓGICO**

#### **1.1. Antecedentes**

Los suelos constituyen la base fundamental de todas las obras de ingeniería civil, siendo el material de construcción más abundante y el soporte esencial para infraestructuras como vías, edificios, puentes, canales, atajados, represas y terraplenes. La calidad de este material determina el uso que puede tener en la construcción de una obra civil, el suelo puede ser sometido a diversos procesos constructivos para mejorar sus características y propiedades físicas y mecánicas, tales como la capacidad portante, la expansión o la permeabilidad, con el fin de asegurar una superficie apta que cumpla con las condiciones de diseño requeridas.

La permeabilidad es una propiedad de los suelos que facilita el movimiento de un flujo (agua) a través de un medio poroso. Su valor depende del tipo de suelo y de su estado de compactación. Generalmente, a menor tamaño de grano, menor permeabilidad del suelo. Sin embargo, incluso suelos con un alto contenido de finos, como las arcillas, pueden presentar permeabilidades que no superen los límites deseables para aplicaciones específicas, como el revestimiento de estructuras hidráulicas.

La bentonita, una arcilla de tipo montmorillonita, reconocida por su notable capacidad de expandirse en presencia de humedad, lo que le permite reducir considerablemente la permeabilidad de los suelos. Su aplicación en la ingeniería civil con se inició en Europa en la década de 1950 y se expandió posteriormente en Estados Unidos. Este material se utiliza para sellar fisuras y grietas en formaciones rocosas, absorber humedad para prevenir derrumbes en túneles o excavaciones, para impermeabilizar membranas en suelos y estabilizar charcas, entre otras aplicaciones.

La investigación plantea la adición de diferentes porcentajes de bentonita sódica activada Super Gel un agente impermeabilizante de uso comercial a una arcilla de alta plasticidad, con la finalidad de cuantificar los efectos directos que provoca en su permeabilidad. Estos efectos serán medidos mediante ensayos de laboratorio de carga variable.

Investigaciones previas, como la de Racchumí (2017) en el canal de riego Mishuco, ya han demostrado que la adición de bentonita sódica disminuye considerablemente la permeabilidad de los suelos, transformándolos de una permeabilidad media a una muy baja, respaldando el potencial de este material.

## **1.2. Situación problemática**

Para poder garantizar la estabilidad y funcionalidad a largo plazo de las estructuras en la construcción de obras hidráulicas como atajados, presas de tierra, diques, canales y embalses, se requiere de suelos con muy baja permeabilidad para evitar pérdidas de agua por infiltración. Si bien las arcillas son abundantes en la región de Tarija, su permeabilidad natural, aunque baja en comparación con otros suelos, puede ser aun relativamente alta para cumplir con los estrictos requisitos de estas infraestructuras, lo que limita su uso directo y eficiente, esto representa un problema significativo para la ingeniería civil en la región, ya que dificulta la selección, el diseño y la optimización de soluciones efectivas para la impermeabilización de suelos, lo que puede derivar en ineficiencias constructivas, costos adicionales o un rendimiento sub óptimo de las obras. Por lo tanto, es necesario investigar y cuantificar de manera precisa y con validación estadística los efectos de la adición de un aditivo como la bentonita sódica en la permeabilidad de las arcillas de alta plasticidad de Tarija, con el fin de determinar su potencial real para mejorar la eficiencia, la sostenibilidad y la confiabilidad de las obras hidráulicas en la zona.

### **1.2.1. Problema**

¿De qué manera la adición de diferentes porcentajes de bentonita sódica activada Super Gel reduce la permeabilidad de una arcilla de alta plasticidad proveniente de Tarija?

### **1.2.2. Relevancia y factibilidad del problema**

La problemática de la permeabilidad en los suelos arcillosos de Tarija es relevante para el desarrollo sostenible de la región. La eficiencia y la seguridad a largo plazo de las infraestructuras hidráulicas locales, fundamentales para la actividad agrícola y el abastecimiento de agua, se ven directamente comprometidas por las características permeables de estos suelos. Abordar y comprender esta situación es crucial, ya que impacta en la pérdida de recursos hídricos por filtración, la reducción de la vida útil de las

obras, el incremento de costos operativos y de mantenimiento. Por lo tanto, cuantificar y optimizar la impermeabilidad de estos suelos no solo es una necesidad técnica, sino una prioridad estratégica que generará beneficios económicos sustanciales y un impacto ambiental positivo al mejorar la gestión del agua y la durabilidad de las infraestructuras en Tarija. La realización de esta investigación es totalmente factible debido a la disponibilidad de los recursos esenciales. Se cuenta con acceso garantizado a los materiales e insumos requeridos, específicamente la arcilla de alta plasticidad y el aditivo que es la bentonita sódica activada Super Gel. Adicionalmente, se dispone del equipo e infraestructura adecuados en el laboratorio de suelos de la Universidad Autónoma Juan Misael Saracho lo que asegura la correcta ejecución de todos los ensayos de caracterización y permeabilidad necesarios para la obtención, análisis y validación de los datos.

### **1.2.3. Delimitación temporal y espacial del problema**

**Delimitación temporal:** La investigación se realiza en tiempo presente abarcando un período suficiente para la realización de los ensayos de laboratorio, el análisis de datos y la elaboración del informe final.

**Delimitación espacial:** El espacio de la investigación es la arcilla de alta plasticidad que será extraída de una ubicación específica de Tarija.

### **1.3. Justificación**

Los aditivos tienen gran importancia en la mejora de las propiedades de los suelos, existen numerosas investigaciones acerca del uso de diferentes aditivos y sus propiedades, sin embargo, específicamente de la bentonita sódica activada Super Gel, hasta la fecha, se carece de un conocimiento preciso sobre la dosificación y más importante aún, de la cuantificación de los efectos específicos que produce en la permeabilidad de las arcillas de alta plasticidad de Tarija.

Los resultados permitirán comprender la relación entre los porcentajes de bentonita sódica y la permeabilidad, lo que facilitará la selección de dosificaciones adecuadas para lograr la impermeabilización deseada. Esto se traducirá directamente en beneficios económicos al reducir las pérdidas de agua por filtración y optimizar los costos de construcción, y

beneficios ambientales al prolongar la vida útil de las obras y mejorar la gestión del recurso hídrico.

Además de su impacto práctico, esta investigación hará una contribución significativa al conocimiento científico y técnico. Al proporcionar datos empíricos sobre el comportamiento de la bentonita sódica activada en las arcillas de alta plasticidad de Tarija. Los hallazgos no solo enriquecerán la comprensión de las interacciones entre aditivos y suelos específicos, sino que también servirán como una base sólida para futuras investigaciones en el campo de la mejora de suelos y la ingeniería hidráulica en contextos similares.

#### **1.4. Objetivos**

Una vez presentada la situación problemática y actual de la investigación se presentan los siguientes objetivos:

##### **1.4.1. Objetivo general**

Analizar los efectos de la bentonita sódica activada Super Gel en la permeabilidad de una arcilla de alta plasticidad cuando es añadida en porcentajes, mediante el ensayo de carga variable.

##### **1.4.2. Objetivos específicos**

- a. Identificar la zona de aplicación del proyecto.
- b. Caracterizar la muestra de arcilla de alta plasticidad en su estado natural y con la adición de los porcentajes de bentonita sódica activada.
- c. Determinar el coeficiente de permeabilidad del suelo natural y del suelo con adición de porcentajes (2%, 4%, 6%, 8%, 10%) de bentonita sódica activada mediante ensayos de carga variable.
- d. Validar estadísticamente los resultados obtenidos a través de análisis de varianza ANOVA y prueba de Tukey, así como mediante modelos de regresión, para confirmar la significancia de la mejora en la permeabilidad.
- e. Comparar los resultados de permeabilidad obtenidos con el suelo natural y con los porcentajes de bentonita sódica activada.

## 1.5. Hipótesis

La adición de porcentajes de bentonita sódica activada Super Gel a una arcilla de alta plasticidad produce una reducción significativa y cuantificable en su permeabilidad.

## 1.6. Operacionalización de las variables

Se presentan dos variables en la investigación, que son; la cantidad de bentonita sódica activada Super Gel como variable independiente y el valor de la permeabilidad como variable dependiente

### 1.6.1. Variable independiente

Cantidad de bentonita sódica activada: Será la variable manipulada, agregada a la arcilla con la finalidad de observar y cuantificar los efectos que ocasiona en la permeabilidad del suelo.

**Tabla 1. 1.** Operacionalización de la variable independiente

| <b>Variable independiente</b>                   | <b>Dimensión</b>  | <b>Indicador</b> | <b>Valor/acción</b>                                                            |
|-------------------------------------------------|-------------------|------------------|--------------------------------------------------------------------------------|
| Cantidad de bentonita sódica activada Super Gel | Tamaño de muestra | %                | Establecer los porcentajes a usar: 2%,4%,6%,8%,10% de adición al suelo natural |

Fuente: Elaboración propia

### 1.6.2. Variable dependiente

Permeabilidad: Su valor será medido y cuantificado a través de ensayos de carga variable, expresado como coeficiente de permeabilidad (k).

**Tabla 1. 2.** Operacionalización de la variable dependiente

| <b>Variable dependiente</b> | <b>Conceptualización</b>                          | <b>Dimensión</b>                  | <b>Indicador</b> | <b>Valor/acción</b>      |
|-----------------------------|---------------------------------------------------|-----------------------------------|------------------|--------------------------|
| Permeabilidad               | Propiedad del suelo que permite el paso del agua. | Coefficiente de permeabilidad (k) | cm/s             | Método de carga variable |

Fuente: Elaboración propia

**1.7. Identificación del tipo de investigación**

La presente investigación tiene un diseño experimental del tipo causal explicativo ya que se basa en la manipulación controlada de la variable independiente (porcentaje de bentonita sódica activada Super Gel) y la medición de su efecto en la variable dependiente (permeabilidad de la arcilla). El diseño experimental permite establecer una relación de causa y efecto directa, garantizando la validez y la confiabilidad de los resultados. El nivel explicativo se manifiesta en el interés por comprender cómo y por qué la adición de bentonita sódica activada Super Gel afecta la permeabilidad, proporcionando una base científica sólida para la toma de decisiones en proyectos de ingeniería.

**1.8. Unidades de estudio y decisión muestral****1.8.1. Unidad de estudio**

En la presente investigación, la unidad de estudio será la muestra de arcilla de alta plasticidad proveniente de la región de Tarija, modificada con la adición de bentonita sódica activada Super Gel en diferentes porcentajes. Esta muestra será sometida a ensayos de permeabilidad en el laboratorio de suelos de la Universidad Autónoma Juan Misael Saracho, con el fin de analizar el efecto de la bentonita sódica en su coeficiente de permeabilidad.

### 1.8.2. Población

La población objeto de estudio está constituida por el conjunto total de arcillas de alta plasticidad presentes en la región de Tarija, que son susceptibles de ser modificadas con bentonita sódica activada para mejorar su impermeabilidad. Debido a la naturaleza extensa y prácticamente incontable de esta población, se ha optado por trabajar con una muestra representativa obtenida de una ubicación específica.

Para determinar la cantidad de ensayos a realizar, para este fin se asumirán valores que serán reemplazados en la siguiente ecuación:

$$n = \frac{\sum_{i=1}^n N_i \sigma^2}{N \left(\frac{e}{Z}\right)^2 + \frac{\sum_{i=1}^n N_i \sigma^2}{N}}$$

Donde:

$n$ : Es el tamaño de la muestra.

$N_i$ : Es el tamaño de cada estrato de la población.

$N$ : Es el tamaño de la población total.

$Z$ : Distribución normal para un nivel de confianza.

$\sigma^2$ : Es la varianza estimada del evento de estudio.

$e$ : Error máximo admisible para la estimación.

Debido al tiempo limitado para realizar la investigación se asumirá un valor de la varianza ( $\sigma^2$ ) igual a 0.10. Para asegurar un nivel de probabilidad dentro del intervalo de confianza en la curva de distribución normal, se tomará un nivel de confianza (NC) del 95%, para lo cual el valor de la variable estandarizada ( $Z$ ) será 1.96. El error máximo admisible ( $e$ ) se fija en 5% (0.05). A continuación, se muestran la tabla con los valores que serán asumidos para la distribución:



**Tabla 1. 3.** Valores asumidos para el cálculo del tamaño de la muestra

| Componente          | Símbolo    | Valor |
|---------------------|------------|-------|
| Nivel de confianza  | $NC$       | 95%   |
| Error admisible     | $E$        | 5%    |
| Distribución normal | $Z$        | 1.96  |
| Varianza estimada   | $\sigma^2$ | 0.10  |

Fuente: Elaboración propia

Aplicando estos valores a la ecuación, el tamaño de muestra calculado para cada tipo de ensayo es:

**Tabla 1. 4.** Tamaño de la muestra

| Etapa                                                                                                                                   | Ensayo               | $Ni$ | $\sigma^2$ | $Ni*\sigma^2$ | $fi$ | $ni$ |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------|------|------------|---------------|------|------|
| Selección del suelo a usar<br>muestra de suelo zona A,<br>B, C, D, E.                                                                   | Límites de Atterberg | 10   | 0.1        | 1             | 0.05 | 5    |
|                                                                                                                                         | Granulometría        | 10   | 0.1        | 1             | 0.05 | 5    |
| Caracterización del suelo<br>en estado natural y con el<br>2%, 4%, 6%, 8%, 10% de<br>bentonita sódica activada.                         | Granulometría        | 30   | 0.1        | 3             | 0.15 | 15   |
|                                                                                                                                         | Hidrómetro           | 12   | 0.1        | 1.2           | 0.06 | 6    |
|                                                                                                                                         | Peso específico      | 24   | 0.1        | 2.4           | 0.12 | 12   |
|                                                                                                                                         | Límites de Atterberg | 30   | 0.1        | 3             | 0.15 | 15   |
|                                                                                                                                         | Compactación         | 30   | 0.1        | 3             | 0.15 | 15   |
| Pruebas finales<br>Permeabilidad (k) del<br>suelo en estado natural y<br>con el 2%, 4%, 6%, 8%,<br>10% de bentonita sódica<br>activada. | Carga variable       | 54   | 0.1        | 5.4           | 0.27 | 27   |
| $\Sigma Ni$                                                                                                                             |                      | 200  |            | 20            |      | 100  |

Fuente: Elaboración propia

$$n = \frac{\sum_{i=1}^n N_i \sigma^2}{N \left( \frac{e}{Z} \right)^2 + \frac{\sum_{i=1}^n N_i \sigma^2}{N}} = 86.90 \approx 87$$

El análisis realizado ha establecido que se necesitan 87 ensayos para alcanzar el nivel de confianza requerido. No obstante, considerando que se debe aplicar un número uniforme de ensayos para cada porcentaje de suelo, la tabla se ajustará para reflejar esta condición:

**Tabla 1. 5.** Número total de ensayos a realizar

| <b>Etapas</b>                                                                                                               | <b>Ensayo</b>        | <b>Nº de muestra</b> | <b>Repeticiones por muestra</b> | <b>Nº de ensayos</b> |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------|----------------------|---------------------------------|----------------------|
| Selección del suelo a usar muestra de suelo zona A, B, C, D, E.                                                             | Límites de Atterberg | 5                    | 1                               | 5                    |
|                                                                                                                             | Granulometría        | 5                    | 1                               | 5                    |
| Caracterización del suelo en estado natural y con el 2%, 4%, 6%, 8%, 10% de bentonita sódica activada.                      | Granulometría        | 6                    | 2                               | 18                   |
|                                                                                                                             | Peso específico      | 6                    | 2                               | 12                   |
|                                                                                                                             | Hidrómetro           | 6                    | 1                               | 6                    |
|                                                                                                                             | Límites de Atterberg | 6                    | 3                               | 18                   |
|                                                                                                                             | Compactación         | 6                    | 3                               | 18                   |
| Pruebas finales<br>Permeabilidad (k) del suelo en estado natural y con el 2%, 4%, 6%, 8%, 10% de bentonita sódica activada. | Carga variable       | 6                    | 5                               | 30                   |
| <b>Número total de ensayos a realizar</b>                                                                                   |                      |                      |                                 | <b>112</b>           |

Fuente: Elaboración propia

### 1.8.3. Muestra

La muestra de estudio estará compuesta por una arcilla de alta plasticidad, extraída de una única ubicación específica dentro de la región de Tarija. Esta arcilla será cuidadosamente preparada en el laboratorio de suelos. La selección de esta ubicación particular se basará en criterios que aseguren la representatividad de un tipo de arcilla de alta plasticidad,

permitiendo un estudio sobre sus propiedades y la interacción con la bentonita sódica activada Super Gel.

#### **1.8.4. Selección de las técnicas de muestreo**

Para esta investigación, la técnica de muestreo empleada será, el muestreo estratificado, enfocado en la selección de una única y representativa muestra de arcilla de alta plasticidad de una ubicación específica en la región de Tarija.

La selección de esta ubicación se realizará con base en la accesibilidad y la disponibilidad de una fuente de arcilla que cumpla con las características de alta plasticidad requeridas para el estudio. La extracción de la muestra de arcilla se llevará a cabo siguiendo los procedimientos estandarizados para garantizar su integridad y representatividad para este estudio específico.

### **1.9. Métodos y técnicas empleadas**

Los métodos y técnicas a usar serán las siguientes:

#### **1.9.1. Métodos**

La presente investigación se llevará a cabo mediante el método experimental, lo cual permitirá analizar el efecto de la bentonita sódica en la permeabilidad de la arcilla de alta plasticidad seleccionada. Se realizarán ensayos de laboratorio controlados, manipulando la variable independiente (porcentaje de bentonita sódica activada Super Gel), y midiendo la variable dependiente (coeficiente de permeabilidad). Además, se utilizará el método analítico para la interpretación y el procesamiento de los datos cuantitativos obtenidos de los ensayos, buscando establecer relaciones causales y cuantificables.

#### **1.9.2. Técnicas**

Para la recolección de datos, se emplearán las siguientes técnicas, aplicadas a la muestra de arcilla de alta plasticidad:

- Ensayos de granulometría: Se aplicará la norma AASTHO T27 para determinar la distribución de tamaños de partículas de la arcilla, proporcionando información esencial sobre su composición.
- Ensayos de límites de Atterberg: Se aplicará la norma ASTM D4318 para determinar el límite líquido (LL) y el límite plástico (LP), así como el índice de plasticidad (IP) de la arcilla, lo que permitirá caracterizar sus propiedades de plasticidad y observar posibles cambios con la bentonita.
- Ensayos de compactación: Se aplicará la norma ASTM D698 para establecer las condiciones óptimas de densidad y humedad en la preparación de las muestras para los ensayos de permeabilidad.
- Ensayos de permeabilidad de carga variable: Se aplicará la norma técnica ASTM D2434 para determinar el coeficiente de permeabilidad (k) de la arcilla en su estado natural y con la adición de diferentes porcentajes de bentonita sódica activada Super Gel.

#### **1.10. Procesamiento de la información**

El procesamiento de la información se realizará de manera sistemática para asegurar la fiabilidad y la validez de los resultados. Inicialmente, se desarrollarán las pruebas de laboratorio sobre la muestra de arcilla de alta plasticidad seleccionada para su caracterización tanto en su estado natural como con la adición de porcentajes de bentonita sódica activada. Esto incluirá la determinación de sus propiedades físicas y de plasticidad, confirmando que cumple con las condiciones requeridas para el estudio.

Posteriormente, se llevará a cabo el ensayo de carga variable para obtener el coeficiente de permeabilidad de la arcilla en su estado natural y con la adición de diferentes porcentajes de bentonita sódica activada.

Todos los datos obtenidos de los ensayos de laboratorio se organizarán y registrarán en tablas de Microsoft Excel, una vez calculados los coeficientes de permeabilidad se procederá a realizar el análisis de la información usando estadística descriptiva e inferencial.

Finalmente, los resultados se presentarán de forma clara y concisa mediante tablas y gráficos, facilitando la visualización, la interpretación y la extracción de conclusiones sobre los efectos de la bentonita sódica activada Super Gel en la permeabilidad de la arcilla estudiada.

### **1.11. Alcance de la investigación**

Este estudio se enfocará en analizar los efectos de la bentonita sódica activada Super Gel en la permeabilidad de una arcilla de alta plasticidad específica proveniente de la región de Tarija, Bolivia.

Se obtendrá y analizará una muestra representativa de arcilla de alta plasticidad con el objetivo principal de evaluar cómo la adición de porcentajes bentonita sódica activada influye en el coeficiente de permeabilidad de esta arcilla en particular. Dichos porcentajes serán del 2%, 4%, 6%, 8% y 10% respectivamente. La permeabilidad se medirá mediante ensayos de carga variable siguiendo la norma ASTM D2434.

El análisis de los datos se realizará usando técnicas estadísticas como la regresión lineal, exponencial y el método ANOVA, con el apoyo del software Microsoft Excel. Los resultados permitirán comprender la relación entre los porcentajes de bentonita sódica activada Super Gel y la permeabilidad de esta arcilla de alta plasticidad.

**CAPÍTULO II**

**ASPECTOS GENERALES DE LAS ARCILLAS**

**Y PERMEABILIDAD**

## CAPÍTULO II

### ASPECTOS GENERALES DE LAS ARCILLAS Y PERMEABILIDAD

#### 2.1. Suelo

Para propósitos de ingeniería, el suelo se define como el agregado no cementado de granos minerales y materia orgánica descompuesta (partículas sólidas) con líquido y gas en los espacios vacíos entre las partículas sólidas. El suelo se utiliza como material de construcción en diversos proyectos de ingeniería civil y con cimientos estructurales. Por lo tanto, 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. (Das B. M., 2015, pág. 25)

**Figura 2. 1. Suelo**



Fuente: Elaboración propia

#### 2.2. Sistemas de clasificación de suelos

Los sistemas de clasificación de suelos dividen los suelos en grupos y subgrupos con base en propiedades ingenieriles comunes como la distribución granulométrica, el límite líquido y el límite plástico. Los dos sistemas de clasificación principales de uso actual se tratan del sistema de la Asociación Americana de Funcionarios Estatales de Carreteras y Transporte o por sus siglas en inglés (AASHTO) y el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS), este último también es el sistema de la ASTM). (Das B. M., 2012, pág. 12)

### 2.2.1. Sistema unificado de clasificación de suelos (SUCS)

El Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS) es un sistema de clasificación de suelos usado en ingeniería y geología para describir la textura y el tamaño de las partículas de un suelo. Este sistema de clasificación puede ser aplicado a la mayoría de los materiales sin consolidar y se representa mediante un símbolo con dos letras. Cada letra es descrita debajo (con la excepción de Pt).

Este sistema fue propuesto por Arturo Casagrande en 1948 como una modificación y adaptación más general a su sistema de clasificación propuesto en el año 1942 para aeropuertos. El Sistema Unificado de Clasificación se presenta en la tabla 2.2. y tabla 2.3. y clasifica los suelos en dos grandes categorías:

- ✓ Suelos de grano grueso que son de grava y arena en estado natural con menos de 50% que pasa a través del tamiz núm. 200. Los símbolos de grupo comienzan con un prefijo de G o S. G es para el suelo de grava o grava, y S para la arena o suelo arenoso.
- ✓ Suelos de grano fino con 50% o más que pasa por el tamiz núm. 200. Los símbolos de grupo comienzan con un prefijo de M, que es sinónimo de limo inorgánico, C para la arcilla inorgánica y O para limos orgánicos y arcillas. El símbolo Pt se utiliza para la turba, lodo y otros suelos altamente orgánicos. (Das B. M., 2015, pág. 82)

Otros símbolos que también se utilizan para la clasificación son:

W: bien clasificado

P: mal clasificado

L: baja plasticidad (límite líquido menor de 50)

H: alta plasticidad (límite líquido mayor de 50)

En el sistema unificado se utilizan los símbolos siguientes para fines de identificación.

**Tabla 2. 1.** Símbolos del sistema unificado

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

Fuente: Fundamentos de ingeniería de cimentaciones, Braja M. Das



A continuación, se muestran las tablas de clasificación del sistema unificado.

**Tabla 2. 2.** Clasificación de suelos gruesos por el sistema SUCS

| Criterios para la asignación de símbolos de grupo y nombre de grupo con el uso de ensayos de laboratorio |                                                                            |                                                                |                                                                   | Clasificación de suelos |                                 |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|-------------------------|---------------------------------|
|                                                                                                          |                                                                            |                                                                |                                                                   | Símbolo de grupo        | Nombre de grupo                 |
| Suelos de partículas gruesas. Más del 50% es retenido en la malla N°200                                  | GRAVAS<br>Más del 50% o más de fracción gruesa es retenida en la malla N°4 | Gravas limpias menos del 5% pasa por malla N°200               | $Cu \geq 4$ y $Cc \leq 3$                                         | GW                      | Grava bien graduada             |
|                                                                                                          |                                                                            |                                                                | $Cu < 4$ y $1 > Cc > 3$                                           | GP                      | Grava mal graduada              |
|                                                                                                          |                                                                            | Gravas con finos, más del 12% pasa por malla N°200             | IP < 4 se grafica en la carta de plasticidad debajo de la línea A | GM                      | Grava limosa                    |
|                                                                                                          |                                                                            |                                                                | IP > 7 se grafica en la carta de plasticidad arriba de la línea A | GC                      | Grava arcillosa                 |
|                                                                                                          |                                                                            | Gravas limpias y finos, entre el 5% y 12% pasa por malla N°200 | Cumple con los criterios para GW y GC                             | GW-GM                   | Grava bien graduada con limo    |
|                                                                                                          |                                                                            |                                                                | Cumple con los criterios para GW y GC                             | GW-GC                   | Grava bien graduada con arcilla |
|                                                                                                          |                                                                            |                                                                | Cumple con los criterios para GP y GM                             | GP-GM                   | Grava mal graduada con limo     |
|                                                                                                          |                                                                            |                                                                | Cumple con los criterios para GP y GC                             | GP-GC                   | Grava mal graduada con arcilla  |
|                                                                                                          | ARENAS<br>El 50% o más de fracción gruesa pasa la malla N°4                | Arenas limpias menos del 5% pasa por malla N°200               | $Cu \geq 6$ y $Cc \leq 3$                                         | SW                      | Arena bien graduada             |
|                                                                                                          |                                                                            |                                                                | $Cu < 6$ y $1 > Cc > 3$                                           | SP                      | Arena mal graduada              |
|                                                                                                          |                                                                            | Arenas con finos, más del 12% pasa por malla N°200             | IP < 4 se grafica en la carta de plasticidad debajo de la línea A | SM                      | Arena limosa                    |
|                                                                                                          |                                                                            |                                                                | IP > 7 se grafica en la carta de plasticidad arriba de la línea A | SC                      | Arena arcillosa                 |
|                                                                                                          |                                                                            | Arenas limpias y finos, entre el 5% y 12% pasa por malla N°200 | Cumple con los criterios para SW y SM                             | SW-SM                   | Arena bien graduada con limo    |
|                                                                                                          |                                                                            |                                                                | Cumple con los criterios para SW y SC                             | SW-SC                   | Arena bien graduada con arcilla |
|                                                                                                          |                                                                            |                                                                | Cumple con los criterios para SP y SC                             | SP-SM                   | Arena mal graduada con limo     |
|                                                                                                          |                                                                            |                                                                | Cumple con los criterios para SP y SC                             | SP-SC                   | Arena mal graduada con arcilla  |

Fuente: Norma ASTM D2487

**Tabla 2. 3.** Clasificación de suelos finos por el sistema SUCS

| Criterios para la asignación de símbolos de grupo y nombre de grupo con el uso de ensayos de laboratorio |                                                 |             |                                                                 |       | Clasificación de suelos |                             |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------|-------------|-----------------------------------------------------------------|-------|-------------------------|-----------------------------|
|                                                                                                          |                                                 |             |                                                                 |       | Símbolo de grupo        | Nombre de grupo             |
| Suelos de partículas finas. El 50% o más pasa la malla                                                   | Limos y arcillas<br>LL<50                       | Inorgánicos | IP>7 se grafica en la carta de plasticidad arriba de la línea A |       | CL                      | Arcilla de baja plasticidad |
|                                                                                                          |                                                 |             | IP<4 se grafica en la carta de plasticidad debajo de la línea A |       | ML                      | Limo de baja plasticidad    |
|                                                                                                          |                                                 | Orgánicos   | Límite líquido-Secado al horno                                  | <0.75 | OL                      | Arcilla orgánica            |
|                                                                                                          |                                                 |             | Límite líquido-No secado                                        |       |                         | Limo orgánico               |
|                                                                                                          | Limos y arcillas<br>LL>50                       | Inorgánicos | IP>7 se grafica en la carta de plasticidad arriba de la línea A |       | CH                      | Arcilla de alta plasticidad |
|                                                                                                          |                                                 |             | IP<4 se grafica en la carta de plasticidad debajo de la línea A |       | MH                      | Limo de alta plasticidad    |
|                                                                                                          |                                                 | Orgánicos   | Límite líquido-Secado al horno                                  | <0.75 | OH                      | Arcilla orgánica            |
|                                                                                                          |                                                 |             | Límite líquido-No secado                                        |       |                         | Limo orgánico               |
| Suelo                                                                                                    | Principalmente materia orgánica de color oscuro |             |                                                                 |       | PT                      | Turba                       |

Fuente: Norma ASTM D2487

### 2.2.2. Sistema de la Asociación Americana de Funcionarios Estatales de Carreteras y Transporte o por sus siglas en inglés (AASHTO)

El Sistema de clasificación de suelos de la AASHTO clasifica el suelo según ocho grupos principales, A-1 a A-8, con base en su distribución granulométrica, límite líquido e índice de plasticidad. Los suelos listados en los grupos A-1, A-2 y A-3 son materiales de grano grueso, y aquellos en los grupos A-4, A-5, A-6 y A-7 son materiales de grano fino. La turba, el fango y otros suelos altamente orgánicos se clasifican en el grupo A-8 y se identifican mediante una inspección visual.

El sistema de clasificación de la AASHTO (para suelos A-1 a A-7) se presenta en la tabla 2.4. (Das B. M., 2012, pág. 18)

**Tabla 2. 4.** Clasificación de suelos por el sistema AASHTO

| Materiales granulares (35% o menos de la muestra total pasa la malla núm. 200) |                                                         |         |                                  |                                  |         |                    |         |
|--------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|---------|----------------------------------|----------------------------------|---------|--------------------|---------|
| Clasificación general                                                          | A-1                                                     |         | A-3                              | A-2                              |         |                    |         |
| Clasificación de grupo                                                         | A-1-a                                                   | A-1-b   |                                  | A-2-4                            | A-2-5   | A-2-6              | A-2-7   |
| Análisis por mallas (% que pasa)                                               |                                                         |         |                                  |                                  |         |                    |         |
| Malla núm. 10                                                                  | 50 máx.                                                 |         |                                  |                                  |         |                    |         |
| Malla núm. 40                                                                  | 30 máx.                                                 | 50 máx. | 51 mín.                          |                                  |         |                    |         |
| Malla núm. 200                                                                 | 15 máx.                                                 | 25 máx. | 10 máx.                          | 35 máx.                          | 35 máx. | 35 máx.            | 35 máx. |
| Para la fracción que pasa malla núm. 40                                        |                                                         |         |                                  |                                  |         |                    |         |
| Límite líquido (LL)                                                            |                                                         |         |                                  | 40 máx.                          | 41 mín. | 40 máx.            | 41 mín. |
| Índice de plasticidad (IP)                                                     | 6 máx.                                                  |         | NP                               | 10 máx.                          | 10 máx. | 11 mín.            | 11 mín. |
| Tipo usual de material                                                         | Fragmentos de roca, grava y arena                       |         | Arena fina                       | Grava y arena limosa o arcillosa |         |                    |         |
| Clasificación de la capa                                                       | Excelente a buena                                       |         |                                  |                                  |         |                    |         |
| Clasificación general                                                          | Materiales de limo y arcilla                            |         |                                  |                                  |         |                    |         |
|                                                                                | (más de 35% de la muestra total pasa la malla núm. 200) |         |                                  |                                  |         |                    |         |
| Clasificación de grupo                                                         | A-4                                                     | A-5     | A-6                              | A-7                              |         |                    |         |
|                                                                                |                                                         |         |                                  | A-7-5 <sup>a</sup>               |         | A-7-6 <sup>b</sup> |         |
| Análisis por mallas (% que pasa)                                               |                                                         |         |                                  |                                  |         |                    |         |
| Malla núm. 10                                                                  |                                                         |         |                                  |                                  |         |                    |         |
| Malla núm. 40                                                                  |                                                         |         |                                  |                                  |         |                    |         |
| Malla núm. 200                                                                 | 36 mín.                                                 | 36 mín. | 36 mín.                          | 36 mín.                          |         | 36 mín.            |         |
| Para la fracción que pasa malla núm. 40                                        |                                                         |         |                                  |                                  |         |                    |         |
| Límite líquido (LL)                                                            | 40 máx.                                                 | 41 mín. | 40 máx.                          | 41 mín.                          |         | 41 mín.            |         |
| Índice de plasticidad (IP)                                                     | 10 máx.                                                 | 10 máx. | 11 mín.                          | 11 mín.                          |         | 11 mín.            |         |
| Tipo usual de material                                                         | Principalmente suelos limosos                           |         | Principalmente suelos arcillosos |                                  |         |                    |         |
| Calificación subrasante                                                        | Regular a malo                                          |         |                                  |                                  |         |                    |         |
| <sup>a</sup> Si $IP \leq LL - 30$ , la clasificación es A-7-5.                 |                                                         |         |                                  |                                  |         |                    |         |
| <sup>b</sup> Si $IP > LL - 30$ , la clasificación es A-7-6.                    |                                                         |         |                                  |                                  |         |                    |         |

Fuente: Fundamentos de ingeniería de cimentaciones, Braja M. Das

Las equivalencias entre el sistema de clasificación AASHTO y el sistema unificado SUCS, se pueden ver en la siguiente tabla:

**Tabla 2. 5.** Relación de clasificación AASHTO-SUCS

| <b>Grupo del suelo en el sistema AASHTO</b> | <b>Comparación de los grupos de suelos en el sistema Unificado</b> |                |                                |
|---------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|----------------|--------------------------------|
|                                             | <b>Más probable</b>                                                | <b>Posible</b> | <b>Posible pero improbable</b> |
| A-1-a                                       | GW, GP                                                             | SW, SP         | GM, SM                         |
| A-1-b                                       | SW, SP, GM, SM                                                     | GP             | -                              |
| A-3                                         | SP                                                                 | -              | SW, GP                         |
| A-2-4                                       | GM, SM                                                             | GC, SC         | GW, GP, SW, SP                 |
| A-2-5                                       | GM, SM                                                             | -              | GW, GP, SW, SP                 |
| A-2-6                                       | GC, SC                                                             | GM, SM         | GW, GP, SW, SP                 |
| A-2-7                                       | GM, GC, SM, SC                                                     | -              | GW, GP, SW, SP                 |
| A-4                                         | ML, OL                                                             | CL, SM, SC     | GM, GC                         |
| A-5                                         | OH, MH, ML, OL                                                     | -              | SM, GM                         |
| A-6                                         | CL                                                                 | ML, OL, SC     | GC, GM, SM                     |
| A-7-5                                       | OH, MH                                                             | ML, OL, CH     | GM, SM, GC, SC                 |
| A-7-6                                       | CH, CL                                                             | ML, OL, SC     | OH, MH, GC, GM, SM             |

Fuente: Norma AASHTO

### 2.3. Arcillas

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 Villalaz, 2004, pág. 22)

**Figura 2. 2. Arcilla**



Fuente: Elaboración propia

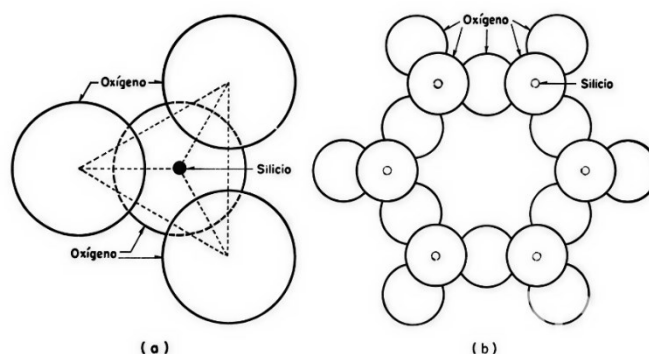
Las arcillas se definen como aquellas partículas “que desarrollan plasticidad cuando se mezclan con una cantidad limitada de agua”. (Grim,1953). Suelos no arcillosos pueden contener partículas suficientemente pequeñas como para estar dentro de la clasificación de tamaño arcilla, por lo tanto, es apropiado llamarlas partículas de tamaño de arcilla en lugar de arcilla. (Das B. M., 2015, pág. 29)

### **2.3.1. Minerales constitutivos de las arcillas**

Las arcillas están constituidas básicamente por silicatos de aluminio hidratados, presentando, además, en algunas ocasiones silicatos de magnesio, hierro u otros metales, también hidratados. Estos minerales tienen casi siempre una estructura cristalina definida, cuyos átomos se disponen en láminas. Existen dos variedades de tales láminas: la silícica (silice tetraédrico) y la alumínica (aluminio octaédrico). (Juárez Badillo & Rico Rodríguez, 2005, pág. 37)

La primera está formada por un átomo de silicio, rodeado de cuatro de oxígeno, disponiéndose el conjunto en forma de tetraedro, tal como se muestra en la figura 2. 3.a. Estos tetraedros se agrupan en unidades hexagonales, sirviendo un átomo de oxígeno de nexo entre cada dos tetraedros, formando una unidad hexagonal como se muestra en la figura 2.3.b. las unidades hexagonales repitiéndose indefinidamente, constituyen una redícula laminar. (Juárez Badillo & Rico Rodríguez, 2005, pág. 37)

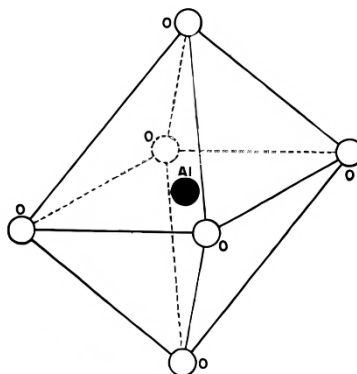
**Figura 2. 3.** Esquema de la estructura de la lámina silícica



Fuente: Mecánica de suelos Juárez, Badillo & Rico Rodríguez

Las láminas aluminicas están formadas por retículas de octaedros dispuestos con un átomo de aluminio al centro y seis oxígenos alrededor, tal como se muestra en la figura 2.4. También ahora es el oxígeno el nexo entre cada dos octaedros vecinos, para constituir la retícula. (Juárez Badillo & Rico Rodríguez, 2005, pág. 38).

**Figura 2. 4.** Esquema de la estructura de la lámina aluminica



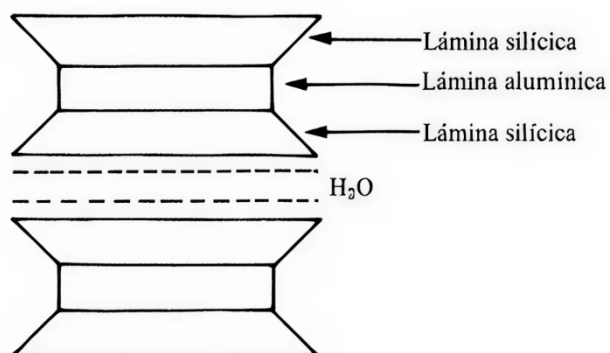
Fuente: Mecánica de suelos Juárez, Badillo & Rico Rodríguez

De acuerdo con su estructura reticular, los minerales de arcilla se encasillan en tres grandes grupos: caolinitas, montmorillonitas e ilitas.

Las montmorillonitas  $[(OH)_4Si_8Al_4O_{20} \cdot nH_2O]$  están formadas por una lámina aluminica entre dos silícicas, superponiéndose indefinidamente. En este caso la unión entre las retículas del mineral es débil, por lo que las moléculas de agua pueden introducirse a la estructura con relativa facilidad a causa de las fuerzas eléctricas generadas por su

naturaleza dipolar. Lo anterior produce un incremento en el volumen de los cristales, lo que se traduce, macrofísicamente, en una expansión. (Juárez Badillo & Rico Rodríguez, 2005, pág. 38)

**Figura 2. 5.** Arcilla montmorillonítica



Fuente: Mecánica de suelos y cimentaciones, Crespo Villalaz

### 2.3.2. Físico químico de las arcillas

En los granos gruesos de los suelos, las fuerzas de gravitación predominan fuertemente sobre cualesquiera otras fuerzas; pero en los suelos de grano muy fino, las fuerzas de otros tipos ejercen acción importantísima; debido a que, en estos granos, la relación de área a volumen alcanza valores de consideración y fuerzas electromagnéticas desarrolladas en la superficie de los compuestos minerales cobran significación. En general, se estima que esta actividad en la superficie de la partícula individual es fundamental para tamaños menores que dos micras (0.002 mm).

Para explicar la estructura interna de las arcillas se puede considerar la siguiente teoría, la superficie de cada partícula de suelo posee carga eléctrica negativa, según se desprende de la estructura iónica. La intensidad de la carga depende de la estructuración y composición de la arcilla. Así la partícula atrae a los iones positivos del agua ( $H^+$ ) y a cationes de diferentes elementos químicos, tales como  $Na^+$ ,  $K^+$ ,  $Ca^{++}$ ,  $Mg^+$ ,  $Al^{+++}$ ,  $Fe^{+++}$ , etc. Lo anterior conduce, en primer lugar, al hecho de que cada partícula individual de arcilla se ve rodeada de una capa de moléculas de agua orientadas en forma definida y ligadas a su estructura (agua adsorbida).

Las moléculas de agua son polarizadas, es decir, en ellas no coinciden los centros de gravedad de sus cargas negativas y positivas, sino que funcionan como pequeños dipolos permanentes; al ligarse a la partícula por su carga (+), el polo de carga (-) queda en posibilidad de actuar como origen de atracción para otros cationes positivos. Los propios cationes atraen moléculas de agua gracias a la naturaleza polarizada de estas, de modo que cada catión está en posibilidad de poseer un volumen de agua en torno a él. El agua adsorbida por cada catión aumenta con la carga eléctrica de este y con su radio iónico. Por lo anterior, cuando las partículas de suelo atraen a los cationes, se ve reforzada la película de agua ligada a la partícula. El espesor de la película de agua absorbida por el cristal de suelo es así función no solo de la naturaleza del mismo, sino también del tipo de los cationes atraídos. (Juárez Badillo & Rico Rodríguez, 2005, pág. 42)

### 2.3.3. Bentonita

Las bentonitas son arcillas del grupo montmorillonítico, originadas por la descomposición química de las cenizas volcánicas y presentan expansividad típica del grupo en forma particularmente aguda, lo que las hace sumamente críticas en su comportamiento mecánico. (Juárez Badillo & Rico Rodríguez, 2005, pág. 38)

**Figura 2. 6. Bentonita**



Fuente: <http://ingeniero-minas.blogspot.com>

Es clasificada en sódica y cálcica, en base al catión predominante entre las capas y a la habilidad para dilatarse. La bentonita sódica ( $\text{Na}^+$ ) exhibe una alta capacidad de dilatación en agua, mientras que la bentonita cálcica ( $\text{Ca}^+$ ) tiene mucho menos capacidad de dilatación. (Coordinación General de Minería, 2013, p.1)



### **2.3.3.1. Bentonita en la ingeniería civil**

Las bentonitas se empezaron a utilizar para este fin en Europa en los años 50, y se desarrolló más tarde en Estados Unidos. Se utiliza para cementar fisuras y grietas de rocas, absorbiendo la humedad para impedir que esta produzca derrumbamiento de túneles o excavaciones, para impermeabilizar trincheras, estabilización de charcas, etc.

Para que puedan ser utilizadas han de estar dotadas de un marcado carácter tixotrópico, viscosidad, alta capacidad de hinchamiento y buena dispersión. Las bentonitas sódicas y cálcicas activadas son las que presentan las mejores propiedades para este uso.

### **2.3.3.2. Usos y aplicación de la bentonita en la ingeniería civil**

- En túneles: Ayuda a la estabilización y soporte en la construcción de túneles. Actúa como lubricante (un 3-5 % de lodo de bentonita sódica mantenida a determinada presión soporta el frente del túnel).
- En tomas de tierra: Proporciona seguridad en el caso de rotura de cables enterrados.
- Transporte de sólidos en suspensión.
- Creación de membranas impermeables en torno a barreras en el suelo, o como soporte de excavaciones.
- Prevención de hundimientos. En las obras, se puede evitar el desplome de paredes lubricándolas con lechadas de Bentonita.
- Protección de tuberías: como lubricante y rellenando grietas.
- En cementos: aumenta su capacidad de ser trabajado y su plasticidad.

### **2.3.3.3. Ventajas del uso de la bentonita**

Además de posibilitar el logro de muy bajos niveles de permeabilidad, tiene las siguientes ventajas:

- Es de muy fácil ejecución.
- Se puede hacer con máquinas de uso muy difundido.
- Una vez ejecutado no requiere proceso de “curado” por lo cual puede entrar en uso de inmediato.
- Es muy económico porque en general requiere dosis bajas de bentonita.
- Disminuye el movimiento de suelos.

- Mayor duración que cualquier membrana plástica. Miles de años de estabilidad.
- No se quema.

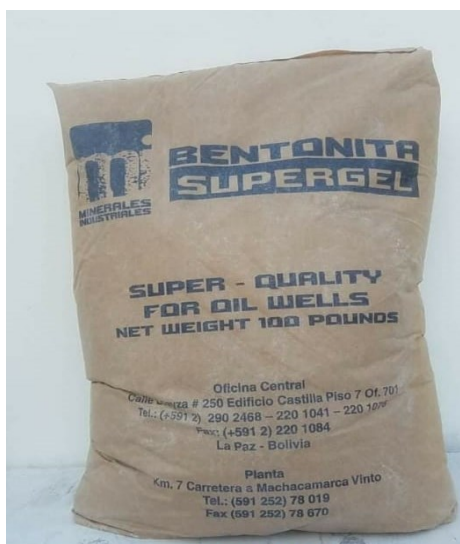
#### 2.3.3.4. Mezclas suelo - bentonita

El agregado de bentonitas a distintos tipos de suelos y su mezclado con el fin de lograr bajos coeficientes de permeabilidad es un método utilizado ampliamente a nivel mundial, pudiéndose lograr membranas impermeables naturales con coeficientes de  $1 \times 10^{-7}$  cm/s o menores. El agregado de bentonita oscila habitualmente entre 3% y 15%, éste último porcentaje se da para suelos francamente arenosos.

#### 2.3.4. Bentonita sódica activada Super Gel

La Bentonita Sódica activada Super Gel es el resultado de los tratamientos de una roca sedimentaria constituida esencialmente por una arcilla esmética del grupo motmorillonítico cálcico, que es activada con carbonato de sodio natural (trona), tiene como principales características la alta capacidad de absorción de agua, que consecuentemente, promueve un acentuado aumento de volumen, su alto poder de absorción de agua inter laminar se refleja en su excepcional hinchamiento de 20 veces su tamaño original. (Minerales industriales, 2012)

**Figura 2. 7.** Bentonita sódica activada Super Gel



Fuente: Elaboración propia

### 2.3.4.1. Características de la bentónica sódica activada Super Gel

Según la información proporcionada por la empresa de minerales industriales el producto tiene las siguientes especificaciones y características que se verán en forma resumida, para más detalle dirigirse al anexo A.

**Tabla 2. 6.** Especificación bentonita sódica activada Super Gel

| <b>Bentonita API</b> |                                                                                                              |
|----------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Fórmula química      | $\text{SiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3$                                                                       |
| Descripción          | Roca arcillosa, blanda, compuesta principalmente por montmorillonita activada con carbonato de sodio natural |
| Grupo químico        | Compuesto inorgánico                                                                                         |

Fuente: Minerales industriales

A continuación, se muestra una tabla que contiene las propiedades físicas y químicas del producto.

**Tabla 2. 7.** Propiedades físicas - químicas bentonita sódica activada Super Gel

| <b>Propiedades físicas - químicas</b> |          |
|---------------------------------------|----------|
| Estado físico                         | Sólido   |
| Apariencia                            | Arcilla  |
| Olor                                  | Sin olor |
| PH                                    | 8.50     |
| Humedad máxima                        | 9%       |
| Lectura viscosímetro a 600RPM         | 30 - 40  |
| Viscosidad plástica                   | 15 – 8cp |
| Viscosidad aparente                   | 4 – 20cp |

Fuente: Minerales industriales

## 2.4. Distribución granulometría

En cualquier masa de suelo, los tamaños de los granos varían en gran medida. Para clasificar apropiadamente un suelo, se debe conocer su distribución granulométrica. La distribución granulométrica de un suelo de grano grueso se determina por lo general mediante un análisis granulométrico con mallas. Para un suelo de grano fino, la distribución granulométrica se puede obtener por medio del análisis del hidrómetro. (Das B. M., 2012, pág. 2)

### 2.4.1. Análisis granulométrico con mallas

Un análisis granulométrico con mallas se efectúa tomando una cantidad medida de suelo pulverizado y haciéndolo pasar a través de un apilo de mallas con aberturas cada vez más pequeñas que dispone de una charola en su parte inferior. Se mide la cantidad de suelo retenido en cada malla y se determina el porcentaje acumulado del suelo que pasa a través de cada una. A este porcentaje se le refiere por lo general como porcentaje de finos.

**Tabla 2. 8.** Juego de tamices siguiendo la norma variante AASHTO T27

| Tamices | Tamaño (mm) |
|---------|-------------|
| 3"      | 75          |
| 2"      | 50.8        |
| 1 1/2 " | 38.1        |
| 1"      | 25.4        |
| 3/4"    | 19.1        |
| 3/8"    | 9.52        |
| Nº4     | 4.76        |
| Nº10    | 2           |
| Nº40    | 0.425       |
| Nº200   | 0.075       |
| Base    |             |

Fuente: Norma AASHTO T27

#### 2.4.1.1. Análisis granulométrico por el método de lavado

El suelo grueso o fino, debe ser lavado cuando se presente las siguientes condiciones.

- Si el suelo grueso, contiene material formado como terrones, deleznable a la presión que pueden ejercer los dedos de la mano, entonces debe ser sometido al proceso de lavado por el tamiz N°200.
- Si el suelo grueso no contiene material o formación de terrones, relativamente limpio, la granulometría es directa, no es necesario lavar el suelo.

Cuando el suelo es fino, es decir pasa el 100% el tamiz N°4 (N°10), y contiene limo y arcilla con poca arena, entonces hay que proceder con el lavado por el tamiz N°200. Caso contrario se tratará de arenas limpias y no es necesario el proceso de lavado. (Yurquina,2016)

#### 2.4.2. Análisis hidrométrico

El análisis hidrométrico se basa en el principio de sedimentación de las partículas de un suelo en agua. Esta prueba comprende utilizar 50 gramos de suelo seco y pulverizado. Al suelo siempre se le agrega un agente defloculante. El agente defloculante más común empleado para el análisis hidrométrico es 125 cc de una solución al 4% de hexametafosfato de sodio. Se deja que el suelo se sature con el agente defloculante durante al menos 16 horas. Después del periodo de saturación, se agrega agua destilada y se agita muy bien la mezcla de suelo y el agente defloculante. Luego la muestra se transfiere a un cilindro de vidrio de 1000 ml. Se agrega más agua destilada al cilindro hasta alcanzar la marca de 1000 ml y se vuelve a agitar muy bien la mezcla. Se coloca un hidrómetro en el cilindro para medir la gravedad específica de la suspensión suelo-agua en la vecindad del bulbo del instrumento (figura 2.8.), por lo general durante un periodo de 24 horas. Los hidrómetros se calibran para mostrar la cantidad de suelo que aún está en suspensión en cualquier tiempo  $t$  dado. El diámetro mayor de las partículas del suelo todavía en suspensión en el tiempo  $t$  se puede determinar mediante la ley de Stokes,

$$D = \sqrt{\frac{18}{(G_s - 1)\gamma_w}} \sqrt{\frac{L}{t}} = K \sqrt{\frac{L_{(cm)}}{t_{(min)}}}$$

Donde:

$D$ : Diámetro de la partícula de suelo.

$G_s$ : Gravedad específica de los sólidos del suelo.

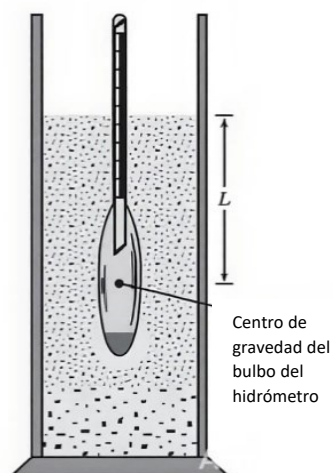
$\gamma_w$ : Peso específico del agua

$\eta$ : Viscosidad del agua

$L$ : Longitud efectiva.

$t$ : Tiempo

**Figura 2. 8.** Definición "L" en una prueba hidrométrica



Fuente: Fundamentos de ingeniería geotécnica Braja M. Das

La ley de Stokes aplicada a partículas de suelo real, que se sedimenten en agua, es válida solamente en tamaños menores de 0.2 mm, aproximadamente (en mayores tamaños, las turbulencias provocadas por el movimiento de la partícula alteran apreciablemente la ley de sedimentación), pero mayores que 0.2 micras, más o menos (abajo de este límite la partícula se afecta por el movimiento browniano y no se sedimenta). Por el análisis de tamices puede llegarse a tamaños de 0.074 mm, que caen dentro del campo de

aplicabilidad de la ley de Stokes; este hecho afortunado permite obtener datos ininterrumpidos. (Juárez Badillo & Rico Rodríguez, 2005, pág. 104)

La norma ASTM nos proporciona las siguientes tablas para realizar el cálculo del diámetro de la partícula.

**Tabla 2. 9.** Variación de  $K$  con el peso específico del suelo

| Temp.<br>(°C) | Peso específico de las partículas del suelo $G_s$ (g/cm <sup>3</sup> ) |        |         |         |        |        |        |        |
|---------------|------------------------------------------------------------------------|--------|---------|---------|--------|--------|--------|--------|
|               | 2.50                                                                   | 2.55   | 2.6     | 2.65    | 2.7    | 2.75   | 2.8    | 2.85   |
| 10            | 0.0161                                                                 | 0.016  | 0.01583 | 0.01555 | 0.0153 | 0.0151 | 0.0149 | 0.0147 |
| 11            | 0.0161                                                                 | 0.0158 | 0.0156  | 0.0153  | 0.0151 | 0.0149 | 0.0147 | 0.0145 |
| 12            | 0.0159                                                                 | 0.0156 | 0.0154  | 0.0151  | 0.0149 | 0.0147 | 0.0145 | 0.0143 |
| 13            | 0.0157                                                                 | 0.0154 | 0.0152  | 0.0149  | 0.0147 | 0.0145 | 0.0143 | 0.0141 |
| 14            | 0.0154                                                                 | 0.0152 | 0.015   | 0.0147  | 0.0145 | 0.0143 | 0.0141 | 0.0139 |
| 15            | 0.0153                                                                 | 0.015  | 0.0148  | 0.0145  | 0.0143 | 0.0141 | 0.0139 | 0.0137 |
| 16            | 0.0151                                                                 | 0.0148 | 0.0146  | 0.0144  | 0.0141 | 0.0139 | 0.0137 | 0.0136 |
| 17            | 0.0149                                                                 | 0.0146 | 0.0144  | 0.0142  | 0.014  | 0.0138 | 0.0136 | 0.0134 |
| 18            | 0.0148                                                                 | 0.0144 | 0.0142  | 0.014   | 0.0138 | 0.0136 | 0.0134 | 0.0132 |
| 19            | 0.0145                                                                 | 0.0143 | 0.014   | 0.0139  | 0.0136 | 0.0134 | 0.0132 | 0.0131 |
| 20            | 0.0143                                                                 | 0.0141 | 0.0139  | 0.0137  | 0.0134 | 0.0133 | 0.0131 | 0.0129 |
| 21            | 0.0141                                                                 | 0.0139 | 0.0137  | 0.0135  | 0.0133 | 0.0131 | 0.0129 | 0.0127 |
| 22            | 0.014                                                                  | 0.0137 | 0.0135  | 0.0133  | 0.0131 | 0.0129 | 0.0128 | 0.0126 |
| 23            | 0.0138                                                                 | 0.0136 | 0.0134  | 0.0132  | 0.013  | 0.0128 | 0.0126 | 0.0124 |
| 24            | 0.0137                                                                 | 0.0134 | 0.0132  | 0.013   | 0.0128 | 0.0126 | 0.0125 | 0.0123 |
| 25            | 0.0135                                                                 | 0.0133 | 0.0131  | 0.0129  | 0.0127 | 0.0125 | 0.0123 | 0.0122 |
| 26            | 0.0133                                                                 | 0.0131 | 0.0129  | 0.0127  | 0.0125 | 0.0124 | 0.0122 | 0.012  |
| 27            | 0.0132                                                                 | 0.013  | 0.0128  | 0.0126  | 0.0124 | 0.0122 | 0.012  | 0.0119 |
| 28            | 0.013                                                                  | 0.0128 | 0.0126  | 0.0124  | 0.0123 | 0.0121 | 0.0119 | 0.0117 |
| 29            | 0.0129                                                                 | 0.0127 | 0.0125  | 0.0123  | 0.0121 | 0.012  | 0.0118 | 0.0116 |
| 30            | 0.0128                                                                 | 0.0126 | 0.0124  | 0.0122  | 0.012  | 0.0118 | 0.0117 | 0.0115 |

Fuente: Norma ASTM D422

**Tabla 2. 10.** Variación de L (profundidad efectiva) con la lectura del hidrómetro 152H

| <b>Lect.<br/>Corr.</b> | <b>“L”<br/>(cm)</b> | <b>Lect.<br/>Corr.</b> | <b>“L”<br/>(cm)</b> |
|------------------------|---------------------|------------------------|---------------------|
| 0                      | 16.3                | 31                     | 11.2                |
| 1                      | 16.1                | 32                     | 11.1                |
| 2                      | 16                  | 33                     | 10.9                |
| 3                      | 15.8                | 34                     | 10.7                |
| 4                      | 15.6                | 35                     | 10.5                |
| 5                      | 15.5                | 36                     | 10.4                |
| 6                      | 15.3                | 37                     | 10.2                |
| 7                      | 15.2                | 38                     | 10.1                |
| 8                      | 15                  | 39                     | 9.9                 |
| 9                      | 14.8                | 40                     | 9.7                 |
| 10                     | 14.7                | 41                     | 9.6                 |
| 11                     | 14.5                | 42                     | 9.4                 |
| 12                     | 14.3                | 43                     | 9.2                 |
| 13                     | 14.2                | 44                     | 9.1                 |
| 14                     | 14                  | 45                     | 8.9                 |
| 15                     | 13.8                | 46                     | 8.8                 |
| 16                     | 13.7                | 47                     | 8.6                 |
| 17                     | 13.5                | 48                     | 8.4                 |
| 18                     | 13.3                | 49                     | 8.3                 |
| 19                     | 13.2                | 50                     | 8.1                 |
| 20                     | 13                  | 51                     | 7.9                 |
| 21                     | 12.9                | 52                     | 7.8                 |
| 22                     | 12.7                | 53                     | 7.6                 |
| 23                     | 12.5                | 54                     | 7.4                 |
| 24                     | 12.4                | 55                     | 7.3                 |
| 25                     | 12.2                | 56                     | 7.1                 |
| 26                     | 12                  | 57                     | 7                   |
| 27                     | 11.9                | 58                     | 6.8                 |
| 28                     | 11.7                | 59                     | 6.6                 |
| 29                     | 11.5                | 60                     | 6.5                 |
| 30                     | 11.4                |                        |                     |

Fuente: Norma ASTM D422



**Tabla 2. 11.** Valores del coeficiente de corrección  $a$  para distintos valores de  $G_s$ 

| <b><math>G_s</math></b> | <b><math>a</math></b> |
|-------------------------|-----------------------|
| 2.95                    | 0.94                  |
| 2.85                    | 0.96                  |
| 2.8                     | 0.97                  |
| 2.75                    | 0.98                  |
| 2.7                     | 0.99                  |
| 2.65                    | 1                     |
| 2.6                     | 1.01                  |
| 2.55                    | 1.02                  |
| 2.5                     | 1.03                  |

Fuente: Norma ASTM D422

**Tabla 2. 12.** Valores de corrección por temperatura

| <b>Temp.<br/>(°C)</b> | <b><math>C_T</math></b> |
|-----------------------|-------------------------|
| 15                    | -1.1                    |
| 16                    | -0.9                    |
| 17                    | -0.7                    |
| 18                    | -0.5                    |
| 19                    | -0.3                    |
| 20                    | 0                       |
| 21                    | 0.2                     |
| 22                    | 0.4                     |
| 23                    | 0.7                     |
| 24                    | 1                       |
| 25                    | 1.3                     |
| 26                    | 1.65                    |
| 27                    | 2                       |
| 28                    | 2.5                     |
| 29                    | 3.05                    |
| 30                    | 3.8                     |

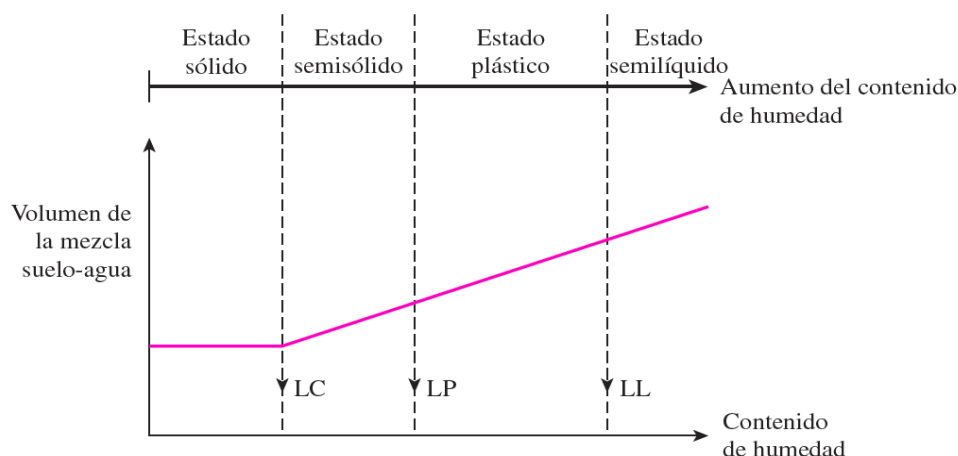
Fuente: Norma ASTM D422

### 2.4.3. Límites de Atterberg

Cuando un suelo arcilloso se mezcla con una cantidad excesiva de agua, puede fluir como un semilíquido. Si el suelo se seca gradualmente, se comportará como un material plástico, semisólido o sólido, dependiendo de su contenido de humedad. El contenido de humedad, en porcentaje, en el que el suelo cambia de un estado líquido a uno plástico se define como límite líquido (LL).

De manera similar, el contenido de humedad, en porcentaje, en el que el suelo cambia de un estado plástico a uno semisólido y de un estado semisólido a uno sólido se definen como límite plástico (LP) y límite de contracción (LC), respectivamente. A estos límites se les refiere como límites de Atterberg (figura 2.9). (Das B. M., 2012, pág. 15)

**Figura 2. 9.** Definición de los límites de Atterberg



Fuente: Fundamentos de ingeniería en cimentaciones Braja M. Das

- El **límite líquido** de un suelo se determina utilizando la copa de Casagrande (designación de prueba D-4318 de la ASTM) y se define como el contenido de humedad en el que se cierra una ranura de 12.7 mm mediante 25 golpes.

En la figura 2.10. se muestra la fotografía de un dispositivo de límite líquido. Este dispositivo consiste en una copa de latón y una base de goma dura. La copa de latón se puede soltar sobre la base por una leva operada por una manivela. Para la prueba de límite líquido, se coloca una pasta de suelo en la copa y se hace un corte en el centro

de la pasta de suelo, usando la herramienta de ranurado estándar. Entonces la copa se eleva con la leva accionada por la manivela y se deja caer desde una altura de 10 mm. El contenido de humedad, en porcentaje, necesario para cerrar una distancia de 12.7 mm a lo largo de la parte inferior de la ranura después de 25 golpes se define como el límite líquido.

**Figura 2. 10.** Dispositivo de límite líquido y herramienta de ranurado



Fuente: Fundamentos de ingeniería geotécnica, Braja M. Das

- El **límite plástico** se define como el contenido de humedad en el que el suelo se agrieta al formar un rollito de 3.18 mm de diámetro (designación de prueba D-4318 de la ASTM). La prueba es simple y se realiza mediante rodados repetidos por parte de una masa de tierra de tamaño elipsoidal sobre una placa de vidrio esmerilado (figura 2.11).

**Figura 2. 11.** Prueba de límite plástico



Fuente: Fundamentos de ingeniería geotécnica Braja M. Das

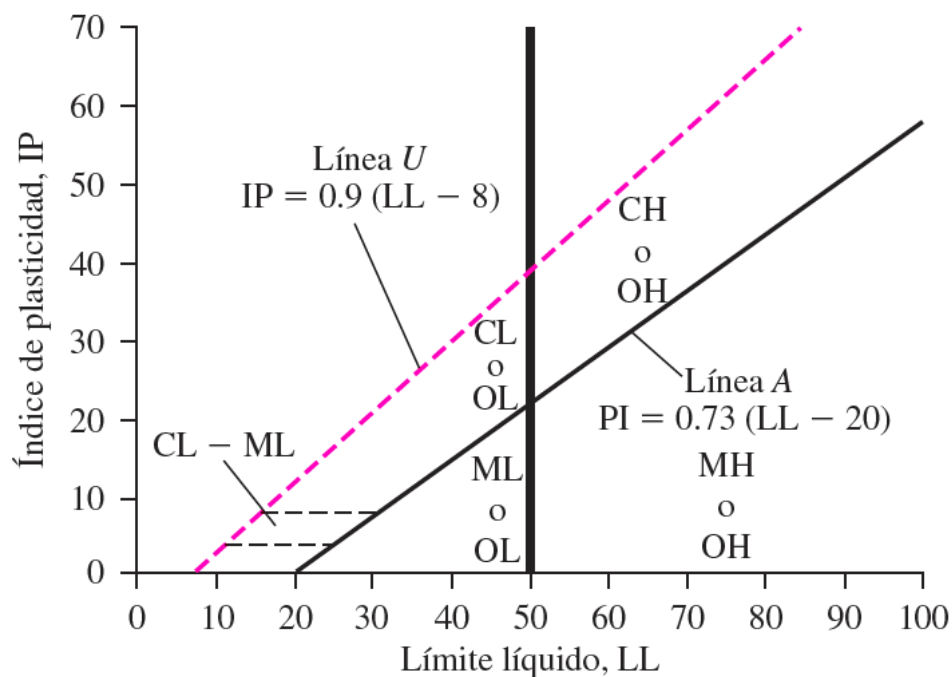
La diferencia entre el límite líquido y el límite plástico de un suelo se define como el **índice de plasticidad (IP)**.

$$IP = LL - LP$$

#### **2.4.3.1. Carta de plasticidad**

Los límites líquido y plástico se determinan por pruebas de laboratorio relativamente sencillas que proporcionan información sobre la naturaleza de los suelos cohesivos. Las pruebas han sido utilizadas ampliamente por los ingenieros para correlacionar varios parámetros físicos del suelo, así como para la identificación del mismo. Casagrande (1932) estudió la razón del índice de plasticidad con el límite líquido de una amplia variedad de suelos naturales. Sobre la base de los resultados de la prueba, se propuso una carta de plasticidad como la que se muestra en la figura 2.12. La característica importante de este cuadro es la línea A empírica que está dada por la ecuación  $PI = 0.73(LL - 20)$ . La línea A separa las arcillas inorgánicas de los limos inorgánicos. Las gráficas de los índices de plasticidad contra límites líquidos de arcillas inorgánicas se encuentran por encima de la línea A, y las de limos inorgánicos se encuentran por debajo de esta línea. Los limos orgánicos se grafican en la misma región (por debajo de la línea A y con LL que va de 30 a 50), como los limos inorgánicos de compresibilidad media. Las arcillas orgánicas parcela se grafican en la misma región que los limos inorgánicos de alta compresibilidad (por debajo de la línea A y LL mayor de 50). La información proporcionada en la carta de plasticidades de gran valor y es la base para la clasificación de los suelos de grano fino en el Sistema de Clasificación Unificado de Suelos.

Considere que una línea llamada U se encuentra por encima de la línea A. La línea U es de aproximadamente el límite superior de la relación del índice de plasticidad al límite de líquido para cualquier suelo encontrado hasta ahora. La ecuación de la línea U se puede dar como:  $PI = 0.9(LL - 8)$

**Figura 2. 12.** Carta de plasticidad

Fuente: Fundamentos de ingeniería geotécnica Braja M. Das

#### 2.4.4. Compactación de suelos

En la construcción de terraplenes de carreteras, presas de tierra y muchas otras estructuras de ingeniería, los suelos sueltos deben ser compactados para aumentar sus pesos unitarios. La compactación aumenta las características de resistencia de los suelos, incrementando de este modo la capacidad de carga de las cimentaciones construidas sobre ellos. La compactación también disminuye la cantidad de solución no deseada de las estructuras y aumenta la estabilidad de los taludes de los terraplenes. En el proceso de la compactación del suelo generalmente se utilizan rodillos de ruedas lisas, rodillos compactadores de suelo, rodillos neumáticos de goma y rodillos vibratorios. Los rodillos vibratorios se utilizan sobre todo para la densificación de los suelos granulares.

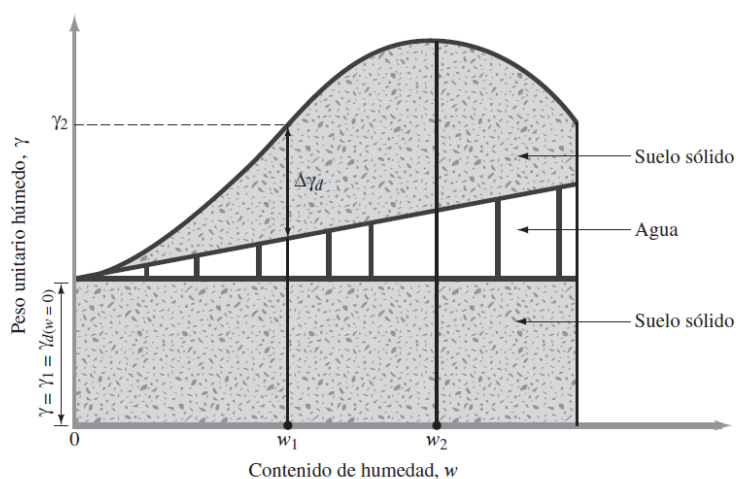
En general, la compactación es la consolidación del suelo por la eliminación de aire, lo que requiere energía mecánica. El grado de compactación de un suelo se mide en términos de su peso unitario seco. Cuando se añade agua a la tierra durante la compactación, ésta actúa como agente suavizante sobre las partículas del suelo. Éstas se deslizan una sobre la

otra y se mueven en una posición densamente empaquetadas. El peso unitario seco después de la compactación primero aumenta a medida que se incrementa el contenido de humedad (figura 2.13). Cuando contenido de humedad  $w = 0$ , la unidad de peso húmedo ( $\gamma$ ) es igual a la unidad de peso seco ( $\gamma_d$ ). Cuando el contenido de humedad se aumenta gradualmente y el mismo esfuerzo compactador se utiliza para la compactación, el peso de los sólidos del suelo en una unidad de volumen aumenta gradualmente. Por ejemplo, con  $w = w_1$ , el peso unitario húmedo es igual a:

$$\gamma = \gamma_d$$

Más allá de cierto contenido de humedad  $w = w_2$  (figura 2.13), cualquier aumento en éste tiende a reducir el peso unitario seco. Esto es debido a que el agua llena los espacios que han sido ocupados por las partículas sólidas. El contenido de humedad en el que se alcanza el peso unitario seco máximo generalmente se denomina *contenido de humedad óptimo*. (Das B. M., 2015, pág. 92)

**Figura 2. 13. Principios de compactación**



Fuente: Fundamentos de ingeniería geotécnica Braja M. Das

La prueba de laboratorio utilizada generalmente para obtener el peso unitario seco máximo de compactación y el contenido óptimo de humedad se denomina *prueba Proctor de compactación* (Proctor, 1933).

En la prueba Proctor, el suelo se compacta en un molde y durante la prueba de laboratorio el molde se une a una placa de base en la parte inferior y a una extensión en la parte

superior (figura 2.14a). El suelo se mezcla con cantidades variables de agua y luego es compactado en tres capas iguales por un martillo (figura 2.14b) que entrega 25 golpes a cada capa. El martillo pesa 24.4 N (masa  $\approx 2.5$ kg) y tiene una caída de 30.48cm.

Para cada prueba, el contenido de humedad del suelo compactado es determinado en el laboratorio. Si se conoce el contenido de humedad, el peso unitario seco  $\gamma_d$  puede calcularse con la siguiente ecuación:

$$\gamma_d = \frac{\gamma}{1 + \frac{w\%}{100}}$$

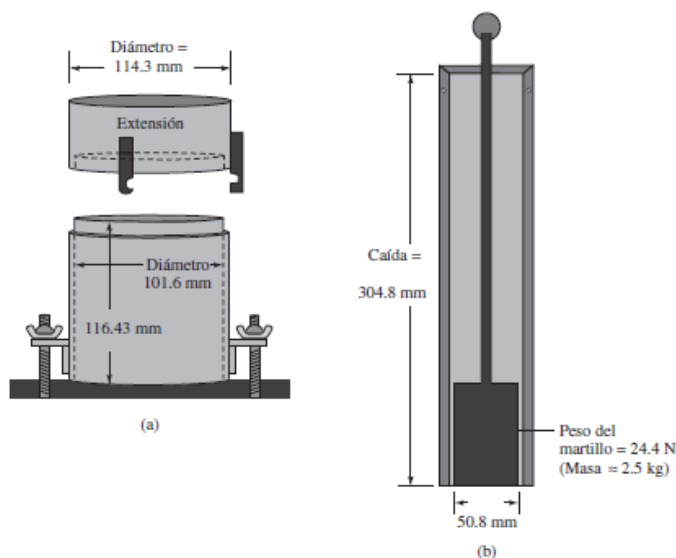
Donde:

$W\%$ : Porcentaje de contenido de humedad

Los valores de  $\gamma_d$  se pueden trazar en función de los correspondientes contenidos de humedad para obtener el peso unitario seco máximo y el contenido de humedad óptimo para el suelo.

El procedimiento para la prueba Proctor estándar se da en la Norma ASTM D698 y Norma AASHTO T99. (Das B. M., 2015, pág. 97)

**Figura 2. 14.** Equipo para la prueba Proctor estándar



Fuente: Fundamentos de ingeniería geotécnica Braja M. Das

La energía de compactación por unidad de volumen,  $E$ , usada en la prueba Proctor estándar puede describirse como:

$$E = \frac{N_{golpes} * N_{capas} * W_{pisón} * h_{caída}}{V}$$

Donde:

$E$ : Energía de compactación (N-m/m<sup>3</sup>).

$N_{golpes}$ : Número de golpes.

$N_{capas}$ : Número de capas.

$W_{pisón}$ : Peso del pisón (N).

$h_{caída}$ : Altura de caída del martillo (m).

$V$ : Volumen del molde (m<sup>3</sup>). (Das B. M., 2015, pág. 97)

## 2.5. Permeabilidad

Los suelos y las rocas no son sólidos ideales, sino que forman sistemas fases de partículas sólidas, líquido y gas. Definimos permeabilidad como la capacidad de un suelo, para permitir en su interior el paso de un fluido (agua) sin que dicho tránsito altere la estructura interna del cuerpo. Dicha propiedad se determina mediante la imposición de un gradiente hidráulico en una sección del cuerpo, y a lo largo de una trayectoria determinada. El concepto permeabilidad puede recibir también las acepciones de conductividad o transmisividad hidráulica, dependiendo del contexto en el cual sea empleado.

El estudio del flujo de agua a través de medios porosos del suelo es importante en la mecánica del suelo. Es necesario para la estimación de la cantidad de filtración subterránea bajo diversas condiciones hidráulicas, para la investigación de los problemas que implica el bombeo de agua para construcción subterránea y para la realización de los análisis de estabilidad de presas y estructuras de retención de tierra que están sujetas a fuerzas de filtración. (Das B. M., 2015, pág. 117)

La conductividad hidráulica o permeabilidad de los suelos depende de varios factores: la viscosidad del fluido, la distribución de tamaño de poro, distribución de tamaño de grano,



la relación de vacíos, la rugosidad de las partículas minerales y el grado de saturación del suelo. En suelos arcillosos la estructura juega un papel importante en la conductividad hidráulica. Otros factores importantes que afectan a la conductividad hidráulica. Otros factores importantes que afectan a la conductividad hidráulica de arcillas son la concentración iónica y el espesor de las capas de agua contenidas en las partículas de arcilla. La conductividad hidráulica de los suelos no saturados es menor y aumenta rápidamente con el grado de saturación. (Das B. M., 2015, pág. 121).

El coeficiente de permeabilidad de un suelo  $k$  se puede definir en términos simples como la velocidad con que el agua pasa a través del suelo dividida entre el gradiente hidráulico, aplicado la ley de Darcy. El valor de la conductividad hidráulica  $k$  se expresa en cm/s, este valor varía entre los diferentes suelos. Algunos valores típicos para suelos saturados se dan en la tabla 2.16.

**Figura 2. 15.** Valores típicos del coeficiente de permeabilidad

|                              | 100                                                                                                                                 | 10                                                                                                           | 1                                                                                             | 10 <sup>-1</sup> | 10 <sup>-2</sup>                                                                                                                        | 10 <sup>-3</sup> | 10 <sup>-4</sup> | 10 <sup>-6</sup>                                                                                      | 10 <sup>-7</sup>                                                                                           | 10 <sup>-8</sup> | 10 <sup>-9</sup> |
|------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------|------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------|------------------|
| Drenaje                      | Bueno                                                                                                                               |                                                                                                              |                                                                                               |                  |                                                                                                                                         |                  | Pobre            | Prácticamente impermeable                                                                             |                                                                                                            |                  |                  |
| Tipo de suelo                | Grava limpia                                                                                                                        | Arenas limpias y mezclas limpias de arena y grava                                                            |                                                                                               |                  | Arena muy fina, limos orgánicos e inorgánicos, Mezclas de arena, limo y arcilla, morenas glaciares, depósitos de arcilla estratificada. |                  |                  | Suelos "impermeables", es decir arcillas homogéneas situadas por debajo de la zona de descomposición. |                                                                                                            |                  |                  |
|                              |                                                                                                                                     |                                                                                                              | Suelos "impermeables" modificados por la vegetación o por la descomposición                   |                  |                                                                                                                                         |                  |                  |                                                                                                       |                                                                                                            |                  |                  |
| Determinación directa de k   | Ensayo directo del suelo "in situ", por ensayos de bombeo se requiere mucha experiencia, pero bien realizados son bastante exactos. |                                                                                                              |                                                                                               |                  |                                                                                                                                         |                  |                  |                                                                                                       |                                                                                                            |                  |                  |
|                              | Permeámetro de carga hidráulica constante. No requiere mayor experiencia.                                                           |                                                                                                              |                                                                                               |                  |                                                                                                                                         |                  |                  |                                                                                                       |                                                                                                            |                  |                  |
| Determinación indirecta de k |                                                                                                                                     | Permeámetro de carga hidráulica decreciente. No se requiere mayor experiencia y se obtiene buenos resultados | Permeámetro de carga hidráulica decreciente. Resultados dudosos se requiere mucha experiencia |                  |                                                                                                                                         |                  |                  |                                                                                                       | Permeámetro de carga hidráulica decreciente. Resultados de regular a bueno. Se requiere mucha experiencia. |                  |                  |
|                              | Por cálculo, partiendo de la curva granulométrica. Solo aplicable en el caso de arenas y gravas limpias sin cohesión.               |                                                                                                              |                                                                                               |                  |                                                                                                                                         |                  |                  | Cálculos basados en los ensayos de consolidación. Resultados buenos, se necesita mucha experiencia.   |                                                                                                            |                  |                  |

Fuente: Mecánica de Suelos, Juárez Badillo & Rico Rodríguez

La permeabilidad de un suelo también está relacionada con las propiedades del fluido que fluye a través de él por la siguiente ecuación:

$$k = \frac{\gamma_w}{\eta} \bar{K}$$

Donde:

$\gamma_w$ : Peso específico del agua

$\eta$  : Viscosidad del agua

$\bar{K}$ : Permeabilidad Absoluta (cm<sup>2</sup>)

La permeabilidad absoluta,  $\bar{K}$ , se expresa en unidades de longitud al cuadrado (es decir, cm<sup>2</sup>). La ecuación mostró que la conductividad hidráulica es una función del peso unitario y la viscosidad del agua, que es a su vez una función de la temperatura a la que se lleva a cabo la prueba. Por lo tanto:

$$\frac{k_{T1}}{k_{T2}} = \left( \frac{\eta_{T2}}{\eta_{T1}} \right) \left( \frac{\gamma_{u(T1)}}{\gamma_{u(T2)}} \right)$$

Donde:

$k_{T1}, k_{T2}$ : Conductividad hidráulica a temperaturas  $T_1$  y  $T_2$ , respectivamente.

$\eta_{T1}, \eta_{T2}$ : Viscosidad del fluido a temperaturas  $T_1$  y  $T_2$ , respectivamente.

$\gamma_{u(T1)}, \gamma_{u(T2)}$ : Unidad de peso de agua a temperaturas  $T_1$  y  $T_2$ , respectivamente. (Das B. M., 2015, pág. 122)

Esto es una convención para expresar el valor de  $k$  a una temperatura de 20°C. Dentro de la gama de temperaturas de prueba, podemos suponer que  $\gamma_{u(T1)} \approx \gamma_{u(T2)}$ . Por lo tanto:

$$k_{20} = \left( \frac{\eta_{T^{\circ}C}}{\eta_{20^{\circ}C}} \right) * k_{T^{\circ}C}$$

Donde:

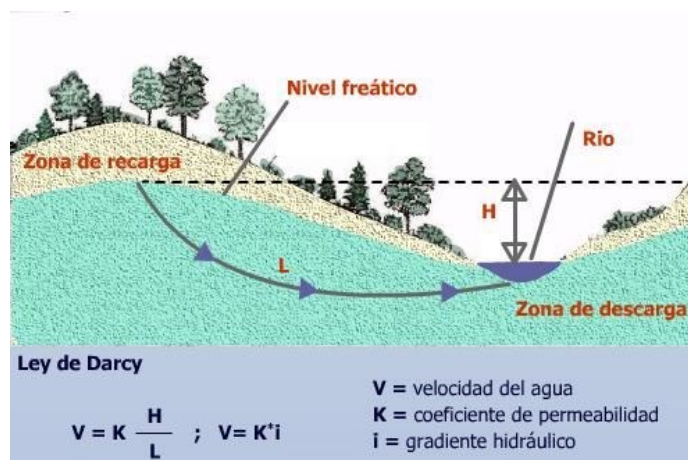
$\frac{\eta_{T^{\circ}C}}{\eta_{20^{\circ}C}}$  : Viscosidad del fluido con la temperatura de prueba T

$k_{T^{\circ}C}$ : Temperatura del agua de la prueba. (Das B. M., 2015, pág. 122)

### 2.5.1. Ley de Darcy

El flujo de agua a través de medios porosos está gobernado por una ley descubierta experimentalmente por Darcy en 1856, quien investigó las características del flujo de agua a través de filtros de material térreo.

**Figura 2. 16.** Ley de Darcy



Fuente: Estudios geotécnicos

Esta ecuación se basa principalmente en las observaciones que Darcy hace sobre el flujo de agua a través de arenas limpias y se da como

$$v = k * i$$

Donde:

$v$ : Velocidad de descarga, que es la cantidad de agua que fluye por unidad de tiempo a través de un área de sección transversal unitaria bruta de suelo en ángulo recto con la dirección del flujo

$k$ : coeficiente de permeabilidad (cm/s)

$i$ : gradiente hidráulico (adimensional)

El gradiente hidráulico del flujo es medido con la expresión:

$$i = \frac{h_1 - h_2}{L}$$

En cualquier punto del flujo la altura piezométrica  $h$  es la carga de la elevación  $z$  del punto, más la carga de presión en dicho punto. La diferencia  $h_1 - h_2$  representa la pérdida de energía sufrida por el flujo en el desplazamiento  $L$ . (Juárez Badillo & Rico Rodríguez, 2005, pág. 193)

### 2.5.1.1. Determinación en laboratorio de la permeabilidad

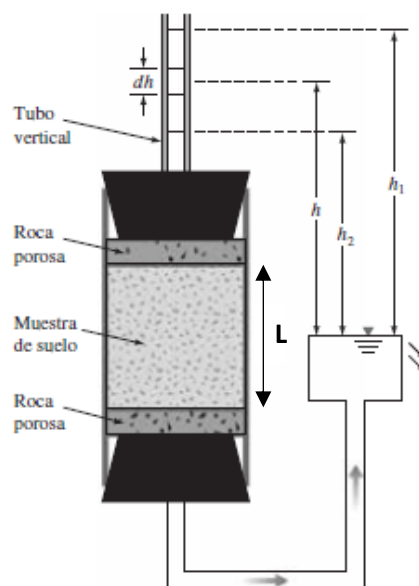
Para determinar la permeabilidad en laboratorio se utilizan dos pruebas estándar: la prueba de carga constante y la prueba de carga variable. La primera se usa para los suelos de grano grueso y la segunda para suelos finos. (Das B. M., 2015, pág. 123)

#### 2.5.1.1.1. Prueba de carga variable

En esta prueba se mide la cantidad de agua que atraviesa una muestra de suelo, por la diferencia de niveles en el tubo alimentador. La diferencia inicial de carga  $h_1$ , en el tiempo  $t = 0$  es registrada y se permite el flujo del agua de manera que la altura final de carga en el tiempo  $t = t_2$  se  $h_2$ . (Das B. M., 2015, pág. 124)

La figura 2.17. muestra un esquema típico para realizar la prueba del permeámetro de carga variable, en el cual se realiza la medición de aguase realiza mediante la variación de alturas en el tubo alimentador.

**Figura 2. 17.** Esquema permeámetro carga variable



Fuente: Fundamentos de ingeniería geotécnica Braja M. Das

La tasa de flujo  $q$  del agua, a través de la muestra de cualquier tiempo  $t$  se expresa por:

$$q = k \frac{h}{L} A = -a \frac{dh}{dt}$$

En donde  $a$  es el área de la sección transversal de la bureta y  $A$  es el área de la sección transversal de la muestra de suelo.

Reordenando la ecuación se tiene:

$$dt = \frac{a L}{A k} \left( -\frac{dh}{h} \right)$$

al integrar el lado izquierdo, con límites de tiempo entre 0 y  $t$  y el derecho con límites de diferencia de carga entre  $h_1$  y  $h_2$ , se obtiene. (Das B. M., 2015)

$$k = 2.303 \frac{a L}{A t} \log_{10} \frac{h_1}{h_2} \quad \text{ó} \quad k = \frac{a * L}{A * t} \ln \frac{h_1}{h_2}$$

Para expresar el valor de  $k$  a una temperatura de 20°C se utiliza la siguiente fórmula:

$$k_{20} = \left( \frac{\eta_{T^{\circ}C}}{\eta_{20^{\circ}C}} \right) * k_{T^{\circ}C}$$

La variación de  $\frac{\eta_{T^{\circ}C}}{\eta_{20^{\circ}C}}$  con la temperatura de prueba  $T$  se obtiene de la siguiente tabla

**Tabla 2. 13.** Variación  $\frac{\eta_{T^{\circ}C}}{\eta_{20^{\circ}C}}$

| Temperatura<br>T °C | $\frac{\eta_{T^{\circ}C}}{\eta_{20^{\circ}C}}$ | Temperatura<br>T °C | $\frac{\eta_{T^{\circ}C}}{\eta_{20^{\circ}C}}$ |
|---------------------|------------------------------------------------|---------------------|------------------------------------------------|
| 15                  | 1.135                                          | 23                  | 0.931                                          |
| 16                  | 1.106                                          | 24                  | 0.910                                          |
| 17                  | 1.077                                          | 25                  | 0.889                                          |
| 18                  | 1.051                                          | 26                  | 0.869                                          |
| 19                  | 1.025                                          | 27                  | 0.850                                          |
| 20                  | 1.000                                          | 28                  | 0.832                                          |
| 21                  | 0.976                                          | 29                  | 0.814                                          |
| 22                  | 0.953                                          | 30                  | 0.797                                          |

Fuente: Fundamentos de ingeniería geotécnica Braja M. Das

## 2.6. Análisis estadístico

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.

### 2.6.1. Estadística descriptiva

La estadística descriptiva tiene como objetivo resumir y caracterizar los datos recolectados en el estudio.

La estadística descriptiva es fundamental para entender y sintetizar los datos de una manera clara y concisa, previo al análisis inferencial. (Sampieri, 2014)

#### 2.6.1.1. Medidas de tendencia central

Las medidas de tendencia central son puntos en una distribución obtenida, los valores medios o centrales de ésta, y nos ayudan a ubicarla dentro de la escala de medición de la variable analizada. Las principales medidas de tendencia central son tres: moda, mediana y media. El nivel de medición de la variable determina cuál es la medida de tendencia central apropiada para interpretar. (Sampieri, 2014, pág. 286)

La **moda** es la categoría o puntuación que ocurre con mayor frecuencia. Se utiliza con cualquier nivel de medición. (Sampieri, 2014, pág. 286)

La **mediana** es el valor que divide la distribución por la mitad. Esto es, la mitad de los casos caen por debajo de la mediana y la otra mitad se ubica por encima de ésta. La mediana refleja la posición intermedia de la distribución. La mediana es una medida de

tendencia central propia de los niveles de medición ordinal, por intervalos y de razón. No tiene sentido con variables nominales, porque en este nivel no hay jerarquías ni noción de encima o debajo. Asimismo, la mediana es particularmente útil cuando hay valores extremos en la distribución. (Sampieri, 2014, pág. 286)

La **media** es tal vez la medida de tendencia central más utilizada y puede definirse como el promedio aritmético de una distribución. Se simboliza como  $\bar{x}$ , y es la suma de todos los valores dividida entre el número de casos. Es una medida solamente aplicable a mediciones por intervalos o de razón. Carece de sentido para variables medidas en un nivel nominal u ordinal. Resulta sensible a valores extremos. (Sampieri, 2014, pág. 287)

#### 2.6.1.2. Medidas de variabilidad

Las medidas de la variabilidad indican la dispersión de los datos en la escala de medición de la variable considerada y responden a la pregunta: ¿dónde están diseminadas las puntuaciones o los valores obtenidos? Las medidas de tendencia central son valores en una distribución y las medidas de la variabilidad son intervalos que designan distancias o un número de unidades en la escala de medición. Las medidas de la variabilidad más utilizadas son rango, desviación estándar y varianza. (Sampieri, 2014, pág. 287)

El **rango**, también llamado recorrido, es la diferencia entre la puntuación mayor y la puntuación menor, e indica el número de unidades en la escala de medición que se necesitan para incluir los valores máximo y mínimo. Se calcula así:  $X_M - X_m$  (puntuación mayor menos puntuación menor). Cuanto más grande sea el rango, mayor será la dispersión de los datos de una distribución. (Sampieri, 2014, pág. 288)

La **desviación estándar** o característica es el promedio de desviación de las puntuaciones con respecto a la media. Esta medida se expresa en las unidades originales de medición de la distribución. Se interpreta en relación con la media. Cuanto mayor sea la dispersión de los datos alrededor de la media, mayor será la desviación estándar. Se simboliza como:  $s$  o la sigma minúscula  $\sigma$ , o bien mediante la abreviatura DE.

La desviación estándar se interpreta como cuánto se desvía, en promedio, de la media un conjunto de puntuaciones. La desviación estándar sólo se utiliza en variables medidas por intervalos o de razón. (Sampieri, 2014, pág. 288)

La **varianza** es la desviación estándar elevada al cuadrado y se simboliza como  $s^2$ . Es un concepto estadístico muy importante, ya que la mayoría de las pruebas cuantitativas se fundamentan en él. Diversos métodos estadísticos parten de la descomposición de la varianza. (Sampieri, 2014, pág. 288)

### **2.6.2. Estadística Inferencial**

Con frecuencia, el propósito de la investigación va más allá de describir las distribuciones de las variables: se pretende probar hipótesis y generalizar los resultados obtenidos en la muestra a la población o universo. Los datos casi siempre se recolectan de una muestra y sus resultados estadísticos se denominan estadígrafos; la media o la desviación estándar de la distribución de una muestra son estadígrafos. A las estadísticas de la población se les conoce como parámetros. Éstos no son calculados, porque no se recolectan datos de toda la población, pero pueden ser inferidos de los estadígrafos, de ahí el nombre de estadística inferencial. (Sampieri, 2014, pág. 299)

Entonces, la estadística inferencial se utiliza fundamentalmente para dos procedimientos vinculados:

- a) Probar hipótesis poblacionales
- b) Estimar parámetros

La inferencia de los parámetros depende de que hayamos elegido una muestra probabilística con un tamaño que asegure un nivel de significancia o significación adecuado. (Sampieri, 2014, pág. 299)

#### **2.6.2.1. Hipótesis y prueba de hipótesis**

Una hipótesis en el contexto de la estadística inferencial es una proposición respecto de uno o varios parámetros, y lo que el investigador hace por medio de la prueba de hipótesis es determinar si la hipótesis poblacional es congruente con los datos obtenidos en la muestra. Una hipótesis se retiene como un valor aceptable del parámetro, si es consistente con los datos. Si no lo es, se rechaza (pero los datos no se descartan). (Sampieri, 2014, pág. 301)



Hay dos tipos de análisis estadísticos que pueden realizarse para probar hipótesis: los análisis paramétricos y los no paramétricos. Cada tipo posee sus características y presuposiciones que lo sustentan; la elección de qué clase de análisis efectuar depende de los supuestos. De igual forma, cabe destacar que en una misma investigación es posible llevar a cabo análisis paramétricos para algunas hipótesis y variables, y análisis no paramétricos para otras. Asimismo, como vimos, los análisis a realizar dependen del planteamiento, tipo de hipótesis y el nivel de medición de las variables que las conforman. A parte de la hipótesis se plantea una hipótesis nula y alternativa (Sampieri, 2014, pág. 304)

***Hipótesis nula ( $H_0$ ):*** Es el reverso de la hipótesis de investigación. También constituyen proposiciones acerca de la relación entre variable, solo que sirven para refutar o negar lo que afirma la hipótesis de investigación. (Sampieri, 2014, pág. 114)

***Hipótesis alternativa ( $H_1$ ):*** Es la posibilidad alterna de la hipótesis de investigación y nula, ofrecen una descripción o explicación distinta a las que proporcionan estas. (Sampieri, 2014, pág. 114)

#### **2.6.2.2. Nivel de significancia ( $\alpha$ ) o significación**

Para probar hipótesis inferenciales respecto a la media, el investigador debe evaluar si es alta o baja la probabilidad de que la media de la muestra esté cerca de la media de la distribución muestral. Si es baja, el investigador dudará de generalizar a la población. Si es alta, el investigador podrá hacer generalizaciones. Es aquí donde entra el nivel de significancia o nivel alfa ( $\alpha$ ), el cual es un nivel de la probabilidad de equivocarse y se fija antes de probar hipótesis inferenciales.

El nivel de significancia de 0.05 implica que el investigador tiene 95% de seguridad para generalizar sin equivocarse y sólo 5% en contra. En términos de probabilidad, 0.95 y 0.05, respectivamente; ambos suman la unidad.

### 2.6.2.3. Análisis paramétricos

Para realizar análisis paramétricos debe partirse de los siguientes supuestos:

- La distribución poblacional de la variable dependiente es normal: el universo tiene una distribución normal.
- El nivel de medición de las variables es por intervalos o razón.
- Cuando dos o más poblaciones son estudiadas, tienen una varianza homogénea: las poblaciones en cuestión poseen una dispersión similar en sus distribuciones. (Sampieri, 2014, pág. 304)

Existen diversas pruebas paramétricas, pero las más utilizadas son:

- Coeficiente de correlación de Pearson y regresión lineal.
- Prueba t.
- Prueba de contraste de la diferencia de proporciones.
- Análisis de varianza unidireccional (ANOVA en un sentido).
- Análisis de varianza factorial (ANOVA).
- Análisis de covarianza (ANCOVA). (Sampieri, 2014, pág. 304)

#### 2.6.2.3.1. Regresión lineal

Es un modelo estadístico para estimar el efecto de una variable sobre otra, está asociado con el coeficiente  $r$  de Pearson. Brinda la oportunidad de predecir las puntuaciones de una variable a partir de las puntuaciones de la otra variable. Entre mayor sea la correlación entre las variables (covariación), mayor capacidad de predicción. (Sampieri, 2014, pág. 307)

*Hipótesis:* correlacionales y causales.

*Variables:* dos. Una se considera como independiente y otra como dependiente. Pero, para poder hacerlo, debe tenerse un sólido sustento teórico.

*Nivel de medición de las variables:* intervalos o razón.

*Procedimiento e interpretación:* la regresión lineal se determina con base en el diagrama de dispersión. Éste consiste en una gráfica donde se relacionan las puntuaciones de una muestra en dos variables. (Sampieri, 2014, pág. 307)

La recta de regresión lineal se expresa mediante la siguiente ecuación:

$$Y = a + bX$$

En donde  $Y$  es un valor de la variable dependiente que se desea predecir,  $a$  es la ordenada en el origen (intersección) y  $b$  la pendiente o inclinación,  $X$  es el valor que fijamos en la variable independiente o predictora. (Sampieri, 2014, pág. 308)

La regresión lineal es útil con relaciones lineales, no con relaciones curvilíneas. Porque como señalan León y Montero (2003, p. 191) es un error atribuir a la relación causal una covariación exclusivamente lineal: a mayores valores en la variable independiente, mayores valores en la dependiente. Las relaciones curvilíneas son aquellas en las cuales la tendencia varía, por ejemplo: primero es ascendente y luego descendente, o viceversa. (Sampieri, 2014, pág. 309)

#### **2.6.2.3.2. Análisis de varianza (ANOVA)**

Es una prueba estadística para analizar si más de dos grupos difieren significativamente entre sí en cuanto a sus medias y varianzas. La prueba  $t$  se aplica para dos grupos y el análisis de varianza unidireccional se usa para tres, cuatro o más grupos. Aunque con dos grupos se puede utilizar también. (Sampieri, 2014, pág. 314)

*Hipótesis:* de diferencia entre más de dos grupos. La hipótesis de investigación propone que los grupos difieren significativamente entre sí y la hipótesis nula propone que los grupos no difieren significativamente.

*Variables:* una variable independiente y una variable dependiente.

*Nivel de medición de las variables:* la variable independiente es categórica y la dependiente es por intervalos o razón. El hecho de que la variable independiente sea categórica significa que es posible formar grupos diferentes. Puede ser una variable

nominal, ordinal, por intervalos o de razón (pero en estos últimos dos casos la variable debe reducirse a categorías).

*Interpretación:* el análisis de varianza unidireccional produce un valor conocido como F o razón F, que se basa en una distribución muestral, conocida como distribución F, la cual es otro miembro de la familia de distribuciones muestrales. La razón F compara las variaciones en las puntuaciones debidas a dos diferentes fuentes: variaciones entre los grupos que se comparan y variaciones dentro de los grupos. (Sampieri, 2014, pág. 314)

El corazón del ANOVA es el estadístico de prueba **F**, que es la razón de estas dos varianzas:

$$F = \frac{\text{Varianza entre grupos}}{\text{Varianza dentro de los grupos}}$$

Si el valor F es significativo implica que los grupos difieren entre sí en sus promedios. Entonces se acepta la hipótesis de investigación y se rechaza la nula. (Sampieri, 2014, pág. 314)

**Tabla 2. 14.** Fórmulas ANOVA

| Fuente de variación    | Suma de cuadrados                                                      | Grados de libertad | Cuadrado medio                          | F                                  |
|------------------------|------------------------------------------------------------------------|--------------------|-----------------------------------------|------------------------------------|
| Entre las muestras     | $SC_{Trat} = \sum_{i=1}^k n_i (\bar{x}_i - \bar{x}_{..})^2$            | $k - 1$            | $CM_{Trat} = \frac{SC_{Trat}}{k - 1}$   | $F = \frac{CM_{Trat}}{CM_{Error}}$ |
| Dentro de las muestras | $SC_{Error} = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{n_i} (x_{ij} - \bar{x}_{i.})^2$ | $N - k$            | $CM_{Error} = \frac{SC_{Error}}{N - k}$ |                                    |
| Total                  | $SC_{Error} = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{n_i} (x_{ij} - \bar{x}_{..})^2$ | $N - 1$            |                                         |                                    |

Fuente: Probabilidad y estadística para ingeniería y ciencias, Walpole et al

### 2.6.2.3.3. Prueba de Tukey

Después de un análisis de varianza en el que se ha rechazado la hipótesis nula de la igualdad de los medios de tratamientos, quieren probarse todas las comparaciones de las medias por pares:

$$H_0: \mu_i = \mu_j$$

$$H_1: \mu_i \neq \mu_j$$

Para toda  $i \neq j$ . Tukey propuso un procedimiento para probar hipótesis para las que el nivel de significación global es exactamente  $\alpha$  cuando los tamaños de las muestras son iguales. El procedimiento de Tukey hace uso de la distribución del estadístico del rango studentizado. (Montgomery, 2004, pág. 96)

Para tamaños de muestra iguales la prueba de Tukey declara que dos medias son significativamente diferentes si el valor absoluto de sus diferencias muestrales excede.

$$T_\alpha = q_\alpha(k, N - k) \sqrt{\frac{CM_E}{n_i}}$$

Donde:

$T_\alpha$ : Valor crítico de Tukey para el nivel de significancia  $\alpha$ .

$q_\alpha, k, N-k$ : Cuantil de la distribución de Tukey para un nivel de significancia  $\alpha$ ,  $k$  grupos y  $N-k$  grados de libertad del error.

$CME$ : Cuadrado medio del error (obtenido del ANOVA).

$n_i$ : Número de repeticiones en cada grupo.

El valor de los cuantiles  $q_\alpha, k, N-k$  se extrae de la siguiente tabla 2.15. (Montgomery, 2004)

**Tabla 2. 15.** Cuantiles de la distribución de Tukey  $q\alpha, k, N-k$ 

| $\alpha = 0.05$ | 2    | 3    | 4    | 5     | 6     | 7     | 8     | 9     | 10    | 11    | 12    | 13    | 14    | 15    |
|-----------------|------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 2               | 6.08 | 8.33 | 9.80 | 10.88 | 11.73 | 12.43 | 13.03 | 13.54 | 13.99 | 14.40 | 14.76 | 15.09 | 15.39 | 15.67 |
| 3               | 4.50 | 5.91 | 6.82 | 7.50  | 8.04  | 8.48  | 8.85  | 9.18  | 9.46  | 9.72  | 9.95  | 10.15 | 10.35 | 10.52 |
| 4               | 3.93 | 5.04 | 5.76 | 6.29  | 6.71  | 7.05  | 7.35  | 7.60  | 7.83  | 8.03  | 8.21  | 8.37  | 8.52  | 8.66  |
| 5               | 3.64 | 4.60 | 5.22 | 5.67  | 6.03  | 6.33  | 6.58  | 6.80  | 6.99  | 7.17  | 7.32  | 7.47  | 7.60  | 7.72  |
| 6               | 3.46 | 4.34 | 4.90 | 5.30  | 5.63  | 5.90  | 6.12  | 6.32  | 6.49  | 6.65  | 6.79  | 6.92  | 7.03  | 7.14  |
| 7               | 3.34 | 4.16 | 4.68 | 5.06  | 5.36  | 5.61  | 5.82  | 6.00  | 6.16  | 6.30  | 6.43  | 6.55  | 6.66  | 6.76  |
| 8               | 3.26 | 4.04 | 4.53 | 4.89  | 5.17  | 5.40  | 5.60  | 5.77  | 5.92  | 6.05  | 6.18  | 6.29  | 6.39  | 6.48  |
| 9               | 3.20 | 3.95 | 4.41 | 4.76  | 5.02  | 5.24  | 5.43  | 5.59  | 5.74  | 5.87  | 5.98  | 6.09  | 6.19  | 6.28  |
| 10              | 3.15 | 3.88 | 4.33 | 4.65  | 4.91  | 5.12  | 5.30  | 5.46  | 5.60  | 5.72  | 5.83  | 5.93  | 6.03  | 6.11  |
| 11              | 3.11 | 3.82 | 4.26 | 4.57  | 4.82  | 5.03  | 5.20  | 5.35  | 5.49  | 5.61  | 5.71  | 5.81  | 5.90  | 5.98  |
| 12              | 3.08 | 3.77 | 4.20 | 4.51  | 4.75  | 4.95  | 5.12  | 5.27  | 5.39  | 5.51  | 5.61  | 5.71  | 5.80  | 5.88  |
| 13              | 3.06 | 3.73 | 4.15 | 4.45  | 4.69  | 4.88  | 5.05  | 5.19  | 5.32  | 5.43  | 5.53  | 5.63  | 5.71  | 5.79  |
| 14              | 3.03 | 3.70 | 4.11 | 4.41  | 4.64  | 4.83  | 4.99  | 5.13  | 5.25  | 5.36  | 5.46  | 5.55  | 5.64  | 5.71  |
| 15              | 3.01 | 3.67 | 4.08 | 4.37  | 4.59  | 4.78  | 4.94  | 5.08  | 5.20  | 5.31  | 5.40  | 5.49  | 5.57  | 5.65  |
| 16              | 3.00 | 3.65 | 4.05 | 4.33  | 4.56  | 4.74  | 4.90  | 5.03  | 5.15  | 5.26  | 5.35  | 5.44  | 5.52  | 5.59  |
| 17              | 2.98 | 3.63 | 4.02 | 4.30  | 4.52  | 4.70  | 4.86  | 4.99  | 5.11  | 5.21  | 5.31  | 5.39  | 5.47  | 5.54  |
| 18              | 2.97 | 3.61 | 4.00 | 4.28  | 4.49  | 4.67  | 4.82  | 4.96  | 5.07  | 5.17  | 5.27  | 5.35  | 5.43  | 5.50  |
| 19              | 2.96 | 3.59 | 3.98 | 4.25  | 4.47  | 4.65  | 4.79  | 4.92  | 5.04  | 5.14  | 5.23  | 5.31  | 5.39  | 5.46  |
| 20              | 2.95 | 3.58 | 3.96 | 4.23  | 4.45  | 4.62  | 4.77  | 4.90  | 5.01  | 5.11  | 5.20  | 5.28  | 5.36  | 5.43  |
| 21              | 2.94 | 3.56 | 3.94 | 4.21  | 4.42  | 4.60  | 4.74  | 4.87  | 4.98  | 5.08  | 5.17  | 5.25  | 5.33  | 5.40  |
| 22              | 2.93 | 3.55 | 3.93 | 4.20  | 4.41  | 4.58  | 4.72  | 4.85  | 4.96  | 5.06  | 5.14  | 5.23  | 5.30  | 5.37  |
| 23              | 2.93 | 3.54 | 3.91 | 4.18  | 4.39  | 4.56  | 4.70  | 4.83  | 4.94  | 5.03  | 5.12  | 5.20  | 5.27  | 5.34  |
| 24              | 2.92 | 3.53 | 3.90 | 4.17  | 4.37  | 4.54  | 4.68  | 4.81  | 4.92  | 5.01  | 5.10  | 5.18  | 5.25  | 5.32  |
| 25              | 2.91 | 3.52 | 3.89 | 4.15  | 4.36  | 4.53  | 4.67  | 4.79  | 4.90  | 4.99  | 5.08  | 5.16  | 5.23  | 5.30  |
| 26              | 2.91 | 3.51 | 3.88 | 4.14  | 4.35  | 4.51  | 4.65  | 4.77  | 4.88  | 4.98  | 5.06  | 5.14  | 5.21  | 5.28  |
| 27              | 2.90 | 3.51 | 3.87 | 4.13  | 4.33  | 4.50  | 4.64  | 4.76  | 4.86  | 4.96  | 5.04  | 5.12  | 5.19  | 5.26  |
| 28              | 2.90 | 3.50 | 3.86 | 4.12  | 4.32  | 4.49  | 4.62  | 4.74  | 4.85  | 4.94  | 5.03  | 5.11  | 5.18  | 5.24  |
| 29              | 2.89 | 3.49 | 3.85 | 4.11  | 4.31  | 4.47  | 4.61  | 4.73  | 4.84  | 4.93  | 5.01  | 5.09  | 5.16  | 5.23  |
| 30              | 2.89 | 3.49 | 3.85 | 4.10  | 4.30  | 4.46  | 4.60  | 4.72  | 4.82  | 4.92  | 5.00  | 5.08  | 5.15  | 5.21  |
| 31              | 2.88 | 3.48 | 3.84 | 4.09  | 4.29  | 4.45  | 4.59  | 4.71  | 4.81  | 4.90  | 4.99  | 5.06  | 5.13  | 5.20  |
| 32              | 2.88 | 3.48 | 3.83 | 4.09  | 4.28  | 4.45  | 4.58  | 4.70  | 4.80  | 4.89  | 4.98  | 5.05  | 5.12  | 5.18  |
| 33              | 2.88 | 3.47 | 3.83 | 4.08  | 4.28  | 4.44  | 4.57  | 4.69  | 4.79  | 4.88  | 4.97  | 5.04  | 5.11  | 5.17  |
| 34              | 2.87 | 3.47 | 3.82 | 4.07  | 4.27  | 4.43  | 4.56  | 4.68  | 4.78  | 4.87  | 4.96  | 5.03  | 5.10  | 5.16  |
| 35              | 2.87 | 3.46 | 3.81 | 4.07  | 4.26  | 4.42  | 4.56  | 4.67  | 4.77  | 4.86  | 4.95  | 5.02  | 5.09  | 5.15  |
| 36              | 2.87 | 3.46 | 3.81 | 4.06  | 4.25  | 4.41  | 4.55  | 4.66  | 4.76  | 4.85  | 4.94  | 5.01  | 5.08  | 5.14  |
| 37              | 2.87 | 3.45 | 3.80 | 4.05  | 4.25  | 4.41  | 4.54  | 4.66  | 4.76  | 4.85  | 4.93  | 5.00  | 5.07  | 5.13  |
| 38              | 2.86 | 3.45 | 3.80 | 4.05  | 4.24  | 4.40  | 4.53  | 4.65  | 4.75  | 4.84  | 4.92  | 4.99  | 5.06  | 5.12  |
| 39              | 2.86 | 3.45 | 3.79 | 4.04  | 4.24  | 4.39  | 4.53  | 4.64  | 4.74  | 4.83  | 4.91  | 4.98  | 5.05  | 5.11  |
| 40              | 2.86 | 3.44 | 3.79 | 4.04  | 4.23  | 4.39  | 4.52  | 4.63  | 4.73  | 4.82  | 4.90  | 4.98  | 5.04  | 5.11  |
| 41              | 2.86 | 3.44 | 3.79 | 4.03  | 4.23  | 4.38  | 4.51  | 4.63  | 4.73  | 4.82  | 4.90  | 4.97  | 5.04  | 5.10  |
| 42              | 2.85 | 3.44 | 3.78 | 4.03  | 4.22  | 4.38  | 4.51  | 4.62  | 4.72  | 4.81  | 4.89  | 4.96  | 5.03  | 5.09  |
| 43              | 2.85 | 3.43 | 3.78 | 4.03  | 4.22  | 4.37  | 4.50  | 4.62  | 4.72  | 4.80  | 4.88  | 4.96  | 5.02  | 5.08  |
| 44              | 2.85 | 3.43 | 3.78 | 4.02  | 4.21  | 4.37  | 4.50  | 4.61  | 4.71  | 4.80  | 4.88  | 4.95  | 5.02  | 5.08  |
| 45              | 2.85 | 3.43 | 3.77 | 4.02  | 4.21  | 4.36  | 4.49  | 4.61  | 4.70  | 4.79  | 4.87  | 4.94  | 5.01  | 5.07  |
| 46              | 2.85 | 3.42 | 3.77 | 4.01  | 4.20  | 4.36  | 4.49  | 4.60  | 4.70  | 4.79  | 4.87  | 4.94  | 5.00  | 5.06  |
| 47              | 2.85 | 3.42 | 3.77 | 4.01  | 4.20  | 4.36  | 4.48  | 4.60  | 4.69  | 4.78  | 4.86  | 4.93  | 5.00  | 5.06  |
| 48              | 2.84 | 3.42 | 3.76 | 4.01  | 4.20  | 4.35  | 4.48  | 4.59  | 4.69  | 4.78  | 4.86  | 4.93  | 4.99  | 5.05  |
| 49              | 2.84 | 3.42 | 3.76 | 4.00  | 4.19  | 4.35  | 4.48  | 4.59  | 4.69  | 4.77  | 4.85  | 4.92  | 4.99  | 5.05  |
| 50              | 2.84 | 3.42 | 3.76 | 4.00  | 4.19  | 4.34  | 4.47  | 4.58  | 4.68  | 4.77  | 4.85  | 4.92  | 4.98  | 5.04  |

Fuente: Diseño y análisis de experimentos, Montgomery

# **CAPÍTULO III**

## **DESARROLLO EXPERIMENTAL**

## **CAPÍTULO III**

### **DESARROLLO EXPERIMENTAL**

#### **3.1. Introducción**

En esta sección se muestra el relevamiento de la información basado en la consulta de bibliografía especializada, manuales de laboratorio, artículos científicos y las normativas ASTM y AASHTO. Una vez definida la metodología, se procedió a la recolección de muestras preliminares de suelo de diferentes zonas de la ciudad de Tarija, con el objetivo de encontrar arcilla de alta plasticidad.

Para esta investigación, se estableció trabajar con la arcilla de alta plasticidad en su estado natural como referencia, y posteriormente se realizaron combinaciones con la adición de bentonita sódica activada en cinco porcentajes distintos: 2%, 4%, 6%, 8% y 10%. El propósito es comparar las propiedades del suelo natural con las del suelo modificado. Se realizarán ensayos de caracterización del suelo para cada porcentaje de bentonita sódica activada con el fin de observar la existencia de cambios en las propiedades mecánicas de la arcilla, haciendo especial énfasis en la permeabilidad, que es la variable principal de este proyecto y será medida mediante el ensayo de carga variable.

#### **3.2. Zona de estudio**

Gran parte de la provincia Cercado de Tarija está compuesta de arcillas, esta característica hizo necesaria la recolección de muestras de diferentes zonas para asegurar la identificación del tipo de suelo deseado.

##### **3.2.1. Criterios de selección de muestra**

Se recolectaron cinco muestras de arcilla de distintas ubicaciones en la región de Tarija. A cada una de estas muestras preliminares se le realizaron ensayos de granulometría y límites de Atterberg para determinar su clasificación utilizando la carta de plasticidad.

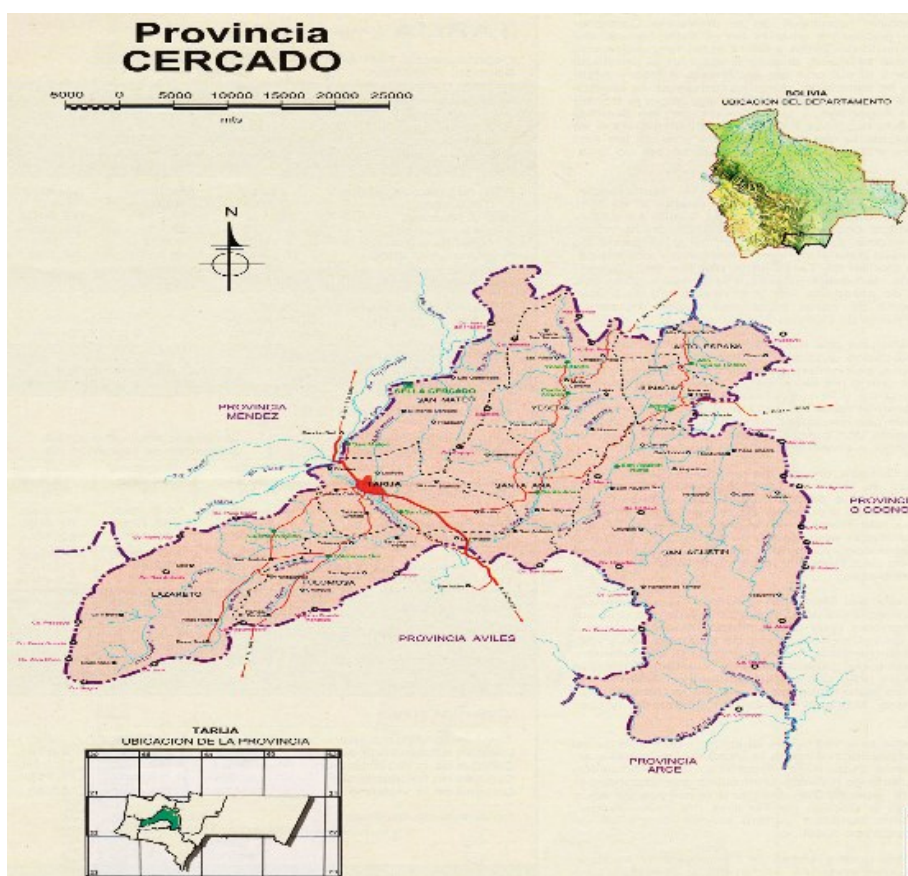
Una vez identificada la muestra que mejor cumplía con esta característica, fue seleccionada como la única arcilla representativa para la fase experimental detallada de esta investigación.



### 3.2.2. Ubicación de las zonas de extracción preliminares

Las muestras de suelo utilizadas en esta investigación serán del Departamento de Tarija, más propiamente de la provincia Cercado. 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. 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.

**Figura 3. 1.** Mapa de la provincia Cercado Tarija



Fuente: <https://www.educa.com.bo/>

Las zonas de recolección de las muestras preliminares para la selección del suelo requerido son las siguientes: Barrio Fray Quebracho, Moto Méndez, Monte Cristo y la zona de San Blas.

### 3.2.3. Mapa satelital y coordenadas de las zonas de extracción de muestras preliminares

**Figura 3. 2.** Mapa satelital barrio Fray Quebracho suelo A



Fuente: Google maps

**Figura 3. 3.** Mapa satelital barrio Moto Méndez suelo B



Fuente: Google maps

**Figura 3. 4.** Mapa satelital zona San Blas suelo C



Fuente: Google maps

**Figura 3. 5.** Mapa satelital zona San Blas suelo D



Fuente: Google maps

**Figura 3. 6.** Mapa satelital barrio Monte Cristo suelo E



Fuente: Google maps

A continuación, se presenta la tabla con las coordenadas geográficas y UTM de las zonas preliminares de extracción:

**Tabla 3. 1.** Coordenadas de las zonas de extracción de muestras preliminares

| Suelo | Zona           | Coordenadas Geográficas |             | Coordenadas UTM |           |
|-------|----------------|-------------------------|-------------|-----------------|-----------|
|       |                | W                       | S           | E               | N         |
| A     | Fray Quebracho | 64°44'06.1"             | 21°29'54"   | -21.49832       | -64.73502 |
| B     | Moto Méndez    | 64°42'19.2"             | 21°32'07.4" | -21.5354        | -64.70532 |
| C     | San Blas       | 64°42'02.2"             | 21°35'14.3" | -21.58729       | -64.7006  |
| D     | San Blas       | 64°42'10.3"             | 21°35'07.7" | -21.58547       | -64.70286 |
| E     | Monte Cristo   | 64°41'48.4"             | 21°31'16.1" | -21.52113       | -64.69677 |

Fuente: Elaboración propia

### 3.2.4. Caracterización de muestras preliminares

Para la selección del suelo apropiado para el proyecto se realizó el ensayo granulometría y límites de Atterberg a cada muestra tomada en las zonas anteriormente mencionadas. Siguiendo los criterios para la clasificación de suelos según SUCS, se obtuvieron los siguientes resultados:

**Tabla 3. 2.** Caracterización de muestras preliminares

| Suelo | Zona           | % Que pasa el tamiz |       |       | LL    | LP    | IP    | Clasificación |
|-------|----------------|---------------------|-------|-------|-------|-------|-------|---------------|
|       |                | N°10                | N°40  | N°200 | (%)   | (%)   | (%)   |               |
| A     | Fray Quebracho | 100                 | 92.68 | 90.96 | 46.53 | 26.51 | 20.02 | CL            |
| B     | Moto Méndez    | 100                 | 91.69 | 88.11 | 48.91 | 29.48 | 19.43 | CL            |
| C     | San Blas       | 100                 | 99.98 | 99.38 | 54.63 | 27.37 | 27.26 | CH            |
| D     | San Blas       | 100                 | 99.75 | 98.75 | 51.54 | 27.75 | 23.79 | CH            |
| E     | Monte Cristo   | 100                 | 92.97 | 84.73 | 39.48 | 23.61 | 15.86 | CL            |

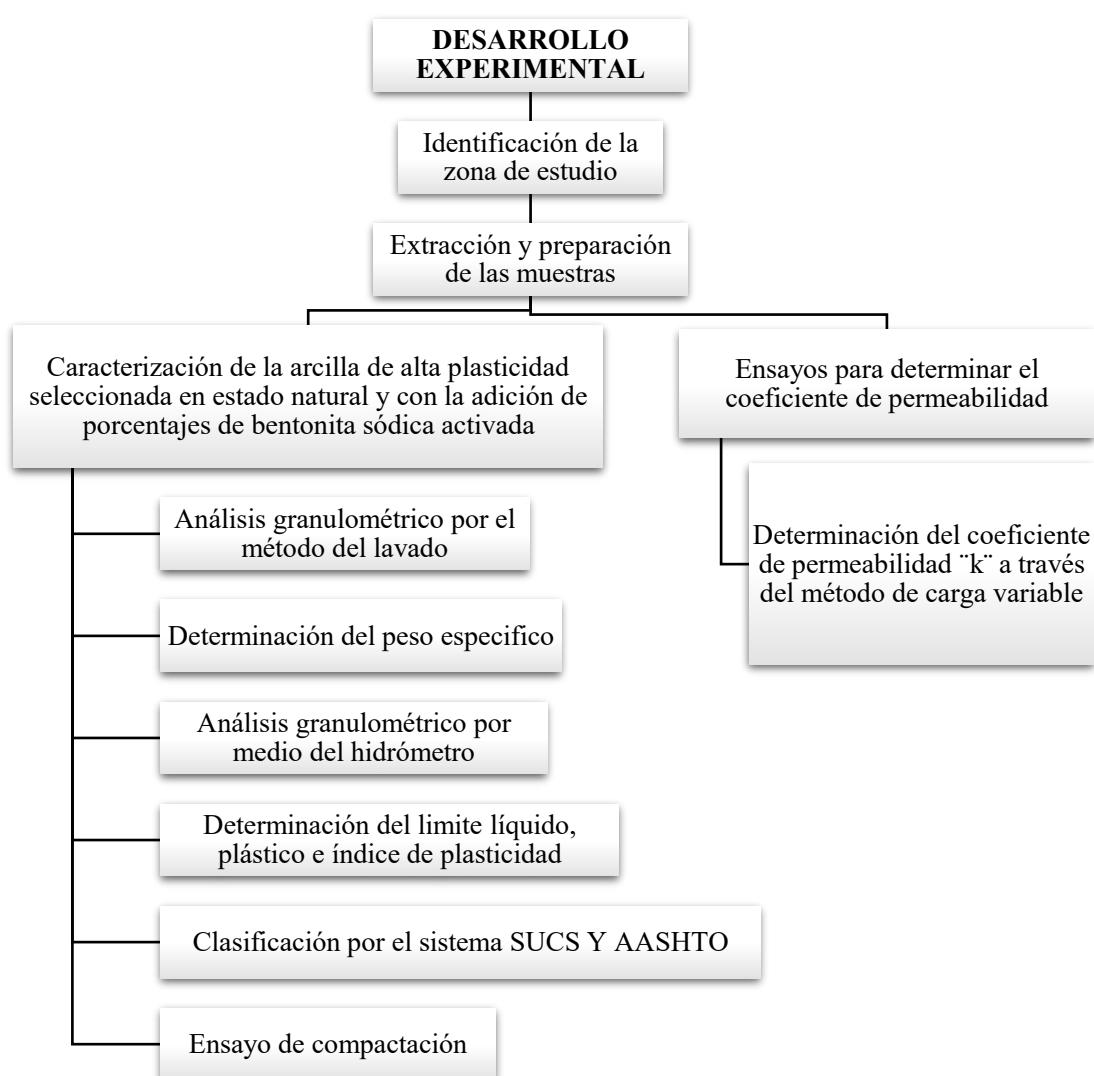
Fuente: Elaboración propia

Según lo indicado en el inicio de la investigación la muestra debe corresponder a un suelo de alta plasticidad, los resultados obtenidos en los ensayos realizados muestran que el suelo que cumple con los requisitos es el extraído de la zona de San Blas, por tal motivo los ensayos serán realizados solo con la muestra de suelo C dejando de lado las demás muestras; ya que esta es la presenta mayores valores de plasticidad.

### 3.3. Programa estratégico de trabajo

Para realizar el desarrollo experimental de la presente investigación se propone el siguiente plan estratégico de trabajo.

**Figura 3. 7.** Programa estratégico de trabajo



Fuente: Elaboración propia



### 3.3.1. Extracción de la muestra

Para el desarrollo de esta investigación, se ha definido trabajar exclusivamente con muestras de suelo reconstituidas (o alteradas/perturbadas). Esta elección metodológica es fundamental, ya que el objetivo principal del estudio es evaluar el efecto de la adición de diversos porcentajes de bentonita sódica activada en la permeabilidad del suelo natural

El tipo de muestreo elegido fue el muestreo a cielo abierto, aprovechando el movimiento de tierra existente en el lugar no fue necesario realizar una excavación profunda en el lugar.

Los materiales utilizados fueron pala, pico, bolsa de yute; con el pico se procedió a retirar la capa superficial del suelo expuesto a la intemperie que pudo ser contaminado con otros suelos, se excavó a una profundidad de 100cm y se procedió a meter el material a las bolsas para su posterior traslado al laboratorio.

**Figura 3. 8.** Extracción de la muestra



Fuente: Elaboración propia

### 3.3.2. Ensayos de caracterización

Los ensayos de caracterización son de vital importancia para conocer las propiedades físicas y mecánicas que posee la arcilla de alta plasticidad seleccionada y como estas varían con la adición de los porcentajes de bentonita sódica activada.

Este apartado detalla la metodología empleada para la realización de cada uno de los ensayos de laboratorio. Se describe el procedimiento llevado a cabo tanto para la muestra de suelo natural como para las mezclas con porcentajes de bentonita sódica activada (2%,

4%, 6%, 8%, 10%). Todos los ensayos fueron ejecutados con un número igual de repeticiones para asegurar la fiabilidad de los resultados.

### **3.3.2.1. Análisis granulométrico por tamizado (método del lavado) ASTM D422; AASHTO T27**

Este ensayo tiene por objeto determinar la granulometría de los agregados mediante el lavado del suelo utilizando el tamiz N°200 para después secar el mismo y obtener su división y separación con una serie de tamices en fracciones granulométricas de tamaño decreciente. A su vez se realiza el ensayo de contenido de humedad de las muestras tomando en cuenta el documento referencial ASTM D2216.

Para la obtención del contenido de humedad se siguen los siguientes pasos:

- Seleccionar e identificar tres cápsulas, para luego determinar y registrar su masa inicial.
- Introducir una porción de suelo húmedo en cada cápsula, en una proporción de 80 gr a 100 gr.
- Pesar nuevamente cada cápsula con el suelo húmedo para obtener la masa combinada.
- Colocar las cápsulas con las muestras en el horno, manteniéndolas a una temperatura entre 105°C a 110°C durante 24 horas.
- Transcurrido el tiempo de secado, retirar las cápsulas del horno, dejarlas enfriar por unos minutos y proceder a pesarlas para obtener la masa del suelo seco más la cápsula.

Para realizar el ensayo de granulometría se siguen los siguientes pasos:

- Dejar remojar 1kg a 1.5kg de suelo durante 24 horas antes de realizar el ensayo.
- Al día siguiente, proceder a lavar el suelo utilizando el tamiz N°200 hasta que el agua de lavado sea de color muy claro, casi transparente.
- Vaciar el contenido retenido en el tamiz N°200 en un plato y llevarlo a secar al horno por durante 24 horas o hasta que el suelo este completamente seco.
- Retirar la muestra del horno, dejar enfriar unos minutos, proceder a realizar el tamizado con la malla N°10, N°40 y N°200.
- Registrar la masa de suelo retenida en cada uno de los tamices.

**Figura 3. 9.** Granulometría por tamizado (método del lavado)



Fuente: Elaboración propia



A continuación, se muestra la tabla de resumen del ensayo de granulometría.

**Tabla 3. 3.** Resumen ensayo de granulometría

| Muestra                           | Promedio            |       |       |
|-----------------------------------|---------------------|-------|-------|
|                                   | % Que pasa el tamiz |       |       |
|                                   | N°10                | N°40  | N°200 |
| Suelo natural                     | 100                 | 99.98 | 99.37 |
| Suelo con 2% de bentonita sódica  | 100                 | 99.77 | 98.9  |
| Suelo con 4% de bentonita sódica  | 100                 | 99.81 | 97.94 |
| Suelo con 6% de bentonita sódica  | 100                 | 99.73 | 98.33 |
| Suelo con 8% de bentonita sódica  | 100                 | 99.77 | 98.3  |
| Suelo con 10% de bentonita sódica | 100                 | 99.76 | 98.3  |

Fuente: Elaboración propia

### 3.3.2.2. Determinación del peso específico relativo del suelo ASTM D854; AASHTO T100

Este método establece el procedimiento para determinar el peso específico del suelo usando un frasco volumétrico con marca de enrase para obtener la densidad de partículas sólidas.

Para comenzar con el ensayo se debe realizar la calibración del frasco volumétrico siguiendo el siguiente procedimiento:

- Lavar el frasco volumétrico para eliminar impurezas, dejar secar y luego pesarlo para obtener su masa.
- Llenar el frasco hasta la mitad de su capacidad (aproximadamente 250 ml) con agua destilada y colocarlo en un baño maría.
- Controlar la temperatura hasta que el agua dentro del frasco alcance los 60°C.
- Retirar el frasco volumétrico del baño maría. Llenarlo con agua destilada hasta la marca de enrase, asegurándose de que la parte inferior del menisco coincida con la marca. Utilizar una pipeta para evitar sobrepasar la cantidad de agua.

- Una vez lleno, secar la parte externa del frasco y pesarlo para obtener la masa del frasco más agua ( $m_{fw}$ ).
- Llevar el frasco a baño maría invertido y tomar la temperatura en el centro del frasco hasta que alcance los 30°C, sacar el frasco, limpiar la parte externa y proceder a pesar para obtener la masa.
- Repetir el proceso de pesaje, reintroduciendo el frasco al baño maría invertido, para las temperaturas de 27°C, 24°C, 21°C, 17°C y 15°C.
- Una vez concluido el ensayo de calibración, vaciar el frasco y dejarlo secar.

Para la determinación del peso específico del suelo se sigue el siguiente procedimiento:

- Pesar 80gr de suelo seco ( $m_s$ ) que pasa el tamiz N°40 y colocarlo en un plato.
- Añadir una pequeña cantidad de agua destilada al suelo y remover hasta obtener pasta suave.
- Vaciar la pasta dentro del frasco volumétrico, agregando un poco más de agua destilada y agitar cuidadosamente hasta que se forme una suspensión uniforme.
- Llenar el frasco hasta la mitad de su capacidad y llevarlo a baño maría hasta que alcance los 60°C.
- Una vez alcanzada la temperatura, retirar el frasco y llenarlo hasta la marca enrase con ayuda de una pipeta, haciendo coincidir la parte inferior del menisco con la marca de enrase.
- Secar la parte externa del frasco y pesarlo.
- Luego, llevarlo a baño maría invertido y medir la temperatura hasta que alcance los 30°C. Retirar el frasco, limpiar su parte externa y pesarlo para obtener la masa del frasco más el suelo ( $m_{fws}$ ).
- Volver a introducir el frasco a baño maría invertido y repetir el proceso de pesaje para las temperaturas de 27°C, 24°C, 21°C, 17°C y 15°C.

**Figura 3. 10.** Determinación del peso específico relativo de los sólidos



Fuente: Elaboración propia

A continuación, se muestra la tabla de resumen del ensayo de peso específico relativo del suelo:

**Tabla 3. 4.** Resumen ensayos de peso específico relativo del suelo

| <b>Muestra</b>                    | <b>Promedio</b>                               |
|-----------------------------------|-----------------------------------------------|
|                                   | <b>Peso específico<br/>relativo del suelo</b> |
|                                   | <b>gr/cm<sup>3</sup></b>                      |
| Suelo natural                     | 2.76                                          |
| Suelo con 2% de bentonita sódica  | 2.78                                          |
| Suelo con 4% de bentonita sódica  | 2.78                                          |
| Suelo con 6% de bentonita sódica  | 2.80                                          |
| Suelo con 8% de bentonita sódica  | 2.81                                          |
| Suelo con 10% de bentonita sódica | 2.82                                          |

Fuente: Elaboración propia

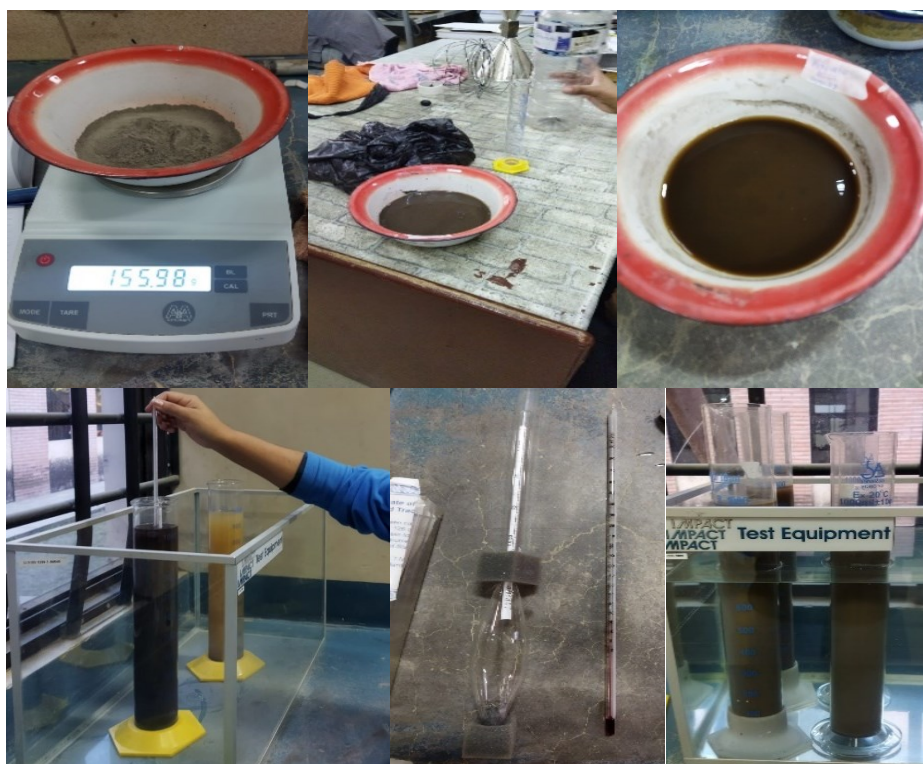
### **3.3.2.3. Análisis granulométrico por medio del hidrómetro AASHTO T88; ASTM D422**

El hidrómetro se usa para determinar el porcentaje de partículas, suelos dispersos, que permanecen en suspensión en un determinado tiempo, el análisis con hidrómetro se aplica a partículas de suelo para determinar la distribución granulométrica del material que pasa el tamiz (N° 200), basándose a la relación de velocidad de una esfera que cae libremente a través de un fluido y su diámetro y así establecer el (%) de limo y de arcilla de una muestra de suelo.

Para realizar el ensayo se sigue el siguiente procedimiento:

- Pesar 50gr de suelo seco que pasa el tamiz N°200 y depositarlo en un plato.
- Agregar 125 ml del defloculante al suelo y dejar reposar la mezcla durante 24 horas para asegurar la separación de las partículas.
- Preparar dos probetas de 1000ml: una se llenará solo con agua destilada (probeta de control), y a la otra con la mezcla de suelo y defloculante.

- Vaciar la mezcla de suelo y defloculante a una probeta, asegurándose de no perder material.
- Llenar con agua destilada la probeta que contiene la mezcla hasta la marca de enrase, hacer un tapón con la palma de la mano y agitar durante aproximadamente un minuto para dispersar uniformemente las partículas en la solución.
- Colocar la probeta con la muestra en un lugar estable para evitar movimientos durante el ensayo. y comenzar a cronometrar el tiempo, iniciar el cronometro e introducir el hidrómetro dentro de la probeta.
- Realizar la primera lectura del hidrómetro 152-H inmediatamente. Luego, retirar el hidrómetro sacar y colocarlo en la probeta de control. Proceder a tomar la lectura de la temperatura con el termómetro.
- Repetir este procedimiento de lectura del hidrómetro y temperatura para los tiempos establecidos: (0.5 min, 1 min, 2min, 4min, 8 min, 15min, 30min, 60 min, 120min, 480min, 1440min. Pasadas las 24 horas, realizar las mediciones diariamente a la misma hora, hasta que la lectura del hidrómetro sea cero o se mantenga constante.
- Una vez finalizada la lectura del hidrómetro, retirarlo, lavar la probeta, desechando el contenido.

**Figura 3. 11.** Granulometría por medio del hidrómetro

Fuente: Elaboración propia

A continuación, se muestra la tabla resumen de granulometría por medio del hidrómetro:

**Tabla 3. 5.** Resumen ensayos de hidrómetro

| <b>Muestra</b>                    | <b>% pasa Tamiz<br/>N°200</b> | <b>% Arcilla</b> | <b>% Limo</b> |
|-----------------------------------|-------------------------------|------------------|---------------|
| Suelo natural                     | 100.00                        | 26.19            | 73.81         |
| Suelo con 2% de bentonita sódica  | 100.00                        | 35.94            | 64.06         |
| Suelo con 4% de bentonita sódica  | 100.00                        | 36.32            | 63.68         |
| Suelo con 6% de bentonita sódica  | 100.00                        | 37.62            | 62.38         |
| Suelo con 8% de bentonita sódica  | 100.00                        | 38.56            | 61.44         |
| Suelo con 10% de bentonita sódica | 100.00                        | 42.69            | 57.31         |

Fuente: Elaboración propia

#### **3.3.2.4. Determinación del límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad de los suelos ASTM D4318**

Para la determinación del límite plástico e índice de plasticidad de las muestras se tomó en cuenta el documento referencial ASTM D4318.

El índice de plasticidad, no es más que la diferencia entre el Límite líquido y el Límite plástico.

##### **Límite líquido (LL)**

Es el contenido de humedad (%), que divide a los estados líquido y plástico del suelo. El límite líquido se obtiene mediante el aparato de Casagrande, cuando el suelo dividido por un ranurador dispuesto dentro de la copa, se une a los 25 golpes.

Para la realización del ensayo se sigue el siguiente procedimiento:

- Tamizar y colocar en un recipiente entre 80 a 100 gr de suelo que pasa por el tamiz N°40. Separar una porción y reservarla, añadir pequeñas cantidades de agua a la porción principal hasta formar una pasta suave, asegurándose de eliminar el aire atrapado entre las partículas del suelo.
- Pesar y registrar la masa de cuatro cápsulas vacías y limpias, cada una con su respectiva identificación.
- Con la ayuda de la espátula, distribuir la pasta de suelo en la copa de Casagrande, buscando que la superficie del suelo esté dispuesta horizontalmente, con el nivel de referencia en la parte inferior de la copa.
- Una vez que la muestra esté horizontal, pasar el ranurador por el centro de la copa de forma vertical, procurando que el fondo de la copa sea visible a lo largo de toda la ranura.
- Accionar la manivela del equipo de Casagrande a un ritmo constante hasta que la ranura se cierre, formando una unión de aproximadamente 12.7 mm.
- Registrar el número de golpes. Con la ayuda de la espátula, realizar dos cortes perpendiculares que pasen por los extremos donde se unió el suelo. Extraer una porción de suelo de esta zona, depositarla en una cápsula, pesarla y reservarla.



- Repetir el procedimiento tres veces más, asegurándose de que el número de golpes se encuentre en un rango de 15 a 35.
- Introducir las capsulas en el horno, dejarlas secar a una temperatura de  $105^{\circ}\text{C}$  a  $110^{\circ}\text{C}$  durante 24 horas. Posteriormente extraerlas del horno y pesarlas para obtener la masa de la cápsula más la muestra seca.

**Figura 3. 12.** Determinación del Límite Líquido



Fuente: Elaboración propia



### Límite plástico (LP)

Es el contenido de humedad (%), que divide a los estados plástico y semisólido del suelo.

Se obtiene siguiendo el siguiente procedimiento:

- Pesar e identificar las cápsulas limpias.
- Tomar la muestra de suelo remanente de la prueba del Límite Líquido que excedió los 35 golpes. Amasarla entre las manos hasta obtener una masa con consistencia similar a la plastilina.
- Cortar pequeños pedazos de la muestra y colocarlos sobre la base de vidrio. Comenzar a rolar el suelo con la palma de la mano hasta que forme un cilindro con un diámetro de aproximadamente 3 mm y presente grietas.
- Con ayuda de la espátula, cortar el rollo en segmentos de aproximadamente 5 cm, seleccionando las partes que presenten agrietamientos. Colocar estos segmentos en una cápsula hasta obtener una masa considerable para los cálculos y registrar el peso.
- Repetir el procedimiento para las cápsulas restantes.
- Introducir las cápsulas al horno durante 24 horas y registrar el peso seco del material.

**Figura 3. 13.** Determinación del Límite plástico



Fuente: Elaboración propia

A continuación, se muestra la tabla de resumen del ensayo de límites de Atterberg:

**Tabla 3. 6.** Resumen ensayos de límites de Atterberg

| <b>Muestra</b>                    | <b>Promedio</b> |           |           |
|-----------------------------------|-----------------|-----------|-----------|
|                                   | <b>LL</b>       | <b>LP</b> | <b>IP</b> |
|                                   | <b>%</b>        | <b>%</b>  | <b>%</b>  |
| Suelo natural                     | 54.66           | 27.38     | 27.28     |
| Suelo con 2% de bentonita sódica  | 55.67           | 28.21     | 27.46     |
| Suelo con 4% de bentonita sódica  | 56.35           | 28.38     | 27.97     |
| Suelo con 6% de bentonita sódica  | 57.37           | 29.10     | 28.27     |
| Suelo con 8% de bentonita sódica  | 58.33           | 29.30     | 29.02     |
| Suelo con 10% de bentonita sódica | 59.31           | 29.95     | 29.36     |

Fuente: Elaboración propia

**3.3.2.5. Clasificación del suelo****Clasificación del suelo según el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos SUCS**

El Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS) clasifica los suelos finos en tres grupos principales: limos inorgánicos (M), arcillas inorgánicas (C) y limos y arcillas orgánicas (O). Cada uno de estos grupos se subdivide según su Límite Líquido (LL), estableciendo la frontera en  $LL = 50\%$

El proceso de clasificación del suelo se realiza utilizando los datos obtenidos en los ensayos previos, siguiendo el siguiente procedimiento:

- Con los datos de granulometría, Límite Líquido e Índice de Plasticidad, se utiliza la carta de plasticidad ver figura 2.12. y los criterios de la tabla 2.2. de clasificación para identificar el tipo de suelo.

**Sistema de clasificación del suelo de la Asociación Americana de funcionarios Estatales de Carreteras y Transporte (AASHTO)**

Esta clasificación utiliza la granulometría y la plasticidad del suelo como características principales para definir asociaciones que obedecen a rangos empíricos de clasificación. La norma AASHTO clasifica los suelos en siete grupos según su composición granulométrica, Límite Líquido e Índice de Plasticidad. El Índice de Grupo (IG) es una

evaluación específica para cada grupo, calculada mediante una fórmula empírica. Siguiendo el siguiente procedimiento:

- Empleando los resultados de laboratorio y el cuadro de clasificación para suelos finos que se encuentra en la tabla 2.3., se realiza un recorrido de izquierda a derecha. El grupo correcto será el primero que satisfaga todos los valores, los cuales se aplicarán como números enteros, redondeando cualquier decimal al entero más cercano.
- El Índice de Grupo (IG) se calcula con la siguiente fórmula:

$$IG = 0.2a + 0.05ac + 0.01bd$$

Donde:

*a*: % que pasa N°200 – 35% (si %N°200>75, se anota 75; si es <35, se anota 0)

*b*: % que 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)

**Tabla 3. 7.** Determinación del índice de grupo (IG)

| <b>Determinación del índice de grupo</b> |                |           |           |           |           |            |
|------------------------------------------|----------------|-----------|-----------|-----------|-----------|------------|
|                                          | <b>natural</b> | <b>2%</b> | <b>4%</b> | <b>6%</b> | <b>8%</b> | <b>10%</b> |
| <b><i>a</i></b>                          | 40.00          | 40.00     | 40.00     | 40.00     | 40.00     | 40.00      |
| <b><i>b</i></b>                          | 40.00          | 40.00     | 40.00     | 40.00     | 40.00     | 40.00      |
| <b><i>c</i></b>                          | 14.66          | 15.63     | 16.35     | 17.37     | 18.33     | 19.31      |
| <b><i>d</i></b>                          | 17.28          | 17.43     | 17.97     | 18.27     | 19.02     | 19.36      |
| <b><i>IG</i></b>                         | <b>18</b>      | <b>18</b> | <b>18</b> | <b>19</b> | <b>19</b> | <b>20</b>  |

Fuente: Elaboración propia

A continuación, se muestra la tabla resumen de clasificación del suelo:

**Tabla 3. 8.** Resumen de clasificación del suelo

| <b>Clasificación y descripción del suelo</b> |             |               |                                        |
|----------------------------------------------|-------------|---------------|----------------------------------------|
| <b>Muestra</b>                               | <b>SUCS</b> | <b>AASHTO</b> | <b>Descripción</b>                     |
| Suelo natural                                | CH          | A-7-6 (18)    | Arcilla inorgánica de alta plasticidad |
| Suelo con 2% de bentonita sódica             | CH          | A-7-6 (18)    | Arcilla inorgánica de alta plasticidad |
| Suelo con 4% de bentonita sódica             | CH          | A-7-6 (18)    | Arcilla inorgánica de alta plasticidad |
| Suelo con 6% de bentonita sódica             | CH          | A-7-6 (19)    | Arcilla inorgánica de alta plasticidad |
| Suelo con 8% de bentonita sódica             | CH          | A-7-6 (19)    | Arcilla inorgánica de alta plasticidad |
| Suelo con 10% de bentonita sódica            | CH          | A-7-6 (20)    | Arcilla inorgánica de alta plasticidad |

Fuente: Elaboración propia

**3.3.2.6. Ensayo de compactación estándar ASTM D698; AASHTO T99**

La compactación es un procedimiento que modifica el estado de un suelo, de suelto a comprimido, mediante la aplicación de un esfuerzo mecánico externo. Para realizar este ensayo se emplea El molde de compactación estándar T-99 para suelos finos y un martillo de compactación de 5.5 lb.

Para realizar el ensayo de compactación se realiza el siguiente procedimiento:

- Medir con el vernier el diámetro y altura del molde de compactación sin collarín, pesar y registrar la masa del molde, por último, pesar e identificar 4 cápsulas.
- Tamizar una cantidad representativa de material pulverizado (suficiente para 4 puntos) a través de la malla N° 10, descartando el material retenido en ella.
- Calcular la humedad natural del suelo para determinar la cantidad de agua a añadir a cada muestra y así alcanzar la humedad óptima de prueba, utilizando la siguiente ecuación:

$$V_w = \frac{(\%w_{ensayado} - \%w_{actual}) * m_s}{100}$$

Dónde:

$V_w$ : Volumen de agua (ml).

$\%e_{ensayado}$ : Porcentaje de humedad deseado para el ensayo.

$\%a_{actual}$ : Porcentaje de humedad natural del suelo.

$m_s$ : Masa de suelo (gr).

- Depositar cada muestra de suelo en una bandeja metálica y mezclar con la cantidad de agua calculada, utilizando una probeta de 1000 ml para asegurar una distribución uniforme
- Unir el molde con el collarín, asegurándolo correctamente. Colocar el molde sobre una superficie plana y rígida. Introducir el suelo previamente preparado en el molde, formando una capa de espesor uniforme que ocupe un tercio del volumen del molde. Compactar esta capa utilizando el martillo apisonador, dejándolo caer desde la altura de la manga, aplicando 25 golpes distribuidos uniformemente por capa.
- Retirar el collarín del molde. Nivelar la superficie superior del molde utilizando el suelo sobrante y una regla metálica. Limpiar el suelo excedente de la parte externa del molde y proceder a pesarlo para obtener la masa del molde más el suelo húmedo.
- Con ayuda del cincel y el combo, extraer una porción de suelo de la parte central del molde. Colocarla en una cápsula y pesarla para obtener su masa.
- Limpiar el molde y repetir los pasos secuencialmente con los diferentes contenidos de humedad establecidos.
- Llevar las cápsulas al horno durante 24 horas. Luego, retirarlas y pesarlas para obtener la masa del suelo seco.

**Figura 3. 14.** Ensayo de compactación



Fuente: Elaboración propia

A continuación, se muestra la tabla resumen del ensayo de compactación:

**Tabla 3. 9.** Resumen ensayos de compactación

| Muestra                           | Promedio |                    |
|-----------------------------------|----------|--------------------|
|                                   | CHO      | DSS                |
|                                   | %        | gr/cm <sup>3</sup> |
| Suelo natural                     | 22.48    | 1.52               |
| Suelo con 2% de bentonita sódica  | 21.78    | 1.49               |
| Suelo con 4% de bentonita sódica  | 21.27    | 1.49               |
| Suelo con 6% de bentonita sódica  | 20.68    | 1.48               |
| Suelo con 8% de bentonita sódica  | 20.40    | 1.47               |
| Suelo con 10% de bentonita sódica | 19.69    | 1.45               |

Fuente: Elaboración propia

### **3.4. Ensayo para la determinación del coeficiente de permeabilidad ASTM D2434; AASHTO T215**

El ensayo de permeabilidad de carga variable es un procedimiento para determinar el coeficiente de permeabilidad de suelos finos (arenas finas tales como limos y arcillas).

El permeámetro es un equipo de carga descendente, considerando que el funcionamiento del mismo se basa fundamentalmente en el desplazamiento vertical de la carga hidráulica mediante un manómetro. El equipo de permeabilidad del laboratorio de suelos está diseñado para las determinaciones en de grano fino o de grano grueso para un flujo laminar de agua donde las muestras pueden ser remodeladas o compactadas.

El ensayo de permeabilidad de carga variable se basa en el ensayo de permeabilidad de suelos granulares a carga constante (ASTM D2434; AASHTO T215). Adicionalmente, el manual de laboratorio de suelos en Ingeniería Civil de Joseph E. Bowles describe detalladamente el procedimiento para este método. Este método de ensayo cubre el procedimiento para determinar el coeficiente de permeabilidad de suelos finos, tales como arenas finas, limos y arcillas. El suelo a ensayar se encontrará en forma alterada, ya que es necesario incorporar los porcentajes de bentonita sódica.



### 3.4.1. Materiales y equipo

- Bureta graduada
- Permeámetro de carga variable
- Pisón metálico
- Bandeja
- Cuchara
- Probeta
- Termómetro
- Vernier

### 3.4.2. Procedimiento

#### Preparación de la muestra

- Tamizar el suelo por el tamiz N°10
- Calcular la humedad inicial antes del ensayo, de tal forma que se pueda complementar el porcentaje faltante para llegar a la humedad óptima del suelo.
- Medir el diámetro y altura del molde con un vernier para obtener el volumen del molde.
- Al no ser el mismo molde de compactación a usar, se debe realizar la igualación de las energías de compactación para establecer el número de capas y número de golpes a realizar. Utilizando la ecuación:

$$E = \frac{N_{golpes} * N_{capas} * m_{pison} * h_{caida}}{V}$$

Donde:

$E$ : Energía de compactación (N-m/m<sup>3</sup>).

$N_{golpes}$ : Número de golpes.

$N_{capas}$ : Número de capas.

$W_{pison}$ : Peso del pisón (N).

$h_{caida}$ : Altura de caída del martillo (m).



$V$ : Volumen del molde ( $\text{m}^3$ ).

**Tabla 3. 10.** Igualación de energías de compactación

| <b>Molde</b>                   | <b>T-99</b> | <b>Permeámetro</b> |
|--------------------------------|-------------|--------------------|
| $N_{\text{golpes}}$            | 25          | 71.26              |
| $N_{\text{capas}}$             | 3           | 8                  |
| $W_{\text{pisón}} \text{ (N)}$ | 24.40       | 3.34               |
| $h_{\text{caída}} \text{ (m)}$ | 0.30        | 0.20               |
| $V \text{ (m}^3\text{)}$       | 0.00095     | 0.0007             |

|                                                     |           |           |
|-----------------------------------------------------|-----------|-----------|
| $E_{\text{compactación}} \text{ (N-m/m}^2\text{)}$  | 586878.78 | 586878.78 |
| $E_{\text{compactación}} \text{ (KN-m/m}^2\text{)}$ | 586.88    | 586.88    |

Fuente: Elaboración propia

Realizando la igualación de energías de compactación, se establece que el número de golpes que se debe realizar en el permeámetro es de  $71.26 \approx 72$  y el número de capas a realizar es de 8.

- Realizar el proceso de compactación dentro del molde del permeámetro. Colocar piedras porosas tanto en la parte superior como inferior de la muestra. Medir  $L$ , que representa la altura de la muestra de suelo compactada.
- Unir el molde con la muestra al conjunto del permeámetro y la bureta.

### Procedimiento del ensayo

- Llenar la bureta con agua, abriendo las válvulas de escape del permeámetro para asegurar la eliminación de cualquier aire atrapado.
- Esperar a que la muestra de suelo se sature completamente. Este proceso puede tardar varios días, dependiendo del tipo de suelo, por lo que fue necesario revisar constantemente el nivel de agua en la bureta.
- Una vez que el suelo esté saturado, proceder a realizar la lectura de las alturas de agua en la bureta, tomando un tiempo fijo de 2 horas entre lecturas. Transcurrido este lapso,

medir la temperatura del agua desalojada. Repetir este procedimiento para tomar 5 lecturas de alturas.

### 3.4.3. Cálculos

- Para el cálculo de la permeabilidad ( $k$ ), se utiliza la siguiente fórmula:

$$k = \frac{a * L}{A * t} * \ln \frac{h_1}{h_2} \quad \left[ \frac{cm}{s} \right]$$

Donde:

$k$ : Permeabilidad (cm/s).

$A$ : Área de la muestra (cm<sup>2</sup>).

$a$ : Área de la bureta (cm<sup>2</sup>).

$t$ : Tiempo (s).

$h_1$ : Carga inicial en el nivel inferior de la bureta de entrada (cm).

$h_2$ : Carga final en el nivel inferior de la bureta de entrada (cm).

- Una vez calculada la permeabilidad ( $k$ ), se debe aplicar una corrección de la viscosidad del agua en temperaturas diferentes a 20°C usando la tabla 2.9
- Calcular la permeabilidad a los 20°C ( $k_{20}$ ) con la siguiente fórmula:

$$k_{20} = k * \frac{\eta_{T^{\circ}C}}{\eta_{20^{\circ}C}}$$

Donde:

$k_{20}$ : Permeabilidad corregida por la viscosidad del agua (cm/s).

$\frac{\eta_{T^{\circ}C}}{\eta_{20^{\circ}C}}$ : Valor del factor de corrección de viscosidad por temperatura.

**Figura 3. 15.** Ensayo de permeabilidad



Fuente: Elaboración propia

**Tabla 3. 11.** Resumen ensayos de permeabilidad

| <b>Suelo natural</b>                     |          |          |          |          |          |                 |
|------------------------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|-----------------|
| <b>Ensayo N°</b>                         | <b>1</b> | <b>2</b> | <b>3</b> | <b>4</b> | <b>5</b> | <b>Promedio</b> |
| <b><i>k</i> (cm/s)</b>                   | 8.13E-06 | 8.48E-06 | 8.67E-06 | 8.10E-06 | 8.58E-06 | <b>8.39E-06</b> |
| <b><i>k</i><sub>20</sub> (cm/s)</b>      | 8.99E-06 | 8.86E-06 | 8.55E-06 | 8.49E-06 | 8.82E-06 | <b>8.74E-06</b> |
| <b>Suelo con 2% de bentonita sódica</b>  |          |          |          |          |          |                 |
| <b>Ensayo N°</b>                         | <b>1</b> | <b>2</b> | <b>3</b> | <b>4</b> | <b>5</b> | <b>Promedio</b> |
| <b><i>k</i> (cm/s)</b>                   | 5.29E-06 | 5.65E-06 | 5.30E-06 | 5.49E-06 | 5.22E-06 | <b>5.39E-06</b> |
| <b><i>k</i><sub>20</sub> (cm/s)</b>      | 5.03E-06 | 5.46E-06 | 5.16E-06 | 5.16E-06 | 5.37E-06 | <b>5.23E-06</b> |
| <b>Suelo con 4% de bentonita sódica</b>  |          |          |          |          |          |                 |
| <b>Ensayo N°</b>                         | <b>1</b> | <b>2</b> | <b>3</b> | <b>4</b> | <b>5</b> | <b>Promedio</b> |
| <b><i>k</i> (cm/s)</b>                   | 2.47E-06 | 2.53E-06 | 2.23E-06 | 2.41E-06 | 2.27E-06 | <b>2.38E-06</b> |
| <b><i>k</i><sub>20</sub> (cm/s)</b>      | 2.72E-06 | 2.58E-06 | 2.32E-06 | 2.55E-06 | 2.48E-06 | <b>2.53E-06</b> |
| <b>Suelo con 6% de bentonita sódica</b>  |          |          |          |          |          |                 |
| <b>Ensayo N°</b>                         | <b>1</b> | <b>2</b> | <b>3</b> | <b>4</b> | <b>5</b> | <b>Promedio</b> |
| <b><i>k</i> (cm/s)</b>                   | 9.13E-07 | 9.80E-07 | 9.76E-07 | 9.23E-07 | 9.33E-07 | <b>9.45E-07</b> |
| <b><i>k</i><sub>20</sub> (cm/s)</b>      | 9.62E-07 | 9.10E-07 | 9.15E-07 | 9.44E-07 | 9.02E-07 | <b>9.27E-07</b> |
| <b>Suelo con 8% de bentonita sódica</b>  |          |          |          |          |          |                 |
| <b>Ensayo N°</b>                         | <b>1</b> | <b>2</b> | <b>3</b> | <b>4</b> | <b>5</b> | <b>Promedio</b> |
| <b><i>k</i> (cm/s)</b>                   | 4.33E-07 | 4.11E-07 | 4.45E-07 | 4.43E-07 | 4.41E-07 | <b>4.35E-07</b> |
| <b><i>k</i><sub>20</sub> (cm/s)</b>      | 4.07E-07 | 4.02E-07 | 4.12E-07 | 3.96E-07 | 3.99E-07 | <b>4.03E-07</b> |
| <b>Suelo con 10% de bentonita sódica</b> |          |          |          |          |          |                 |
| <b>Ensayo N°</b>                         | <b>1</b> | <b>2</b> | <b>3</b> | <b>4</b> | <b>5</b> | <b>Promedio</b> |
| <b><i>k</i> (cm/s)</b>                   | 9.29E-08 | 8.73E-08 | 9.56E-08 | 9.45E-08 | 8.44E-08 | <b>9.09E-08</b> |
| <b><i>k</i><sub>20</sub> (cm/s)</b>      | 8.58E-08 | 8.54E-08 | 8.63E-08 | 8.84E-08 | 8.65E-08 | <b>8.65E-08</b> |

Fuente: Elaboración propia

# **CAPÍTULO IV**

## **ANÁLISIS DE RESULTADOS**

## **CAPÍTULO IV**

### **ANÁLISIS DE RESULTADOS**

#### **4.1. Introducción**

En esta sección, se presentan y cuantifican los resultados obtenidos en los ensayos de laboratorio, comenzando con un análisis preliminar de los resultados obtenidos en los ensayos de granulometría, límites de Atterberg y compactación; realizando un análisis estadístico enfocado en los efectos de la adición de porcentajes de bentonita sódica en la permeabilidad de la arcilla de alta plasticidad seleccionada.

Los principales métodos de análisis estadístico utilizados serán: Análisis de Varianza (ANOVA), Prueba de Tukey (Post-Hoc), Regresión Lineal y Exponencial.

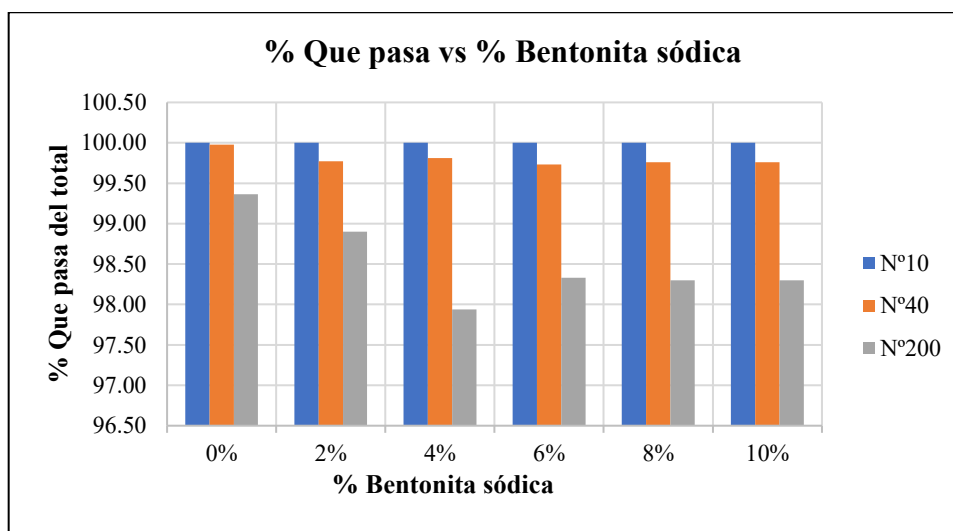
Estos criterios de análisis permitirán, no solo, identificar si hay un efecto en la permeabilidad, sino también cuantificar su magnitud y la relación funcional con la dosificación de bentonita sódica activada Super Gel.

#### **4.2. Análisis preliminar**

Se hará el análisis de los resultados obtenidos en los ensayos de laboratorio de granulometría, límites y compactación.

##### **4.2.1. Análisis de la Granulometría**

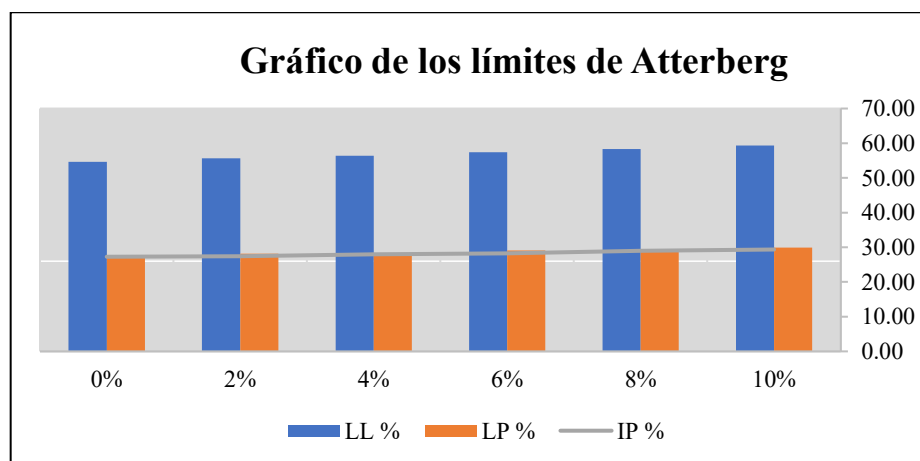
Los datos mostrados en la figura 4.1. muestran que la adición de bentonita sódica activada presenta una disminución inicial del porcentaje que pasa el tamiz N°200 el cual sugiere que la bentonita está interactuando con las partículas finas del suelo, posiblemente causando aglomeración (las partículas finas se unen formando agregados más grandes) o un hinchamiento de las propias partículas de bentonita, lo que resulta en menos material fino pasando el tamiz. Los tamices N°10 y N°40 no se ven afectados de manera significativa por la adición de bentonita.

**Figura 4. 1.** Gráfico de análisis para la granulometría

Fuente: Elaboración propia

#### 4.2.2. Análisis de la plasticidad

En la figura 4.2. se puede observar que el porcentaje de bentonita sódica activada es directamente proporcional a los valores del límite líquido, es decir que existe un incremento general en sus valores conforme aumenta el porcentaje de la bentonita sódica activada. Esto es esperable, ya que la bentonita es un material altamente plástico que tiende a aumentar la capacidad de retención de agua y el rango de plasticidad del suelo.

**Figura 4. 2.** Gráfico de análisis para el LL, LP e IP

Fuente: Elaboración propia

### 4.2.3. Análisis de la Compactación

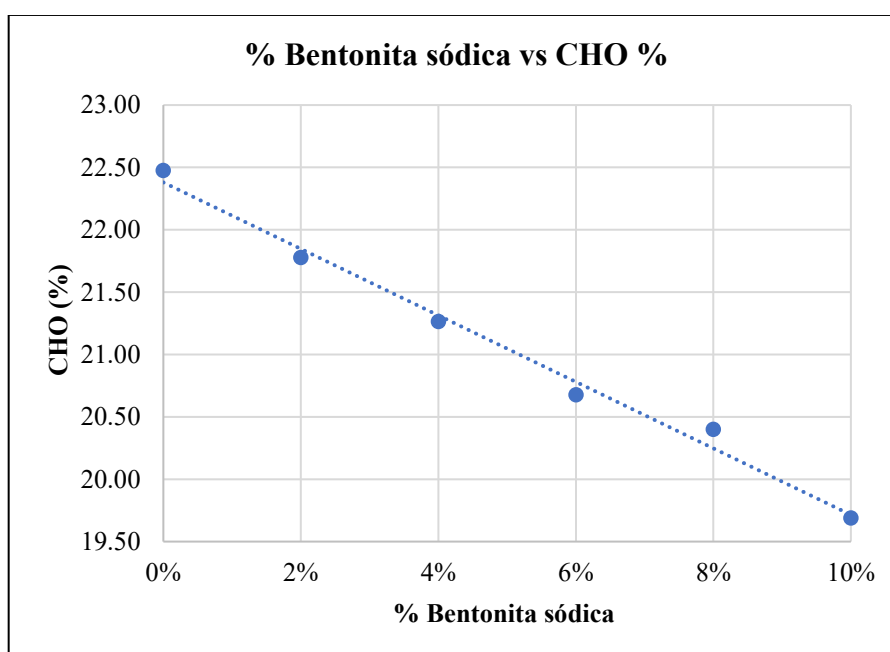
Este análisis se realizará tomando en cuenta los valores de la densidad seca máxima y el contenido de humedad cada uno por separado.

#### 4.2.3.1. Contenido de Humedad Óptimo (CHO %)

En la figura 4.3. se observa una tendencia decreciente en el CHO a medida que aumenta el porcentaje de bentonita sódica.

El CHO disminuye desde 22.48% para el suelo natural hasta 19.69% para el suelo con 10% de bentonita. Esto sugiere que la adición de bentonita reduce la cantidad de agua necesaria para alcanzar la máxima compactación

**Figura 4. 3.** Relación entre porcentaje de Bentonita y Contenido de humedad óptimo



Fuente: Elaboración propia

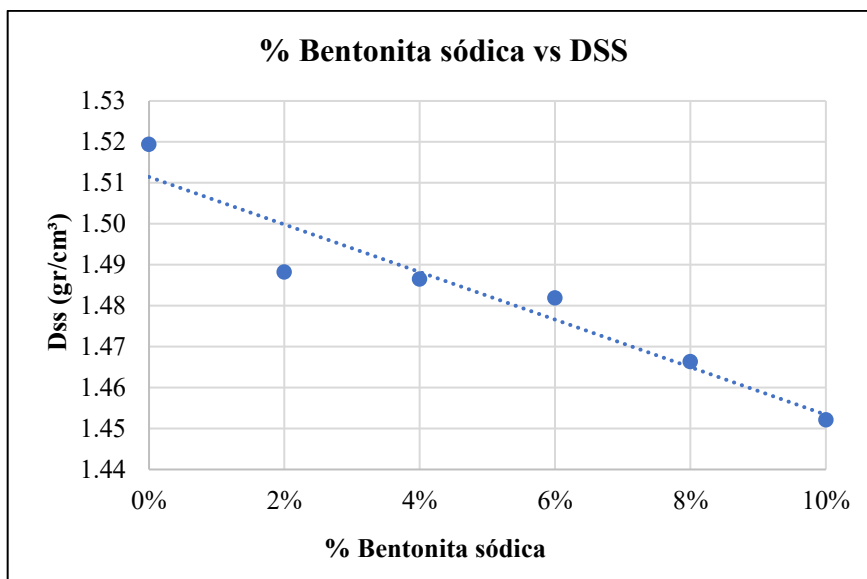
#### 4.2.3.2. Densidad Seca Máxima (DSS gr/cm<sup>3</sup>)

En la figura 4.4. se observa una tendencia general decreciente en la DSS a medida que aumenta el porcentaje de bentonita sódica.



La DSS disminuye desde 1.52 gr/cm<sup>3</sup> para el suelo natural hasta 1.45 gr/cm<sup>3</sup> para el suelo con 10% de bentonita. Esto indica que, aunque la bentonita puede mejorar otras propiedades del suelo, en este caso, reduce la densidad máxima que se puede alcanzar.

**Figura 4. 4.** Relación entre porcentaje de bentonita y densidad de suelo seco



Fuente: Elaboración propia

### 4.3. Análisis de la permeabilidad

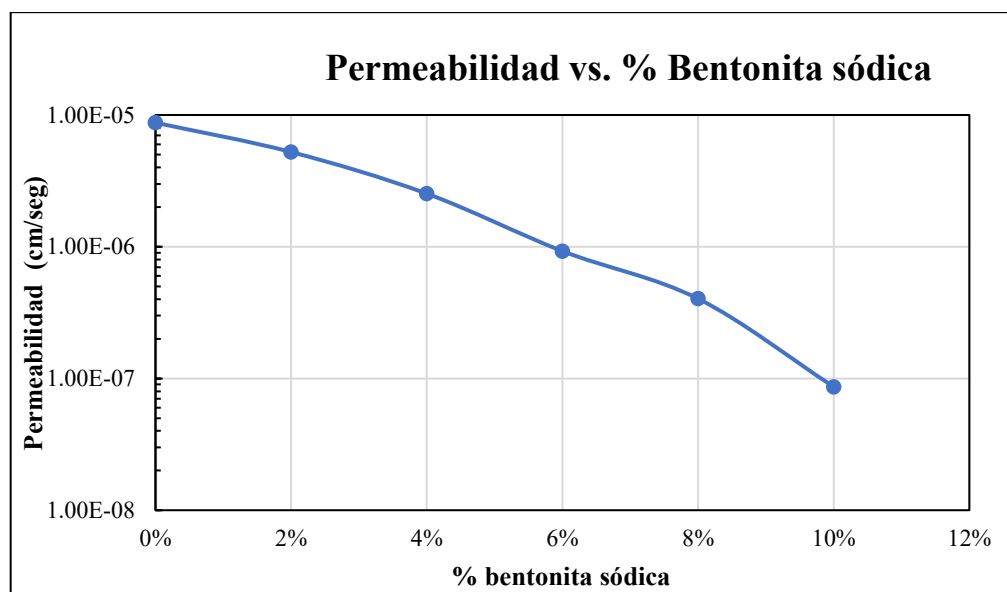
A continuación, se presenta un análisis comparativo de los valores del coeficiente de permeabilidad obtenidos para el suelo natural (suelo con 0% de bentonita sódica activada) y el suelo con los distintos porcentajes de bentonita sódica (suelo con 2%, 4%, 6%, 8%, 10% de bentonita sódica activada). La tabla 4.1 muestra el resumen de los resultados obtenidos en el ensayo de carga variable a la temperatura de 20°C, los mismos que serán utilizados para la realización de todo el análisis.

**Tabla 4. 1.** Resultados del coeficiente de permeabilidad  $k_{20^{\circ}\text{C}}$ 

| Permeabilidad $k_{20}$ (cm/s) |          |          |          |          |          |          |
|-------------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| % Bentonita<br>sódica         | 0%       | 2%       | 4%       | 6%       | 8%       | 10%      |
| Ensayo N°1                    | 8.99E-06 | 5.03E-06 | 2.72E-06 | 9.62E-07 | 4.07E-07 | 8.58E-08 |
| Ensayo N°2                    | 8.86E-06 | 5.46E-06 | 2.58E-06 | 9.10E-07 | 4.02E-07 | 8.54E-08 |
| Ensayo N°3                    | 8.55E-06 | 5.16E-06 | 2.32E-06 | 9.15E-07 | 4.12E-07 | 8.63E-08 |
| Ensayo N°4                    | 8.49E-06 | 5.16E-06 | 2.55E-06 | 9.44E-07 | 3.96E-07 | 8.84E-08 |
| Ensayo N°5                    | 8.82E-06 | 5.37E-06 | 2.48E-06 | 9.02E-07 | 3.99E-07 | 8.65E-08 |
| <b>Promedio</b>               | 8.74E-06 | 5.23E-06 | 2.53E-06 | 9.27E-07 | 4.03E-07 | 8.65E-08 |

Fuente: Elaboración propia

En la figura 4.5 se muestra la relación de los valores promedio del coeficiente de permeabilidad con respecto al porcentaje de bentonita sódica activada, en el mismo se puede observar la disminución considerable de la permeabilidad.

**Figura 4. 5.** Relación entre permeabilidad del suelo y porcentaje de bentonita sódica

Elaboración: Fuente propia

#### 4.3.1. Análisis estadístico descriptivo

El análisis estadístico descriptivo incluye la evaluación de las medias, medianas, desviaciones estándar, varianzas, rango, mínimo, máximo, de los resultados de permeabilidad obtenidos para el suelo natural y con la adición de porcentajes de bentonita sódica. Este análisis permite evaluar la consistencia, la dispersión y la confiabilidad de las mediciones para cada combinación.

**Tabla 4. 2.** Estadística descriptiva de los coeficientes de permeabilidad

| % bentonita sódica         | 0%        | 2%       | 4%        | 6%       | 8%        | 10%      |
|----------------------------|-----------|----------|-----------|----------|-----------|----------|
| Media                      | 8.74E-06  | 5.23E-06 | 2.53E-06  | 9.27E-07 | 4.03E-07  | 8.65E-08 |
| Error típico               | 9.54E-08  | 7.85E-08 | 6.50E-08  | 1.13E-08 | 2.94E-09  | 5.08E-10 |
| Mediana                    | 8.82E-06  | 5.16E-06 | 2.55E-06  | 9.15E-07 | 4.02E-07  | 8.63E-08 |
| Moda                       | 0         | 0        | 0         | 0        | 0         | 0        |
| Desviación estándar        | 2.15E-07  | 1.75E-07 | 1.45E-07  | 2.53E-08 | 6.28E-09  | 1.14E-09 |
| Varianza de la muestra     | 4.61E-14  | 3.08E-14 | 2.11E-14  | 6.43E-16 | 3.95E-17  | 1.29E-18 |
| Curtosis                   | -2.40     | -1.66    | 8.97E-01  | -1.54    | -5.56E-01 | 2.48     |
| Coefficiente de asimetría  | -2.51E-01 | 3.09E-01 | -3.67E-01 | 7.40E-01 | 5.61E-01  | 1.46     |
| Rango                      | 5.01E-07  | 4.33E-07 | 3.97E-07  | 6.01E-08 | 1.68E-08  | 2.93E-09 |
| Mínimo                     | 8.49E-06  | 5.03E-06 | 2.32E-06  | 9.02E-07 | 3.96E-07  | 8.54E-08 |
| Máximo                     | 8.99E-06  | 5.46E-06 | 2.72E-06  | 9.62E-07 | 4.12E-07  | 8.84E-08 |
| Suma                       | 4.37E-05  | 2.62E-05 | 1.27E-05  | 4.63E-06 | 2.02E-06  | 4.32E-07 |
| Cuenta                     | 5         | 5        | 5         | 5        | 5         | 5        |
| Nivel de confianza (95.0%) | 2.65E-07  | 2.18E-07 | 1.80E-07  | 3.15E-08 | 8.17E-09  | 1.41E-09 |

Elaboración: Fuente propia

### 4.3.2. Análisis estadístico de varianza (ANOVA)

El Análisis de Varianza (ANOVA) permite comparar las medias de más de dos grupos para determinar si existen diferencias significativas entre ellas y dado que se cuenta con una variable dependiente (permeabilidad) y una variable independiente con múltiples niveles (los porcentajes de bentonita). El ANOVA determinará si hay diferencias significativas en la permeabilidad, donde los grupos a analizar son los diferentes porcentajes de bentonita sódica activada (0%, 2%, 4%, 6%, 8%, 10%) añadidos a la arcilla.

Las fórmulas simplificadas para el cálculo del ANOVA son:

$$SC_{Trat} = \sum_{i=1}^k \frac{1}{n_i} x_{i.}^2 - \frac{x_{..}^2}{N}$$

$$SC_{Error} = SC_T - SC_{Trat}$$

$$SC_{Total} = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{n_i} x_{ij}^2 - \frac{x_{..}^2}{N}$$

Donde:

$SC_{Trat}$ : Suma de cuadrados entre grupos (o de tratamientos).

$SC_{Total}$ : Suma de cuadrados total.

$SC_{Error}$ : Suma de cuadrados del error (o dentro de grupos).

$K$ : Número de grupos (porcentajes de bentonita = 6).

$n_i$ : Número de datos en cada grupo (número de repeticiones por porcentaje = 5).

$N$ : Total de datos ( $k \times n_i = 30$ ).

$x_i$  : Media de cada grupo.

$x_{..}$ : Media general de todos los datos.

$x_{ij}$ : Cada observación individual.

$K-1$ : Grado de libertad 1

$N-K$ : Grado de libertad 2

Aplicando las fórmulas se obtienen los siguientes resultados:

**Tabla 4. 3. Análisis ANOVA**

| % Bentonita | 0%       | 2%       | 4%       | 6%       | 8%       | 10%      |
|-------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Ensayo N°1  | 8.99E-06 | 5.03E-06 | 2.72E-06 | 9.62E-07 | 4.07E-07 | 8.58E-08 |
| Ensayo N°2  | 8.86E-06 | 5.46E-06 | 2.58E-06 | 9.10E-07 | 4.02E-07 | 8.54E-08 |
| Ensayo N°3  | 8.55E-06 | 5.16E-06 | 2.32E-06 | 9.15E-07 | 4.12E-07 | 8.63E-08 |
| Ensayo N°4  | 8.49E-06 | 5.16E-06 | 2.55E-06 | 9.44E-07 | 3.96E-07 | 8.84E-08 |
| Ensayo N°5  | 8.82E-06 | 5.37E-06 | 2.48E-06 | 9.02E-07 | 3.99E-07 | 8.65E-08 |

|                        |          |          |          |          |          |          |
|------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| <b>Suma(xi.)</b>       | 4.37E-05 | 2.62E-05 | 1.27E-05 | 4.63E-06 | 2.02E-06 | 4.32E-07 |
| <b>Media</b>           | 8.74E-06 | 5.23E-06 | 2.53E-06 | 9.27E-07 | 4.03E-07 | 8.65E-08 |
| <b>Suma total(x..)</b> | 8.96E-05 |          |          |          |          |          |
| <b>ni</b>              | 5        | 5        | 5        | 5        | 5        | 5        |
| <b>N</b>               | 30       |          |          |          |          |          |
| <b>SCTrat</b>          | 2.89E-10 |          |          |          |          |          |
| <b>SCTotal</b>         | 2.89E-10 |          |          |          |          |          |
| <b>SCError</b>         | 3.92E-13 |          |          |          |          |          |

| ANOVA               |                   |                         |                     |             |
|---------------------|-------------------|-------------------------|---------------------|-------------|
| Fuente de variación | Suma de cuadrados | Grados de libertad (gl) | Cuadrado medio (CM) | F calculada |
| Entre grupos        | 2.89E-10          | 5                       | 5.77E-11            | 3509.71     |
| Dentro de grupos    | 3.95E-13          | 24                      | 1.64E-14            |             |
| Total               | 2.89E-10          | 29                      |                     |             |

|                                                          |                 |
|----------------------------------------------------------|-----------------|
| <b>(Valor crítico) <math>F_{\alpha, k-1, N-k}</math></b> | <b>2.62</b>     |
| <b>p-valor</b>                                           | <b>1.52E-33</b> |

Elaboración: Fuente propia

#### 4.3.3. Prueba de Tukey

La prueba de Tukey es un método de comparación de pares de medias de tratamientos utilizado para realizar comparaciones múltiples entre las medias de los grupos; una vez que el ANOVA ha determinado que existen diferencias significativas. Permite identificar

específicamente qué pares de medias son estadísticamente diferentes entre sí. Se calcula con la siguiente fórmula:

$$T_{\alpha} = q_{\alpha}(k, N - k) \sqrt{\frac{CME}{n_i}}$$

Donde:

$T_{\alpha}$ : Valor crítico de Tukey para el nivel de significancia  $\alpha$ .

$CME$ : Cuadrado medio del error (obtenido del ANOVA).

$n_i$ : Número de repeticiones en cada grupo (5 en este caso).

$q_{\alpha}, k, N-k$ : Cuantil de la distribución de Tukey extraído de la tabla 2.11 para un nivel de significancia  $\alpha = 0.05$ ,  $k$  grupos y  $N-k$  grados de libertad del error.

|                 |      | $k$  |      |       |       |       |       |       |      |
|-----------------|------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|------|
| $\alpha = 0.05$ | 2    | 3    | 4    | 5     | 6     | 7     | 8     | 9     |      |
| 2               | 6.08 | 8.33 | 9.80 | 10.88 | 11.73 | 12.43 | 13.03 | 13.54 |      |
| 3               | 4.50 | 5.91 | 6.82 | 7.50  | 8.04  | 8.48  | 8.85  | 9.18  |      |
| 4               | 3.93 | 5.04 | 5.76 | 6.29  | 6.71  | 7.05  | 7.35  | 7.60  |      |
| 5               | 3.64 | 4.60 | 5.22 | 5.67  | 6.03  | 6.33  | 6.58  | 6.80  |      |
| 6               | 3.46 | 4.34 | 4.90 | 5.30  | 5.63  | 5.90  | 6.12  | 6.32  |      |
| 7               | 3.34 | 4.16 | 4.68 | 5.06  | 5.36  | 5.61  | 5.82  | 6.00  |      |
| 8               | 3.26 | 4.04 | 4.53 | 4.89  | 5.17  | 5.40  | 5.60  | 5.77  |      |
| 9               | 3.20 | 3.95 | 4.41 | 4.76  | 5.02  | 5.24  | 5.43  | 5.59  |      |
| 10              | 3.15 | 3.88 | 4.33 | 4.65  | 4.91  | 5.12  | 5.30  | 5.46  |      |
| 11              | 3.11 | 3.82 | 4.26 | 4.57  | 4.82  | 5.03  | 5.20  | 5.35  |      |
| 12              | 3.08 | 3.77 | 4.20 | 4.51  | 4.75  | 4.95  | 5.12  | 5.27  |      |
| 13              | 3.06 | 3.73 | 4.15 | 4.45  | 4.69  | 4.88  | 5.05  | 5.19  |      |
| 14              | 3.03 | 3.70 | 4.11 | 4.41  | 4.64  | 4.83  | 4.99  | 5.13  |      |
| 15              | 3.01 | 3.67 | 4.08 | 4.37  | 4.59  | 4.78  | 4.94  | 5.08  |      |
| 16              | 3.00 | 3.65 | 4.05 | 4.33  | 4.56  | 4.74  | 4.90  | 5.03  |      |
| 17              | 2.98 | 3.63 | 4.02 | 4.30  | 4.52  | 4.70  | 4.86  | 4.99  |      |
| 18              | 2.97 | 3.61 | 4.00 | 4.28  | 4.49  | 4.67  | 4.82  | 4.96  |      |
| 19              | 2.96 | 3.59 | 3.98 | 4.25  | 4.47  | 4.65  | 4.79  | 4.92  |      |
| 20              | 2.95 | 3.58 | 3.96 | 4.23  | 4.45  | 4.62  | 4.77  | 4.90  |      |
| 21              | 2.94 | 3.56 | 3.94 | 4.21  | 4.42  | 4.60  | 4.74  | 4.87  |      |
| 22              | 2.93 | 3.55 | 3.93 | 4.20  | 4.41  | 4.58  | 4.72  | 4.85  |      |
| 23              | 2.93 | 3.54 | 3.91 | 4.18  | 4.39  | 4.56  | 4.70  | 4.83  |      |
| $N-k$           | 24   | 2.92 | 3.53 | 3.90  | 4.17  | 4.37  | 4.54  | 4.68  | 4.81 |

Una vez ordenados los datos se tiene la siguiente información:

|                                      |          |
|--------------------------------------|----------|
| <b><i>k</i></b>                      | 6        |
| <b><i>N-k</i></b>                    | 24       |
| <b><i>CME</i></b>                    | 1.64E-14 |
| <b><i>n<sub>i</sub></i></b>          | 5        |
| <b><i>q<sub>α</sub> (k, N-k)</i></b> | 4.37     |

Reemplazando los datos en la fórmula de Tukey

$$T_{\alpha} = q_{\alpha}(k, N - k) \sqrt{\frac{CM_E}{n_i}} = 2.51 \text{ E} - 07$$

#### **Criterio de Decisión para Tukey:**

Para obtener la diferencia muestral de las medias muestrales entre el suelo en estado natural y el de los porcentajes de bentonita sódica se calcula el valor absoluto de esta diferencia. Una vez calculada la diferencia muestral se consideran los siguientes criterios:

- Si Diferencia Muestral > T<sub>α</sub> (Valor crítico de Tukey), entonces la diferencia entre las medias de esos dos grupos es estadísticamente significativa.
- Si Diferencia Muestral < T<sub>α</sub> (Valor crítico de Tukey), entonces la diferencia no es estadísticamente significativa.

**Tabla 4. 4.** Comparaciones de pares de medias mediante la prueba de Tukey

| <b>Diferencia poblacional</b> | <b>Diferencia muestral</b> | <b>Decisión</b> |
|-------------------------------|----------------------------|-----------------|
| μ0% - μ2%                     | 3.51E-06                   | Significativo   |
| μ0% - μ4%                     | 6.21E-06                   | Significativo   |
| μ0% - μ6%                     | 7.82E-06                   | Significativo   |
| μ0% - μ8%                     | 8.34E-06                   | Significativo   |
| μ0% - μ10%                    | 8.66E-06                   | Significativo   |

Elaboración: Fuente propia

La prueba de Tukey se aplicó para identificar cuáles pares específicos de porcentajes de bentonita difieren significativamente en su efecto sobre la permeabilidad, ya que el ANOVA solo indica una diferencia general.

Los resultados de la prueba de Tukey indican que todas las comparaciones entre los diferentes porcentajes de bentonita sódica con respecto al suelo natural arrojaron diferencias estadísticamente significativas. Esto significa que cada incremento en el porcentaje de bentonita sódica produce una mejora (reducción de permeabilidad) que es estadísticamente distinguible de la anterior. Esto indica que la bentonita funciona y que cada adición de la misma en los rangos probados genera un efecto discernible y beneficioso.

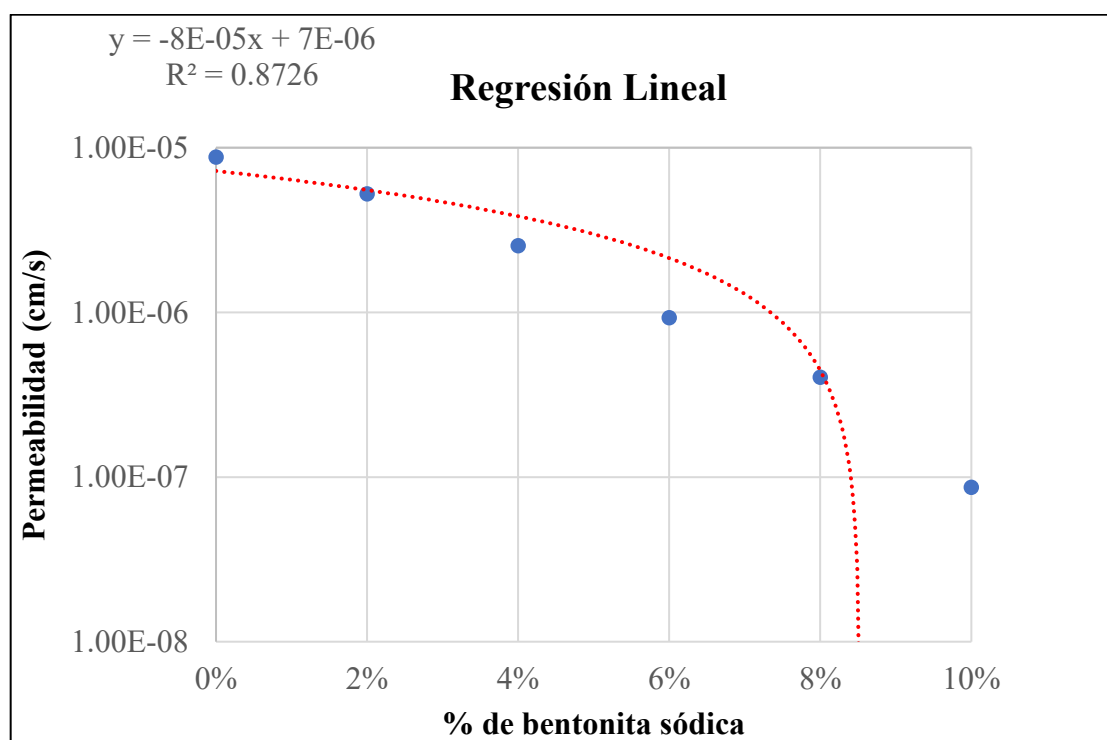
#### 4.3.4. Análisis de regresión lineal y exponencial

Para cuantificar la relación entre el porcentaje de bentonita sódica adicionada (variable independiente) y el coeficiente de permeabilidad (variable dependiente), se realizaron análisis de regresión lineal y exponencial. El objetivo es identificar la función que mejor describe esta relación y su poder predictivo.

##### 4.3.4.1. Regresión Lineal

La regresión lineal sigue la siguiente ecuación  $Y = bx + a$

**Figura 4. 6.** Regresión lineal de la permeabilidad



Elaboración: Fuente propia



Donde:

- $b = -8\text{E-}05$
- $a = 7\text{E-}06$
- $R^2 = 0.8726$

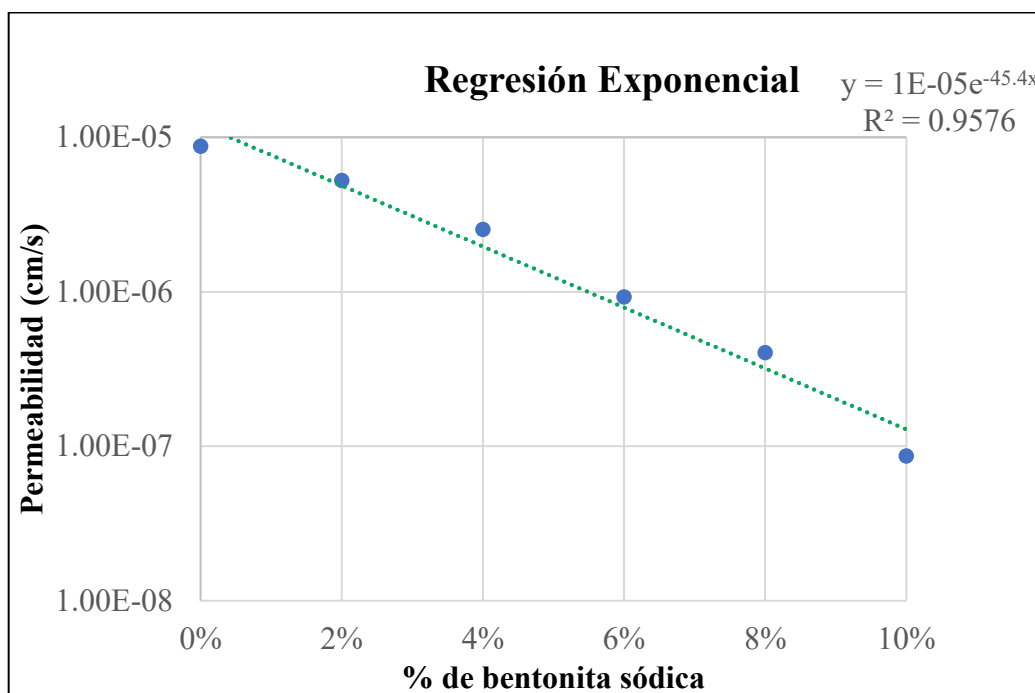
Para lograr una mejor visualización de los valores la escala de los datos de permeabilidad fue colocada en escala logarítmica.

Con un coeficiente de determinación  $R^2 = 0.8726$ , el modelo lineal explica el 87.26% de la variabilidad en la permeabilidad. Esto indica una fuerte relación lineal negativa, es decir, a medida que aumenta el porcentaje de bentonita, la permeabilidad disminuye linealmente.

#### 4.3.4.2. Regresión Exponencial:

La regresión exponencial sigue la siguiente ecuación  $y = a * E^{(bx)}$

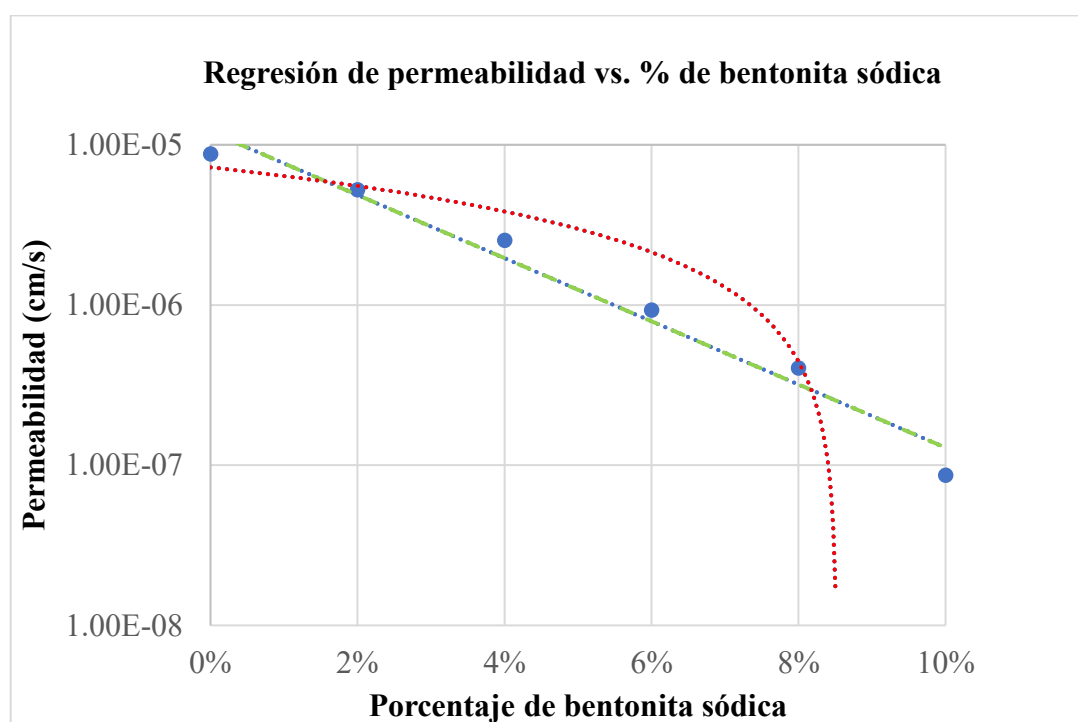
- $a = 1\text{E-}05$
- $b = -45.4$
- $R^2 = 0.9576$



Elaboración: Fuente propia

Con un coeficiente de determinación  $R^2 = 0.9576$ , el modelo exponencial explica el 95.76% de la variabilidad en la permeabilidad. Este valor de  $R^2$  significativamente más alto sugiere que la relación entre el porcentaje de bentonita y la permeabilidad es de naturaleza exponencial decreciente, lo cual es coherente con el comportamiento de reducción de la permeabilidad en suelos con adición de materiales impermeabilizantes. Esto implica que los primeros porcentajes de bentonita pueden generar una reducción de permeabilidad más drástica, y el efecto puede ir disminuyendo marginalmente con mayores adiciones.

**Figura 4. 7.** Regresión exponencial y lineal permeabilidad vs % bentonita sódica



Elaboración: Fuente propia

La regresión exponencial proporciona un ajuste mucho más preciso a los datos experimentales, lo que la convierte en el modelo preferido para predecir el coeficiente de permeabilidad para diferentes dosificaciones de bentonita sódica dentro del rango estudiado.

#### 4.3.5. Prueba de hipótesis

En la prueba de hipótesis se establecieron las siguientes premisas:

- **Hipótesis planteada (H):** La adición de porcentajes de bentonita sódica activada Super Gel a una arcilla de alta plasticidad produce una reducción significativa y cuantificable en su permeabilidad.
- **Hipótesis Nula ( $H_0$ ):** No existen diferencias significativas en la permeabilidad media de la arcilla de alta plasticidad con la adición de bentonita sódica. Es decir, la adición de bentonita no tiene un efecto significativo en la permeabilidad.

El análisis ANOVA arrojó un valor de F calculado de **3509.71** y un p-valor asociado de **1.52E-33**. El nivel de significancia ( $\alpha$ ) establecido es de 0.05.

**Tabla 4. 5.** Criterio de decisión para ANOVA

| <b>F</b>                   | <b>f crítico</b> |
|----------------------------|------------------|
| 3509.71                    | 2.62             |
| <b><math>\alpha</math></b> | <b>p-valor</b>   |
| 0.05                       | 1.52E-33         |

Elaboración: Fuente propia

Dado que el valor de F calculado es desproporcionadamente mayor que el valor crítico de f crítico, y el p-valor es extremadamente menor que el nivel de significancia  $\alpha$ , se rechaza la hipótesis nula ( $H_0$ ) y se acepta la hipótesis planteada (H).

Existe una diferencia altamente significativa entre la permeabilidad media de la arcilla natural y la permeabilidad de las mezclas con los distintos porcentajes de bentonita sódica. Esto confirma que la adición de bentonita sódica tiene un impacto sustancial y estadísticamente significativo en la reducción de la permeabilidad de la arcilla. Los resultados proporcionan una evidencia muy fuerte sobre la efectividad de la bentonita como agente impermeabilizante.

#### **4.4. Conclusión General del Capítulo (Síntesis)**

En este capítulo, se ha demostrado de manera contundente que la adición de bentonita sódica a la arcilla de alta plasticidad de Tarija produce una reducción altamente significativa en su coeficiente de permeabilidad. Los análisis estadísticos (ANOVA y Tukey) confirmaron que cada incremento porcentual de bentonita genera un cambio discernible en la permeabilidad. La regresión exponencial, con un  $R^2$  de 0.9576, ha sido

el modelo que mejor describe la relación entre la dosificación de bentonita y la permeabilidad, indicando una efectividad sobresaliente de la bentonita como agente impermeabilizante. Estos hallazgos validan las propiedades esperadas de la bentonita sódica y proporcionan una base sólida para su aplicación práctica en obras de ingeniería civil que requieran suelos de baja permeabilidad en la región.

#### **4.4.1. Aporte académico**

El aporte académico que se da en esta investigación titulada “ANÁLISIS DE LOS EFECTOS DE LA BENTONITA SÓDICA EN LA PERMEABILIDAD DE ARCILLAS DE ALTA PLASTICIDAD” es la cuantificación de los efectos específicos que produce la adición de porcentajes de bentonita sódica activada en la permeabilidad y consistencia de las arcillas de alta plasticidad de Tarija. Los aditivos tienen gran importancia en la mejora de las propiedades de los suelos, existen numerosas investigaciones acerca del uso de diferentes aditivos y sus propiedades, sin embargo, específicamente de la bentonita sódica activada Super Gel se carece de un conocimiento preciso sobre la dosificación y más importante aún, de la cuantificación de los efectos específicos que produce en la permeabilidad de las arcillas de alta plasticidad de Tarija.

Los resultados permiten comprender la relación entre los porcentajes de bentonita sódica y la permeabilidad. Este aporte se enfoca en el conocimiento fundamental del suelo de la región ya que genera conocimiento empírico específico al correlacionar por primera vez, bajo condiciones de laboratorio controladas, por ejemplo, con compactación tipo Proctor; la plasticidad de las arcillas locales con su reacción ante el agente modificador (bentonita sódica). Estos datos experimentales enriquecen el marco teórico geológico-geotécnico de la región, sirviendo como referencia técnica indispensable para futuros proyectos de obras civiles (presas, atajados, canales, carreteras), donde sean necesario crear membranas impermeables, que involucren la estabilización o el uso de suelos arcillosos de alta plasticidad.

## **CAPÍTULO V**

### **CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

## CAPÍTULO V

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 5.1. Conclusiones

Tras el desarrollo experimental y el análisis de la permeabilidad, se puede concluir que se ha cumplido satisfactoriamente con el objetivo general y los objetivos específicos planteados en la investigación, específicamente en relación con la arcilla de alta plasticidad seleccionada.

- El objetivo principal de esta investigación fue analizar el comportamiento de la permeabilidad en una arcilla de alta plasticidad en su estado natural versus el mismo suelo con la adición de bentonita sódica en porcentajes de 2%, 4%, 6%, 8% y 10%. Los resultados obtenidos en laboratorio tabla 4.1. evidencian que la adición de bentonita sódica provoca una reducción drástica de  $8.74^{-06}$  a  $8.65^{-08}$  y sostenida en la permeabilidad de la arcilla con cada incremento porcentual, haciendo que el suelo sea significativamente más impermeable.

| Permeabilidad $k_{20}$ (cm/s) |          |          |          |          |          |          |
|-------------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| % Bentonita sódica            | 0%       | 2%       | 4%       | 6%       | 8%       | 10%      |
| Ensayo N°1                    | 8.99E-06 | 5.03E-06 | 2.72E-06 | 9.62E-07 | 4.07E-07 | 8.58E-08 |
| Ensayo N°2                    | 8.86E-06 | 5.46E-06 | 2.58E-06 | 9.10E-07 | 4.02E-07 | 8.54E-08 |
| Ensayo N°3                    | 8.55E-06 | 5.16E-06 | 2.32E-06 | 9.15E-07 | 4.12E-07 | 8.63E-08 |
| Ensayo N°4                    | 8.49E-06 | 5.16E-06 | 2.55E-06 | 9.44E-07 | 3.96E-07 | 8.84E-08 |
| Ensayo N°5                    | 8.82E-06 | 5.37E-06 | 2.48E-06 | 9.02E-07 | 3.99E-07 | 8.65E-08 |
| <b>Promedio</b>               | 8.74E-06 | 5.23E-06 | 2.53E-06 | 9.27E-07 | 4.03E-07 | 8.65E-08 |

- La adición de bentonita sódica genera cambios físico-químicos en el suelo, lo cual se manifiesta en cambios notorios, como en el índice de plasticidad (IP) mostrados en la tabla 3.6, donde se observa un aumento del mismo a medida que se incrementa el

porcentaje de bentonita. Esto es consistente con la naturaleza expansiva e hidrofílica de la bentonita.

| Muestra                           | Promedio |       |       |
|-----------------------------------|----------|-------|-------|
|                                   | LL       | LP    | IP    |
|                                   | %        | %     | %     |
| Suelo natural                     | 54.66    | 27.38 | 27.28 |
| Suelo con 2% de bentonita sódica  | 55.67    | 28.21 | 27.46 |
| Suelo con 4% de bentonita sódica  | 56.35    | 28.38 | 27.97 |
| Suelo con 6% de bentonita sódica  | 57.37    | 29.10 | 28.27 |
| Suelo con 8% de bentonita sódica  | 58.33    | 29.30 | 29.02 |
| Suelo con 10% de bentonita sódica | 59.31    | 29.95 | 29.36 |

- Se realizó un análisis estadístico de los resultados de permeabilidad. El Análisis de Varianza (ANOVA) demostró que existen diferencias altamente significativas en la permeabilidad entre los grupos de dosificación, dando un valor **F** significativo mostrado en la tabla 4.5. que es mucho más grande al **f crítico** aceptando así la hipótesis de investigación y se rechazando la hipótesis la nula.

| <b>F</b>                   | <b>f crítico</b> |
|----------------------------|------------------|
| 3509.71                    | 2.62             |
| <b><math>\alpha</math></b> | <b>p-valor</b>   |
| 0.05                       | 1.52E-33         |

- La prueba de Tukey en la tabla 4.4. confirmó que todas las comparaciones entre pares de porcentajes de bentonita y el suelo natural (0% de bentonita) mostraron diferencias estadísticamente significativas, lo que valida la efectividad incremental de la bentonita.

| Diferencia poblacional | Diferencia muestral | Decisión      |
|------------------------|---------------------|---------------|
| $\mu 0\% - \mu 2\%$    | 3.51E-06            | Significativo |
| $\mu 0\% - \mu 4\%$    | 6.21E-06            | Significativo |
| $\mu 0\% - \mu 6\%$    | 7.82E-06            | Significativo |
| $\mu 0\% - \mu 8\%$    | 8.34E-06            | Significativo |
| $\mu 0\% - \mu 10\%$   | 8.66E-06            | Significativo |

- La relación entre el porcentaje de bentonita y la permeabilidad se modeló de manera más precisa mediante una regresión exponencial ( $R^2$ ) igual a 0.9576, indicando una relación no lineal y altamente predictiva, donde pequeñas adiciones iniciales de bentonita tienen un gran impacto en la reducción de la permeabilidad.
- El nivel de confianza fue cumplido en la investigación, ya que se aplicaron métodos estadísticos y se controlaron adecuadamente las variables, lo que proporcionó resultados confiables y significativos para respaldar las conclusiones obtenidas.

## 5.2. Recomendaciones

Para futuras investigaciones y aplicaciones prácticas, se recomienda lo siguiente:

- Se recomienda la utilización de papel filtro en cada extremo de la muestra de suelo dentro del permeámetro para reducir la migración de finos, especialmente al momento de realizar la prueba de permeabilidad de carga variable.
- Es crucial purgar completamente el sistema de aire antes de efectuar la práctica de permeabilidad de carga variable, puesto que la presencia de burbujas de aire en las mangueras o dentro de la muestra puede ocasionar variaciones significativas en las alturas de carga hidráulica y, por ende, en los resultados de permeabilidad.
- Después de realizar los ensayos de carga variable, es fundamental limpiar a fondo el equipo, y sobre todo las piedras porosas, con el objetivo de preservar la vida útil de los equipos y eliminar los restos de material fino que podrían incrustarse en las piedras, afectando futuras mediciones.
- En el presente documento, el coeficiente de permeabilidad se calculó para muestras compactadas a su densidad máxima y humedad óptima. Con fines de enriquecimiento



académico y aplicaciones más amplias, se recomienda en futuros trabajos investigar la permeabilidad a diferentes niveles de compactación (porcentajes de la densidad máxima) y contenidos de humedad, esto para comprender mejor el comportamiento de la permeabilidad en condiciones de campo más variadas.

- Se sugiere incluir un análisis costo-beneficio de la adición de bentonita sódica para determinar la dosificación óptima desde una perspectiva económica, balanceando la mejora en permeabilidad con los costos del material.