

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

En el ámbito de la ingeniería civil, uno de los desafíos recurrentes en el desarrollo de obras está relacionado con las condiciones geotécnicas del terreno, especialmente cuando se trata de suelos cohesivos, como las arcillas. Estos suelos presentan una baja permeabilidad, lo que provoca fenómenos de expansión y contracción debido a la variación en su contenido de humedad, generando asentamientos diferenciales y afectando la estabilidad de las estructuras que se fundan sobre ellos.

En este contexto, se han investigado diversos métodos para el mejoramiento de suelos, entre ellos, la estabilización química mediante la adición de sales. Un estudio realizado en México por Garnica et al, (2002), titulado “Estabilización de suelos con cloruros de sodio para uso de las vías terrestres”, analizó el comportamiento de suelos cohesivos al ser mezclados con cloruro de sodio (NaCl), evidenciando cambios en sus propiedades mecánicas. Según este estudio, el cloruro de sodio puede influir en la tensión superficial del agua contenida en el suelo y reducir la velocidad de evaporación, lo cual sugiere una posible mejora temporal en su comportamiento mecánico.

En esta investigación, se emplea el ensayo de compresión no confinada, una prueba estándar que permite evaluar la resistencia al corte no drenado del suelo, Este ensayo consiste en aplicar una carga axial a una muestra sin confinamiento lateral hasta que se produce la falla, lo que permite estimar la cohesión aparente del material y su capacidad para soportar cargas bajo condiciones no drenadas.

El propósito del presente estudio es evaluar el efecto del cloruro de sodio en suelos arcillosos de baja plasticidad, mediante la determinación de la carga última obtenida en condiciones controladas. Se busca establecer si la adición de diferentes porcentajes de NaCl mejora o deteriora la resistencia mecánica del suelo compactado en comparación con muestras inalteradas. El conocimiento derivado de esta investigación permitirá comprender mejor la interacción entre soluciones salinas y suelos cohesivos, aportando

datos útiles para la planificación, diseño y mitigación de riesgos en obras geotécnicas, especialmente en regiones donde la salinidad del suelo es una condición presente.

1.1 Antecedentes

La salinidad del suelo representa un factor ambiental relevante que puede modificar sustancialmente las propiedades físico-mecánicas de los suelos, en especial los suelos arcillosos, cuya estructura coloidal y alto contenido de humedad los hace particularmente sensibles a la presencia de sales disueltas. La incorporación de compuestos como el cloruro de sodio (NaCl), ya sea por infiltración desde capas freáticas salinas o por el uso de aguas salobres en procesos constructivos, puede inducir transformaciones en el comportamiento geotécnico del suelo.

En suelos cohesivos, el contenido de sal puede afectar la interacción entre las partículas de arcilla y el agua, alterando fenómenos de floculación y dispersión. Esto modifica parámetros críticos como la cohesión aparente, la fricción interna y, en consecuencia, la resistencia al corte. En particular, la resistencia al corte no drenado (S_u) es un parámetro de especial interés en la ingeniería geotécnica, ya que permite estimar la capacidad portante del suelo bajo cargas aplicadas sin que se produzca drenaje de agua intersticial, condición común en obras como cimentaciones superficiales, presas de materiales sueltos o taludes saturados.

La investigación sobre los efectos de la salinidad en suelos arcillosos no solo responde a un interés académico, sino también a la necesidad práctica de optimizar el diseño de infraestructuras geotécnicas en regiones donde los suelos presentan condiciones químicas adversas. Comprender cómo influye el cloruro de sodio en el comportamiento mecánico del suelo permite tomar decisiones informadas sobre la viabilidad de estabilización química, o bien, prever riesgos potenciales asociados a su uso.

1.2 Situación problemática

La investigación se desarrolla en la ciudad de Tarija, específicamente en el Distrito 12, una zona caracterizada por la presencia de suelos arcillosos que presentan desafíos

particulares para el diseño y ejecución de obras de infraestructura. Entre los factores que condicionan el comportamiento de estos suelos, destaca la salinidad, principalmente atribuida a la presencia de sales solubles como el cloruro de sodio (NaCl), ya sea por infiltración de aguas salinas, riego inadecuado o condiciones naturales del subsuelo.

La salinidad del suelo tiene el potencial de alterar significativamente sus propiedades geotécnicas, especialmente en suelos cohesivos, cuya estructura micro agregada y alto contenido de agua los hace vulnerables a cambios físico-químicos. En este contexto, uno de los parámetros más afectados es la resistencia al corte no drenado (S_u), fundamental para la evaluación de la capacidad portante y la estabilidad de estructuras geotécnicas bajo condiciones de carga rápida o saturación.

No obstante, el efecto específico del cloruro de sodio sobre la resistencia al corte no drenado en suelos arcillosos no ha sido suficientemente caracterizado en la región de estudio, lo que genera incertidumbre en la toma de decisiones durante la planificación y construcción de obras civiles. La adición de sal puede inducir fenómenos como la floculación de partículas de arcilla, reducción del espesor de la doble capa difusa o modificaciones en la presión de poros, afectando directamente la cohesión aparente y la fricción interna del suelo.

Frente a este panorama, se plantea la necesidad de evaluar experimentalmente cómo influye el cloruro de sodio, en diferentes concentraciones, sobre la resistencia al corte no drenado de suelos arcillosos representativos del Distrito 12. Esta evaluación, mediante ensayos de compresión no confinada (UCS), permitirá obtener datos técnicos fiables para definir si el uso del NaCl puede considerarse una alternativa viable para la estabilización de suelos, o si por el contrario compromete la integridad de los materiales empleados en obras de ingeniería.

Este estudio responde, por tanto, a una problemática real y vigente, cuya solución puede mejorar significativamente el desempeño de las estructuras construidas sobre suelos de baja capacidad portante, al mismo tiempo que promueve prácticas más seguras y sostenibles en el ámbito geotécnico.

1.2.1 Problema

¿Cómo es el comportamiento del cloruro de sodio en los suelos arcillosos en los parámetros de resistencia cortante a través del ensayo a compresión no confinada?

1.2.2 Relevancia y factibilidad de la investigación

1.2.2.1 Relevancia de la investigación

La investigación es relevante porque aborda la influencia de la salinidad, específicamente del cloruro de sodio (NaCl), en la resistencia al corte no drenado de los suelos arcillosos, un parámetro fundamental en el diseño y estabilidad de estructuras geotécnicas. Infraestructuras como edificios, carreteras, puentes y obras de contención dependen directamente de la capacidad del suelo para resistir cargas y deformaciones. Si la salinidad afecta negativamente esta resistencia, se compromete tanto la seguridad estructural como la durabilidad de las obras civiles.

Analizar este fenómeno resulta crucial para anticipar comportamientos desfavorables del suelo en condiciones reales, particularmente en zonas con presencia natural o inducida de sales. Este estudio no solo enriquecerá el conocimiento científico en el campo de la ingeniería geotécnica, sino que también servirá como base técnica para futuras investigaciones, permitiendo desarrollar soluciones más eficientes y sostenibles en el tratamiento y mejoramiento de suelos.

1.2.2.2 Factibilidad de la investigación

La factibilidad de esta investigación está garantizada por la disponibilidad de muestras representativas de suelos arcillosos del distrito 12 de la ciudad de Tarija, así como por el acceso a los equipos necesarios para la realización de ensayos de compresión no confinada en laboratorio. La metodología experimental propuesta es clara y viable, centrada en evaluar el efecto del cloruro de sodio sobre la resistencia al corte no drenado.

Además, el estudio es pertinente desde una perspectiva práctica, ya que permite determinar si la adición de NaCl a suelos cohesivos resulta perjudicial para su

comportamiento mecánico. De comprobarse su efecto negativo, se podrán descartar su uso como estabilizante y promover alternativas técnicas más efectivas, como el uso de agentes estabilizantes aprobados por normativas geotécnicas (por ejemplo, cal, cemento, polímeros o materiales geos sintéticos).

En este sentido, la investigación no solo es viable en términos técnicos y logísticos, sino también en su aplicabilidad real, ya que aportará criterios objetivos para la toma de decisiones en proyectos de construcción donde la salinidad del suelo sea un factor crítico.

1.2.3 Delimitación temporal y espacial de la investigación

1.2.3.1 Delimitación temporal

El fenómeno ocurre en tiempo “presente” y que no se modificara las variables en función del tiempo.

1.2.3.2 Delimitación espacial

Se desarrollará un análisis de los suelos arcillosos del departamento de Tarija.

1.3 Justificación

La investigación se justifica por la necesidad de dar respuesta a los desafíos geotécnicos asociados a la salinidad en suelos arcillosos, especialmente en contextos donde estos suelos se ven expuestos a cloruro de sodio (NaCl) debido a condiciones ambientales o prácticas antrópicas. Si bien existen estudios que abordan la influencia de la salinidad en las propiedades del suelo, aún persiste un vacío significativo en la comprensión específica del efecto del NaCl sobre la resistencia al corte no drenado, un parámetro esencial para evaluar la estabilidad y capacidad portante de suelos cohesivos bajo cargas axiales rápidas o sin drenaje.

El aporte de esta investigación no es únicamente teórico, sino también de alta aplicabilidad práctica en el ámbito de la ingeniería civil y la planificación de infraestructuras. La resistencia al corte no drenado está directamente relacionada con la seguridad estructural de edificaciones, carreteras, puentes y otras obras construidas sobre suelos cohesivos, Si

la salinidad disminuye significativamente dicha resistencia, las consecuencias pueden ser críticas: fallos estructurales, asentamientos diferenciales e incluso colapsos, con implicaciones tanto humanas como económicas.

Adicionalmente, esta investigación contribuirá a mejorar la gestión de los recursos naturales y el diseño de soluciones de estabilización de suelos, mediante una evaluación objetiva del uso del cloruro de sodio como potencial aditivo estabilizante. Los resultados podrán orientar futuras investigaciones sobre alternativas más eficientes y sostenibles, fortaleciendo la capacidad de los ingenieros para tomar decisiones informadas en el diseño y ejecución de proyectos.

La investigación busca llenar un vacío técnico existente, generar conocimiento original y brindar criterios claros para el análisis, diseño y mejoramiento de suelos cohesivos en condiciones salinas, elevando así los estándares de seguridad y eficiencia en la ingeniería geotécnica.

1.4 Objetivos

1.4.1. Objetivo general

Analizar el efecto del Cloruro de Sodio en suelos arcillosos en parámetros de la resistencia cortante no drenada; considerando el ensayo de la compresión no confinada; de tal manera, que se pueda establecer los parámetros de resistencia y su comportamiento.

1.4.2 Objetivos específicos

- Delimitación del área de trabajo del distrito 12.
- Caracterización de las muestras seleccionadas, los suelos arcillosos.
- Obtener una relación de resistencia cortante no drenada en muestras inalteradas y alteradas con cloruro de sodio.
- Analizar el comportamiento del cloruro de sodio en la resistencia al corte no drenado mediante el ensayo a compresión no confinada con diferentes porcentajes que son al 0%, 1%, 2%, y 3%.

1.5 Hipótesis

Si, al analizar el efecto del cloruro de sodio en los suelos arcillosos los parámetros de resistencia al corte no drenado a través del ensayo a compresión no confinada, se podrá establecer el comportamiento de la resistencia cortante.

1.6 Operacionalización de las variables

1.6.1 Variable independiente

Tabla 1: Cantidades de cloruro de sodio

Variable	Conceptualización	Dimensión	Indicador	Valor/acción
Cantidades de Cloruro de Sodio	Compuesto químico (NaCl) muy soluble en agua; es una sustancia blanca y cristalina que abunda en la naturaleza en forma de grandes masas sólidas.	Porcentaje en peso de la muestra seca.	Porcentaje (%)	Variación en búsqueda del último.

1.6.2 Variable dependiente

Tabla 2: Parámetros de resistencia cortante no drenada

Variable	Conceptualización	Dimensión	Indicador	Valor/acción
Parámetros de Resistencia Cortante No drenada	Los parámetros de Resistencia Cortante No drenada se analizan con esfuerzos totales, Se analizará la resistencia con dos ensayos.	Método de compactación	Un método adecuado	Compactar el suelo agregando las cantidades de cloruro de sodio
		Método de rotura	Un método adecuado	Mediante el ensayo al a Compresión no confinada

1.7 Identificación del tipo de Investigación

La presente investigación se enmarca dentro de un estudio de tipo "Descriptivo-experimental". Se adoptará un enfoque descriptivo, ya que se busca caracterizar el

comportamiento de los suelos arcillosos del Distrito 12 de la ciudad de Tarija, tanto en su estado natural como en condiciones modificadas mediante la adición de cloruro de sodio (NaCl), documentando detalladamente sus propiedades geotécnicas, en particular la resistencia al corte no drenado, paralelamente, la investigación también asume un enfoque experimental, al introducir deliberadamente una variable (el porcentaje de NaCl) en las muestras remodelada, con el fin de observar y analizar el efecto de esta sal sobre la resistencia última del suelo a través de ensayos de laboratorio. La combinación de estos enfoques permite obtener una visión integral del impacto del cloruro de sodio en suelos cohesivos, proporcionando resultados reproducibles y técnicamente verificables.

1.8 Unidades de estudio y decisión muestral

1.8.1 Unidad de estudio

La unidad de estudio está conformada por las muestras de suelo arcilloso obtenidas en campo y ensayadas en laboratorio. Estas muestras serán evaluadas a través de ensayos de compactación Proctor y ensayos de Compresión No Confinada (UCS), tanto en su estado natural (inalterado) como en su estado remoldeado con diferentes porcentajes de cloruro de sodio (0%, 1%, 2% y 3%).

1.8.2 Población

La población se obtendrá un estudio de los suelos arcillosos de la ciudad de Tarija, los cuales comprenden suelos arcillosos de baja plasticidad (CL) Y suelos arcillosos de alta plasticidad (CH).

1.8.3 Muestra

Las muestras de suelos arcillosos con cloruro de sodio se refieren a las muestras que han sido tratadas con una solución de cloruro de sodio para simular los efectos de la salinidad en suelos arcillosos. Esta investigación comprende como el cloruro de sodio afecta las propiedades físicas y químicas de los suelos arcillosos del distrito 12.

1.8.4 Selección de las técnicas de muestreo

Se realizará un muestreo probabilístico (selección aleatoria) ya que es el más apropiado para nuestra practica por lo tanto en función al conocimiento claro en la población y los factores representativos para la investigación. El muestreo aleatorio se tendrá la misma probabilidad en cada suelo arcilloso extraído en el distrito 12.

1,9 Métodos empleados

1.9.1 Métodos

El método de investigación que se utilizara para el tema de investigación es:

Tabla 3: Método de investigación

Empíricos	Teóricos
Trabajo en campo	Análisis
Observatorio	Síntesis
Cuestionario	Hipotético
	Deductivo
Experimento en Laboratorio	Revisión bibliográfica

1.11 Alcance de la investigación

El presente estudio tiene como alcance principal analizar el efecto del cloruro de sodio (NaCl) sobre la resistencia al corte no drenado de suelos arcillosos pertenecientes al distrito 12 de la ciudad de Tarija, mediante la ejecución de ensayos de Compresión No Confinada (UCS) en un entorno de laboratorio controlado. Esta investigación se limita a la evaluación de muestras representativas de suelos CL (arcillas de baja plasticidad) y CH (arcillas de alta plasticidad), tanto en su estado natural (inalterado) como en estado remoldeado con adición de distintas concentraciones de cloruro de sodio (0%, 1%, 2% y 3%).

El estudio contempla los siguientes alcances específicos:

- Evaluar la resistencia última de muestras inalteradas de suelo natural sin presencia de aditivos.
- Analizar el comportamiento mecánico de muestras remoldeada tratadas con diferentes porcentajes de cloruro de sodio.
- Comparar los resultados obtenidos entre muestras tratadas y no tratadas para establecer el impacto de la salinidad sobre la cohesión aparente del suelo.
- Generar conclusiones aplicables al ámbito de la ingeniería geotécnica, especialmente en lo que respecta a la estabilidad de estructuras construidas sobre suelos arcillosos influenciados por sales solubles.

Cabe resaltar que este estudio se enfoca únicamente en los efectos inmediatos observables en laboratorio, por lo que no considera factores externos como el tiempo de exposición prolongada, efectos de ciclos de humedecimiento-secado, ni comportamiento en campo a gran escala. A pesar de estas limitaciones, los resultados aportarán información técnica relevante para futuras investigaciones y decisiones de diseño en obras civiles emplazadas sobre suelos potencialmente salinizados.

CAPÍTULO II

FUNDAMENTO

TEÓRICO

CAPÍTULO II

FUNDAMENTO TEÓRICO

2.1 Definición de suelos arcillosos

El suelo arcilloso es aquel en el que predomina la arcilla sobre otras partículas de otros tamaños. Las arcillas son cualquier sedimento o depósito mineral que es plástico cuando se humedece y que consiste en un material muy fino, formado por partículas muy pequeñas cuyo tamaño es inferior a 2 micras, y se componen principalmente de silicatos de aluminio hidratados. Los terrenos arcillosos son en principio, los más peligrosos para cimentar, En ellos se pueden producir grandes asentamientos en un largo plazo de tiempo, y es en los que el conocimiento de su comportamiento bajo cargas ha progresado más en los últimos años, (González et al, 2017).

Figura 1: Fotografía de suelo arcillosos en Tarija



“Los suelos se definen como aglomerados de partículas procedentes de la descomposición de las rocas debido a la erosión: están contruidos por elementos relativamente pequeños y no homogéneos”. Cuyo término es aplicado por la geotécnica, ciencia que se ejerce en la construcción, determinado las presentes características físicas y mecánicas de cada depósito de suelo, con o sin materiales orgánico, (Sanz, 1975).

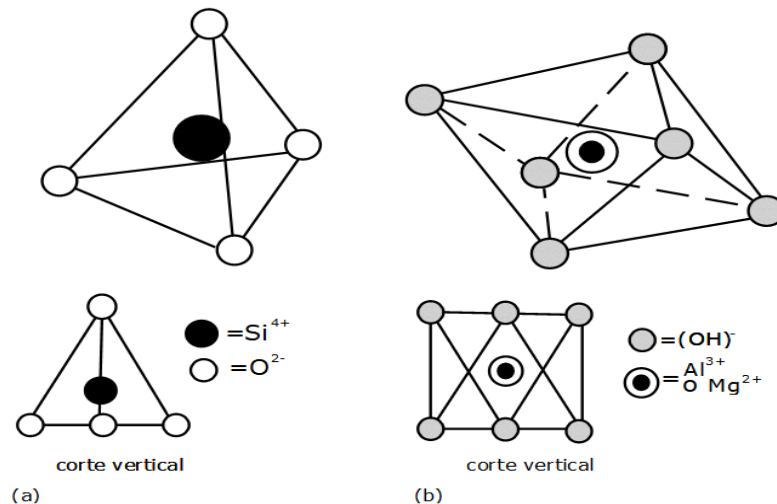
2.1.1 Composición mineralógica de la arcilla

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 laminas; la silícica y la aluminica, (J, Badillo et al, 2005).

Los minerales arcillosos son formados principalmente por la meteorización química de las rocas, es decir que estos minerales son productos de la alteración de minerales preexistentes en la roca. Estos minerales son tan diminutos que solo pueden ser vistos utilizando un microscopio electrónico.

Los principales elementos químicos constituyentes de estos minerales son átomos de; silicio, aluminio, hierro magnesio, hidrogeno y oxígeno. Estos elementos atómicos se combinan formando estructuras atómicas básicas, que combinándose entre sí forman laminas, la que al agruparse forman estructuras laminares que finalmente al unirse por medio de un enlace forman un mineral de arcilla, (Pacheco,2019).

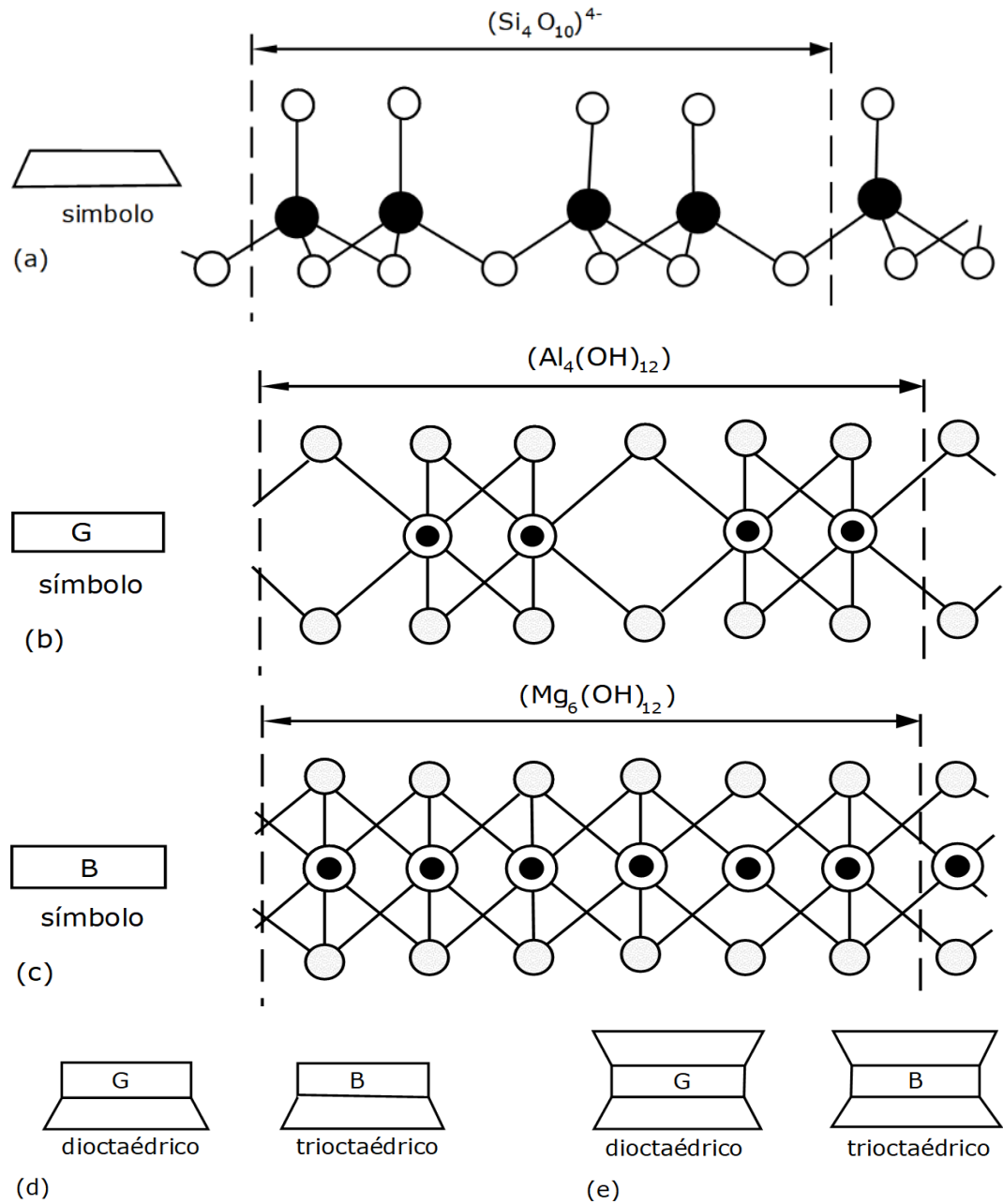
Figura 2: Elementos unitarios de los minerales de arcilla



Fuente: Whitlow, 1999

- a) Unidad tetraédrica.
- b) Unidad octaédrica, (Whitlow, 1999).

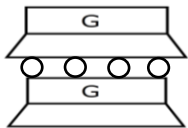
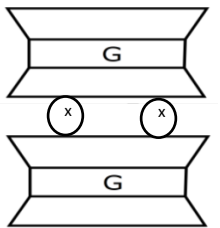
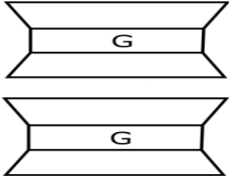
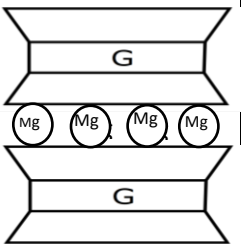
Figura 3: Estructuras de capas reticulares



Fuente: Whitlow, 1999,

- a) Capa de sílice, b) Capa de gibsitita.
 c) Capa de brucita, d) Retículos de las capas.
 e) Retículos de tres capas (Whitlow, 1999).

Figura 4: Estructura y tamaños de los principales minerales de arcilla

Nombre del mineral	Estructura simbolizada	Entre las laminas	Tamaño aproximado [μm]	Superficie específica [m²/g]	Capacidad aprox, de intercambio [me/100g]
caolinita		enlace de liga H	$l = 0,2 - 2,0$ $t = 0,05 - 0,2$	10 - 30	5
haloisita		H_2O	[tubular] $l = 0,5$ $t = 0,05$	40 - 50	15
ilita		enlace de K^+	$l = 0,2 - 2,0$ $t = 0,02 - 0,2$	50 - 100	30
montmorillonita		enlace entre cruzado débil entre iones Mg/Al	$l = 0,1 - 0,5$ $t = 0,01 - 0,1$	200 - 800	100
vermiculita		enlace de	$l = 0,15 - 1,0$ $t = 0,01 - 0,1$	20 - 400	150

Fuente: Whitlow, 1999

2.1.2 Características de la arcilla

Las arcillas están constituidas por silicatos de aluminio hidratados, algunas arcillas presentan además silicatos de magnesio, hierro u otros metales hidratados. Cada partícula de arcilla tiene una carga eléctrica negativa, su intensidad de carga depende de la estructuración y composición.

Los suelos que contienen arcillas y limos presentan problemas geotécnicos para su empleo en obra civil debido a la elevada plasticidad, una reducida capacidad portante e inestabilidad de volumen en función de la humedad (expansión y contracción). Muchos de los suelos arcillosos se hallan en zonas de alta precipitación, presentando deficiencias en el drenaje, este suelo se caracteriza por su alto contenido de agua y su baja resistencia.

El tamaño de partículas de los suelos arcillosos varía desde 0,005mm hasta dimensiones coloidales, teniendo muchas partículas arcillosas con diámetro inferior a 0,002mm, En el cuadro se muestra los distintos sistemas de clasificación según las organizaciones que actualmente utilizan los ingenieros en los proyectos.

Tabla 4: Límites de tamaño de los suelos separados

Nombre de la Organización	Tamaño del grano [mm]			
	Grava	Arena	Limo	Arcilla
Instituto Tecnológico de Massachussets (MIT)	>2	2 a 0,06	0,06 a 0,002	<0,002
Departamento de Agricultura de Estados Unidos (USDA)	>2	2 a 0,05	0,05 a 0,002	<0,002
Asociación Americana de transporte y carreteras estatales (AASHTO)	76,2 a 2	2 a 0,075	0,075 a 0,002	<0,002
Sistema unificado de clasificación de suelos (U:S: Army corps of Engineers; U,S, Bureau of reclamation; American Society for Testing and Materials)	76,2 a 4,75	4,75 a 0,075	Finos (es decir, limos y arcillas <0,0075)	

Fuente: Fundamentos de Ingeniería Geotécnica (Braja M, Das)

2.1.3 Diferencia entre limos y arcilla

Para la extracción en campo primero se conoció la diferencia entre limos y arcilla y por eso tenemos la siguiente tabla.

Tabla 5: Diferencia entre limos y arcillas

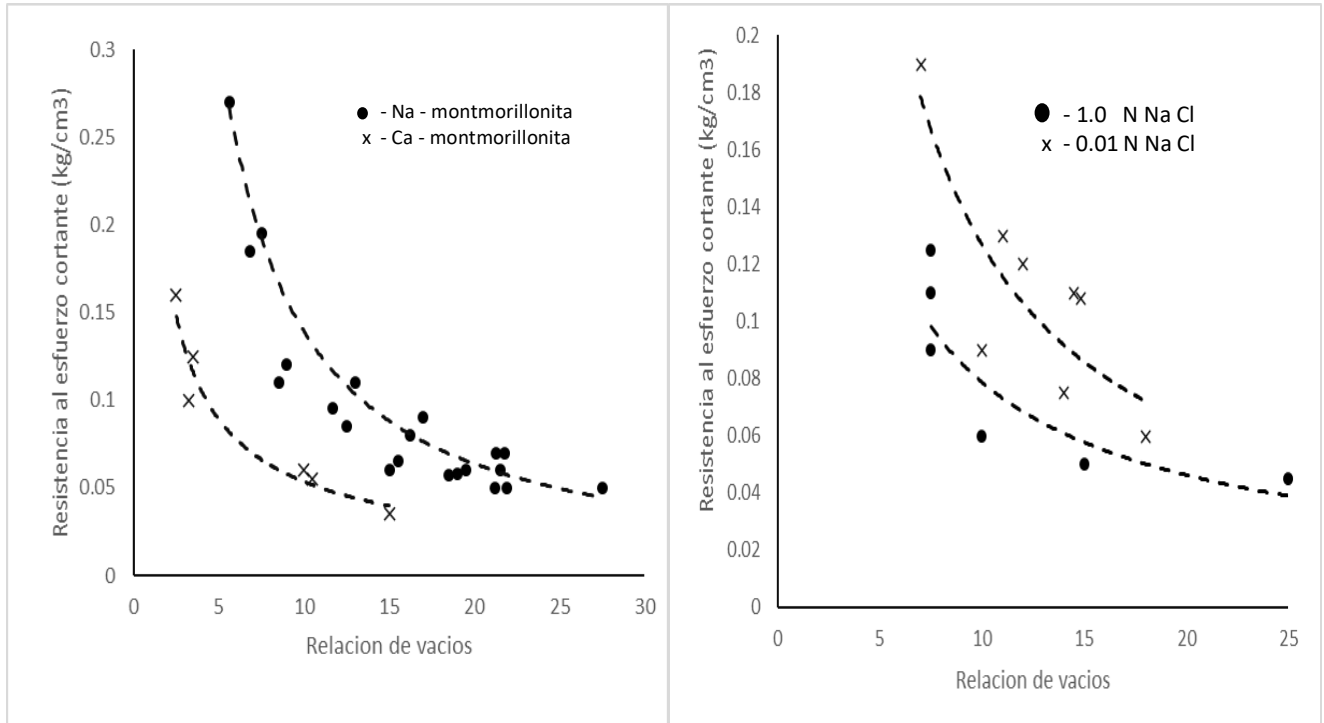
Limos [entre 0,002 y 0,06 mm]	Arcilla [<0,002 mm]
No suelen tener propiedades coloidales.	Suelen tener propiedades coloidales.
A partir de 0,002 mm, y a medida que aumenta el tamaño de las partículas, se va haciendo cada vez mayor la proporción de minerales no arcillosos.	Consisten en su mayor parte en minerales arcillosos.
Tacto áspero.	Tacto suave.
Se secan con relativa rapidez y no se pegan los dedos.	Se secan lentamente y se pegan los dedos.
Los terrones secos tienen una cohesión apreciable, pero se pueden reducir a polvo con los dedos.	Los terrones secos se pueden partir, pero no reducir a polvo con los dedos.

Fuente: (Juan, 2023)

2.1.4 Efectos de las sales en los suelos arcillosos

Las sales se forman a partir de la neutralización de un ácido con una base. Las sales normales tales como el cloruro de sodio (NaCl), cloruro de calcio (CaCl_2) o cloruro de potasio (KCl) son sales completamente neutralizadas, es decir que no contienen exceso de iones ácidos de hidrógeno (H^+) ni básicos de hidroxilo (OH^-), (Yanshon et al., 2015).

Gráfica 1: Suelos finos catión y salinidad

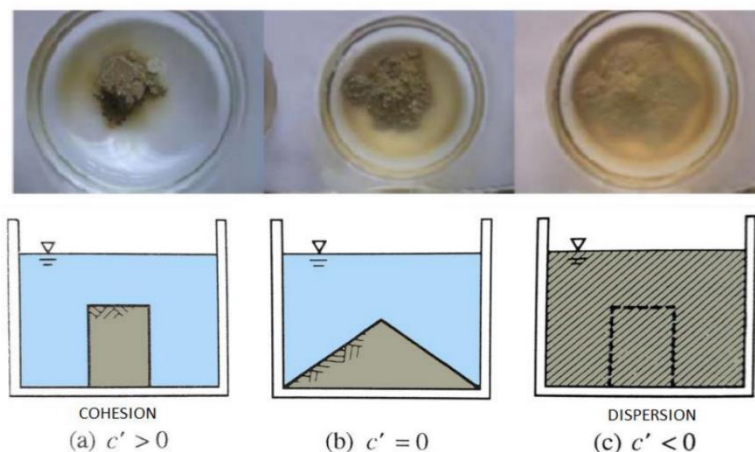


Fuente: John Atkinson, 1997

2.2 Suelos dispersivos

Los suelos dispersivos dependen de los minerales químicos que tienen dentro del suelo lo cual hará que exista una fuerza de atracción o de repulsión entre sus átomos y al tiempo la cohesión llega a dispersarse.

Figura 5: Muestra de los suelos dispersivos



Fuente: John Atkinson, 1997

Tabla 6: Suelos dispersivos

Suelos dispersivos	
Cationes Si^{4+} Intercambio Catiónico Al^{3+} Mg^{2+} Na^{+} CEC – capacidad de intercambio catiónico El factor principal en el fenómeno de dispersión de suelos es el porcentaje de sodio presente en la capa adsorbida de la partícula de arcilla. Medida de cuantos cationes puede atrapar una partícula de arcilla. Se mide en meq/100g.	
Arcilla	Capacidad de intercambio iónico [meq/100g]
Caolinita	3 – 5
Halloisita	10 – 40
Illita	10 – 50
Clorita	10 – 50
Esmectita	80 – 150
Montmorillonita	80 – 200
Vermiculita	100 – 200

Fuente: Elaborada por J.C. Rojas, (2020)

2.3 Cloruro de sodio

El cloruro de sodio actúa disminuyendo la humedad optima esto sucede porque las soluciones que contengan cloruro de sodio disuelto, presentan una mayor tensión superficial, lo que reduce la evaporación del agua. Sin embargo, cuando la aportación de agua a la superficie expuesta es menor que la evaporación, la superficie se empieza a secar y el cloruro de sodio se cristaliza en la superficie y en los vacíos, lo que puede ayudar a formar una barrera que impedirá posteriores evaporaciones, (**Yanshon et al., 2015**).

El cloruro de sodio es muy útil en climas con problemas de congelamiento. A humedades relativas altas actúa como retenedora del agua debido a su naturaleza higroscópica, reduce la evaporación y evita la formación de polvo. Además, se puede esperar un mejor resultado si el suelo contiene material fino que reaccione con la sal. Entre las limitaciones para su uso se señalan: el medio ambiente debe tener una humedad relativa superior al 30 %; las partículas del suelo deben pasar por malla 200 y reaccionar favorablemente con la sal; y la ausencia de materia orgánica ya que esta inhibe la acción de la sal, (**Garnica et al., 2002**).

2.4 Contenido de humedad

Se define como la cantidad de agua que se encuentra dentro de una muestra de suelo y que luego de someterlo a elevadas temperaturas se puede conocer su valor, expresada en porcentaje, (**Juárez et al., 2005**).

La siguiente expresión define el cálculo del contenido de humedad del suelo.

$$W = \frac{W_w}{W_{ss}} * 100$$

Donde:

W = Contenido de agua [%]

W_w = Peso del agua presente en el suelo [g]

W_{ss} = Peso del suelo seco después de secado al horno [g]

Dentro del suelo, el agua se presenta de las siguientes formas:

Agua libre: Es el agua que circula a través del suelo sin dificultad alguna y por la acción de gravedad puede ser drenada.

Agua retenida: Se encuentra retenida dentro del suelo y la causa de su formación se define:

- **Agua higroscópica:** Es la que adsorbe un suelo de la humedad del aire,
- **Agua capilar:** Es la retenida por efecto de la tensión superficial,

2.4.1 Métodos para la determinación del contenido de humedad

Los métodos para determinar el contenido de humedad tienen el principio de conocer el peso de una muestra de suelo en su estado húmedo y también en su estado seco, entonces, con solo conocer la diferencia de estos valores, podemos conocer el contenido de humedad de los diferentes suelos, (Lambe, R, V, Whitman, 1997).

2.4.2 Método estándar (horno)

Este método consiste en realizar el secado de la muestra de suelo húmedo en un horno durante 24 horas a una temperatura de 100-105°C aproximadamente, pasado el tiempo definido, se pesa la cápsula junto con el material, es un método que da resultados precisos.

Figura 6: Horno de laboratorio de suelos



2.4.3 Método hornalla

Cosiste en realizar el secado del suelo húmedo en una hornalla en lapso de tiempo de 30 minutos, se dice que el material está seco cuando se coloca un vidrio encima y no se observa humedad de vapor, Si se utiliza este método se deberá realizar una corrección respecto del método estándar.

2.5 Análisis granulométrico

La variedad en el tamaño de las partículas de suelos, casi es ilimitada; por definición, los granos mayores son los que se pueden mover con la mano, mientras que los más finos son tan pequeños que no se pueden apreciar con un microscopio corriente.

Debido a ello es que se realiza el análisis granulométrico que tiene por objeto determinar el tamaño de las partículas o granos que constituyen un suelo y fijar, en porcentaje de su peso total, la cantidad de granos de distinto tamaño que el mismo contiene. La importancia de realizar un análisis granulométrico es para identificar cual es la clase de suelo, la manera de hacer esta determinación es por medio de tamices de abertura cuadrada.

La ejecución del ensayo es simple y consiste en tomar una muestra de suelo de peso conocido, colocarlo en el juego de tamices ordenados de mayor a menor abertura, pesando los retenidos parciales de suelo en cada tamiz. Esta separación física de la muestra en dos o más fracciones que contiene cada una de las partículas de un solo tamaño, es lo que se conoce como “Fraccionamiento”, (F, Mantilla, 2012).

Figura 7: Tamices de laboratorio

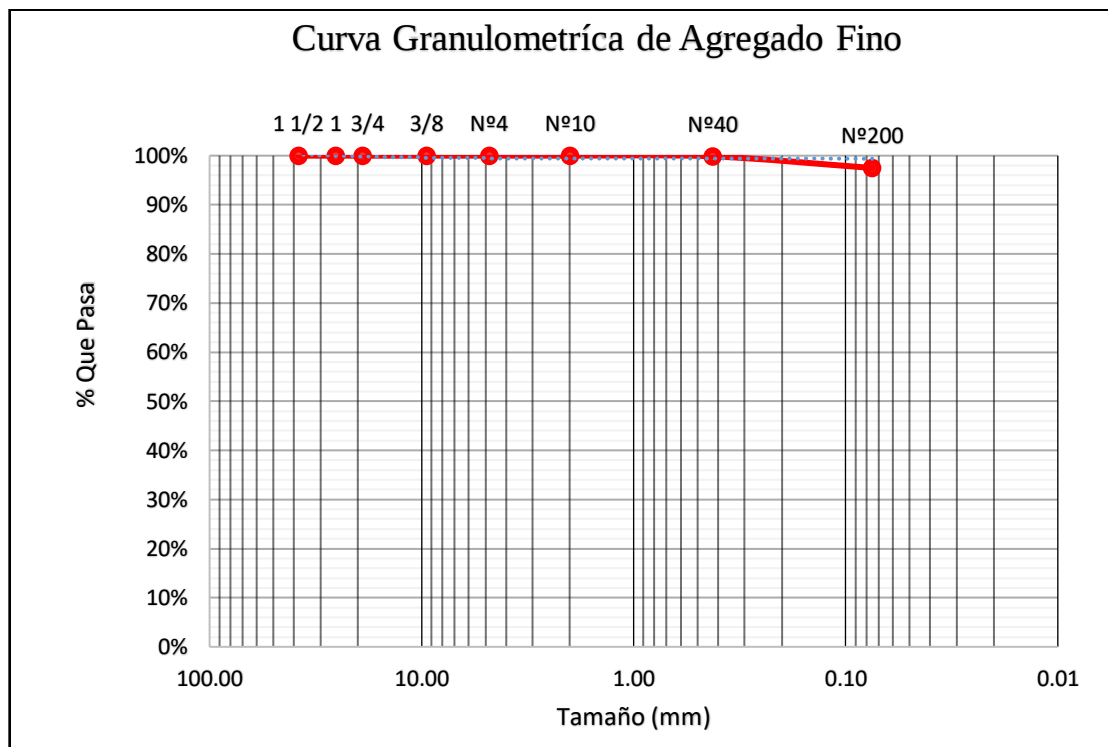


2.5.1 Curva de distribución granulométrica

La curva granulométrica que se dibuja, es a escala logarítmica ya que, de no ser así, la representación gráfica tendría que usar una escala demasiado grande, Se utilizan estas curvas para caracterizar el material que se va a utilizar.

Siempre que se cuente con suficiente número de puntos, la representación gráfica de la distribución granulométrica debe estimarse preferentemente en tablas, (F, Mantilla, 2012).

Gráfica 2: Curva de distribución granulométrica

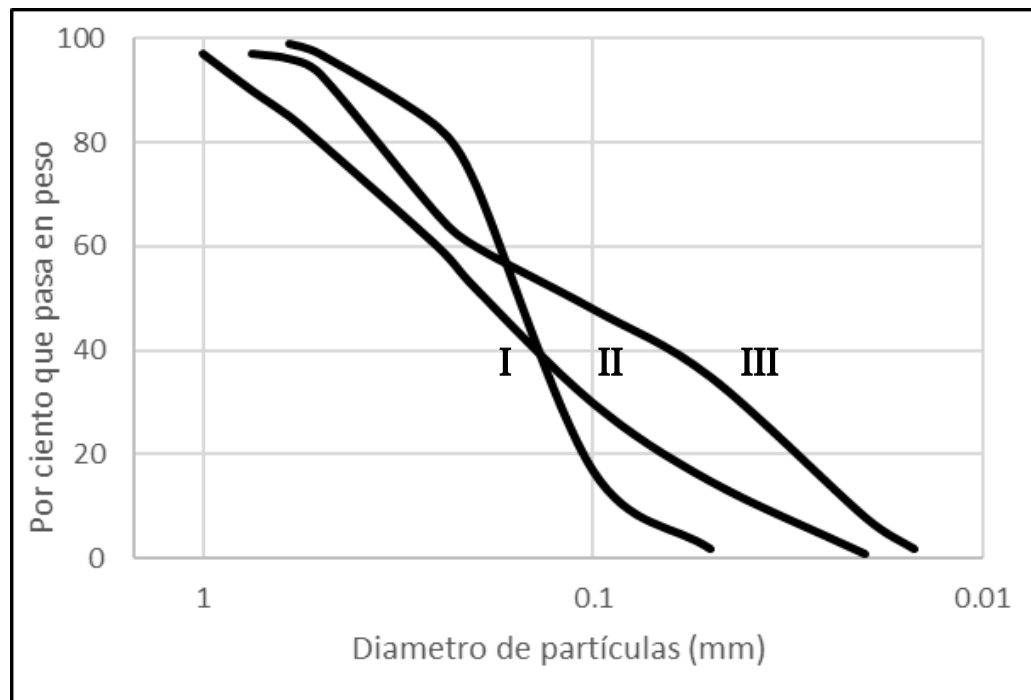


La curva I representa un tipo de suelo en el que la mayoría de los granos son del mismo tamaño y se llama suelo mal graduado.

La curva II representa un suelo en que los tamaños de las partículas están distribuidos sobre un amplio rango y se llama bien graduado.

La curva III representa tal suelo y se llama de granulometría discontinua.

Gráfica 3: Tipos de diferentes curvas granulométricas



Fuente: Braja M, Das

2.6 Peso específico relativo de los solidos

2.6.1 Aplicación

El peso específico $[G_s]$ es un factor auxiliar que se emplea para determinar otras propiedades del suelo como son: porosidad, relación de vacíos, la velocidad de una partícula en el seno de un fluido viscoso (método del hidrómetro basado en la ley de Stokes).

También se utiliza en: estudios de consolidación del suelo, cálculo del grado de saturación, estudios de gradiente hidráulico crítico, y en otros cálculos.

2.6.2 Peso específico de un suelo (GS)

Es la relación entre el peso unitario de las partículas sólidas del suelo $[\gamma_s]$ y el peso unitario del agua destilada $\gamma_w = 1,00 \frac{g}{cm^3}$.

$$G_s = \frac{\gamma_s}{\gamma_w} = \frac{W_s}{V_s * \gamma_w} \quad (\text{Adimensional}).$$

El peso específico de los sólidos varía comúnmente entre los valores de 2,5 a 2,8, Los suelos orgánicos tienen valores bajos (**Humus: $G_s=1,37$**), (**Peso específico, Univ, Andes, 2017**).

Tabla 7: Peso específico de las partículas

PESO ESPECÍFICO RELATIVO PARA ALGUNOS SUELOS		
Tipo de Suelos		G _s
INORGÁNICO	Gravas	2,65
	Arena gruesa a media	2,65-2,67
	Arena fina (limosa)	2,67-2,70
	Arena arcillosa	2,67
	Limo	2,65-2,70
	Limo arenoso	2,66
	Limo arcillo arenoso	2,67
	Arcilla	2,70-2,80
	Arcilla arenosa	2,7
	Arcilla limosa	2,75
	Loes, polvo de Piedra	2,67
	Suelos con micas o minerales de Hierro	2,75-3,00
ORGÁNICO *Variable, puede ser inferior a 2,0	Limo con trazos de materia orgánica	2,3
	Arcilla	2,6
	Lodos aluviales organicos	2,13-2,60
	Turba	1,20-2,15

Fuente: (ASTM D-854-92, s,f,)

Para arenas y suelos finos se determina con la siguiente formula:

$$\gamma_s = \frac{W_s}{W_{fw} + W_s - W_{fsw}}$$

Donde:

γ_s =Peso específico relativo de un suelo

W_s =Peso del suelo seco

W_{fw} =Peso del frasco lleno de agua

W_{fsw} =Peso del frasco del suelo y agua

Luego de cálculos los pesos específicos se deben de ajustar estos datos a una temperatura patrón de 20 °C, cuya densidad son:

2.7 Hidrómetro 152-H

El análisis hidrométrico se basa en la Ley de Stokes, la cual relaciona la velocidad de una esfera, cayendo libremente a través de un fluido, con el diámetro de la esfera.

$$V = \left(\frac{(\rho_s - \rho_f)}{1800 * n} \right) * D^2 \quad ec,$$

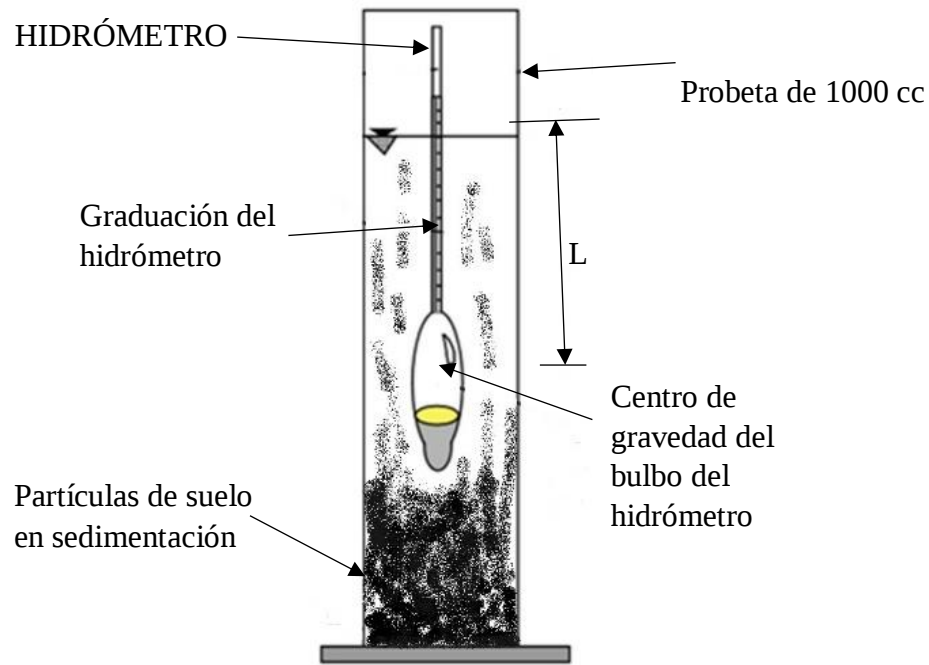
Se asume que la ley de Stokes puede ser aplicada a una masa de suelo dispersado, con partículas de varias formas y tamaños. El hidrómetro se usa para determinar el porcentaje de partículas de suelos dispersados, que permanecen en suspensión en un determinado tiempo. Para ensayos de rutina con fines de clasificación, el análisis con hidrómetro se aplica a partículas de suelos que pasan el tamiz de 2,00 mm (No10). Cuando se quiere más precisión, el análisis con hidrómetro se debe realizar a la fracción de suelo que pase el tamiz de 75 μ m (No,200).

El hidrómetro se encuentra graduado para leer, de acuerdo con la escala que tenga grabada, el peso específico de la suspensión o los gramos por litro de suspensión. En el primer caso, la escala tiene valores de peso específico que van de 0,995 a 1,038 y estará calibrado para leer 1,00 en agua destilada a 20 °C (68°F), Este Hidrómetro se identifica como 151 H.

En el otro caso la escala tiene valores de gramos de suelo por litro [g/l] que van de -5 á+ 60. Se identifica como 152 H y está calibrado para el supuesto que el agua destilada tiene gravedad específica de 1,00 a 20 °C (68 °F) y que el suelo en suspensión tiene un peso específico de 2,65. Las dimensiones de estos hidrómetros son las mismas; sólo varían las escalas.

El hidrómetro debe ser calibrado para determinar su profundidad efectiva en términos de lecturas de hidrómetro. Si se dispone de un hidrómetro tipo 151-H o 152-H la profundidad efectiva puede ser obtenida de las tablas, (Montellano, 2011).

Figura 8: Hidrómetro 152H



Fuente: Guía de laboratorio de Suelos I

2.8 Límites de consistencia

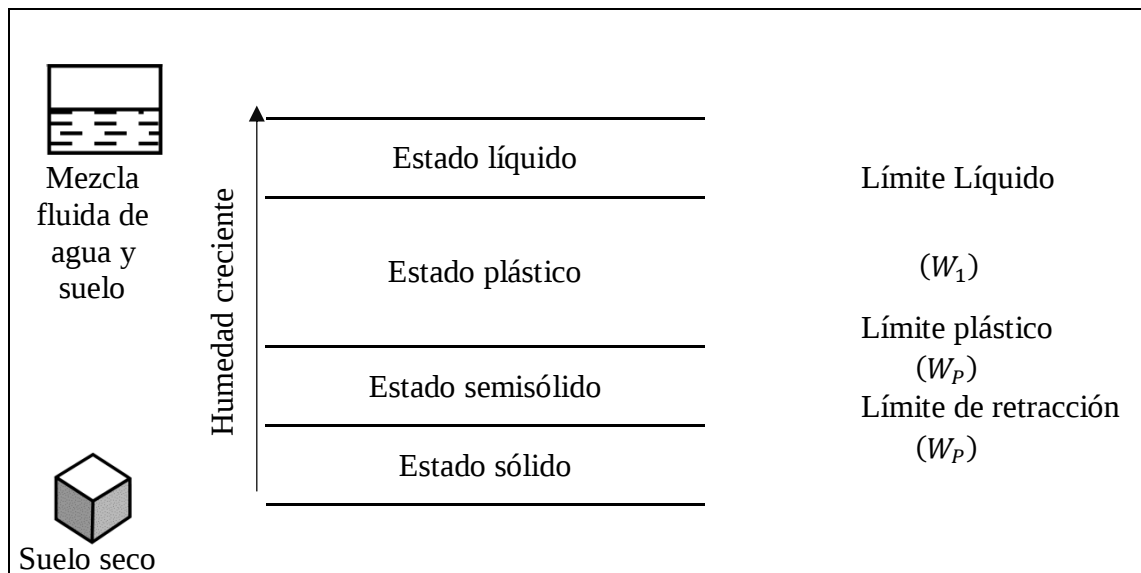
Los límites de consistencia o también llamados los límites de Atterberg se basan en el concepto de que los suelos finos, presentes en la naturaleza, pueden encontrarse en diferentes estados, dependiendo de su propia naturaleza y la cantidad de agua que contengan. Así un suelo se puede encontrar en un estado sólido, semisólido, plástico y líquido o viscoso. La arcilla, por ejemplo, si está seca se encuentra muy suelta o en terrones, añadiendo agua adquiere una consistencia similar a una pasta, y añadiendo más agua adquiere una consistencia fluida.

La plasticidad se convirtió en una propiedad ingenieril de interés científico escrito dejando de ser una cualidad puramente descriptiva o de trabajabilidad en cerámica, las

investigaciones posteriores han probado que la plasticidad de un suelo es debida a su contenido de partículas más finas de forma laminar.

Cuando a un suelo cohesivo se le reduce lentamente su contenido de humedad el suelo pasa gradualmente del estado líquido a su estado plástico y así hasta llegar a su estado sólido. Los límites que son necesarios para la identificación del suelo son el límite líquido y el límite plástico.

Figura 9: Estados de consistencia del suelo y límites de Atterberg



Fuente: Apuntes de ingeniería civil

El contenido de agua con que se produce el cambio entre estados varía de un suelo a otro y en mecánica de suelos interesa fundamentalmente conocer el rango de humedades para el cual el suelo presenta un comportamiento plástico, es decir, acepta deformaciones sin romperse (plasticidad). Se trata de la propiedad que presentan los suelos hasta cierto límite.

El método usado para medir estos límites de humedad fue ideado por el científico sueco Albert Atterberg en el año 1911. Los límites de Atterberg son propiedades, valores de humedad de los suelos que se utilizan en la identificación y clasificación de un suelo.

2.8.1 Plasticidad de los suelos

Se define como plasticidad la capacidad que tenía un suelo de ser deformado sin agrietarse, ni producir rebote elástico. A su vez observa que los suelos arcillosos en condiciones húmedas son plásticos y se vuelven muy duros en condiciones secas, que los limos no son necesariamente plásticos y se vuelven menos duros con el secado y que las arenas son desmenuzables en condiciones sueltas y secas.

2.8.2 Índice de plasticidad

El índice de plasticidad indica la diferencia entre el límite líquido y el límite plástico, representa la variación de humedad que tiene el suelo para permanecer en estado plástico.

$$IP = LL - LP$$

Donde:

IP = Índice de plasticidad de suelo [%]

LL = Límite líquido de suelo [%]

LP = Límite plástico de suelo [%]

Tabla 8: Índice de plasticidad del suelo

IP	Descripción
0 - 3	No plástico
3 - 15	Ligeramente plástico
15 - 30	Baja plasticidad
>30	Alta plasticidad

Fuente: Apuntes de ingeniería civil

2.8.3 Límite líquido

Se produce cuando el suelo pasa del estado semilíquido al estado plástico, Es el contenido de humedad al cual una muestra de suelo húmedo colocada en el aparato de Casagrande

cierre una ranura de $\frac{1}{2}$ '' de amplitud, a los 25 golpes generados a la cápsula de bronce, con un ritmo de dos golpes por segundo.

Figura 10: Aparato de Casagrande



2.8. Límite plástico

El límite plástico es el contenido de agua en porcentaje, con el cual el suelo separa el estado semisólido del plástico. Se logra determinar amasando el suelo seco con poca agua y formando rollitos con la palma de la mano sobre una placa de vidrio hasta llegar a un diámetro de 3 mm y una longitud de 25 a 30 mm, el momento en que se empiezan a formar fisuras en fracciones de alrededor de 6mm, su humedad es la correspondiente al límite plástico, Los valores típicos entre limos y arcillas se encuentran entre 5 y 30%.

Figura 11: Prueba del límite plástico



2.9 Clasificación de suelos

La clasificación de suelos es un proceso fundamental en geotecnia que permite agrupar los suelos según sus propiedades físicas y mecánicas. Existen varios sistemas de clasificación, siendo los más comunes el sistema de clasificación de suelos de la ASTM (American Society for Testing and Materials) y el sistema unificado de clasificación de suelos (USCS, Unified Soil Classification System).

Pese a que la clasificación por textura del suelo es relativamente simple, esta se basa completamente en la distribución del tamaño de las partículas. La cantidad y tipo de minerales arcillosos presentes en los suelos de grano fino dictan sus propiedades físicas en gran parte. Por tanto, el ingeniero de suelos debe considerar la plasticidad, la cual resulta por la presencia de minerales de arcilla, para interpretar adecuadamente las características del suelo. Debido a que los sistemas de clasificación por textura no toman en cuenta la plasticidad y en general no consideran muchas propiedades importantes del suelo, estos sistemas son inadecuados para la mayoría de los propósitos en ingeniería.

Actualmente, dos sistemas de clasificación más elaborados son comúnmente usados por los ingenieros de suelos. Ambos sistemas toman en cuenta la distribución del tamaño de las partículas y los límites de Atterberg. Estos son el sistema de clasificación de la AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials) y el Sistema Unificado de Clasificación. El sistema de clasificación AASHTO es usado en su mayoría por el estado y los departamentos regionales de carreteras. Los ingenieros geotécnicos generalmente prefieren el sistema unificado, (ULPGC,2017).

2.9.1 Sistema Unificado de Clasificación de Suelo (S.U.C.S.)

El Sistema Unificado de Clasificación del suelo (USCS o SUCS) se basa en el sistema de clasificación desarrollado por Casagrande durante la Segunda Guerra Mundial. Con algunas modificaciones fue aprobado conjuntamente por varias agencias de gobierno de los EE, UU, en 1952. Refinamientos adicionales fueron hechas y actualmente está estandarizado como la norma **ASTM D 2487-93**.

Se utiliza en los EE, UU, y gran parte del mundo para trabajos geotécnicos que no sean los caminos y carreteras.

Los suelos de un sistema unificado se designan por un símbolo de dos letras: el primero considera que el principal componente de la tierra, y la segunda describe informaciones de la curva granulométrica o características de plasticidad.

Se utilizan los símbolos de cinco letras:

G: por grava

S: por arena

M: por limo

C: por arcilla

O: por suelos orgánico

P: por turba

Regla N1: Si menor del 50% del suelo pasa la malla No, 200 (0,075 mm), el suelo es de grano grueso, y la primera letra será G o S.

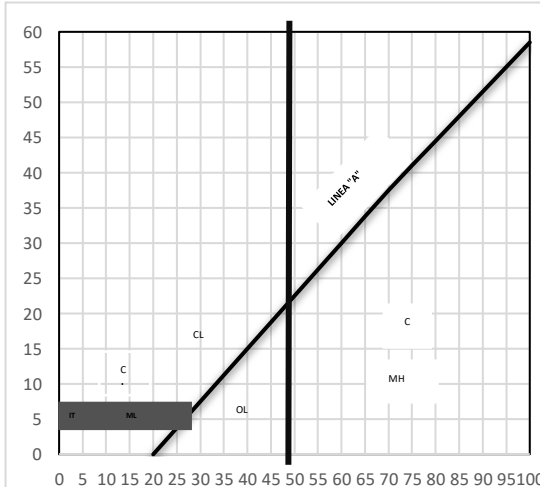
Regla N2: Si más del 50% pasa la malla No, 200(0,075 mm), el suelo es de grano fino y la primera letra será M o C.

Regla N3:

Arenas y gravas limpias (con menos del 5% que pasa la malla No, 200): se les da una segunda letra P si están mal graduadas o W si bien graduadas. Arenas y gravas, con más de 12% en peso que pasa la malla No, 200: se les da una segunda letra M si son limosas o C, si son arcillosos.

Arenas y gravas que tienen entre 5 y 12%: se dan clasificaciones duales como SP-SM. Limos, arcillas y suelos orgánicos se les da la segunda letra H o L para designar a la plasticidad de alta o baja, **(Dr. Borselli, 2024-2025)**.

Gráfica 4: Clasificación de Suelos S.U.C.S.

DIVISIÓN MAYOR				SÍMBOLO	NOMBRE TÍPICOS	CRITERIO DE CLASIFICACIÓN EN EL LABORATORIO		
SUELOS DE PARTICULAS GRUESAS Más de la mitad del material es retenido en la malla número 200	Las partículas de 0,074 mm de diámetro (la malla N° 200) son aproximadamente, las más pequeñas visibles a simple vista,	GRAVAS Más de la mitad de la fracción gruesa es retenida por la malla N° 4 PARA CLASIFICACIÓN VISUAL PUEDE USARSE 1/2 cm. COMO EQUIVALENTE ALA ABERTURA DE LA MALLA N° 4	GRAVAS LIMPIAS Poco o nada de partículas finas,	GW	Gravas bien graduadas mezclas de grava y arena con poco o nada de finas	COEFICIENTE DE UNIFORMIDAD Cu: mayor de 4 COEFICIENTE DE CURVATURA CC.: entre 1 Y 3 $C_u = D_{60}/D_{10}$ $C_c = (D_{30})^2/(D_{10})(D_{60})$		
				GP	Gravas mal graduadas mezclas de grava y arena con poco y nada de finos	NO SATISFACEN TODOS LOS REQUISITOS DE GRADUACIÓN PARA GW		
			GRAVAS CON FINOS Cantidad apreciable de partículas finas,	GM	d u Gravas limosas, mezclas de gravas, arenas y limo	LÍMITES DE ATTERBERG ABAJO DE LA "LINEA A" O I.P. MENOR QUE 4		
				GC	Gravas arcillosas, mezclas de gravas, arenas y arcilla	LÍMITES DE ATTERBERG ARRIBA DE LA "LINEA A" CON I.P. MAYOR QUE 7		
			ARENAS LIMPIAS poco o nada de partículas finas,	SW	Arenas bien graduadas, arena con gravas, con poca o nada de finos	Arriba de la "línea A" y con I.P. entre 4 y 7 son casos de frontera que requieren el uso de símbolos dobles,		
				SP	Arenas mal graduadas, arena con gravas, con poca o nada de finos	$C_u = D_{60}/D_{10}$ mayor de 6; $C_c = (D_{30})^2/(D_{10})(D_{60})$ entre 1 y 3		
			ARENAS CON FINOS Cantidad apreciable de partículas finas	SM	d u Arenas limosas, mezclas de arena y limo,	No satisfacen todos los requisitos de graduación para SW		
				SC	Arenas arcillosas, mezclas de arena y arcilla,	LÍMITES DE ATTERBERG ABAJO DE LA "LINEA A" O I.P. MENOR QUE 4		
			LIMOS Y ARCILLAS Limite Líquido Menor de 50	ML	Limos inorgánicos, polvo de roca, limos arenosos o arcillosos ligeramente plásticos	LÍMITES DE ATTERBERG ARRIBA DE LA "LINEA A" CON I.P. MAYOR QUE 7		
				CL	Arcillas inorgánicas de bajas o media plasticidad, arcillas con grava, arcillas arenosas, arcillas limosas, arcillas pobres	G - Grava, S - Arena, O -Suelo Orgánico, P - Turba, M - Limo C - Arcilla, W - Bien Graduada, P - Mal Graduada, I - Baja Comprensibilidad, H - Alta Comprensibilidad		
SUELOS DE PARTICULAS FINAS Más de la mitad del material es retenido en la malla número 200	Las partículas de 0,074 mm de diámetro (la malla N° 200) son aproximadamente, las más pequeñas visibles a simple vista,	LIMOS Y ARCILLAS Limite Líquido Mayor de 50	LIMOS Y ARCILLAS Limite Líquido Menor de 50	OL	Limos orgánicos y arcillas limosas orgánicas de baja plasticidad	CARTA DE PLASTICIDAD (S.U.C.S.)		
				MH	Limos inorgánicos y limos micáceos o diatomáceos, más clásticos,			
				CH	Arcillas inorgánicas de alta plasticidad, arcillas francas			
			SUELOS ALTAMENTE ORGÁNICOS	OH	Arcillas orgánicas de media o alta plasticidad, limos orgánicos de media plasticidad			
				P	Turbas y otros suelos altamente orgánicos			
			LIMOS Y ARCILLAS Limite Líquido Mayor de 50	MH	Limos inorgánicos y limos micáceos o diatomáceos, más clásticos,			
				CH	Arcillas inorgánicas de alta plasticidad, arcillas francas			

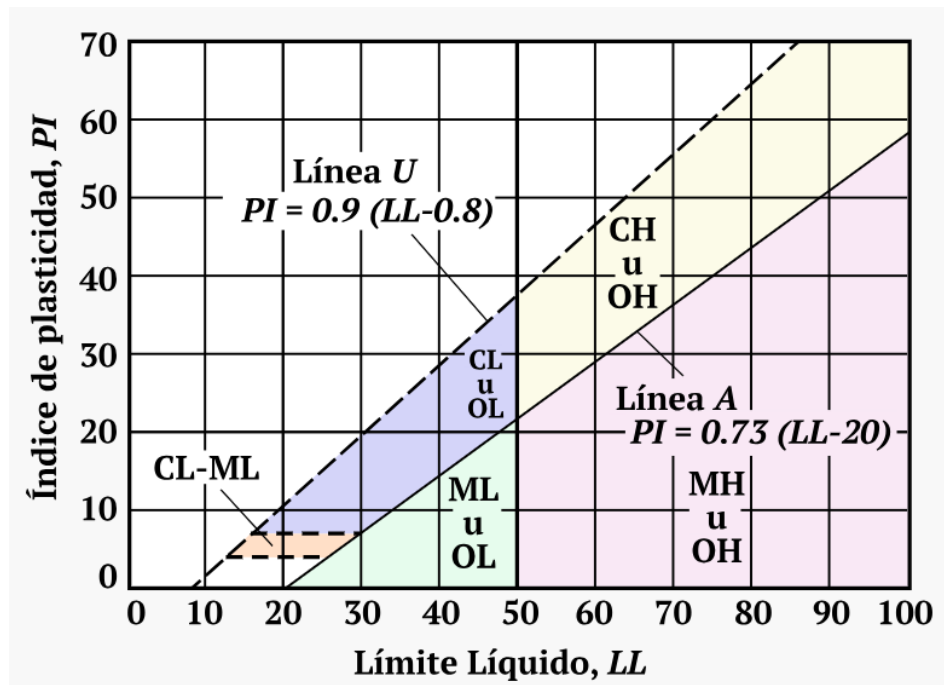
Fuente: (Salas, Geotecnia y cimientos I, 2013)

2.9.2 Carta de Plasticidad

Para clasificar el suelo fino, es necesario conocer algunos límites de consistencia, como el límite líquido (LL) e índice de plasticidad (IP), Estos parámetros se pueden obtener a través de la metodología mostrada en la normativa ASTM D4318.

En la carta de plasticidad el límite líquido está en el eje de las abscisas y el índice de plasticidad en el eje de las ordenadas.

Gráfica 5: Plasticidad de suelos



Fuente: Olavarría, 2014

Existe una recta vertical cuando el límite líquido es igual a 50%, esta recta permite diferenciar a los suelos de baja compresibilidad (L) y los de alta compresibilidad (H).

Los suelos finos se diferencian entre limos (M) y arcillas (C), según la combinación que tenga el límite líquido (LL) con el índice de plasticidad (IP), respecto a su posicionamiento con la recta PI Línea A:

$$PI = 0,73 * (LL - 20)$$

Si el suelo se encuentra sobre la recta PI Línea A es considerado arcilla (C) y si está por debajo es considerado limo (M).

Esto hace que la carta de plasticidad permita clasificar al suelo fino en 4 tipos:

- **CL:** Arcillas de baja compresibilidad.
- **ML:** Limos de baja compresibilidad.
- **CH:** Arcillas de alta compresibilidad.
- **MH:** Limos de alta compresibilidad.

También existe un rango por encima de la recta PI Línea A con un índice de plasticidad entre (4-7) %, aquí el suelo es considerado como arcilloso o limoso de baja compresibilidad.

Es importante destacar que también en la carta de plasticidad se puede observar una recta PI Línea U por encima de la recta PI Línea A.

$$PI = 0,90 * (LL - 0,8)$$

La recta PI Línea U es una frontera o límite superior del índice de plasticidad en conjunto al límite líquido, debido a que no se encuentran suelos con esta combinación, por lo que se consideran “Infaltable Práctico”.

Finalmente, hay que tomar en consideración que la carta de plasticidad es utilizada para clasificar el suelo fino, sin embargo, forma parte del proceso de clasificación de suelo que se lleva a cabo a través de la normativa ASTM D2487, (**Gavidia A, 2023**).

2.10 Ensayo de Compactación

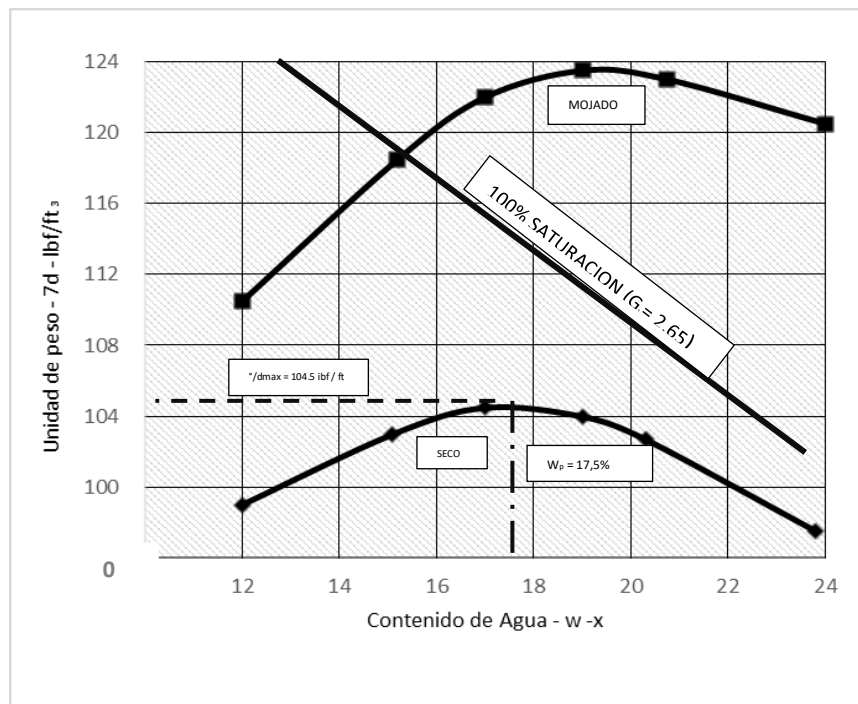
Se entiende por compactación de los suelos el mejoramiento artificial de sus propiedades mecánicas. La importancia de la compactación de los suelos estriba en el aumento de

resistencia y disminución de capacidad de deformación que se obtiene al sujetar el suelo a técnicas convenientes que aumenta su peso específico seco, disminuyendo sus vacíos, **(J, Badillo et al, 2005)**.

Suelo colocado como relleno de ingeniería (terraplenes, cimientos almohadillas, bases de carreteras) se compacta a un estado denso para obtener propiedades de ingeniería satisfactorias tales como resistencia al corte, compresibilidad o permeabilidad. Además, los suelos de cimentación son a menudo compactado para mejorar sus propiedades de ingeniería. Las pruebas de compactación en laboratorio proporcionan la base para determinar el porcentaje de compactación y el contenido de agua necesarios para lograr las propiedades de ingeniería requeridas, y para controlar la construcción para asegurar que la compactación requerida y el agua se logran los contenidos, **(ASTM D698, 2003)**.

El método que realizaremos en este ensayo es el método de prueba estándar para características de compactación de laboratorio del suelo usando Esfuerzo estándar (12 400 ft-lbf/ft³(600 kN-m/m³)) de acuerdo a la Norma **ASTM D698**.

Gráfica 6: Curva de compactación



Fuente: ASTM D698,2003

2.11 Resistencia al corte no drenado

La resistencia no-drenada es la resistencia del suelo cuando las cargas producen la falla en condiciones no-drenadas, se aplican sobre la masa de suelo a una velocidad superior a la del drenaje del suelo. El caso más común de resistencia no-drenada, se presenta en los depósitos naturales de arcilla saturada cuando éstos son cargados o descargados en forma relativamente rápida.

Cuando se presenta esta condición se asume que hay un fenómeno de resistencia no-drenada; el contenido de agua y el volumen de la arcilla permanecen constantes durante la carga no-drenada y se generan presiones de poros en exceso. El comportamiento no-drenado de arcillas saturadas se analiza en términos de esfuerzos totales y la evaluación de las presiones de poros es innecesaria. Bajo esta situación se asume un método de análisis $\phi = 0$ y la resistencia no-drenada C_u es igual al valor de cohesión en la envolvente de Mohr-Coulomb para esfuerzos totales.

Bajo estas suposiciones, la resistencia no-drenada de una arcilla saturada, no es afectada por los cambios en la presión de confinamiento (mientras el contenido de agua no cambie). Las arcillas normalmente consolidadas o ligeramente sobre consolidadas tienden a comprimirse cuando están sometidas a esfuerzos de cortante y producen un incremento de la presión de poros en condiciones no-drenadas. La tendencia de las arcillas (fuertemente consolidadas) a dilatarse cuando son sometidas a cortante, da como resultado, cambios negativos de la presión de poros en condiciones no-drenadas.

De acuerdo con lo anterior, cuando una arcilla es sometida a corte en condiciones no-drenadas, el esfuerzo efectivo sobre el plano potencial de falla cambia haciéndose menor en arcillas normalmente consolidadas y mayor en arcillas sobre consolidadas, la resistencia no-drenada puede ser mayor que la resistencia drenada, debido a que la presión de poros disminuye y el esfuerzo efectivo aumenta durante el corte no-drenado (**Duncan y Wright, 2005**) (**INGEAS**).

2.11.1 Resistencia a la compresión no confinada (q_u)

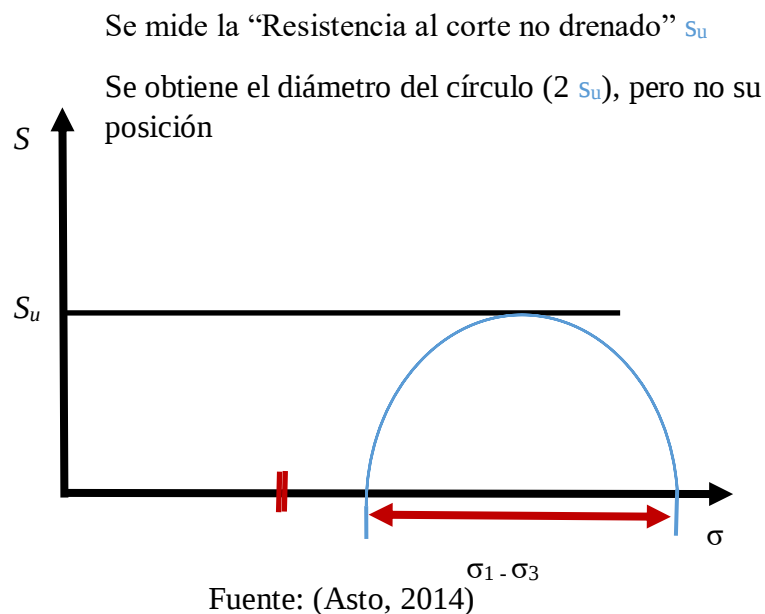
La tensión de compresión a la que una muestra cilíndrica, no confinada, de suelo colapsa en un ensayo de compresión simple, En este método de ensayo la resistencia a la

compresión se considera como la carga máxima alcanzada por área unitaria o la carga por área unitaria al 15% de la deformación axial, cualquiera que se alcance primero durante el ensayo, (ASTM D2166, 2005).

2.11.2 Resistencia al corte (Cu)

Para muestras no confinadas para resistencia a la compresión, la resistencia al corte se calcula como 1/2 de la resistencia a la compresión en la falla. (ASTM D2166).

Gráfica 7: Resistencia al corte no drenado



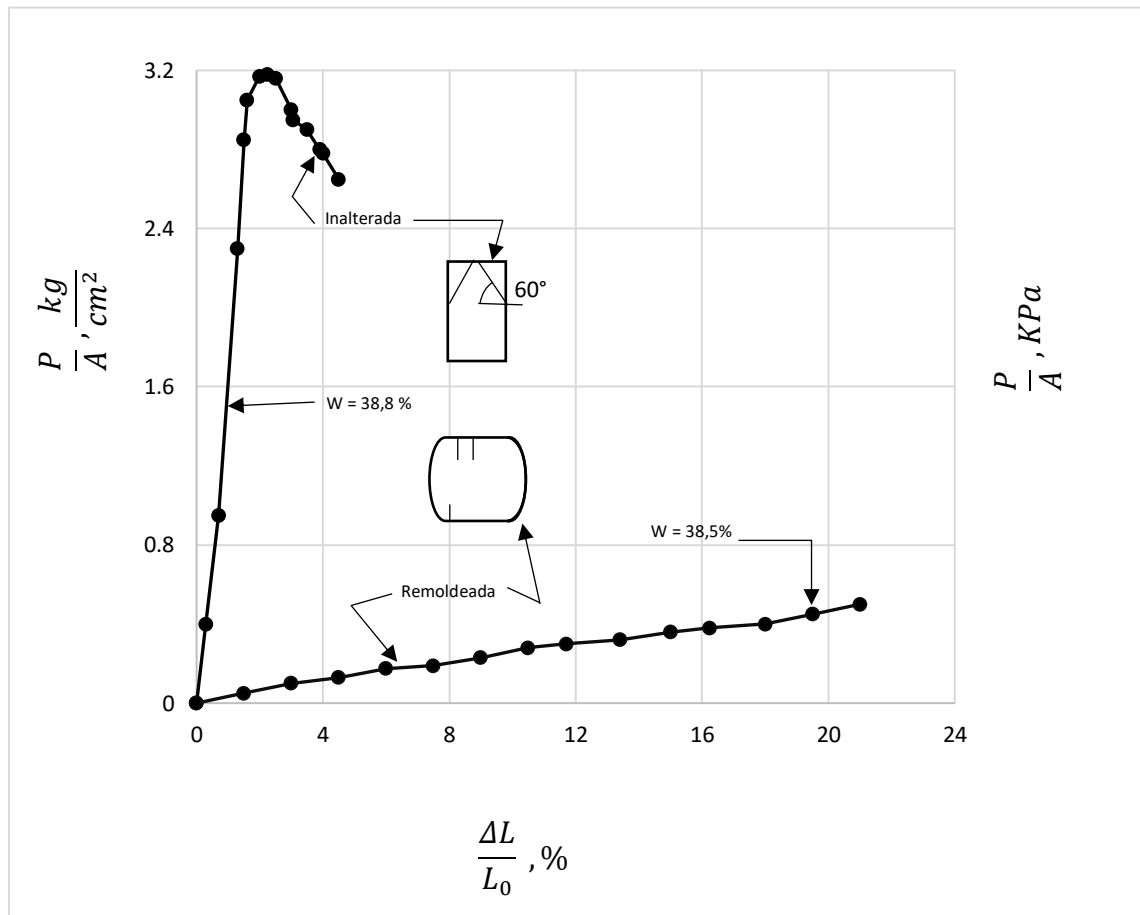
2.12 Ensayo de compresión no confinada,

Es muy importante en mecánica de suelos, ya que permite obtener un valor de carga última del suelo, el cual, como se verá más adelante se relaciona con la resistencia al corte del suelo y entrega un valor de carga que pueda utilizarse en proyectos que no requieran de un valor más preciso, ya que entrega un resultado conservador. Es importante comprender el comportamiento de los suelos sometidos a cargas, ya que es en ellos y sobre ellos que se van a fundar las estructuras, ya sean puentes, edificios o carreteras, que requieran una base firme, o más aún que puedan aprovechar las resistencias del suelo en beneficio de su propia capacidad y estabilidad, siendo el estudio y la experimentación las

herramientas para conseguirlo, y finalmente poder predecir, con cierta aproximación, el comportamiento ante las cargas de estas estructuras, (Soto, 2018).

Este método de ensayo es aplicable sólo a materiales cohesivos que no expulsan agua (agua expulsada del suelo debido a deformación o compactación) durante la parte de carga del ensayo, en la cual mantendrán resistencia intrínseca después de remover presiones de confinamiento, tales como arcillas o suelos cementados. No pueden ser ensayadas con este método suelos secos y frágiles, materiales fisurados, limos, turba y arenas para obtener valores válidos de resistencia de compresión no confinada, (ASTM D2166).

Gráfica 8: Deformación-esfuerzo en el ensayo de compresión no confinada



Fuente: (I. N. V. E-152, 2012)

2.12.1 Consistencia y sensibilidad de las arcillas

La consistencia de las arcillas y de otros suelos cohesivos se describe comúnmente con los términos blando, compacto, resistente y duro. La medida cuantitativa más directa de la consistencia es la resistencia a la compresión no confinada de muestras prismáticas o cilíndricas del suelo, y tabla proporción los valores de dicha resistencia para varios grados de consistencia.

Tabla 9: Consistencia de las arcillas saturadas en función de la resistencia a la compresión no confinada

Consistencia	Resistencia a la compresión simple que en kg/cm²
Muy blanda	Menos de 0,25
Blanda	0,25 – 0,5
Medianamente compacta	0,5 – 1,0
Compacta	1,0 – 2,0
Muy compacta	2,0 – 4,0
Dura	mayor de 4,0

Fuente: Terzaghi y Peck, 1973

Las arcillas comparten con muchas otras sustancias coloidales la propiedad de perder resistencia por ablandamiento cuando son amasadas a un contenido inalterado de humedad. El ablandamiento de una arcilla amasada se debe a dos causas distintas:

- a) La destrucción del ordenamiento en que están dispuestas las moléculas de las capas adsorbidas.
- b) La destrucción de la estructura formada por las partículas durante el proceso de sedimentación.

Aquella parte de la pérdida de resistencia que se debe al desordenamiento de las capas adsorbidas puede ser gradualmente recuperada si la arcilla permanece en reposo, a

contenido de humedad constante, después del amasado. El resto, causado probablemente por una alteración permanente de la estructura, es irreversible a menos que se reduzca el contenido de humedad el suelo. La importancia que cada una de estas partes tiene en la estructuración de la resistencia de las arcillas inalteradas es muy distinta para las diferentes arcillas.

El termino sensibilidad se refiere al efecto que el amasado produce sobre la consistencia de las arcillas saturadas, independientemente de la naturaleza física de las causas del fenómeno. El grado de sensibilidad es diferente para las arcillas y puede también diferir en una misma arcilla según cual sea su contenido de humedad, Si una arcilla es muy sensitiva, un deslizamiento de cualquier naturaleza puede transformarla en una masa de trozos lubricados capaces de deslizar con talud suave, mientras que un deslizamiento similar en una arcilla de baja sensibilidad, solo produce una deformación local. El cambio de consistencia producido por la alteración de una arcilla sensitiva trae siempre aparejado un cambio de su permeabilidad.

El grado de sensibilidad S_t de una arcilla saturada se expresa por la relación entre la resistencia a la compresión no confinada de una muestra inalterada y la resistencia de la misma muestra después de amasada a contenido de humedad constante, es decir;

$$S_t = \frac{\text{resistencia a la compresion no confinada de la arcilla inalterada}}{\text{resistencia a la compresion no confinada de la arcilla amasada}}$$

La resistencia de algunas arcillas saturadas después de amasadas puede resultar tan baja como para imposibilitar la confección de una probeta, a causa de que experimentan una deformación excesiva bajo su propio peso. En tales circunstancias, el grado de sensibilidad S_t puede evaluarse comparando la resistencia, inalterada y amasada.

Tabla 10: Rango de sensibilidad de los suelos al ensayo compresión no confinada

Comportamiento de la arcilla	Rango de variación de sensibilidad
Insensible o que no se ve afectada cuando se la remoldea	$S < 2$
Moderadamente sensible	$2 < S < 4$
Sensible	$4 < S < 8$
Muy sensible	$8 < S < 16$
Ultrasensible, Estas generalmente se convierten en líquidos viscosos (quick)	$S > 16$

Fuente: U-cursos

La sensibilidad es una característica importante en la ingeniería geotécnica, ya que indica cómo puede comportarse el suelo durante y después de actividades de construcción, como excavaciones o movimientos de tierra, donde el suelo se ve sometido a perturbaciones.

CAPÍTULO III

DESARROLLO

EXPERIMENTAL DE LA

ZONA DE ESTUDIO DEL

DISTRITO 12

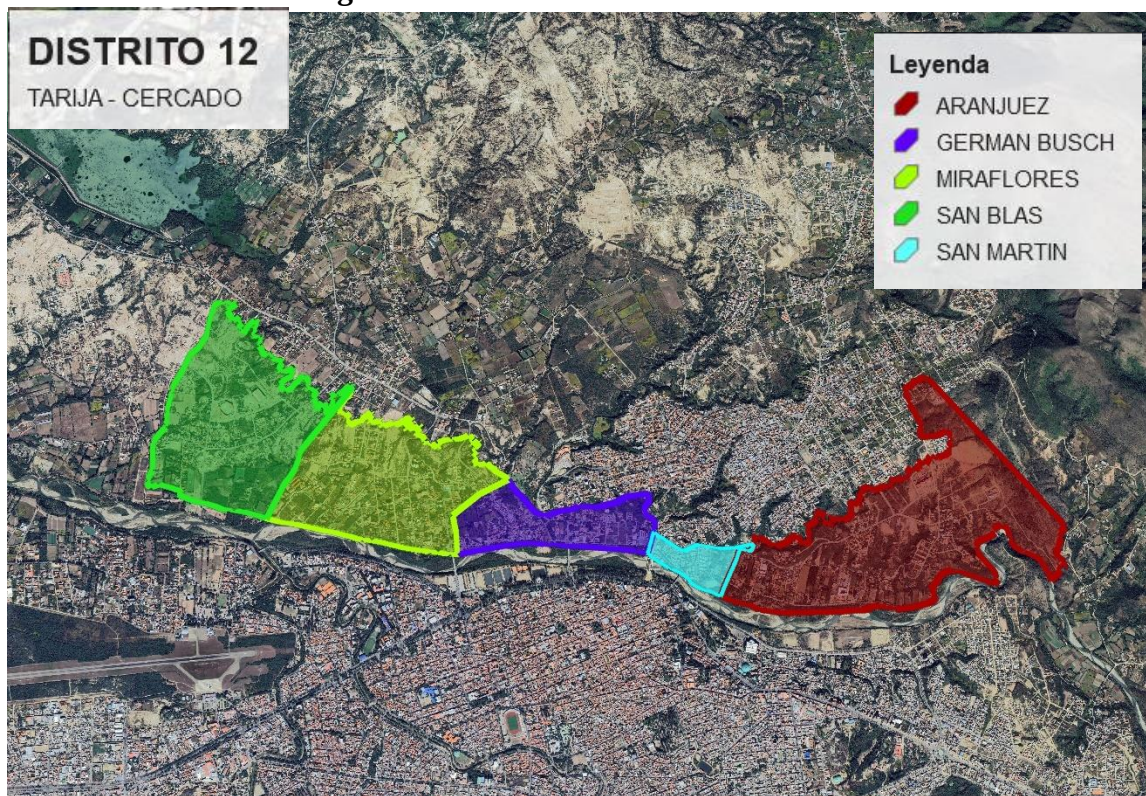
CAPÍTULO III

DESARROLLO EXPERIMENTAL

3.1 Ubicación de la zona de estudio

La zona de estudio que se realizó se encuentra en la ciudad de Tarija provincia Cercado ubicado en el Distrito 12 que cuenta con 5 barrios y son: Aranjuez, San Martín, German Bush, Miraflores y San Blas.

Figura 12: Vista satelital del Distrito 12



Fuente: Google Earth pro

Para aumentar la probabilidad de encontrar el tipo de suelo deseado se hizo uso de otros proyectos de grado de años pasados donde también se trabajó con arcillas y mencionan algunas zonas o barrios de donde se presume exista el tipo de suelo buscado (CL o CH clasificación SUCS).

Ya que al realizar el ensayo de límites de Atterberg, en estas zonas se obtuvo el suelo con las características necesarias para este trabajo de investigación.

Tabla 11: Ubicación de las muestras del Distrito 12

BARRIO	MUESTRAS	COORDENADAS GEOGRAFICAS		COORDENADAS UTM		
		LATITUD	LONGITUD	ZONA	ABSCISA [m]	NORTE [m]
		SUR	OESTE		ESTE	SUR
ARANJUEZ	AJ-P1	21°31'40,81"	64°45'3,76"	20 K	318643,00	7618398,00
	AJ-P2	21°31'28,47"	64°45'10,80"	20 K	318436,00	7618775,00
	AJ-P3	21°31'37,49"	64°45'3,65"	20 K	318645,00	7618500,00
	AJ-P4	21°31'23,87"	64°45'15,34"	20 K	318304,00	7618915,00
	AJ-P5	21°31'40,90"	64°44'58,23"	20 K	318802,00	7618397,00
	AJ-P6	21°31'22,28"	64°45'21,78"	20 K	318118,72	7618962,00
SAN MARTIN	SM-P1	21°32'11,87"	64°44'31,91"	20 K	319570,78	7617453,39
	SM-P2	21°31'57,72"	64°44'44,36"	20 K	319207,91	7617884,51
	SM-P3	21°31'52,58"	64°44'35,02"	20 K	319474,23	7618045,83
	SM-P4	21°31'49,10"	64°44'35,08"	20 K	319471,39	7618152,55
	SM-P5	21°31'53,00"	64°44'54,21"	20 K	318922,44	7618026,93
	SM-P6	21°31'50,97"	64°44'49,63"	20 K	319053,20	7618090,62
GERMAN BUSH	GB-P1	21°32'46,90"	64°44'8,63"	20 K	320252,78	7616383,03
	GB-P2	21°32'36,68"	64°44'9,79"	20 K	320215,00	7616697,00
	GB-P3	21°32'31,37"	64°44'16,44"	20 K	320022,00	7616858,00
	GB-P4	21°32'22,15"	64°44'27,73"	20 K	319694,00	7617138,00
	GB-P5	21°32'18,79"	64°44'29,29"	20 K	319648,00	7617241,00
	GB-P6	21°32'25,88"	64°44'22,84"	20 K	319836,00	7617025,00
MIRAFLORES	MF-P1	21°33'1,18"	64°44'7,93"	20 K	320277,00	7615944,00
	MF-P2	21°32'52,66"	64°44'7,79"	20 K	320278,00	7616206,00
	MF-P3	21°33'8,50"	64°43'55,33"	20 K	320642,05	7615723,86
	MF-P4	21°32'59,73"	64°43'47,75"	20 K	320857,09	7615995,54
	MF-P5	21°33'22,77"	64°43'33,74"	20 K	321268,00	7615291,00
	MF-P6	21°33'19,89"	64°43'35,86"	20 K	321206,00	7615379,00
SAN BLAS	SB-P1	21°34'12,77"	64°43'40,38"	20 K	321094,00	7613751,00
	SB-P2	21°34'8,71"	64°43'34,01"	20 K	321276,00	7613878,00
	SB-P3	21°34'0,64"	64°43'25,47"	20 K	321519,16	7614129,54
	SB-P4	21°33'42,48"	64°43'11,21"	20 K	321923,01	7614692,74
	SB-P5	21°33'40,56"	64°43'39,41"	20 K	321111,20	7614742,67
	SB-P6	21°33'32,84"	64°43'31,60"	20 K	321333,42	7614982,32

3.2 Muestreo de materiales

Para la selección de zona de estudio se tomó en cuenta primero que en el distrito 12 cuente con zona de material arcilloso, se tomaron muestras de cada zona para realizar el ensayo de límites de Atterberg y determinar el índice de plasticidad de dichas muestras y así clasificar el tipo de suelo que tendrá cada zona de estudio.

Se procedió a excavar unos 50 cm en subrasantes, para eliminar impurezas superficiales.

Se tomó cada muestra del punto en bolsa plástica herméticamente para evitar que pierda su humedad natural, la muestra restante se tomó en bolsas plásticas más grandes para realizar los respectivos ensayos en laboratorio de suelo.

Al realizar los cálculos de los mismos, se determina que las muestras presentan índices de plasticidad apropiadas.

Figura 13: Extracción de la muestra del barrio Aranjuez





3.3 Ensayos de caracterización

3.3.1 Contenido de humedad in situ (ASTM D2216)

Al momento de realizar la extracción de la muestra, se separó una pequeña muestra para realizar el contenido de la humedad del suelo, esta muestra se colocó en una bolsa plástica herméticamente cerrada para evitar la pérdida de humedad.

Para muchos tipos de suelo, el contenido de agua es una de las propiedades índices más significativas, que se emplea para establecer una correlación entre el comportamiento de dicho suelo y otras propiedades índices.

Se realizó este ensayo por el método del horno donde se coloca las muestras extraídas de diferentes zonas para ser llevadas al horno de laboratorio dejando así 24 horas en el horno a una temperatura de 110°C , la muestra que se tome para la determinación de la humedad deberá ser representativa del suelo cuya humedad se desea conocer.

Para el empleo dentro de los ensayos se procedió a usar una porción pequeña de suelo, aproximadamente unos 50g a 150g, Y lo cual describimos a continuación:

Figura 14: Ensayo del contenido de humedad



Tabla 12: Contenido de humedad “AJ-P2”

CONTENIDO DE HUMEDAD NATURAL			
Cápsula	1	2	3
Peso de Cápsula [g]	13,58	13,12	14,2
Peso de suelo húmedo + Cápsula [g]	131,8	127,58	111,62
Peso de suelo seco + Cápsula [g]	123,28	119,81	105,08
Peso de suelo seco [g]	109,7	106,69	90,88
Peso del agua [g]	8,52	7,77	6,54
Contenido de humedad [%]	7,77	7,28	7,20
Promedio [%]	7,00		

Tabla 13: Planilla de contenido de humedad de las muestras

ZONA	MUESTRA	CONTENIDO DE HUMEDAD [%]
Aranjuez	AJ-P1	5,41
	AJ-P2	7,42
	AJ-P3	7,15
	AJ-P4	6,96
	AJ-P5	7,03
	AJ-P6	3,91
San Martin	SM-P1	6,91
	SM-P2	5,72
	SM-P3	5,02
	SM-P4	7,00
	SM-P5	8,09
	SM-P6	7,77
German Bush	GB-P1	8,34
	GB-P2	5,54
	GB-P3	8,26
	GB-P4	7,27
	GB-P5	8,42
	GB-P6	6,44
Miraflores	MF-P1	5,63
	MF-P2	7,60
	MF-P3	7,23
	MF-P4	5,38
	MF-P5	6,23
	MF-P6	6,67
San Blas	SB-P1	4,73
	SB-P2	6,83
	SB-P3	5,02
	SB-P4	7,00
	SB-P5	8,09
	SB-P6	7,27

3.3.2 Peso Específico (ASTM D854)

Primeramente, se calibro el frasco volumétrico de 500 ml, Este proceso de calibración empezó con el lavado del frasco volumétrico con alcohol luego se hizo secar y se pesó, después se llenó con agua destilada hasta la mitad del volumen del frasco (250 ml) y se llevó a baño María caliente hasta lograr una temperatura de 60 °C. Se sacó del baño María caliente y aumento agua destilada hasta casi llegar a la marca del menisco y se completó con la pipeta hasta el 100%. Luego llevar a baño María frio y esperar que la temperatura baje hasta 30°C y tener mediciones entre el rango de 30°C - 15°C y por lo menos obtener unas 5 mediciones de temperatura sus pesos respectivos tratando de limpiar bien la base del frasco al pesar y enrazar al 100% del volumen con la pipeta en cada medición.

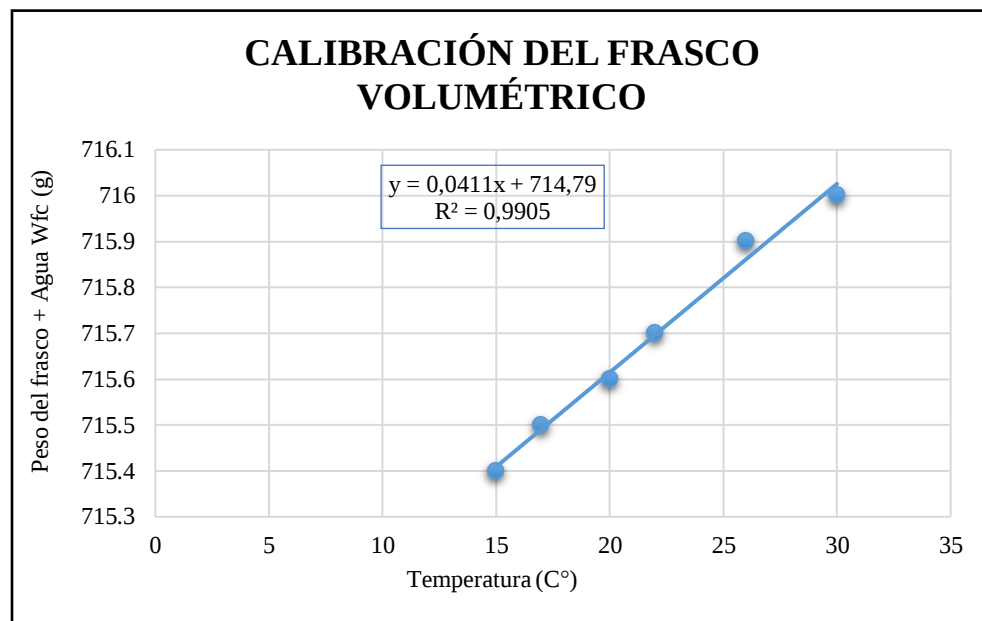
Figura 15: Calibración del frasco volumétrico



Tabla 14: Calibración del frasco volumétrico

N° DE ENSAYOS	T [C°]	wfc [g]
1	30	716
2	26	715,9
3	22	715,7
4	20	715,6
5	17	715,5
6	15	715,4

Gráfica 9: Calibración del frasco volumétrico



Para el peso específico de suelos arcillosos, primero se pesa 80 gr de suelo húmedo, este suelo se coloca en un plato y se añade agua destilada para mezclar y formar una pasta suave, y de ahí este suelo se coloca dentro del frasco volumétrico calibrado hasta los 250ml y se coloca en baño maría hasta que llegue a los 60°C, una vez llegado la temperatura requerida se coloca se pesa el frasco+suelo y se aumenta agua destilada hasta el menisco de los 500ml con ayuda de la pipeta y se procede a pesar en la balanza y de ahí

se coloca en baño de hielo hasta que disminuya su temperatura hasta los 30°C y se saca datos con el rango de 30°C - 15°C para realizar los cálculos del peso específico.

Figura 16: Ensayo de Peso específico “AJ-P2”



Tabla 15: Peso específico “AJ-P2”

Número de ensayo	1	2	3	4	5	6
Temperatura [C°]	30	27	24	21	18	16
Peso del suelo seco [g]	78,4	78,4	78,4	78,4	78,4	78,4
Peso frasco+agua [g]	716,023	715,9	715,78	715,653	715,53	715,448
P, frasco+agua+suelo [g]	766,4	766,3	766,2	766,1	766	765,9
Peso específico [g/cm³]	2,80	2,80	2,80	2,80	2,81	2,81
Factor de corrección K	0,99573	0,9966	0,9974	0,99808	0,9986	0,99909
Peso específico corregido [g/cm³]	2,79	2,79	2,80	2,80	2,80	2,80

El peso relativo de la muestra es de= **2,80 g/cm³**

Tabla 16: Planilla del peso específico de las muestras seleccionadas

Muestras de ensayos		
AJ-P1	2,78	g/cm ³
AJ-P2	2,80	g/cm ³
GB-P4	2,74	g/cm ³
MF-P2	2,72	g/cm ³

3.3.3 Análisis granulométrico por el método de lavado (ASTM D-136)

Este ensayo sirve para determinar el porcentaje en peso de las partículas de diferentes tamaños, teniendo una visión de la distribución del tamaño de los granos presentes en un suelo, al ver que la muestra de suelo pasa todos los tamices (3" hasta el número 10), se opta por hacer el método de lavado, para su posterior clasificación, se utiliza el siguiente material:

- Tamices, balanza, tamaños nominales de las aberturas según el Manual técnico Suelos (Nº 4, Nº 10, Nº 40, Nº 200).
- Tapa, base, horno, rodillo, brochas espátulas y recipientes.

El ensayo de análisis granulométrico por tamizado se realizó mediante el método del lavado en el cual se pesa 2000 gr como peso total del material en estado natural para curarlo durante el tiempo necesario de 24 horas para que se mezclen homogéneamente, se procede a realizar el lavado por la malla Nº 200 de acuerdo a la norma, después que el suelo está seco se pesa y se procede al tamizado por la malla Nº 40 y Nº 200, desde arriba hacia abajo. El primer tamiz, es el de mayor tamaño y es donde inicia el tamizado, se tapa con el fin de evitar pérdidas de finos, el último tamiz está abajo y descansa sobre un recipiente (base) de forma igual a uno de los tamices y recibe el material más fino no retenido por ningún tamiz, después se realiza el pesaje del material retenido en cada malla.

Figura 17: Ensayo de granulometría por el método del lavado



Tabla 17: Granulometría por el método del lavado “AJ-P2”

Peso Total [g] =			2000		
Tamices	Tamaño [mm]	Peso Ret. [g]	Ret. Acum. [g]	Ret. [%]	Que pasa del total [%]
3	75,00	0,00	0,00	0,00%	100,00%
2 1/2	63,00	0,00	0,00	0,00%	100,00%
2	50,00	0,00	0,00	0,00%	100,00%
1 1/2	38,10	0,00	0,00	0,00%	100,00%
1	25,40	0,00	0,00	0,00%	100,00%
3/4	19,05	0,00	0,00	0,00%	100,00%
3/8	9,50	0,00	0,00	0,00%	100,00%
Nº4	4,80	0,00	0,00	0,00%	100,00%
Nº10	2,00	0,00	0,00	0,00%	100,00%
Nº40	0,425	2,00	2,00	0,10%	99,90%
Nº200	0,075	15,80	17,80	0,89%	99,11%
Base		0,00			

Gráfica 10: Curva granulométrica “AJ-P2”

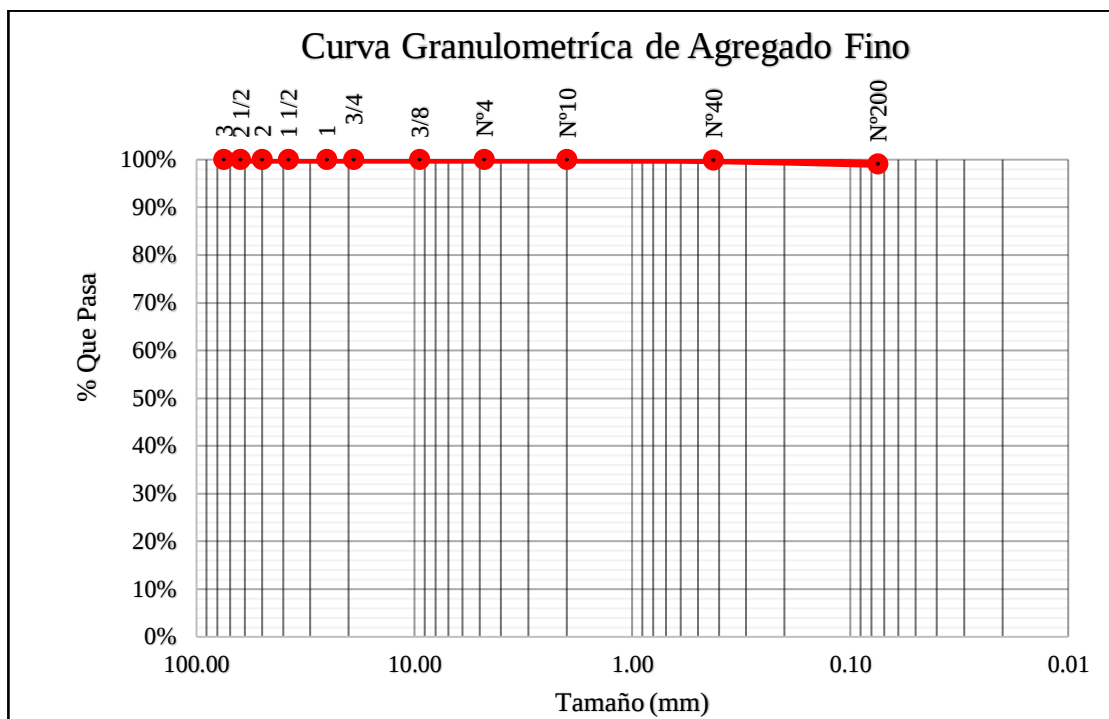


Tabla 18: Planilla de la granulometría por el método del lavado de los suelos seleccionados

AJ-P1		AJ-P2		GB-P4		MF-P2	
Tamices	Que pasa del total [%]	Tamices	Que pasa del total [%]	Tamices	Que pasa del total [%]	Tamices	Que pasa del total [%]
1 1/2	100,00%	1 1/2	100,00%	1 1/2	100,00%	1 1/2	100,00%
1	100,00%	1	100,00%	1	100,00%	1	100,00%
3/4	100,00%	3/4	100,00%	3/4	100,00%	3/4	100,00%
3/8	100,00%	3/8	100,00%	3/8	100,00%	3/8	100,00%
N°4	100,00%	N°4	100,00%	N°4	100,00%	N°4	100,00%
N°10	100,00%	N°10	100,00%	N°10	100,00%	N°10	100,00%
N°40	99,93%	N°40	99,90%	N°40	99,86%	N°40	99,94%
N°200	98,52%	N°200	99,11%	N°200	97,50%	N°200	99,52%

3.3.4 Análisis granulométrico por hidrómetro (ASTM D-522)

Este ensayo se encuentra basado en el principio de sedimentación de granos de suelo en agua, cuando un espécimen de suelos se sedimenta en agua, las partículas se asientan a diferentes velocidades, dependiendo de sus formas, tamaños y pesos. Por simplicidad, se supone que todas las partículas de los suelos son esferas y que la velocidad de las partículas se expresa por la ley de Stokes, por lo dicho anteriormente se presentan unas restricciones a esta ley que son necesarias tener en cuenta como objeto del estudio que se hace:

- Las partículas finas no son esferas
- El suelo no es homogéneo en cuanto a su composición
- La temperatura del fluido no es constante
- Las partículas finas forman grumos debido a la iteración eléctrica que ocurre entre ellas

El ensayo por hidrómetro se usa para determinar el porcentaje de partículas de suelos dispersados, que permanecen en suspensión en un determinado tiempo.

Para ensayos de rutina con fines de clasificación, el análisis con hidrómetro se aplica a partículas de suelos que pasan el tamiz N°10.

Cuando se quiere más precisión, el análisis con hidrómetro se debe realizar a la fracción de suelo que pase el tamiz N°200.

Figura 18: Ensayo por Hidrómetro



Tabla 19: Análisis granulométrico por hidrómetro “AJ-P2”

Modelo Hidrómetro:			152 H						Temperatura [°C]:			23		
Peso suelo seco:			80		g				Registro Hidrómetro [g/l]:			0		
Peso específico:			2,80		g/cm³				Ct [g/l]:			0,7		
Agente Dispersante:			sin defluctuante						Cm [g/l]:			1		
									RCd [g/l]:			1,7		
"a"	0,969													
Tiempo [min]	T [°C]	Lect. Real Rh [g/l]	Const. K Tabla	Ct [g/l]	Lect. Corr. Menis. Rr [g/l]	Correc. Por defluc. Cd [g/l]	Lect. Corr. Rc [g/l]	Prof. Efec. L [cm]	L/t [cm/min]	a	Diam. Part. [mm]	% Mas Fino Parc.	% Mas Fino Tot.	
											0,0750		98,66	
1	23	53	0,0126	0,7	54	7,7	47	8,60	8,6000	0,969	0,0370	91,09	89,87	
2	23	52	0,0126	0,7	53	7,7	46	8,80	4,4000	0,969	0,0264	89,15	87,95	
4	23	50	0,0126	0,7	51	7,7	44	9,10	2,2750	0,969	0,0190	85,27	84,13	
8	23	48	0,0126	0,7	49	7,7	42	9,40	1,1750	0,969	0,0137	81,40	80,31	
15	23	43	0,0126	0,7	44	7,7	37	10,20	0,6800	0,969	0,0104	71,71	70,75	
30	23	39	0,0126	0,7	40	7,7	33	10,90	0,3633	0,969	0,0076	63,95	63,10	
60	23	34	0,0126	0,7	35	7,7	28	11,70	0,1950	0,969	0,0056	54,26	53,54	
120	23	30	0,0126	0,7	31	7,7	24	12,40	0,1033	0,969	0,0041	46,51	45,89	
240	23	27	0,0126	0,7	28	7,7	21	12,90	0,0538	0,969	0,0029	40,70	40,15	
480	23	23	0,0126	0,7	24	7,7	17	13,50	0,0281	0,969	0,0021	32,95	32,50	
1440	23	19	0,0126	0,7	20	7,7	13	14,20	0,0099	0,969	0,0013	25,19	24,86	
1860	23	17	0,0126	0,7	18	7,7	11	14,50	0,0078	0,969	0,0011	21,32	21,03	
2880	23	13	0,0126	0,7	14	7,7	7	15,20	0,0053	0,969	0,0009	13,57	13,38	
4320	23	10	0,0126	0,7	11	7,7	4	15,60	0,0036	0,969	0,0008	7,75	7,65	

Gráfica 11: Curva de Distribución Granulométrica “AJ-P2”

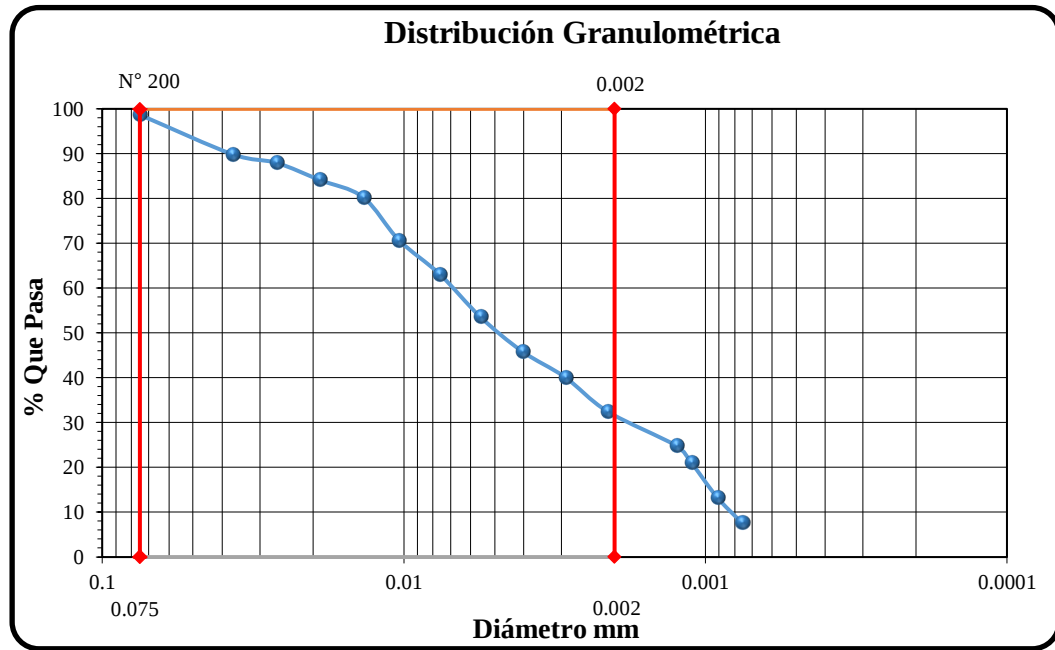


Tabla 20: Planilla del análisis granulométrico por hidrómetro de los suelos elegidos

AJ-P1		AJ-P2		GB-P4		MF-P2	
Diam. Part. [mm]	Mas Fino Tot, [%]	Diam. Part. [mm]	Mas Fino Tot, [%]	Diam. Part. [mm]	Mas Fino Tot, [%]	Diam. Part. [mm]	Mas Fino Tot, [%]
0,075	99,480	0,075	98,660	0,075	98,120	0,075	95,450
0,036	98,673	0,037	89,865	0,038	90,433	0,037	92,138
0,025	98,673	0,026	87,953	0,028	80,812	0,026	90,258
0,018	98,673	0,019	84,129	0,020	73,116	0,019	82,736
0,013	94,804	0,014	80,305	0,015	65,419	0,014	77,095
0,010	90,934	0,010	70,745	0,011	57,723	0,011	69,574
0,007	85,130	0,008	63,097	0,008	48,102	0,008	63,932
0,005	79,325	0,006	53,537	0,006	40,406	0,006	56,411
0,004	69,652	0,004	45,889	0,004	34,634	0,004	47,009
0,003	56,108	0,003	40,153	0,003	28,861	0,003	37,607
0,002	38,695	0,002	32,505	0,002	25,013	0,002	30,086
0,001	23,217	0,001	24,856	0,001	15,393	0,001	18,804
0,001	15,478	0,001	21,032	0,001	9,620	0,001	16,923
0,001	7,739	0,001	13,384	0,001	5,772	0,001	9,402
0,001	3,870	0,001	7,648	0,001	1,924	0,001	1,880

3.3.5 Límites de Atterberg (ASTM D-4318)

3.3.5.1 Límite líquido

Este método establece el procedimiento para determinar el límite líquido de los suelos, mediante la máquina Casagrande.

El límite líquido es la humedad expresada como porcentaje de la masa de suelo seco en horno, de un suelo remoldeado en el límite entre los estados líquido y plástico.

Corresponde a la humedad necesaria para que una muestra de suelo remoldeada, depositada en la taza de bronce de la máquina Casagrande y dividida en dos porciones simétricas separadas 2 mm entre sí, fluya y entren en contacto en una longitud de 10 mm, aplicando 25 golpes.

Figura 19: Límite líquido



3.3.5.2 Límite plástico

Este método establece el procedimiento para determinar el límite plástico y el índice de plasticidad de los suelos.

El límite plástico, es la humedad expresada como porcentaje de la masa de suelo seco en horno, de un suelo remoldeado en el límite entre los estados plástico y semisólido.

Corresponde a la humedad necesaria para bastones cilíndricos de suelo de 3 [mm] de

diámetro se disgreguen en trozos de 0,5 a 1,5 cm de largo y no puedan ser re amasados ni reconstituidos.

Figura 20: Limite plástico



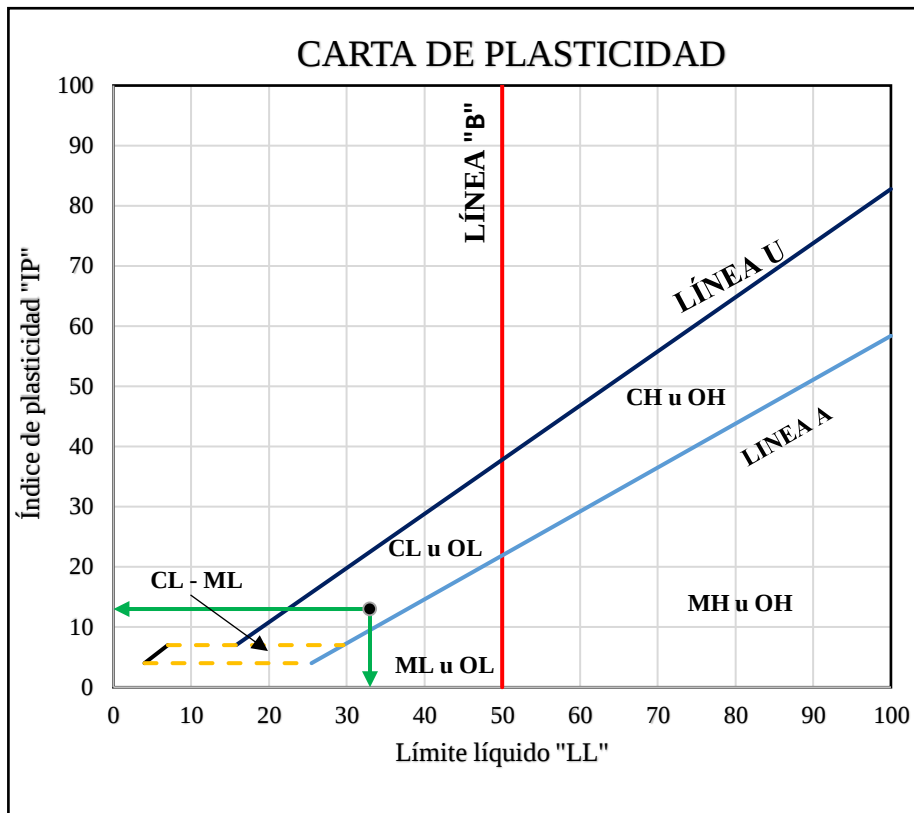
Figura 21: Ensayo de los Limites de Atterberg



3.3.6 Clasificación de suelos

Se clasifican los suelos una vez ya teniendo obtenidos los datos de los límites de atterberg, para así poder clasificar y determinar su característica de cada suelo obtenido en el campo.

Gráfica 12: Clasificación de suelo “AJ-P2”



CLASIFICACIÓN DEL SUELO		DESCRIPCIÓN
SUCS	CL	Arcilla inorgánica de baja plasticidad

Tabla 21: Planilla de la clasificación de suelos y los límites de atterberg del distrito
12

N°	DESCRIPCION		LIMITE LIQUIDO	LIMITE PLASTICO	ÍNDICE DE PLASTICIDAD	CLASIFICACION [SUCS]	
1	German Bush	GB-P1	30	19	11	CL	Arcilla inorgánica de baja plasticidad
2	San Martín	SM-P2	31	21	10	CL	
3	Aranjuez	AJ-P2	33	20	13	CL	
4	German Bush	GB-P3	34	22	12	CL	
5	San Blas	SB-P3	35	21	14	CL	
6	San Martín	SM-P1	35	21	14	CL	
7	Aranjuez	AJ-P6	37	23	14	CL	
8	Miraflores	MF-P6	37	22	15	CL	
9	San Martín	SM-P3	37	23	14	CL	
10	German Bush	GB-P5	38	23	15	CL	
11	San Blas	SB-P6	38	23	15	CL	
12	German Bush	GB-P4	39	23	16	CL	
13	San Martín	SM-P6	39	25	14	CL	
14	San Martín	SM-P4	40	24	16	CL	
15	Miraflores	MF-P1	40	24	16	CL	
16	Miraflores	MF-P4	42	23	19	CL	
17	Aranjuez	AJ-P3	43	22	21	CL	
18	Aranjuez	AJ-P5	44	23	21	CL	
19	Miraflores	MF-P2	46	26	20	CL	
20	San Blas	SB-P1	47	25	22	CL	
21	San Blas	SB-P2	48	25	23	CL	
22	Miraflores	MF-P3	48	26	22	CL	
23	German Bush	GB-P6	49	26	23	CL	
24	San Martín	SM-P5	49	26	23	CL	
25	German Bush	GB-P2	51	24	27	CH	Arcilla inorgánica de alta plasticidad
26	San Blas	SB-P4	51	28	23	CH	
27	Aranjuez	AJ-P1	54	27	27	CH	
28	Aranjuez	AJ-P4	55	28	27	CH	
29	Miraflores	MF-P5	55	27	28	CH	
30	San Blas	SB-P5	57	25	32	CH	

3.3.7 Compactación de suelo (ASTM D-628)

3.3.7.1 Proctor Estándar T-99

Este método establece el procedimiento para determinar la relación entre la humedad y la densidad de un suelo compactado en un molde normalizado mediante un pisón de 2,44 kgf, en caída libre, desde una altura de 304,8 mm, con una energía específica de compactación de 591,3 KN-m/m³.

Para realizar la compactación se debe usar suelo seco que pasa por el tamiz N°4, pero debido a que las partículas del suelo no se disgregaron de forma adecuada, se trabajó con el tamiz N°10 para tener una mejor distribución del tamaño de la muestra.

De acuerdo a las especificaciones, el método para nuestro ensayo es el Método B.

Figura 22: Material para el ensayo de compactación



Figura 23: Ensayo de compactación



Tabla 22: Planilla para el ensayo de compactación “AJ-P2”

N° de capas	3	3	3	3
N° de golpes por capa	25	25	25	25
Peso suelo húmedo + molde [g]	5881,5	5950,5	6053,9	5984
Peso del molde [g]	4158,3	4158,3	4158,3	4158,3
Peso suelo húmedo [g]	1723,2	1792,2	1895,6	1825,7
Volumen de la muestra [cm³]	943	943	943	943
Densidad suelo húmedo [g/cm³]	1,83	1,90	2,01	1,94
Cápsula N°	1	2	3	4
Peso suelo húmedo + capsula [g]	57,6	53,4	67,2	75,9
Peso suelo seco + cápsula [g]	53,1	48,7	60	64,9
Peso del agua [g]	4,5	4,7	7,2	11,0
Peso de la cápsula [g]	15,1	15,8	20,2	14,9
Peso suelo seco [g]	38	32,9	39,8	50,00
Contenido de humedad [%h]	11,84	14,29	18,09	22,00
Densidad suelo seco [g/cm³]	1,63	1,66	1,70	1,59

Gráfica 13: Grafico de compactación “AJ-P2”

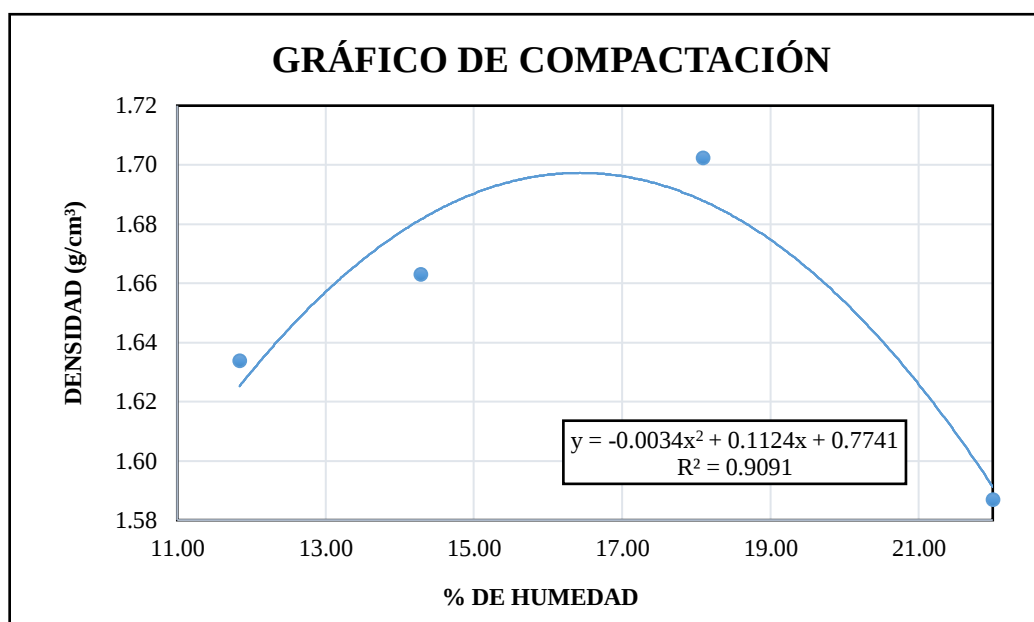


Tabla 23: Planilla de los ensayos de compactación

Muestras de Suelos		Densidad Maxima [g/cm³]	Humedad Optima [%]
Aranjuez	AJ-P1	1,618	24,73
Aranjuez	AJ-P2	1,693	17,25
German Bush	GB-P4	1,602	18,85
Miraflores	MF-P2	1,612	20,66

3.3.8 Ensayo compresión no confinada (ASTM 2166)

Este ensayo tiene por finalidad determinar la resistencia a la compresión no confinada de una probeta cilíndrica de suelo, de manera de poder obtener de forma indirecta la resistencia al corte de la muestra.

Para lo anterior se somete una muestra de suelo a un esfuerzo vertical con la deformación controlada, y se mide la máxima carga que resiste.

Figura 24: Instrumento para en ensayo de la compresión no confinada



Figura 25: Ensayo de la compresión no confinada



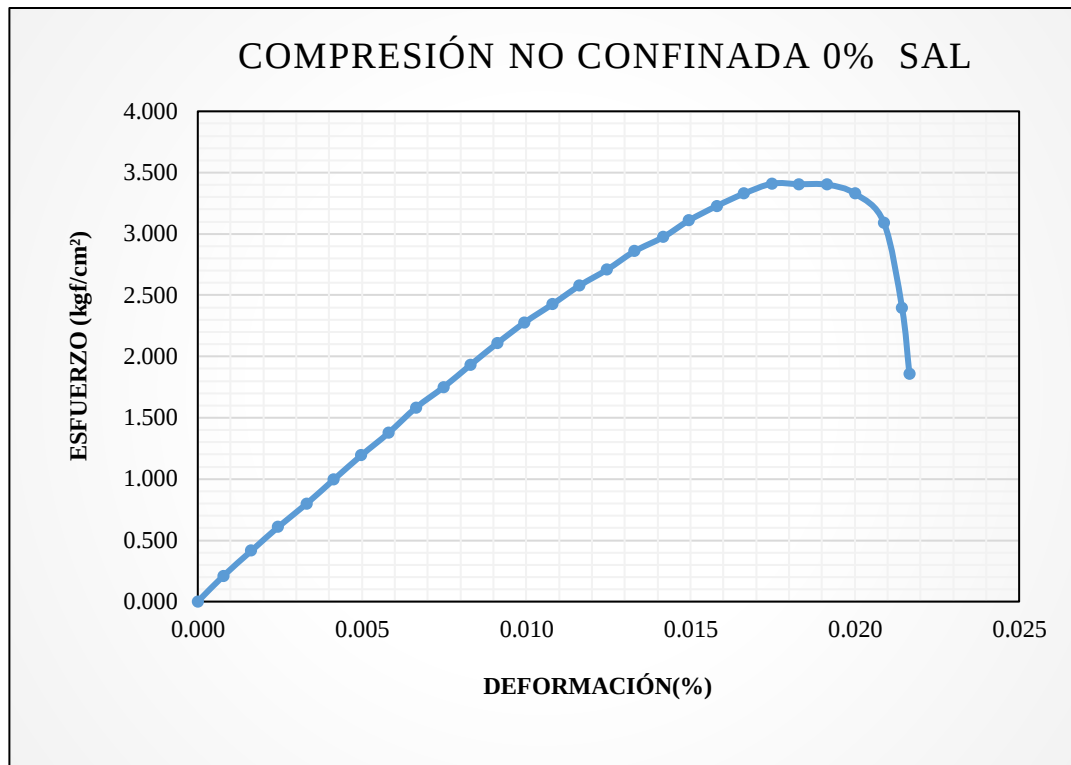
Figura 26: Muestras de los ensayos y su tipo de rotura



Tabla 24: Planilla de cálculos compresión no confinada “AJ-P2” al 0% sal

DEFORMACION SIMPLE	DEFORMACION	ESFUERZO	AREA CORREGIDA	CARGA	ESFUERZO		
mm	%	%	cm ²	KN	kPa	Pas [N/cm ²]	Kgf/cm ²
0,000	0,000	0,000	23,328	0,000	0,000	0,000	0,000
0,080	0,001	3,586	23,346	0,048	20,501	20501,21	0,209
0,168	0,002	7,530	23,366	0,095	40,643	40643,40	0,414
0,252	0,002	11,295	23,386	0,140	59,656	59655,76	0,608
0,341	0,003	15,285	23,406	0,183	78,267	78267,43	0,798
0,426	0,004	19,095	23,425	0,229	97,582	97582,20	0,995
0,513	0,005	22,994	23,445	0,275	117,082	117082,24	1,194
0,598	0,006	26,804	23,465	0,317	134,935	134934,79	1,376
0,684	0,007	30,659	23,484	0,364	155,135	155135,09	1,582
0,771	0,007	34,558	23,504	0,403	171,643	171642,73	1,750
0,855	0,008	38,324	23,524	0,446	189,406	189406,30	1,931
0,939	0,009	42,089	23,543	0,487	206,776	206775,56	2,109
1,025	0,010	45,944	23,563	0,526	223,382	223381,60	2,278
1,112	0,011	49,843	23,583	0,561	237,953	237952,57	2,426
1,197	0,012	53,653	23,603	0,597	252,868	252867,66	2,579
1,283	0,012	57,508	23,623	0,627	265,571	265571,37	2,708
1,369	0,013	61,363	23,643	0,663	280,253	280253,02	2,858
1,459	0,014	65,397	23,663	0,690	291,628	291628,24	2,974
1,540	0,015	69,027	23,682	0,722	305,007	305006,57	3,110
1,627	0,016	72,927	23,703	0,750	316,531	316530,61	3,228
1,712	0,017	76,737	23,723	0,774	326,411	326410,80	3,328
1,801	0,017	80,726	23,743	0,794	334,451	334450,50	3,410
1,884	0,018	84,446	23,763	0,794	333,995	333995,24	3,406
1,974	0,019	88,481	23,784	0,793	333,517	333517,17	3,401
2,061	0,020	92,380	23,805	0,777	326,370	326369,52	3,328
2,151	0,021	96,414	23,826	0,722	303,170	303169,79	3,091
2,208	0,021	98,969	23,839	0,560	234,794	234794,34	2,394
2,231	0,022	100,000	23,845	0,434	181,988	181988,33	1,856

Gráfica 14: Compresión no confinada “AJ-P2” al 0% sal

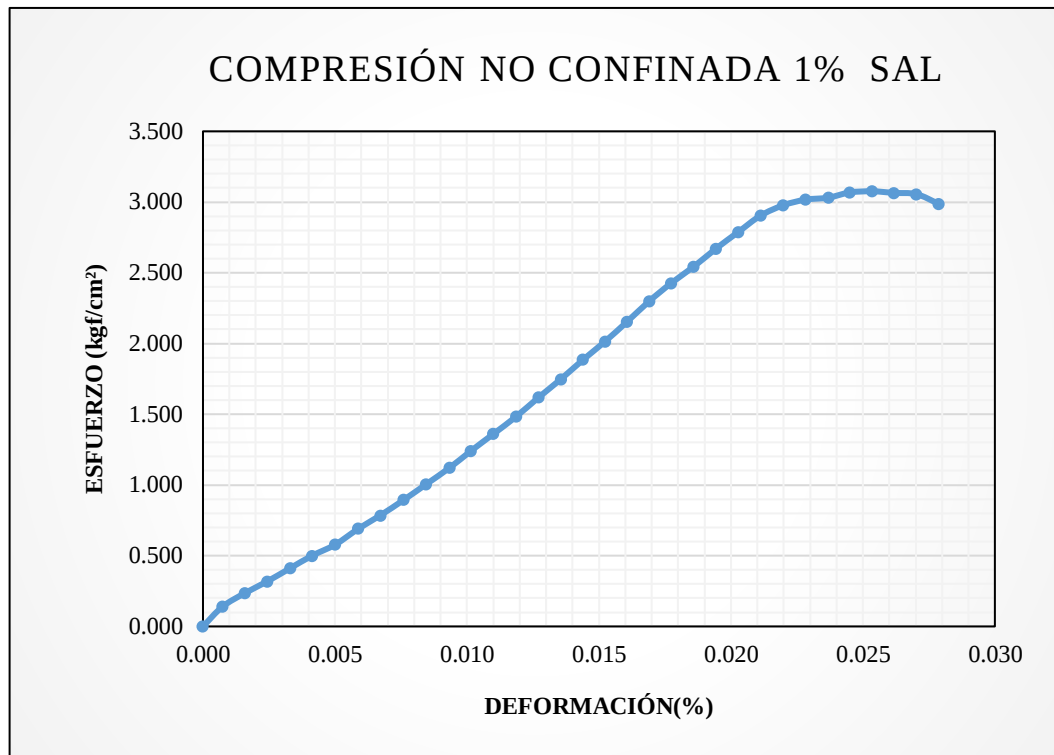


CARGA			
ULTIMA	qu=	3,410	Kgf/cm²
COHESION	Cu=	1,705	Kgf/cm²

Tabla 25: Planilla de cálculos compresión no confinada “AJ-P2” al 1% sal

DEFORMACION SIMPLE	DEFORMACION	ESFUERZO	AREA CORREGIDA	CARGA	ESFUERZO		
mm	%	%	cm ²	KN	kPa	Pas [N/cm ²]	Kgf/cm ²
0,000	0,000	0,000	19,635	0,000	0,000	0,000	0,000
0,074	0,001	2,655	19,649	0,027	13,702	13701,625	0,140
0,158	0,002	5,669	19,666	0,045	23,034	23034,140	0,235
0,244	0,002	8,755	19,683	0,062	31,265	31264,574	0,319
0,330	0,003	11,841	19,700	0,079	40,349	40348,805	0,411
0,413	0,004	14,819	19,716	0,097	48,989	48989,209	0,500
0,501	0,005	17,976	19,734	0,112	56,759	56758,903	0,579
0,589	0,006	21,134	19,751	0,134	67,767	67767,222	0,691
0,672	0,007	24,112	19,768	0,152	77,026	77026,300	0,785
0,761	0,008	27,305	19,786	0,174	87,780	87779,843	0,895
0,845	0,008	30,319	19,802	0,195	98,519	98518,942	1,005
0,935	0,009	33,549	19,820	0,218	110,098	110097,874	1,123
1,015	0,010	36,419	19,836	0,241	121,667	121667,394	1,241
1,100	0,011	39,469	19,853	0,265	133,427	133427,418	1,361
1,187	0,012	42,591	19,871	0,289	145,595	145594,892	1,485
1,272	0,013	45,640	19,888	0,316	158,862	158861,693	1,620
1,356	0,014	48,654	19,905	0,341	171,466	171465,627	1,748
1,440	0,014	51,668	19,922	0,368	184,911	184910,738	1,886
1,524	0,015	54,682	19,939	0,394	197,686	197686,205	2,016
1,607	0,016	57,661	19,956	0,422	211,303	211302,656	2,155
1,691	0,017	60,675	19,973	0,450	225,539	225539,448	2,300
1,774	0,018	63,653	19,990	0,476	238,034	238034,146	2,427
1,859	0,019	66,703	20,007	0,499	249,428	249428,171	2,543
1,943	0,019	69,717	20,024	0,524	261,878	261877,974	2,670
2,028	0,020	72,766	20,041	0,548	273,446	273445,556	2,788
2,112	0,021	75,780	20,059	0,571	284,781	284781,212	2,904
2,199	0,022	78,902	20,076	0,586	292,020	292020,472	2,978
2,282	0,023	81,880	20,093	0,594	295,837	295836,649	3,017
2,369	0,024	85,002	20,111	0,598	297,283	297282,739	3,031
2,451	0,025	87,944	20,128	0,606	300,876	300876,398	3,068
2,535	0,025	90,958	20,146	0,608	301,684	301684,043	3,076
2,617	0,026	93,900	20,163	0,606	300,578	300577,660	3,065
2,703	0,027	96,986	20,180	0,605	299,673	299672,983	3,056
2,787	0,028	100,000	20,198	0,592	293,031	293030,918	2,988

Gráfica 15: Compresión no confinada “AJ-P2” al 1% sal



CARGA			
ULTIMA	qu=	3,076	Kgf/cm²
COHESION	Cu=	1,538	Kgf/cm²

Tabla 26: Planilla de cálculos compresión no confinada “AJ-P2” al 2% sal

DEFORMACION SIMPLE	DEFORMACION	ESFUERZO	AREA CORREGIDA	CARGA	ESFUERZO		
mm	%	%	cm ²	KN	kPa	Pas [N/cm ²]	Kgf/cm ²
0,000	0,000	0,000	21,237	0,000	0,000	0,000	0,000
0,077	0,001	2,394	21,253	0,019	8,847	8847,134	0,090
0,161	0,002	5,005	21,271	0,036	17,077	17077,449	0,174
0,247	0,002	7,678	21,289	0,059	27,903	27903,042	0,285
0,331	0,003	10,289	21,306	0,084	39,313	39312,772	0,401
0,416	0,004	12,931	21,324	0,106	49,701	49700,960	0,507
0,503	0,005	15,636	21,342	0,130	60,879	60879,243	0,621
0,590	0,006	18,340	21,361	0,156	73,057	73056,982	0,745
0,678	0,007	21,076	21,379	0,176	82,409	82408,779	0,840
0,766	0,008	23,811	21,398	0,200	93,545	93545,336	0,954
0,850	0,008	26,422	21,416	0,224	104,466	104466,224	1,065
0,933	0,009	29,002	21,433	0,246	114,571	114571,227	1,168
1,019	0,010	31,675	21,451	0,273	127,251	127250,949	1,298
1,104	0,011	34,318	21,470	0,298	138,913	138912,601	1,417
1,191	0,012	37,022	21,488	0,322	149,954	149953,896	1,529
1,278	0,013	39,726	21,507	0,346	161,015	161015,450	1,642
1,365	0,013	42,431	21,525	0,374	173,655	173654,867	1,771
1,453	0,014	45,166	21,544	0,403	186,869	186868,646	1,906
1,541	0,015	47,902	21,563	0,426	197,667	197666,962	2,016
1,626	0,016	50,544	21,581	0,454	210,245	210245,067	2,144
1,715	0,017	53,311	21,600	0,483	223,389	223389,450	2,278
1,798	0,018	55,891	21,618	0,505	233,741	233741,036	2,383
1,889	0,019	58,719	21,638	0,532	246,042	246041,994	2,509
1,976	0,019	61,424	21,657	0,562	259,521	259521,389	2,646
2,066	0,020	64,221	21,676	0,583	269,003	269003,133	2,743
2,154	0,021	66,957	21,695	0,606	279,463	279463,491	2,850
2,244	0,022	69,754	21,715	0,630	290,295	290295,223	2,960
2,334	0,023	72,552	21,735	0,657	302,491	302490,930	3,085
2,422	0,024	75,288	21,754	0,676	310,719	310718,949	3,168
2,512	0,025	78,085	21,773	0,696	319,518	319518,007	3,258
2,598	0,025	80,758	21,792	0,715	328,314	328313,850	3,348
2,687	0,026	83,525	21,812	0,734	336,295	336295,246	3,429
2,775	0,027	86,260	21,831	0,749	343,281	343281,363	3,500
2,861	0,028	88,934	21,850	0,764	349,671	349671,237	3,566
2,952	0,029	91,763	21,870	0,777	355,246	355245,990	3,622
3,036	0,030	94,374	21,889	0,783	357,497	357497,177	3,645
3,129	0,031	97,265	21,909	0,764	348,530	348530,172	3,554
3,217	0,032	100,000	21,929	0,674	307,195	307195,343	3,133

Gráfica 16: Compresión no confinada “AJ-P2” al 2% sal

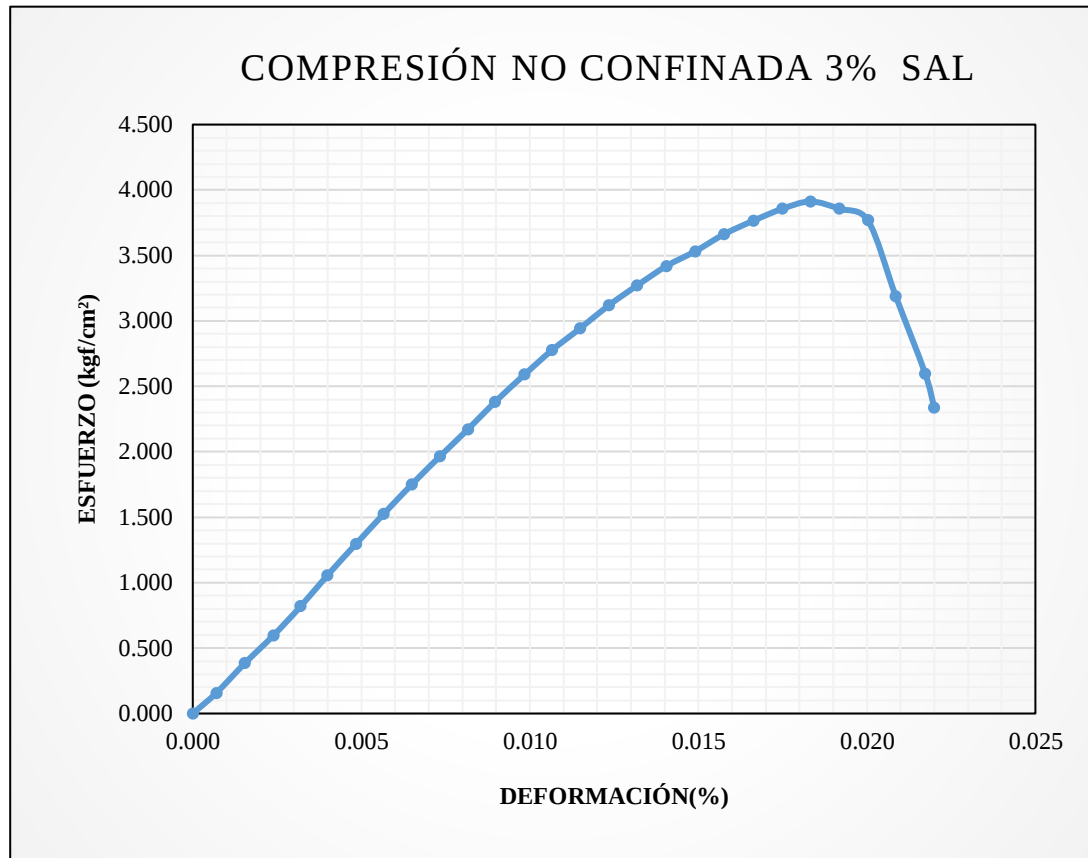


CARGA			
ULTIMA	qu=	3,645	Kgf/cm ²
COHESION	Cu=	1,823	Kgf/cm ²

Tabla 27: Planilla de cálculos compresión no confinada “AJ-P2” al 3% sal

DEFORMACION SIMPLE	DEFORMACION	ESFUERZO	AREA CORREGIDA	CARGA	ESFUERZO		
mm	%	%	cm ²	KN	kPa	Pas [N/cm ²]	Kgf/cm ²
0,000	0,000	0,000	19,635	0,000	0,000	0,000	0,000
0,070	0,001	3,182	19,649	0,030	15,442	15442,237	0,157
0,155	0,002	7,045	19,665	0,074	37,812	37812,028	0,386
0,239	0,002	10,864	19,682	0,115	58,407	58407,192	0,596
0,320	0,003	14,545	19,698	0,158	80,286	80285,866	0,819
0,400	0,004	18,182	19,714	0,204	103,684	103683,665	1,057
0,485	0,005	22,045	19,731	0,251	127,254	127254,312	1,298
0,567	0,006	25,773	19,747	0,296	149,704	149704,366	1,527
0,650	0,007	29,545	19,763	0,339	171,682	171682,363	1,751
0,733	0,007	33,318	19,780	0,381	192,605	192604,720	1,964
0,816	0,008	37,091	19,796	0,421	212,851	212850,827	2,170
0,897	0,009	40,773	19,813	0,463	233,501	233501,044	2,381
0,984	0,010	44,727	19,830	0,503	253,885	253885,485	2,589
1,066	0,011	48,455	19,847	0,540	272,299	272298,648	2,777
1,150	0,012	52,273	19,863	0,574	288,728	288727,756	2,944
1,234	0,012	56,091	19,880	0,608	305,777	305776,931	3,118
1,319	0,013	59,955	19,897	0,638	320,849	320849,445	3,272
1,405	0,014	63,864	19,915	0,668	335,245	335244,874	3,419
1,491	0,015	67,773	19,932	0,690	346,380	346380,228	3,532
1,577	0,016	71,682	19,950	0,717	359,219	359219,476	3,663
1,663	0,017	75,591	19,967	0,737	369,237	369237,142	3,765
1,749	0,017	79,500	19,984	0,756	378,162	378161,903	3,856
1,833	0,018	83,318	20,002	0,767	383,640	383640,133	3,912
1,919	0,019	87,227	20,019	0,757	378,151	378151,468	3,856
2,003	0,020	91,045	20,036	0,740	369,462	369462,281	3,767
2,086	0,021	94,818	20,053	0,627	312,569	312569,047	3,187
2,173	0,022	98,773	20,071	0,511	254,691	254691,085	2,597
2,200	0,022	100,000	20,077	0,460	229,147	229146,907	2,337

Gráfica 17: Compresión no confinada “AJ-P2” al 3% sal

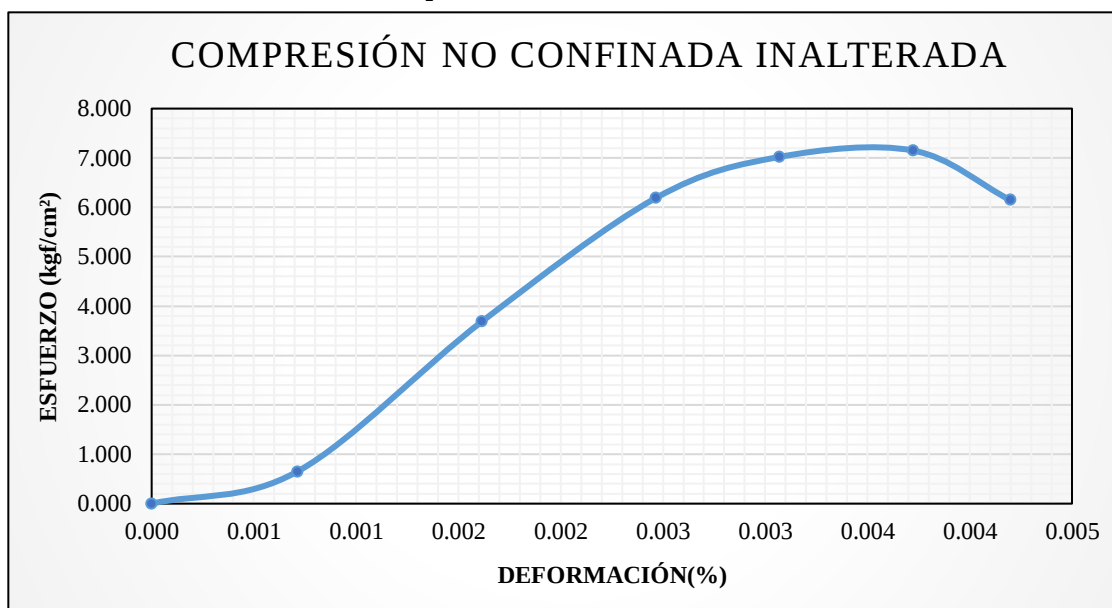


CARGA			
ULTIMA	qu=	3,912	Kgf/cm²
COHESION	Cu=	1,956	Kgf/cm²

Tabla 28: Planilla de cálculos compresión no confinada “AJ-P2” Inalterada

DEFORMACION SIMPLE	DEFORMACION	ESFUERZO	AREA CORREGIDA	CARGA	ESFUERZO		
mm	%	%	cm ²	KN	kPa	Pas [N/cm ²]	Kgf/cm ²
0,000	0,000	0,000	22,062	0,000	0,000	0,000	0,000
0,072	0,001	16,981	22,078	0,141	63,851	63850,769	0,651
0,163	0,002	38,443	22,097	0,798	361,316	361316,492	3,684
0,249	0,002	58,726	22,116	1,343	607,038	607038,440	6,190
0,310	0,003	73,113	22,130	1,524	688,502	688501,898	7,021
0,376	0,004	88,679	22,144	1,553	701,205	701205,244	7,150
0,424	0,004	100,000	22,155	1,336	602,927	602927,373	6,148

Gráfica 18: Compresión no Confinada “AJ-P2” Inalterada



CARGA			
ULTIMA	qu=	7,150	Kgf/cm ²
COHESION	Cu=	3,575	Kgf/cm ²

En estas tablas y graficas se puede observar los efectos que genera el cloruro de sodio en un suelo arcilloso con diferentes porcentajes (0%, 1%, 2% y 3% de sal) y el suelo inalterado.

CAPÍTULO IV

ANÁLISIS DE LOS

EFFECTOS DEL

CLORURO DE SODIO

POR EL ENSAYO DE

COMPRESIÓN NO

CONFINADA

CAPÍTULO IV

ANÁLISIS DE LOS EFECTOS DEL CLORURO DE SODIO POR EL ENSAYO DE COMPRESIÓN NO CONFINADA

4.1 Análisis de la zona de estudio del distrito 12

Para este trabajo de investigación lo primero que se realizó fue tener la ubicación geográfica del distrito 12 donde este distrito consta de 5 barrios que son; Aranjuez, San Martín, German Bush, Miraflores y San Blas.

Tabla 29: Planilla de los suelos seleccionados por estudiar

		Nº	DESCRIPCIÓN	LÍMITE LÍQUIDO	LÍMITE PLÁSTICO	ÍNDICE DE PLASTICIDAD	CLASIFICACIÓN [SUCS]		
1		1	German Bush	GB-P1	30	19	11	CL	Arcilla inorgánica de baja plasticidad
		2	San Martín	SM-P2	31	21	10	CL	
		3	Aranjuez	AJ-P2	33	20	13	CL	
		4	German Bush	GB-P3	34	22	12	CL	
		5	San Blas	SB-P3	35	21	14	CL	
		6	San Martín	SM-P1	35	21	14	CL	
2		7	Aranjuez	AJ-P6	37	23	14	CL	
		8	Miraflores	MF-P6	37	22	15	CL	
		9	San Martín	SM-P3	37	23	14	CL	
		10	German Bush	GB-P5	38	23	15	CL	
		11	San Blas	SB-P6	38	23	15	CL	
		12	German Bush	GB-P4	39	23	16	CL	
		13	San Martín	SM-P6	39	25	14	CL	
		14	San Martín	SM-P4	40	24	16	CL	
		15	Miraflores	MF-P1	40	24	16	CL	
		16	Miraflores	MF-P4	42	23	19	CL	
3		17	Aranjuez	AJ-P3	43	22	21	CL	
		18	Aranjuez	AJ-P5	44	23	21	CL	
		19	Miraflores	MF-P2	46	26	20	CL	
		20	San Blas	SB-P1	47	25	22	CL	
		21	San Blas	SB-P2	48	25	23	CL	
		22	Miraflores	MF-P3	48	26	22	CL	
		23	German Bush	GB-P6	49	26	23	CL	
		24	San Martín	SM-P5	49	26	23	CL	
		25	German Bush	GB-P2	51	24	27	CH	
4		26	San Blas	SB-P4	51	28	23	CH	
		27	Aranjuez	AJ-P1	54	27	27	CH	
		28	Aranjuez	AJ-P4	55	28	27	CH	
		29	Miraflores	MF-P5	55	27	28	CH	
		30	San Blas	SB-P5	57	25	32	CH	
								Arcilla inorgánica de alta plasticidad	

Una vez definido el ámbito de estudio y delimitado el distrito correspondiente, se procedió a realizar un levantamiento geotécnico preliminar. En total, se identificaron 30 puntos de muestreo distribuidos estratégicamente a lo largo del área urbana y periurbana del distrito, donde se efectuaron estudios de reconocimiento del subsuelo. A partir de estos, se identificaron suelos predominantemente arcillosos, con distintas características de compresibilidad, clasificándolos inicialmente como suelos de alta y baja compresibilidad.

El primer paso metodológico consistió en la realización de ensayos de laboratorio, específicamente la determinación de los límites de Atterberg (LL, LP, IP), con el objetivo de caracterizar y clasificar cada uno de los suelos según el sistema SUCS (Sistema Unificado de Clasificación de Suelos). Con los resultados obtenidos, se observó que varios suelos compartían propiedades similares, tanto en términos de plasticidad como de comportamiento mecánico.

Dado que las diferencias entre ciertos suelos eran mínimas, se optó por agrupar los 30 suelos en 4 grupos representativos, utilizando como criterio principal los límites líquidos (LL) y el índice de plasticidad (IP). Esto permitió optimizar los recursos y concentrar los análisis en muestras representativas de cada grupo. Los suelos seleccionados para representar cada grupo fueron los siguientes:

- AJ-P1
- AJ-P2
- GB-P4
- MF-P2

Con estos suelos seleccionados, se procedió a realizar su caracterización completa, cuyos resultados se presentan en la Tabla correspondiente (por insertar). Posteriormente, se llevaron a cabo ensayos de compresión no confinada (UCS) en cada una de las muestras, utilizando diferentes porcentajes de cloruro de sodio (NaCl) como aditivo estabilizante en concentraciones de 0%, 1%, 2% y 3%. El objetivo fue evaluar el efecto del cloruro de sodio en la resistencia mecánica de los suelos arcillosos, a fin de determinar su viabilidad en procesos de mejoramiento de suelos.

Tabla 30: Planilla de suelos seleccionados

N°	DESCRIPCION		CONTENIDO DE HUMEDAD (%)	% QUE PASA EL TAMIZ N° 200	PESO ESPECÍFICO (g/cm ³)	LÍMITE LÍQUIDO (%)	LÍMITE PLÁSTICO (%)	ÍNDICE DE PLASTICIDAD (%)	CLASIFICACION (SUCS)	
1	Aranjuez	AJ-P2	7,415	0,991	2,796	30,000	19,000	11,000	CL	Arcilla inorgánica de baja plasticidad
2	German Bush	GB-P4	7,267	0,975	2,737	39,000	23,000	16,000	CL	
3	Miraflor es	MF-P2	7,603	0,995	2,718	46,000	26,000	20,000	CL	
4	Aranjuez	AJ-P1	5,407	0,985	2,780	54,000	27,000	27,000	CH	Arcilla inorgánica de alta plasticidad

Caracterización de los suelos seleccionados aleatoriamente teniendo así 3 suelos CL y un suelo CH lo cual con estos suelos se trabajó para los diferentes porcentajes de cloruro de sodio.

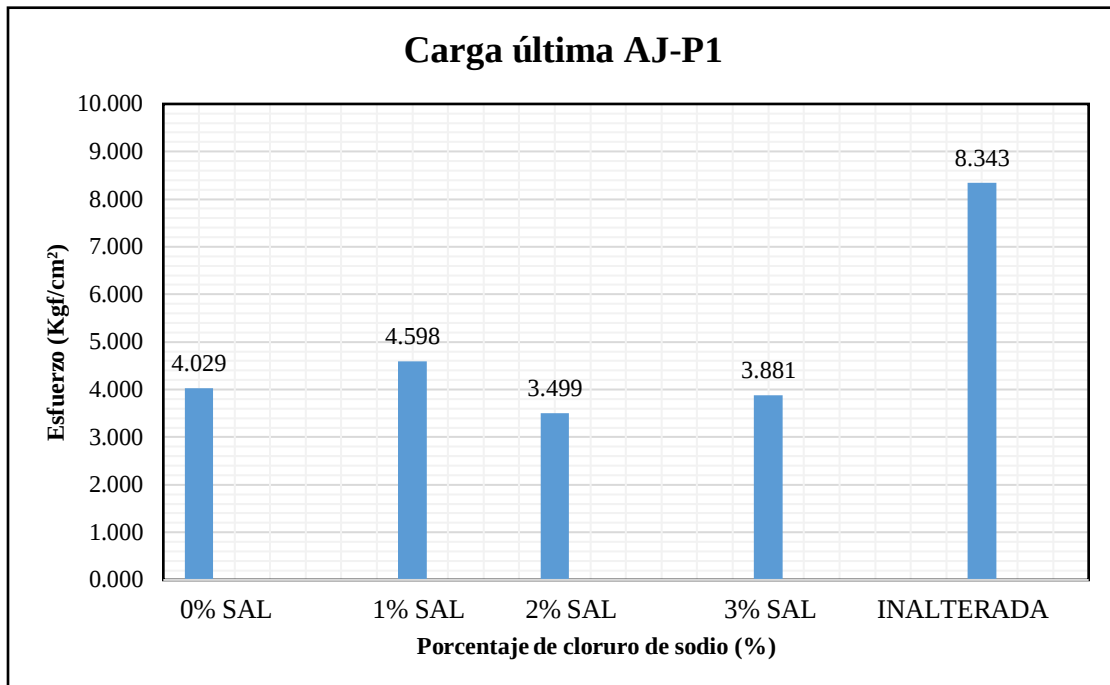
4.2 Análisis del suelo Aranjuez AJ-P1 con diferentes porcentajes de cloruro de sodio (CH)

Tabla 31: Planilla carga última, consistencia y sensibilidad del suelo

Barrios	Muestras	Porcentaje de Sal	Carga última (qu)			Cohesión (Cu)	Promedio de la Carga última	Consistencia de suelo	Sensibilidad del Suelo	
			KPas	Pas (N/cm²)	Kgf/cm²					
ARANJUEZ	AJ-P1	0 % SAL	369,306	369306,027	3,766	1,883	4,029	Dura	2,071	Moderadamente sensible
	AJ-P1		386,303	386302,592	3,939	1,970				
	AJ-P1		429,711	429711,180	4,382	2,191				
	AJ-P1	1 % SAL	460,312	460311,533	4,694	2,347	4,598	Dura	1,814	Insensible o que no se ve afectada cuando se la remoldea
	AJ-P1		441,602	441601,518	4,503	2,252				
	AJ-P1	2 % SAL	297,739	297738,532	3,036	1,518	3,499	Muy Compacta	2,385	Moderadamente sensible
	AJ-P1		370,742	370742,450	3,781	1,890				
	AJ-P1		360,913	360912,579	3,680	1,840				
	AJ-P1	3 % SAL	397,881	397880,506	4,057	2,029	3,881	Muy Compacta	2,150	Moderadamente sensible
	AJ-P1		376,770	376769,608	3,842	1,921				
	AJ-P1		367,125	367125,201	3,744	1,872				
	AJ-P1	INALTERADA	690,866	690866,170	7,045	3,522	8,343	Dura		
	AJ-P1		945,544	945543,881	9,642	4,821				

4.2.1 Carga última del AJ-P1 de los diferentes porcentajes de sal y suelo inalterado

Gráfica 19: Carga última de diferentes porcentajes de cloruro de sodio y suelo inalterado



En la gráfica 19 se presenta el comportamiento de la resistencia a compresión no confinada de un suelo arcilloso de alta plasticidad bajo diferentes condiciones: suelo inalterado, compactado sin aditivo (0% NaCl) y compactado con distintos porcentajes de cloruro de sodio (1%, 2% y 3%).

Se observa que el suelo inalterado presenta una carga última de 8,343 kgf/cm², valor superior al registrado en el suelo compactado sin aditivo (0% NaCl), que alcanzó solo 4,029 kgf/cm². Esta diferencia significativa sugiere que el proceso de remoldeo y compactación del suelo afecta negativamente su resistencia, probablemente debido al incremento de humedad y a la alteración de la estructura original del suelo.

Al analizar los efectos del cloruro de sodio como estabilizante, se observó que, al aumentar la concentración de NaCl, la resistencia a la compresión no confinada no mejora respecto

al suelo inalterado. Por el contrario, en la mayoría de los casos, la carga última disminuyó progresivamente con el aumento del contenido de sal. Este comportamiento indica que la adición de NaCl no resulta favorable para el mejoramiento de este tipo específico de suelo arcilloso de alta plasticidad.

En consecuencia, se concluye que, en este caso particular, el suelo inalterado presenta mejores propiedades mecánicas que el suelo compactado, tanto con como sin aditivos. Por tanto, preservar la estructura natural del suelo puede ser una mejor estrategia en el ámbito geotécnico local, especialmente en aplicaciones donde la resistencia a corto plazo es crítica.

4.2.2 Análisis de la Consistencia del AJ-P1, suelo 0% sal, 1% sal, e inalterada

Durante el proceso de caracterización del suelo, se evaluó su consistencia mediante métodos de inspección táctil, observando su comportamiento al ser manipulado manualmente. Se determinó que el suelo presenta una consistencia dura, ya que resiste una presión moderada entre los dedos (pulgar e índice) y su ruptura ocurre con cierta dificultad. Esta característica indica una estructura interna relativamente firme, asociada a un contenido de humedad próximo al límite plástico, lo cual influye directamente en su comportamiento mecánico y capacidad de soporte.

La consistencia dura observada también respalda los resultados obtenidos en los ensayos de laboratorio, donde el suelo inalterado mostró una alta resistencia a la compresión, en comparación con las muestras remoldeada o compactadas.

4.2.3 Análisis de la Sensibilidad del AJ-P1, suelo al 0% sal, 2% sal y 3% sal

Según los resultados obtenidos y su análisis en la tabla 31, se puede clasificar el suelo como moderadamente sensible. Esto implica que, aunque su resistencia al corte disminuye tras ser perturbado o remoldeado, el suelo no pierde completamente su estructura ni su capacidad de soportar cargas.

Este comportamiento es típico de suelos arcillosos con cierta cohesión residual, donde la remoción de su estructura natural afecta parcialmente su resistencia, pero sin llegar a un colapso total. La sensibilidad moderada es un factor importante a considerar en obras de movimiento de tierras, cimentaciones superficiales y estabilización, ya que sugiere que el suelo puede mantenerse estable bajo ciertas condiciones de carga aun después de ser intervenido.

4.2.4 Análisis de la Consistencia del AJ-P1, suelo al 2% sal y 3% sal

El suelo analizado presenta una consistencia muy compacta, lo que indica que sus partículas se encuentran densamente empaquetadas, con mínimos vacíos intergranulares. Esta condición sugiere una alta densidad seca y una baja porosidad, factores que influyen positivamente en la capacidad de soporte del suelo y en su resistencia al corte.

Un suelo con estas características generalmente exhibe baja compresibilidad y alta estabilidad, siendo adecuado para cimentaciones superficiales o estructuras que demanden mínima deformación bajo carga. Además, la elevada compacidad también puede dificultar el paso del agua, generando una menor permeabilidad, lo cual es un dato relevante para el diseño de sistemas de drenaje o control de infiltraciones.

4.2.5 Análisis de la Sensibilidad del AJ-P1, suelo al 1% sal

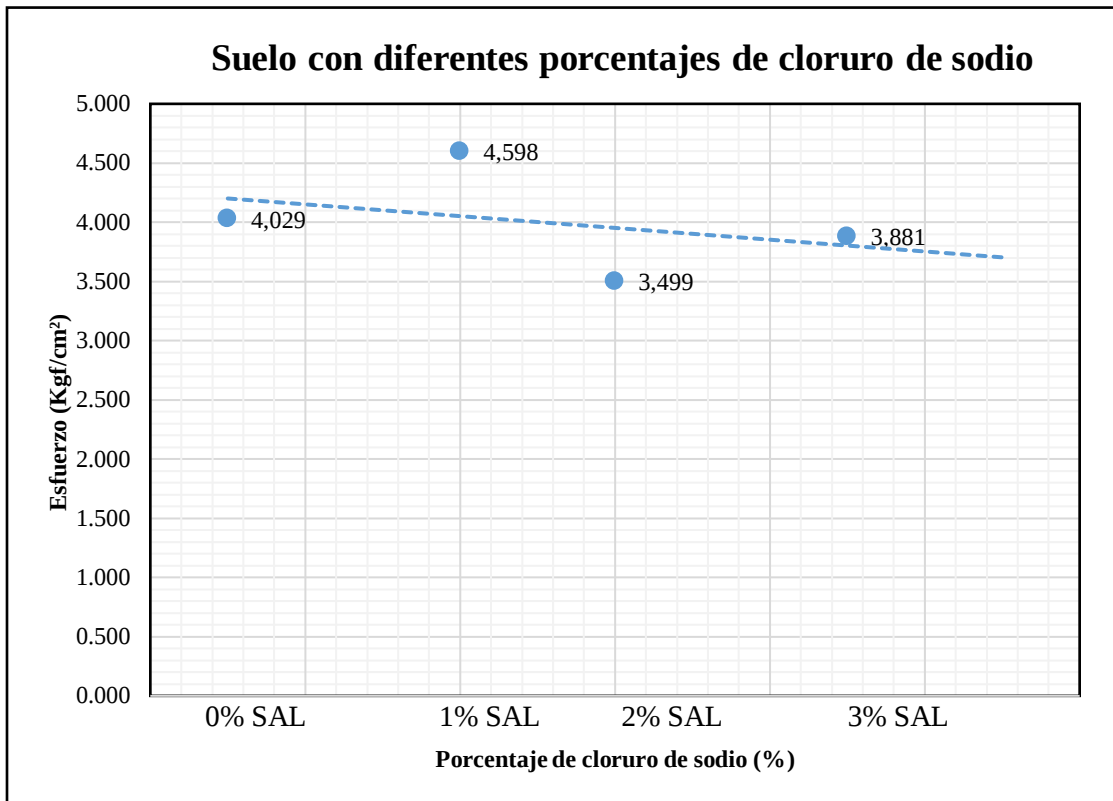
Con base en los resultados obtenidos del ensayo de compresión no confinada antes y después del remoldeo, se determina que el suelo presenta una baja sensibilidad o, en términos prácticos, puede considerarse insensible a la perturbación. Esto significa que la resistencia al corte del suelo no varía significativamente al ser remodelado, lo cual indica que su estructura interna no depende en gran medida de su estado natural de deposición.

Desde el punto de vista geotécnico, un suelo de baja sensibilidad conserva su capacidad de soporte incluso después de ser intervenido o compactado, lo que lo convierte en un material estable y confiable para procesos constructivos que impliquen excavación, manipulación o compactación. Este comportamiento es típico de algunos suelos finos con

cohesión residual bien desarrollada, y favorece su utilización en obras civiles sin necesidad de técnicas complejas de estabilización.

4.2.6 Análisis del comportamiento del suelo AJ-P1, en la carga última con sus diferentes porcentajes de cloruro de sodio

Gráfica 20: Comportamiento del suelo con diferentes porcentajes de cloruro de sodio



Se analizó el comportamiento de un suelo CH (arcilloso de alta plasticidad) compactado con distintos porcentajes de cloruro de sodio (NaCl), variando entre 0% y 3%. Los resultados obtenidos fueron representados gráficamente, donde se observa una línea de tendencia que muestra cómo la resistencia al corte, medida por la carga última, varía con la adición del aditivo.

De acuerdo con los resultados, se determinó que el porcentaje óptimo de cloruro de sodio es del 1%, alcanzando una carga última máxima de 4,598 kgf/cm². Este valor representa el punto en el cual el suelo muestra la mejor capacidad de soporte, alcanzando su

resistencia máxima. Sin embargo, al aumentar la concentración de cloruro de sodio más allá del 1%, se observó una disminución en la carga última y un comportamiento oscilatorio en los valores registrados para las concentraciones de 2% y 3%.

Este comportamiento oscilatorio sugiere que el aumento de la sal más allá del 1% puede afectar negativamente la estructura del suelo, posiblemente debido a la alteración de las interacciones iónicas dentro de la matriz de partículas del suelo, lo que reduce su resistencia a medida que se incrementa la concentración de NaCl.

Este análisis proporciona una visión clara de cómo la concentración de cloruro de sodio afecta la resistencia del suelo CH y sugiere que el 1% de NaCl es el porcentaje óptimo para este tipo de suelos en términos de resistencia a la compresión.

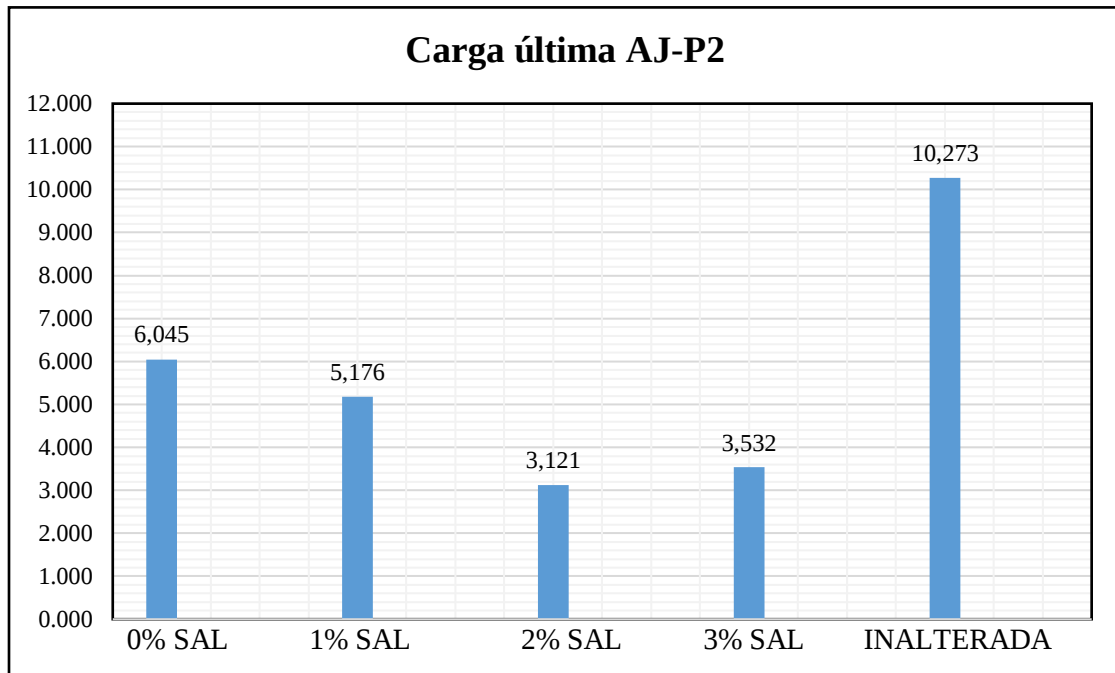
4.3 Análisis del suelo Aranjuez AJ-P2 con diferentes porcentajes de cloruro de sodio (CL).

Tabla 32: Planilla carga última, consistencia y sensibilidad del suelo

Barrios	Muestras	Porcentaje de Sal	Carga última (qu)			Cohesión (Cu)	Promedio de la Carga última	Consistencia de suelo	Sensibilidad del Suelo	
			KPas	Pas (N/cm²)	Kgf/cm²	Kgf/cm²	Kgf/cm²			
ARANJUEZ	AJ-P2	0 % SAL	425,693	425692,866	4,341	2,170	6,045	Dura	1,699	Insensible o que no se ve afectada cuando se la remoldea
	AJ-P2		334,272	334271,940	3,409	1,704				
	AJ-P2	1 % SAL	356,786	356785,979	3,638	1,819	5,176	Dura	1,985	Insensible o que no se ve afectada cuando se la remoldea
	AJ-P2		301,684	301684,043	3,076	1,538				
	AJ-P2	2 % SAL	357,278	357277,832	3,643	1,822	3,121	Muy Compacta	3,291	Moderadamente sensible
	AJ-P2		254,953	254952,955	2,600	1,300				
	AJ-P2	3 % SAL	383,640	383640,133	3,912	1,956	3,532	Muy Compacta	2,908	Moderadamente sensible
	AJ-P2		309,199	309198,752	3,153	1,576				
	AJ-P2	INALTERADA	1313,780	1313779,939	13,397	6,698	10,273	Dura		
	AJ-P2		701,179	701179,042	7,150	3,575				

4.3.1 Carga última del AJ-P2 de los diferentes porcentajes de sal e inalteradamente el suelo

Gráfica 21: Carga última de diferentes porcentajes de cloruro de sodio



Durante los ensayos de compresión no confinada, se observó que el suelo inalterado presentó una resistencia máxima de 6,045 kgf/cm², lo que indica que el suelo en su estado natural tiene una mayor capacidad de carga en comparación con el suelo compactado. Este comportamiento se debe a que, al compactar el suelo, se le agrega humedad, lo que modifica su estructura interna, provocando una pérdida de resistencia debido a la alteración de la disposición de las partículas.

Cuando el suelo es remoldeado durante el proceso de compactación, sus propiedades mecánicas se ven alteradas, lo que da como resultado una reducción de la resistencia al corte. Por esta razón, se concluye que, para evaluar la resistencia de carga última de un suelo, es preferible utilizar muestras inalteradas, ya que estas muestran una mayor capacidad de carga en comparación con las muestras compactadas.

En cuanto a los efectos de la adición de cloruro de sodio (NaCl) en las muestras compactadas, se procedió a evaluar la influencia de diferentes concentraciones de sal (0%, 1%, 2%, y 3%) en la resistencia al corte. Los resultados mostraron que, al incrementar la concentración de cloruro de sodio, la resistencia al corte disminuye progresivamente en relación con el suelo inalterado, lo que indica que la adición de NaCl no mejora las propiedades mecánicas de estos suelos. De hecho, el aumento de sal no resulta en una mejoría de la capacidad de carga y, por lo tanto, no se presenta como una alternativa viable para el mejoramiento de suelos.

Por lo tanto, los resultados sugieren que, en términos de rendimiento geotécnico, el suelo inalterado es la mejor opción para su utilización en proyectos de ingeniería civil, dado que mantiene su resistencia superior en comparación con las muestras compactadas o aquellas tratadas con cloruro de sodio.

4.3.2 Análisis de la Consistencia del AJ-P2, suelo 0% sal, 1% sal, e inalterada

El suelo presenta una consistencia dura, lo que indica que tiene una alta resistencia a la deformación. Esto significa que el suelo no se deforma fácilmente cuando se le aplica una presión moderada, lo que lo hace relativamente firme al tacto. Esta característica es típica de suelos con alta cohesión, donde las partículas están fuertemente unidas, y es un indicio de que el suelo es menos susceptible a la compresión o al cambio de forma bajo cargas externas.

La alta resistencia a la deformación de este tipo de suelo sugiere que, bajo condiciones normales de carga, se comportará de manera estable, con baja compresibilidad. Este tipo de suelo es adecuado para fundaciones superficiales y estructuras que requieren estabilidad a largo plazo, ya que presenta un buen comportamiento en términos de resistencia mecánica.

4.3.3 Análisis de la Sensibilidad del AJ-P2, suelo al 0% sal, 1% sal

En el caso del presente estudio, el suelo analizado presenta una baja sensibilidad, es decir, la relación entre la resistencia intacta y la remoldeada es cercana a 1. Esto implica que el

proceso de distribución mecánica no altera significativamente su resistencia al corte. Este comportamiento es típico de suelos estructuralmente homogéneos, con bajo contenido de arcillas sensibles y buena cohesión interna, lo cual reduce el riesgo de pérdida de resistencia súbita ante disturbios.

Desde un punto de vista geotécnico, la baja sensibilidad del suelo representa una ventaja en términos de estabilidad estructural, ya que disminuye la probabilidad de colapsos inesperados por remoldeo, especialmente durante actividades como excavaciones, cimentaciones o cargas transitorias.

4.3.4 Análisis de la Consistencia del AJ-P2, suelo al 2% sal y 3% sal

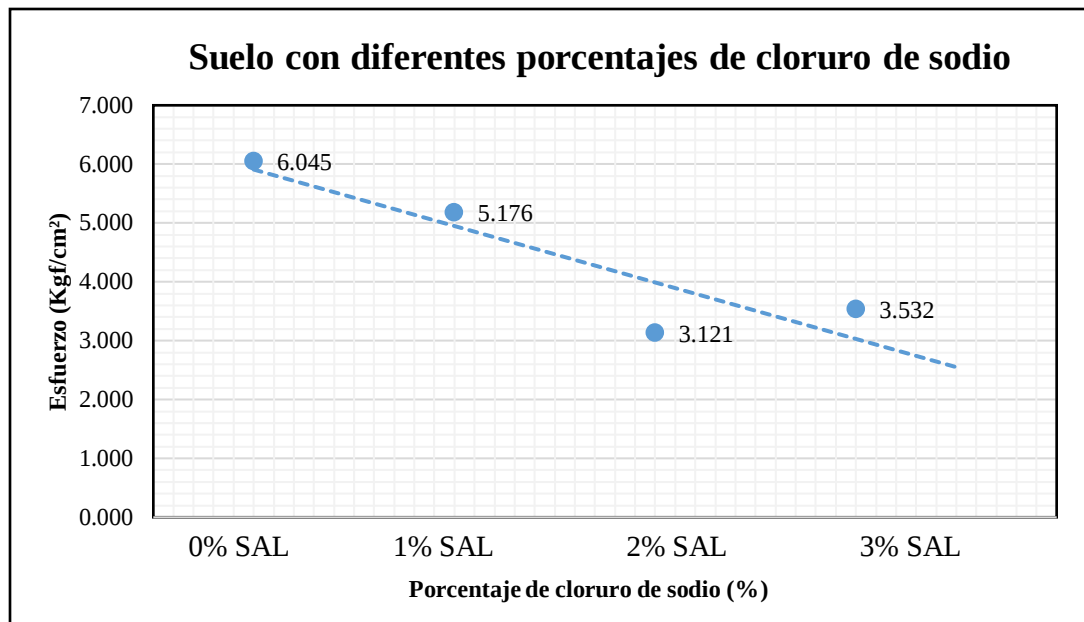
En el presente estudio, el suelo evaluado presenta una consistencia muy compacta, característica asociada a una alta densidad seca y una baja porosidad, lo cual incide directamente en sus propiedades mecánicas. La alta densidad del suelo reduce el volumen de vacíos y, por tanto, limita la deformabilidad del terreno ante la aplicación de cargas externas.

4.3.5 Análisis de la Sensibilidad del AJ-P2, suelo al 2% sal, 3% sal

El suelo analizado tiene una sensibilidad moderada, lo que significa que, aunque su resistencia al corte disminuye tras ser remoldeado, no pierde completamente su estructura interna ni su capacidad para resistir cargas mecánicas. Esta condición se evidencia en la relación entre la resistencia no drenada en estado intacto y la resistencia remoldeada.

4.3.6 Análisis del comportamiento del suelo AJ-P2, en la carga última con sus diferentes porcentajes de cloruro de sodio

Gráfica 22: Comportamiento del suelo con diferentes porcentajes de cloruro de sodio



En el presente estudio se analizó el comportamiento mecánico de un suelo clasificado como CL (arcilla de baja plasticidad), compactado y modificado con diferentes porcentajes de cloruro de sodio (NaCl), variando entre 0% y 3% en peso. Los ensayos realizados permitieron evaluar la resistencia a la carga última del material tratado, observándose una tendencia específica en la respuesta del suelo frente al contenido de sal añadida.

Los resultados obtenidos indican que el suelo sin adición de cloruro de sodio (0%) presentó el valor más alto de carga última, alcanzando los 6,045 kgf/cm², lo cual sugiere que en su estado natural presenta su máxima capacidad resistente. A medida que se incrementa el contenido de cloruro de sodio, la resistencia a la carga muestra un comportamiento no lineal. En particular, al 1% de contenido de NaCl, se observa un valor máximo relativo de 5,176 kgf/cm², después del cual la resistencia continúa disminuyendo de forma progresiva para porcentajes mayores.

Este comportamiento refleja una posible alteración de la estructura interna del suelo debido a la interacción del cloruro de sodio con las partículas finas, lo cual puede generar una modificación en las propiedades físico-químicas del sistema suelo-agua, afectando negativamente la capacidad portante conforme aumenta la concentración salina.

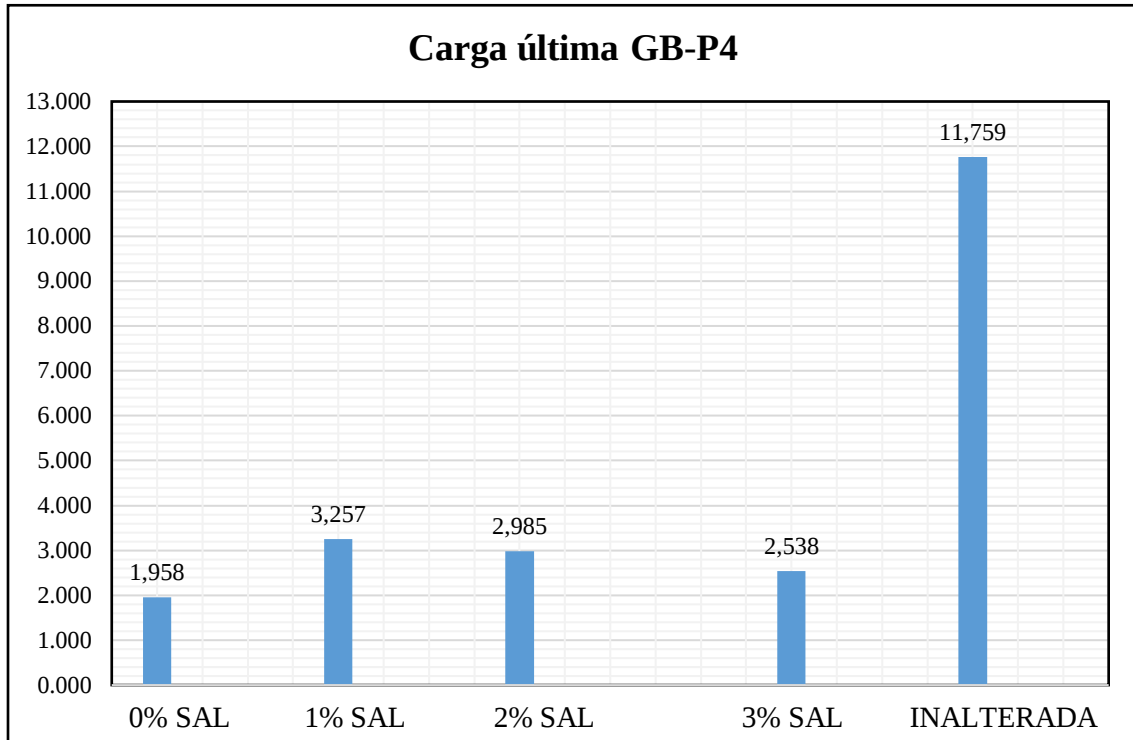
4.4 Análisis del suelo German Bush GB-P4 con diferentes porcentajes de cloruro de sodio (CL)

Tabla 33: Planilla carga última, consistencia y sensibilidad del suelo

Barrios	Muestras	Porcentaje de Sal	Carga última (qu)			Cohesión (Cu)	Promedio de la Carga última	Consistencia de suelo	Sensibilidad del Suelo	
			KPas	Pas (N/cm ²)	Kgf/cm ²	Kgf/cm ²	Kgf/cm ²			
GERMAN BUSH	GB-P4	0 % SAL	173,921	173921,074	1,773	0,887	1,958	Compacta	6,007	Sensible
	GB-P4		210,016	210015,672	2,142	1,071				
	GB-P4	1 % SAL	317,262	317262,107	3,235	1,618	3,257	Muy Compacta	3,610	Moderadamente sensible
	GB-P4		321,611	321610,783	3,280	1,640				
	GB-P4	2 % SAL	341,272	341272,341	3,480	1,740	2,985	Muy Compacta	3,940	Moderadamente sensible
	GB-P4		245,277	245276,932	2,501	1,251				
	GB-P4		291,629	291629,413	2,974	1,487				
	GB-P4	3 % SAL	263,727	263727,198	2,689	1,345	2,538	Muy Compacta	4,633	Sensible
	GB-P4		234,145	234144,647	2,388	1,194				
	GB-P4	INALTERADA	1281,473	1281473,157	13,067	6,534	11,759	Dura		
	GB-P4		1024,947	1024946,864	10,451	5,226				

4.4.1 Carga última del GB-P4 de los diferentes porcentajes de sal e inalteramente el suelo

Gráfica 23: Carga última de diferentes porcentajes de cloruro de sodio



Los ensayos de compresión no confinada permitieron comparar el comportamiento mecánico entre el suelo inalterado y el suelo compactado con diferentes porcentajes de cloruro de sodio (NaCl). Se observó que el suelo inalterado presentó una resistencia significativamente mayor, alcanzando una carga última de 11,759 kgf/cm², en comparación con el suelo compactado sin adición de sal (0%), que registró apenas 1,958 kgf/cm².

Esta diferencia notable se explica por el hecho de que, durante el proceso de compactación, el suelo es rehumedecido y remodelado, lo cual altera su estructura natural. La estructura del suelo inalterado, al mantenerse intacta, conserva una mejor distribución y contacto entre partículas, generando una mayor capacidad de resistencia frente a esfuerzos de corte. En cambio, el suelo remodelado pierde cohesión interna y presenta una reducción en su capacidad portante.

En cuanto al efecto del cloruro de sodio, al incrementar su proporción en el suelo compactado, se identificó una tendencia decreciente en la resistencia a compresión no confinada. Esto indica que la adición de NaCl no mejora las propiedades mecánicas del suelo CL; por el contrario, contribuye a una degradación progresiva de la resistencia, posiblemente debido a fenómenos de dispersión de partículas finas, alteración en las fuerzas de atracción electroquímicas, y/o aumento de la porosidad efectiva.

Por tanto, se concluye que la adición de cloruro de sodio no constituye una alternativa viable para el mejoramiento de suelos de baja plasticidad y que, para fines de diseño geotécnico, el suelo inalterado representa una mejor condición estructural siempre que su estado natural pueda ser preservado en obra.

4.4.2 Análisis de la consistencia del GB-P4, suelo 0% sal.

El análisis del suelo GB-P4 sin adición de cloruro de sodio (0%) revela que presenta una consistencia compacta, lo que implica una alta densidad relativa y una baja porosidad estructural. Esta condición indica que las partículas del suelo se encuentran estrechamente unidas, formando una matriz densa que limita la circulación de agua y aire a través de sus poros.

La estructura compacta observada confiere al suelo una mayor rigidez y resistencia mecánica, además de una menor compresibilidad, lo cual es favorable en términos de estabilidad estructural. Esta configuración también reduce la susceptibilidad al asentamiento y mejora la capacidad portante del suelo en estado seco o parcialmente saturado.

Desde una perspectiva geotécnica, un suelo con estas características puede considerarse adecuado para soportar cargas estáticas moderadas, especialmente en proyectos que no exigen una alta deformabilidad ni exposición prolongada a procesos de saturación. Sin embargo, debe tenerse en cuenta que, al ser remodelado, esta estructura puede perder parte de su resistencia, como se ha evidenciado en los análisis comparativos de sensibilidad.

4.4.3 Análisis de la Sensibilidad del GB-P4, suelo al 0% sal y 3% sal

El comportamiento del suelo GB-P4, tanto en su estado compactado sin adición de cloruro de sodio (0%) como con una concentración del 3% de sal, evidencia una alta sensibilidad, clasificándose como un suelo sensible. Este tipo de suelo se caracteriza por una drástica pérdida de resistencia al corte al ser remoldeado, llegando a adoptar un comportamiento cercano al de un fluido viscoso, especialmente bajo condiciones de carga.

La alta sensibilidad observada indica que, una vez perturbada su estructura original durante el proceso de compactación, el suelo pierde la cohesión interna y la fricción entre partículas, lo que deteriora su capacidad portante. Este efecto se intensifica con la presencia de cloruro de sodio, el cual puede favorecer la dispersión de partículas finas y alterar las interacciones electroquímicas del suelo, reduciendo aún más su resistencia.

En consecuencia, tanto el suelo sin tratamiento (0% sal) como el modificado con 3% de NaCl no son recomendables para aplicaciones donde se requiera remoldear o manipular el suelo en campo, ya que su estabilidad estructural se ve comprometida significativamente. Para proyectos de ingeniería civil, este comportamiento implica la necesidad de reforzar o estabilizar el terreno si se opta por trabajar con este tipo de material, especialmente en cimentaciones superficiales o rellenos estructurales.

4.4.4 Análisis de la Consistencia del GB-P4, suelo al 1% sal, 2% sal y 3% sal

Los resultados obtenidos del análisis del suelo GB-P4 tratado con concentraciones de 1%, 2% y 3% de cloruro de sodio (NaCl) muestran que el suelo mantiene una consistencia muy compacta en todas las proporciones analizadas. Esta condición implica una alta densidad seca y una baja porosidad, lo que a nivel geotécnico favorece un comportamiento más estable frente a esfuerzos mecánicos.

Una estructura densa y con baja porosidad reduce la capacidad del suelo para permitir la circulación de agua y aire a través de su matriz, lo que contribuye a una mayor resistencia al corte. Al mismo tiempo, la menor compresibilidad asociada a esta configuración

minimiza la deformación del suelo bajo carga, haciendo que su desempeño estructural sea más predecible y controlable.

Sin embargo, es importante considerar que, a pesar de su consistencia favorable, la introducción de cloruro de sodio puede alterar las propiedades electroquímicas del suelo a nivel microscópico. En este caso, aunque el suelo conserva su compacidad física, los valores de resistencia obtenidos en los ensayos muestran una tendencia decreciente en la carga última, lo que sugiere que la adición de sal genera efectos negativos en la cohesión o en la estructura interna del suelo, particularmente a concentraciones más altas.

4.4.5 Análisis de la Sensibilidad del GB-P4, suelo al 1% sal y 2% sal

Se evaluó la sensibilidad del suelo GB-P4 modificado con 1% y 2% de cloruro de sodio (NaCl), mediante ensayos de compresión no confinada. Los resultados obtenidos muestran que el suelo presenta un comportamiento moderadamente sensible, es decir, su resistencia al corte disminuye tras ser remoldeado, pero no llega a perder completamente su estructura interna ni su capacidad de carga.

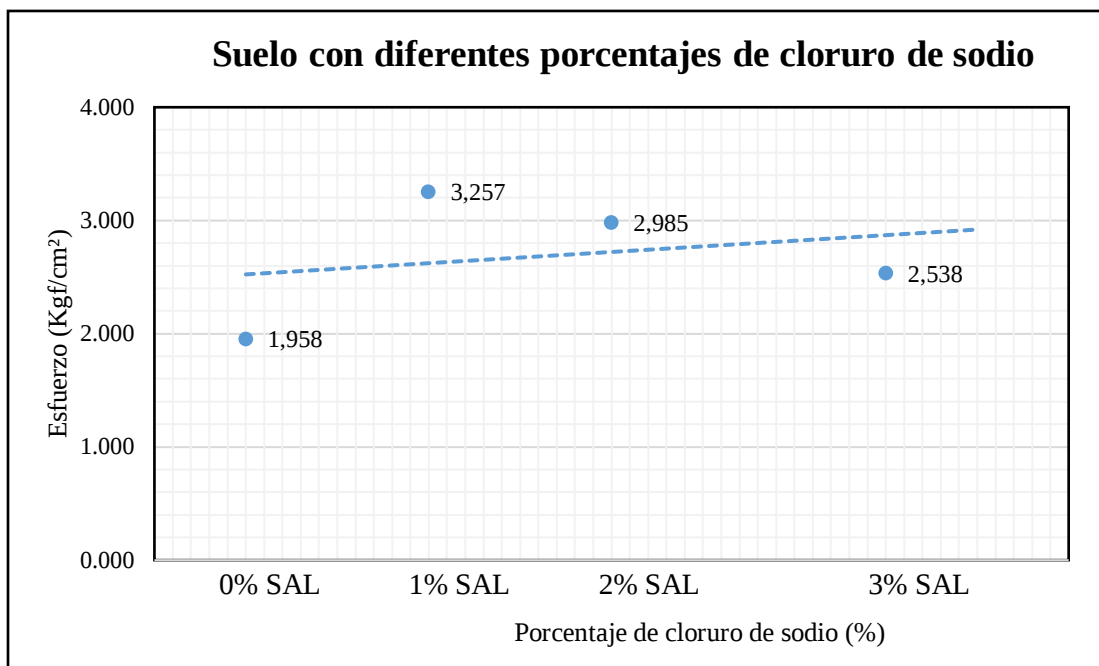
Esta respuesta indica que, a pesar de la alteración de la estructura original del suelo durante el proceso de remoldeado y compactación, todavía se conserva cierta integridad del esqueleto granular, lo cual permite que el suelo siga transmitiendo esfuerzos, aunque con una eficiencia reducida respecto al estado inalterado. A concentraciones de 1% y 2% de NaCl, la resistencia a la carga última mostró una tendencia decreciente, pero sin evidenciar una transición a un comportamiento plástico extremo o fluido viscoso.

Este nivel de sensibilidad debe ser considerado cuidadosamente en el diseño de obras geotécnicas, ya que sugiere que, aunque el suelo pueda mantener una capacidad portante aceptable bajo ciertas condiciones, su estabilidad podría verse comprometida en situaciones donde se presenten disturbios severos, cargas dinámicas o saturación prolongada.

Por tanto, se recomienda que, para aplicaciones estructurales críticas, se tomen medidas adicionales de estabilización o confinamiento si el suelo va a ser remodelado o perturbado durante la ejecución de la obra.

4.4.6 Análisis del comportamiento del suelo GB-P4, en la carga última con sus diferentes porcentajes de cloruro de sodio

Gráfica 24: Comportamiento del suelo con diferentes porcentajes de cloruro de sodio



En la gráfica 24 se presenta el análisis del comportamiento del suelo CL compactado con diferentes porcentajes de cloruro de sodio, variando entre el 0% y el 3%. El comportamiento observado muestra una tendencia general que permite identificar el punto de carga última máxima, el cual ocurre para el 1% de cloruro de sodio, con un valor máximo de carga última de 3,257 kgf/cm². Este valor representa la mayor resistencia alcanzada por el suelo en los ensayos realizados. A partir de este porcentaje (1%), se observa un comportamiento oscilatorio en los valores de carga última a medida que se incrementa el porcentaje de cloruro de sodio, lo que sugiere que concentraciones mayores no continúan aumentando la resistencia de manera lineal, sino que fluctúan. Esto indica que, después de cierto punto, la resistencia del suelo comienza a estabilizarse o incluso a

disminuir, lo cual podría deberse a factores como la saturación de los iones de cloruro o cambios en la estructura interna del suelo.

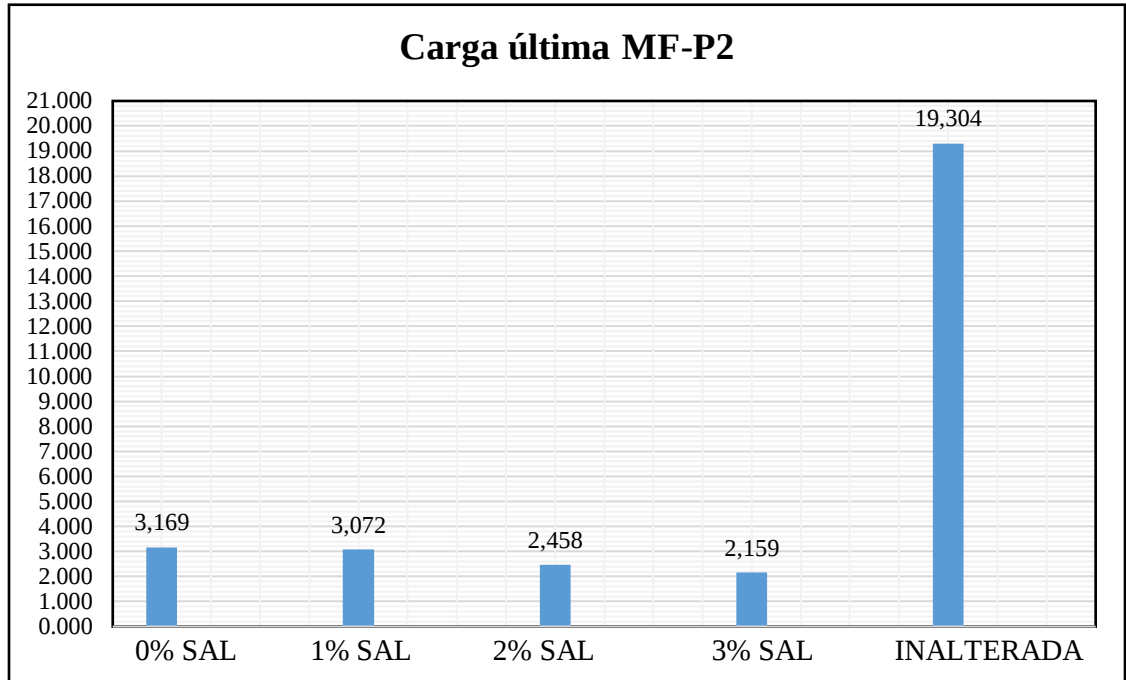
4.5 Análisis del suelo Miraflores MF-P2 con diferentes porcentajes de cloruro de sodio (CL)

Tabla 34: Planilla carga última, consistencia y sensibilidad del suelo

Barrios	Muestras	Porcentaje de Sal	Carga última (qu)			Cohesión (Cu)	Promedio de la Carga última	Consistencia de suelo	Sensibilidad del Suelo	
			Kpas	Pas (N/cm²)	Kgf/cm²	Kgf/cm²	Kgf/cm²			
MIRAFLORES	MF-P2	0 % SAL	284,323	284323,280	2,899	1,450	3,169	Muy Compacta	6,092	Sensible
	MF-P2		337,131	337130,858	3,438	1,719				
	MF-P2	1 % SAL	346,433	346432,811	3,533	1,766	3,072	Muy Compacta	6,284	Sensible
	MF-P2		256,078	256077,553	2,611	1,306				
	MF-P2	2 % SAL	241,305	241305,457	2,461	1,230	2,458	Muy Compacta	7,854	Sensible
	MF-P2		240,756	240755,640	2,455	1,228				
	MF-P2	3 % SAL	178,172	178172,359	1,817	0,908	2,159	Muy Compacta	8,939	Muy Sensible
	MF-P2		245,378	245377,871	2,502	1,251				
	MF-P2	INALTERADA	2060,105	2060104,609	21,007	10,504	19,304	Dura		
	MF-P2		1726,035	1726034,613	17,601	8,800				

4.5.1 Carga última del MF-P2 de los diferentes porcentajes de sal e inalteramente el suelo

Gráfica 25: Carga última de diferentes porcentajes de cloruro de sodio



A partir de los ensayos de compresión no confinada, se evaluó el comportamiento mecánico de un suelo de baja plasticidad (clasificación CL) en estado inalterado y compactado, tanto sin adición de sal (0%) como con concentraciones de 1%, 2% y 3% de cloruro de sodio (NaCl). La comparación se centró en la resistencia al corte, medida a través de la carga última alcanzada por cada muestra.

Los resultados evidencian que el suelo en estado natural (inalterado) presentó la mayor resistencia, alcanzando una carga última de 19,304 kgf/cm². En contraste, el suelo compactado sin adición de sal (0%) mostró una disminución significativa en su resistencia, alcanzando solo 3,169 kgf/cm². Esta pérdida se atribuye al proceso de remoldeo y adición de humedad inherente al procedimiento de compactación, el cual altera la estructura original del suelo y reduce su capacidad portante.

Asimismo, al incorporar cloruro de sodio en diferentes proporciones al suelo compactado, se observó una tendencia descendente en la resistencia al corte a medida que aumentaba la concentración de sal. Contrario a lo que se esperaba, la adición de NaCl no generó una mejora en la resistencia respecto al suelo inalterado; por el contrario, los valores de carga última continuaron disminuyendo, lo que demuestra que este tipo de tratamiento no representa una alternativa eficaz de mejoramiento de suelo en este caso específico.

Este análisis permite concluir que, para aplicaciones geotécnicas que exigen una alta capacidad portante, el suelo inalterado conserva mejores propiedades mecánicas en comparación con su versión compactada o tratada con cloruro de sodio. Por tanto, su preservación y uso en estado natural representa una alternativa más confiable dentro del ámbito del diseño geotécnico, siempre que las condiciones del proyecto lo permitan.

4.5.2 Análisis de la consistencia del MF-P2, suelo 0% sal, 1% sal, 2% sal y 3% sal

Los resultados obtenidos del análisis del suelo MF-P2, tratado con diferentes concentraciones de cloruro de sodio (0%, 1%, 2% y 3%), indican que el material presenta una consistencia muy compacta en todas las muestras analizadas. Esta condición geotécnica se caracteriza por una alta densidad relativa y una baja porosidad, lo cual sugiere que las partículas del suelo están densamente empaquetadas, con una disposición interna que deja muy pocos vacíos entre ellas.

Esta estructura compacta favorece una mayor resistencia al corte, ya que el contacto entre las partículas es más efectivo, aumentando la fricción interna. Además, la menor presencia de vacíos disminuye la compresibilidad del suelo, lo que resulta ventajoso en términos de estabilidad volumétrica frente a cargas aplicadas.

Cabe destacar que, aunque la compactación inicial del suelo induce una consistencia favorable, la influencia del cloruro de sodio sobre la resistencia mecánica debe considerarse de forma paralela. En este caso, la sal no modifica significativamente la condición física de empaquetamiento de las partículas, pero puede influir en el

comportamiento químico y estructural del suelo a nivel microscópico, como se analizó en secciones anteriores.

4.5.3 Análisis de la sensibilidad del MF-P2, suelo al 0% sal, 1% sal y 2% sal

El análisis de la sensibilidad del suelo MF-P2, tratado con concentraciones de cloruro de sodio del 0%, 1% y 2%, indica que se trata de un suelo con sensibilidad alta o suelo sensible. Este tipo de comportamiento se manifiesta cuando el suelo, tras ser remoldeado o perturbado, pierde de forma significativa su resistencia al corte y adquiere un comportamiento similar al de un fluido viscoso, incapaz de mantener su estructura original bajo carga.

En estado inalterado o compactado inicialmente, el suelo puede presentar una resistencia aceptable. Sin embargo, al ser sometido a un proceso de remoldeo (como ocurre durante la compactación o por efectos constructivos en campo), su estructura interna se ve alterada, lo que resulta en una drástica reducción de su capacidad portante. Este fenómeno es característico de suelos sensibles, en los que la cohesión aparente está asociada principalmente a una estructura estable, que colapsa cuando se rompe el arreglo original de partículas.

La incorporación de cloruro de sodio no mejora este comportamiento; por el contrario, puede acentuar la sensibilidad del suelo al interferir en las interacciones electroquímicas entre las partículas finas, promoviendo su dispersión y reduciendo la fricción interna. Esto se traduce en una menor resistencia post-remoldeo y, por tanto, en un mayor riesgo de inestabilidad si el suelo es perturbado durante o después del proceso constructivo.

4.5.4 Análisis de la Consistencia del MF-P2, suelo inalterado

El suelo MF-P2 en su estado inalterado presenta una consistencia dura, lo que indica una estructura natural densa, con una fuerte cohesión entre partículas. Desde el punto de vista geotécnico, esta condición implica que el suelo ofrece una alta resistencia a la deformación cuando se aplica una presión moderada, pudiendo romperse únicamente con cierta

dificultad mediante la presión entre el pulgar y el índice, lo que confirma su comportamiento cohesivo consolidado.

Esta consistencia es propia de suelos que no han sido remoldeado ni alterados por procesos de compactación o adición de humedad, por lo que mantienen intacta su estructura natural, la cual aporta una resistencia mecánica superior en comparación con suelos modificados. Este tipo de comportamiento es especialmente favorable en aplicaciones geotécnicas donde se requiere un buen soporte de carga y baja deformabilidad.

La dureza observada también sugiere que el suelo posee una baja compresibilidad y una alta resistencia al corte no drenado, lo que lo convierte en un material geotécnicamente confiable, siempre y cuando se mantenga su estado original durante la ejecución de obras.

4.5.5 Análisis de la Sensibilidad del MF-P2, suelo al 3% sal

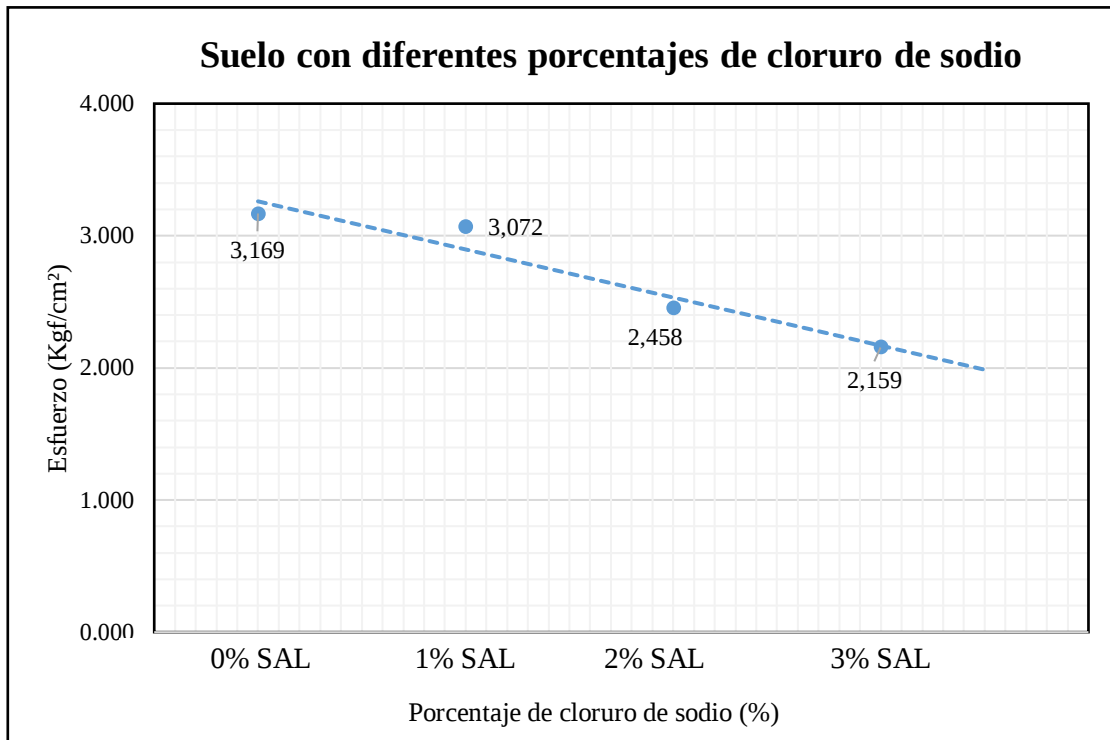
El análisis de sensibilidad del suelo MF-P2 con una concentración del 3% de cloruro de sodio revela un comportamiento correspondiente a un suelo muy sensible. Esta clasificación se basa en la observación de que la resistencia al corte no drenado en estado inalterado es significativamente mayor que la resistencia remoldeada, indicando una pérdida casi total de la estructura del suelo una vez que es perturbado.

Este tipo de suelo, al ser remoldeado o sometido a cambios estructurales producto de esfuerzos mecánicos o procesos constructivos, pierde cohesión interna y adopta un comportamiento similar al de un fluido viscoso, con muy baja capacidad para soportar cargas. La adición del 3% de cloruro de sodio parece intensificar este efecto, posiblemente debido a la alteración de las fuerzas interarticulares (principalmente las de tipo electroquímico) que estabilizan las arcillas y limos en su estado natural.

Desde el punto de vista geotécnico, esta sensibilidad extrema representa un riesgo importante, ya que implica que el suelo puede experimentar fallas súbitas al ser intervenido, afectando la estabilidad de cimentaciones superficiales, terraplenes o cualquier estructura apoyada sobre este material.

4.5.6 Análisis del comportamiento del suelo MF-P2, en la carga última con sus diferentes porcentajes de cloruro de sodio

Gráfica 26: Comportamiento del suelo con diferentes porcentajes de cloruro de sodio



La Gráfica 26 muestra el comportamiento del suelo MF-P2, clasificado como CL (arcilla de baja plasticidad), compactado con diferentes porcentajes de cloruro de sodio (NaCl) en concentraciones de 0%, 1%, 2% y 3%. A partir del análisis de los resultados experimentales se observa una tendencia no lineal en la resistencia del suelo frente a la carga última obtenida a través del ensayo de compresión no confinada.

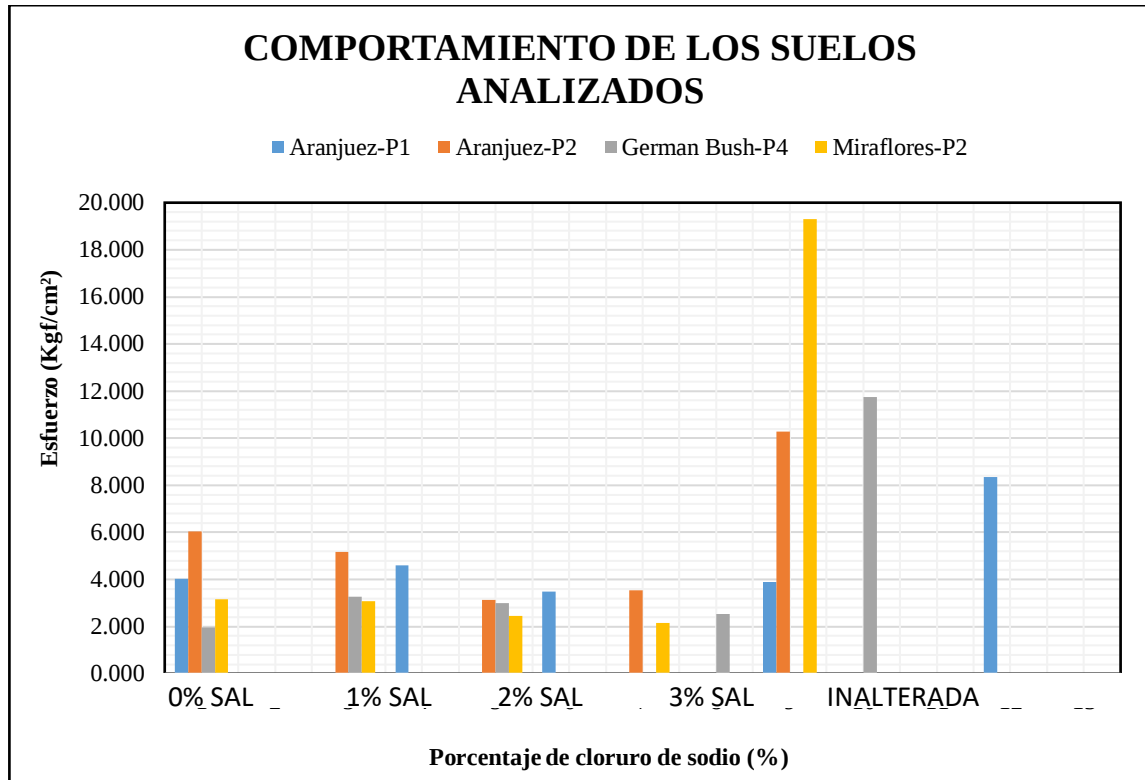
El valor más alto de carga última se presenta en la muestra con 0% de sal, alcanzando una resistencia de 3,169 kgf/cm², lo que indica que el suelo compactado sin aditivos de sal tiene el mejor desempeño mecánico dentro del grupo de muestras tratadas. Al incrementarse la concentración de NaCl al 1%, se obtiene una ligera disminución en la resistencia, con una carga última de 3,072 kgf/cm², lo cual aún representa un valor elevado y cercano al máximo.

Sin embargo, a medida que el porcentaje de cloruro de sodio sigue aumentando, se observa una reducción progresiva en la resistencia del suelo. Esta disminución puede estar relacionada con los efectos del NaCl en la estructura del suelo, específicamente en la modificación de las interacciones físico-químicas entre las partículas finas, afectando la cohesión y, por ende, la capacidad portante del material.

En resumen, el uso de cloruro de sodio como aditivo no genera una mejora significativa en la resistencia del suelo MF-P2, Por el contrario, su adición progresiva tiende a disminuir la carga última. Por lo tanto, desde el punto de vista geotécnico, el uso de NaCl no representa una alternativa eficaz para el mejoramiento de este tipo de suelo, siendo más adecuado emplearlo en su estado compactado natural (0% sal), donde se alcanzan los valores óptimos de resistencia.

4.6 Análisis del comportamiento del suelo estudiado con diferentes porcentajes de cloruro de sodio VS suelo inalterado

Gráfica 27: Comportamiento del suelo con diferentes porcentajes de cloruro de sodio VS suelo inalterado



La Gráfica 27 muestra el comportamiento comparativo entre las muestras de suelo tratadas con cloruro de sodio (NaCl) en diferentes porcentajes (0%–3%) y el suelo en su estado inalterado. A partir de los resultados obtenidos, se evidencia que la adición de sal no mejora las propiedades mecánicas del suelo, particularmente en lo que respecta a la resistencia a la compresión no confinada.

El suelo en estado inalterado, sin procesos de remoldeo ni adición de humedad o aditivos, presentó consistentemente los valores más altos de resistencia, superando a todas las muestras compactadas con NaCl. Esto demuestra que la estructura natural del suelo, especialmente en suelos de tipo arcilloso como los CL y CH, posee una cohesión y compacidad superiores a las logradas mediante la intervención con sales.

El comportamiento de las muestras tratadas con cloruro de sodio indica un efecto adverso: el suelo se vuelve más dúctil, más húmedo, con menor densidad y menor capacidad portante. Desde un enfoque geotécnico, estas características son desfavorables, ya que comprometen la estabilidad y resistencia del terreno frente a cargas estructurales. Además, el uso de sal puede inducir efectos colaterales como la dispersión de partículas finas y la alteración del equilibrio químico del suelo, lo que puede derivar en una mayor deformabilidad y pérdida de integridad estructural con el tiempo.

En conclusión, el uso de cloruro de sodio no representa una solución efectiva para el mejoramiento de suelos arcillosos. Independientemente del tipo de suelo (CL o CH), la presencia de sal no contribuye a una mejora en las propiedades geotécnicas fundamentales, como la resistencia al corte o la compresibilidad. Por tanto, se desaconseja su utilización como técnica de estabilización de suelos en proyectos de infraestructura civil.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y

RECOMENDACIONES

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

- Se realizó la delimitación del área de estudio en el Distrito 12, mediante la exploración de 30 puntos de muestreo. De esta evaluación inicial, se seleccionaron cuatro suelos de manera aleatoria para llevar a cabo el análisis geotécnico detallado, cumpliendo con los criterios de representatividad del área.
- Se procedió a la caracterización geotécnica de los suelos arcillosos pertenecientes al área de estudio, mediante ensayos de laboratorio que permitieron clasificar los materiales, identificando tipos CL y CH, de acuerdo con el sistema unificado de clasificación de suelos (SUCS).
- El estudio incluyó la evaluación de la resistencia al corte no drenado a través del ensayo de compresión no confinada, tanto en muestras compactadas con diferentes porcentajes de cloruro de sodio (NaCl), como en muestras inalteradas. Estas últimas se mantuvieron sin remoldeo ni adición de sales para conservar su estructura natural.
- Se determinó que la adición de cloruro de sodio no mejora de manera consistente la resistencia del suelo, ya que, en la mayoría de los casos, los valores de carga última obtenidos fueron inferiores a los de las muestras inalteradas. Sin embargo, se observaron mejoras puntuales al 1% de concentración de sal en suelos remoldeado tipo CH (Aranjuez-P1) y CL (Germán Busch-P4). Por otro lado, los valores máximos de resistencia en otros casos se registraron en las muestras con 0% de sal (Aranjuez-P2 y Miraflores-P2).
- Se identificó que la presencia de cloruro de sodio influye en la interacción del suelo con el agua, acelerando el proceso de evaporación. A mayor contenido de sal, mayor fue la velocidad de pérdida de humedad, lo que afecta el comportamiento de compactación y la cohesión entre partículas. Esto sugiere que

el NaCl modifica el comportamiento higroscópico del suelo sin proporcionar beneficios geotécnicos significativos.

- El análisis conjunto de todas las muestras demuestra que el cloruro de sodio no es un aditivo adecuado para el mejoramiento de suelos arcillosos, ya sean de baja (CL) o alta plasticidad (CH). Su uso no aporta beneficios geotécnicos relevantes, y por el contrario, puede debilitar la resistencia mecánica del suelo.
- Se determinó que la preservación del suelo en su estado inalterado, o la aplicación de alternativas de estabilización más efectivas (como cal, cemento, geopolímeros u otros productos estabilizantes especializados), representa una opción más segura y técnicamente adecuada para obras de infraestructura que requieran alta capacidad portante y estabilidad estructural duradera.
- La investigación promueve un enfoque más responsable en el uso de aditivos químicos, al evidenciar que la intervención del suelo con NaCl puede inducir efectos colaterales como mayor humedad, dispersión de partículas finas o disminución de la capacidad portante. Estos factores no solo afectan la durabilidad de las obras, sino también el equilibrio ambiental del suelo.
- En suma, el valor de esta investigación radica en elevar los estándares técnicos en la ingeniería geotécnica, fortalecer la planificación preventiva de obras civiles y fomentar el uso de soluciones más eficientes, sostenibles y seguras en contextos donde la salinidad del suelo es un factor condicionante. Todo ello representa un beneficio directo para la sociedad al garantizar infraestructuras más seguras, duraderas y económicamente viables.

5.2 Recomendaciones

- Se recomienda realizar estudios de mineralogía del suelo en la ciudad de Tarija, con el fin de identificar los minerales predominantes en la región. Esta información permitirá seleccionar aditivos más adecuados y eficaces para futuras investigaciones de estabilización y mejoramiento de suelos, considerando la interacción química entre minerales y agentes estabilizantes.
- A partir de los resultados obtenidos, se desaconseja el uso de cloruro de sodio (NaCl) como aditivo en suelos arcillosos dentro del ámbito geotécnico, ya que su aplicación no ha demostrado mejoras sustanciales en la resistencia mecánica ni en las propiedades deseables para obras de infraestructura.
- Para obtener resultados confiables en los ensayos de compresión no confinada, se recomienda mayor precisión en el proceso de extracción y tallado de las muestras inalteradas, garantizando que cumplan con las dimensiones establecidas (diámetro y altura) según la norma correspondiente. Esto asegurará una adecuada colocación en el equipo y evitará errores por deformaciones o imperfecciones en la muestra.
- Si se opta por estabilizar un suelo CH remoldeado, se puede evaluar el uso de NaCl en una concentración controlada del 1%, ya que es la única proporción que mostró una ligera mejora sin efectos adversos significativos. No obstante, se recomienda validar este comportamiento con pruebas de durabilidad y a largo plazo.
- Se sugiere complementar este estudio con otros ensayos geotécnicos como triaxial no consolidado, permeabilidad o consolidación, para obtener una visión más completa del comportamiento del suelo tratado con NaCl.
- Dado que el NaCl acelera la evaporación y modifica el comportamiento higroscópico, se recomienda establecer procedimientos estrictos de control de humedad y densidad durante la ejecución de obras para mantener la estabilidad del suelo tratado.
- Desaconsejar el uso del cloruro de sodio como estabilizante químico en suelos arcillosos, debido a su efecto negativo comprobado en la resistencia mecánica y estabilidad del suelo, priorizando alternativas de mejoramiento reconocidas y avaladas por normativas geotécnicas.

- Fomentar la capacitación de profesionales en ingeniería sobre los efectos adversos de la salinidad en suelos y la importancia de seleccionar técnicas de estabilización basadas en evidencia técnica y normativa.
- En obras que impliquen excavaciones, rellenos o compactaciones, es crucial tener en cuenta la alta sensibilidad del suelo. En estos casos, se deben tomar medidas de control, como confinamiento lateral, reducción de carga transitoria, o incluso reemplazo del material si no se puede estabilizar adecuadamente.