

# CAPÍTULO I

## INTRODUCCIÓN

### 1.1. Antecedentes

Los suelos arcillosos de alta compresibilidad, debido a su baja capacidad de soporte y mala calidad no siempre cumplen con los requerimientos necesarios para ser empleados en proyectos de pavimentación.

La duración y el funcionamiento de un proyecto dependen la mayor parte de la estructura de sus suelos de fundación.

Las carreteras que se construyen con este tipo de suelo que presentan materiales inestables, presentan un elevado costo por su diseño demandan mayores espesores de pavimento. Luego su vida disminuye por problemas de hundimientos o asentamientos.

En la ingeniería vial este tipo de arcillas presentan un problema técnico y económico que necesita ser mitigado, por lo que desde hace un buen tiempo se vienen investigando nuevos materiales para ser usados como aditivos en el mejoramiento de este tipo de suelos arcillosos, de tal forma pueda mejorar la calidad de la cimentación de la estructura de la carretera y así puedan ser empleados en diferentes procesos constructivos. Estos nuevos materiales deben permitir incrementar la resistencia de los suelos de subrasante en la construcción, mejorar la calidad, permitir un ahorro económico y cumplir con las especificaciones técnicas.

Una alternativa del aditivo que se usa en este proyecto son las cenizas de carbón que son residuos generados por la fabricación de cerámicas, este método se aplica para que se evite o aminore la contaminación en nuestro medio.

La investigación en curso pretende analizar el cambio volumétrico dado por la expansividad que se genera al incrementar las cenizas de carbón en dos tipos de suelos mediante ensayos de laboratorio como el consolidómetro y analizar los resultados si son favorables o no adicionando cenizas de carbón.

## 1.2. Referencias a trabajos realizados

- Del artículo científico “Evaluación de aditivos usados en el tratamiento de arcillas expansivas” se concluye:  
Una concentración del 25% de cenizas en el suelo puede resultar muy beneficiosa, modificando directamente su estructura debido a que sus partículas son altamente atraídas entre sí, formando una masa compacta, reduciendo los espacios vacíos y floculando los porcentajes de arcillas del suelo reduciendo el límite líquido y el índice plástico del suelo.
- Del artículo científico “Caracterización de un material compuesto por suelo arenoso, ceniza de cáscara de arroz y cal potencialmente útil para su uso en pavimentación” se concluye:  
En suelos arenosos se logra un aumento considerable de CBR de la mezcla del suelo con 20% de cenizas y 10% de cal, con 28 días de cura con respecto al suelo natural, permitiendo afirmar que el material así producido podría ser empleado como capa de sub- base de pavimentos.
- De la tesis “Estabilización de suelos arcillosos con cenizas de carbón para su uso como subrasante mejorada y/o subbase de pavimentos” se concluye:  
La mezcla de ceniza volante con el suelo arcilloso presenta un mejor comportamiento que el suelo puro, para su empleo como capa de subbase y subrasante mejorada de pavimentos, examinado factores como tiempo de curado, tiempo de compactación contenido de agua que influyen directamente en el comportamiento de la mezcla final.

## 1.3. Justificación

Las cenizas de carbón son un derivado de la quema de fabricación de ladrillos las cuales se producen en grandes cantidades donde se podría decir que solo un 20% se reutiliza y el restante se depositan en vertederos generando contaminación.

Para tratar de reducir ese impacto que generan dichas cenizas se optó por el uso de este material ya que es de fácil obtención bajo costo, fácil traslado y listo para ser aplicado.

Las cenizas están compuestas básicamente por silicatos aluminios, cal libre y algunos óxidos que permite una reacción puzolánica con el suelo reduciendo el índice de expansión y mejorando la capacidad de soporte.

Se pretende que este trabajo sea una iniciativa para seguir analizando a mayor profundidad los usos de las cenizas de carbón y contribuir con posteriores estudios.

El mal manejo de las cenizas carbón genera una gran contaminación del agua, del suelo es por eso que se opta por aprovechar productos secundarios como lo son estas que constituyen productos de desecho que se ve orientado en la reducción de la contaminación del medio ambiente.

Es por eso que las cenizas de carbón son una alternativa más para reducir ese impacto, las cuales pueden ser aprovechadas en diferentes campos de la ingeniería además que es un material de bajo costo fácil obtención.

En la ingeniería civil es importante tener en cuenta que toda obra se ejecute de manera eficiente y eficaz, por ello se busca economizar los costos de construcción de cualquier infraestructura que se requiera. es por eso que se busca nuevas alternativas que permitan dar solución al mejoramiento de este tipo de suelos sin tener que recurrir en costos elevados y aprovechando estos residuos y ser generosos con el medio ambiente.

La elección del aditivo cenizas de carbón es una opción económica ya que el costo de obtención del mismo es nulo, y el único costo sería de transporte hacia el lugar de aplicación y además que no es de gran dificultad su manipulación y traslado, de esta podríamos aplicar esta alternativa a alguna obra vial, donde se requiera que la subrasante requiera una disminución en su expansión.

### **1.3.1. Aporte académico**

El presente trabajo se basa en el ensayo de consolidación analizando la expansión según la norma ASTM 2435, AASHTO T216, entonces lo que se pretende con esta investigación es dar a conocer que se puede realizar el ensayo de una muestra alterada, es decir suelo más cenizas de carbón u otro aditivo y así poder encontrar una alternativa para la reducción de la expansión en suelos arcillosos de alta compresibilidad y la

importancia del reciclado de estos materiales y dar a conocer si las cenizas de carbón tienen efectos positivos en cuanto a expansión en los suelos arcillosos de alta compresibilidad y así poder ser aplicado en nuestra rama de la ingeniería civil.

#### **1.4. Planteamiento del problema**

##### **1.4.1. Situación problemática**

Las arcillas expansivas son aquellas que conforman los suelos arcillosos, donde el tamaño de las partículas es inferior a 2 micras, y se caracterizan por la capacidad que de expansión (aumento de volumen) cuando absorben agua o retracción (disminución de volumen) cuando baja la humedad.

Una concentración de 25% de cenizas en el suelo puede resultar muy beneficiosa, afectando la granulometría, floculando los porcentajes de arcillas del suelo y reduciendo el límite líquido y el índice plástico del suelo.

Los suelos arcillosos, debido a su baja capacidad de soporte y mala calidad no siempre cumplen con los requerimientos necesarios para ser empleados en proyecto de pavimentación y no cumple con las condiciones óptimas requeridas para su uso lo cual tiene una incidencia negativa en la construcción de obras civiles debido a que la arcilla sufre cambios morfológicos al estar en contacto con el agua.

Las carreteras que se construyen sobre suelo de baja capacidad de soporte presentan un elevado costo por su diseño demanda mayores espesores de pavimento. Luego su vida disminuye por problemas de hundimientos o asentamientos.

Una alternativa de solución es mejorar las características mecánicas del material adicionando cenizas de carbón.

Las cenizas de carbón son granos finos compuestos básicamente por silicatos, aluminios, cal libre y algunos óxidos que permiten una reacción puzolánica con el suelo arcilloso que al igual que otras sustancias reduce el índice de expansión.

##### **1.4.2. Delimitación temporal**

Esta investigación se realiza en tiempo presente por qué se quiere analizar la incidencia que tienen las cenizas en suelos arcillosos y evidenciar que ocasiona en dichos suelos

respecto al potencial de expansión, cuales fuesen sus efectos ya sean positivos, negativos o nulos.

#### **1.4.3. Delimitación espacial**

Las muestras de suelo arcilloso serán obtenidas de la ciudad de Tarija de los barrios Juan Nicolai y San Blas, que son unos de los pocos bancos de muestra de arcilla de alta compresibilidad y luego de ser extraídas procederán a ser trasladadas al laboratorio de Mecánica de Suelos de la Universidad Autónoma Juan Misael Saracho para los ensayos que correspondan.

#### **1.4.4. Formulación del problema**

¿Cuál es la incidencia que tiene la ceniza de carbón en la expansión de arcillas de alta compresibilidad?

### **1.5. Objetivos**

#### **1.5.1. Objetivo general**

Analizar la incidencia que tiene la ceniza de carbón en la expansión de suelos arcillosos de alta compresibilidad, mediante ensayos de expansión en el consolidómetro; de tal manera, se pueda reducir sus efectos en la construcción de obras civiles.

#### **1.5.2. Objetivos específicos**

- Estudiar las características de los suelos arcillosos de alta compresibilidad.
- Obtener las propiedades de expansión de suelos arcillosos.
- Analizar el ensayo de expansión en consolidómetro.
- Describir los efectos de la expansión en la construcción de suelos arcillosos.

### **1.6. Hipótesis**

#### **1.6.1. Identificación de variables**

“La adición de ceniza de carbón a una arcilla de alta compresibilidad disminuye su potencial de expansión”

- **Variable independiente**

Porcentaje de cenizas de carbón.

- **Variable dependiente**

El potencial de expansión.

### 1.6.2. Conceptualización y operacionabilidad de variables

**Tabla 1.** Conceptualización de variable independiente.

<b>Variable Independiente</b>	<b>Concepto</b>	<b>Dimensión</b>	<b>Indicador</b>	<b>Valor/Acción</b>
Cantidad de cenizas de carbón	Diferentes cantidades de cenizas de carbón que se adiciona en diferentes porcentajes	Masa de suelo	Gramos (gr)	Preparación Previa de la muestra
		Cenizas de carbón	Porcentaje (%)	Porcentajes de adición 10,15,20,25 y 30 %
		Mezcla de suelo-cenizas de carbón	Gramos (gr)	Realizada por separado en función a los porcentajes dados.

**Fuente:** Elaboración propia.

**Tabla 2.** Conceptualización de variable dependiente.

<b>Variable Independiente</b>	<b>Concepto</b>	<b>Dimensión</b>	<b>Indicador</b>	<b>Valor/Acción</b>
El potencial de expansión	Cambio de volumen que sufre el suelo por la presencia de agua	Estabilidad volumétrica	Porcentaje (%)	Lecturas realizadas en el consolidómetro

**Fuente:** Elaboración propia.

### **1.7. Alcance de la investigación**

En esta investigación se tiene como única variable manipulable a las cenizas de carbón expresado en porcentaje los cuales fueron dados por el investigador y una variable dependiente (potencial de expansión).

Esta variable dependiente (potencial de expansión), que motivada por la variable independiente (ceniza de carbón) cambiar su valor en tal sentido que se trata de una investigación con alcance “causal/explicativo”, con diseño experimental en la categoría cuasiexperimento.

Para cumplir con los objetivos propuestos en esta investigación se evalúa los suelos de alta compresibilidad los cuales serán sometidos a ensayos de caracterización y de expansividad únicamente en el ensayo de consolidación, en estado natural y combinado con las cenizas de carbón y obtener los resultados y analizar la incidencia que tiene dicho aditivo en la expansión de estos suelos.

## CAPÍTULO II

### SUELOS DE ALTA COMPRESIBILIDAD Y CENIZAS DE CARBÓN

#### 2.1. Carbón vegetal

Es el resultado de la quema de la madera, creándose una combustión sin oxígeno, solo madera expuesta a altas temperaturas durante un tiempo establecido. Esta reacción es llamada Pirolisis. En Bolivia, el uso de estos dendrocombustibles se usa principalmente para cocción de alimentos a nivel comercial y doméstico.

La madera consiste de tres componentes principales: celulosa, lignina y agua. La celulosa, la lignina y algunas otras materias están fuertemente ligadas entre sí y constituyen el material denominado madera. *(Consultation: mayo 24, 2021)*

El carbón vegetal en geología económica se considera un recurso que proviene de materia naturales pero que se fabrica con la intervención del ser humano. Básicamente, son trozos de madera que se han colocado dentro de un “recipiente” en un ambiente con bajo porcentaje de oxígeno y que se calienta a más de 500°C, con el objetivo de crear un tipo de carbón muy similar al carbón bituminoso.

Por lo tanto, el carbón vegetal son restos de madera que se han calentado y se les ha eliminado todos sus componentes volátiles como la humedad, el agua, el alquitrán y el metano y gracias a esto se ha potenciado su poder calorífico al aumentar su porcentaje de carbono, y como resultado se obtiene un “tipo de carbón puro artificial”.

El carbón es conocido prácticamente desde la aparición del hombre, en las formas de carbón vegetal y negro de humo. Los egipcios preparaban carbón de leña con un método similar al de hoy. El carbón en estado natural se presenta en dos formas de acuerdo a su grado de pureza: el carbón puro se cristaliza en diamante o grafito, mientras que el resto se presenta amorfo como carbón de hulla (carbón de piedra); el diamante es el carbón puro por excelencia, y es el material más duro y precioso conocido en el universo; el grafito, es una modificación cristalina, que se presenta en escamas y láminas levemente adheridas entre sí, que se resbalan de una capa sobre otra con facilidad. *(Giraldo y Blas, 2008)*

### 2.1.1. Forma de producción

Antes de que la calcinación ocurra, se necesita enorme cantidad de energía para evaporar el agua de la madera, por lo que, se coloca el mayor tiempo posible al sol para el pre secado de este, antes de la incineración. (Montes, 1983)

- Primera etapa: hasta llegar a los 170°C, mayormente se elabora a destilación de unos cuantos aceites esenciales y la deshidratación de la madera; unido todo ello a una pequeña degradación de la madera. hasta los 270°C.
- Segunda etapa: existe unos abundantes desprendimientos de gases como el carbono dióxido y el carbono monóxido y también líquidos acuosos.
- Tercera etapa: se llegan a alcanzar temperaturas superiores a 600°C donde ocurre la calcinación, la desunión de sustancias volátiles es máxima, y el residuo sólido que resulta es el carbón vegetal. (collaborators, marzo 24,2021)

### 2.1.2. Cenizas de carbón

Las cenizas de materiales orgánicos provienen de la quema de diferentes tipos de trocos y tallos, los más comunes son las cenizas de bagazo de caña, cenizas de cáscara de arroz y cenizas vegetales, estas cenizas presentan propiedades de un material puzolánico, altas proporciones en sílice y alúmina, a la presencia de agua éste reacciona químicamente y obtiene propiedades cementantes. (J. Pérez y R. Ribero, 2008)

La estabilización de los suelos tratados con cenizas volantes es el resultado de intercambio de catión entre las partículas de arcilla y aluminio ( $Al^{3+}$ ), calcio ( $Ca^{2+}$ ) y hierro ( $Fe^{3+}$ ) en las cenizas volantes. Se describe el proceso de estabilización indicando que las cenizas volantes pueden proporcionar una adecuada matriz de cationes divalentes y trivalentes que bajo condiciones ionizadas origina la floculación de dispersión de las partículas de arcilla.

Cuando las cenizas volantes se mezclan con el suelo arcilloso, las características de compactación (densidad y óptimo contenido de humedad) de los suelos cambian. El proceso de hidratación se produce durante el contacto entre el suelo, la ceniza y el agua hace que la unión y cementación generen altos valores de densidad.

Todos los mecanismos de estabilización están relacionados con un cambio químico o proceso.

Las cenizas volantes son procedentes de la combustión en las centrales termoeléctricas. La composición de cada una de las clases de ceniza y el porcentaje de carbón encontrado en éstas depende del proceso que se realice en cada una de las plantas de la termoeléctrica. Las cenizas son granos finos compuestos básicamente por silicatos, aluminios, cal libre y algunos óxidos que permiten una reacción puzolánica con el suelo arcilloso que al igual que otras sustancias reduce el índice de expansión.

Una concentración de 25% de cenizas en el suelo puede resultar muy beneficiosa, afectando la granulometría, floculando los porcentajes de arcillas del suelo y reduciendo el límite líquido y el índice plástico del suelo. Las reacciones puzolánicas permiten incrementar la capacidad de soporte de la subrasante y con ello mejorar las estructuras viales en carreteras. *(Cokca, 2001)*

Las cenizas del carbón son el residuo inorgánico resultado de la incineración del material y están compuestas de fases inorgánicas originales y nuevas fases generadas tanto de materia inorgánica como orgánica del carbón (Elliot, 1981). La materia inorgánica del carbón comprende sólidos no cristalinos y cristalinos y fluidos inorgánicos. La materia mineral como parte de la materia inorgánica del carbón consiste principalmente en especies minerales que pertenecen a los sulfuros, sulfosales, óxidos e hidróxidos, silicatos, sulfatos, carbonatos, fosfatos, cloruros, elementos nativos, y otros minerales estrictamente definidos y caracterizados en la ciencia de la mineralogía. Esta materia mineral comprende todos los elementos que no forman parte de la materia orgánica del carbón (carbono, hidrógeno, nitrógeno, oxígeno y azufre) y es la principal fuente de los elementos que componen las cenizas cuando el carbón se quema en el aire u oxígeno.

Cuatro de los cinco elementos que generalmente se consideran como parte de la materia orgánica (carbono, hidrógeno, oxígeno y azufre) también están presentes en la materia inorgánica en los carbones. El carbono se encuentra en carbonatos (por lo general, calcio, magnesio y hierro); el hidrógeno está presente en aguas libres y en el agua de

hidratación, el oxígeno está presente en óxidos, el agua, los sulfatos y silicatos, y el azufre en sulfuros y sulfatos. (*J. Willey, 2005*)

Actúan como conglomerantes puzolánico al entrar en contacto con agua, las cenizas de carbón están compuestas por silíceos y aluminio que reaccionan en forma química con cal a una temperatura calmada. Las cenizas de carbón según la norma ASTM se dividen en cenizas de fondo, cenizas volantes y mixtas.

- Cenizas del fondo: se sitúan al fondo, tienen diámetro  $>0,075$  mm. (no pasan la malla N° 200).
- Cenizas volantes: son los residuos  $<$  de  $0,075$  mm. (malla N°200) (*Huamant de la Cruz, 2022, pág. 16*)

**Figura 1.** Carbón vegetal



**Fuente.** Elaboración Propia

## **2.2. Características de las cenizas de carbón**

### **2.2.1. Color, finura, forma de la partícula y densidad**

- **Color**

Presenta color gris ya que es resultado de la combustión del carbón bajo condiciones reducidas de oxígeno. El color de la ceniza puede tender al gris o al negro, dependiendo de la fuente, la tendencia clara usualmente indica altos contenidos de cal, y de gris a negro indica altos contenidos de carbón.

- **Finura**

En varios países en que se cuenta con especificaciones para la ceniza volante se puede tener un grado de fineza mediante prueba de material retenido en la malla de 45 micras para controlar el grado de fineza.

- **Forma de la partícula**

La ceniza volante tiene forma esférica y es un polvo granulado de características únicas, Sin embargo, en la fracción más gruesa de 300 a 45 micras la mayoría de las partículas son porosas y negras. (Pérez, 2014, p. 35)

- **Densidad**

Las cenizas provenientes de la madera y la corteza tienen un punto de fusión entre 1300-1400 °C, por tal motivo se los denomina biocombustibles, su densidad es 1,3 T/m<sup>3</sup>.

**Figura 2.** Cenizas de carbón.



**Fuente.** Elaboración Propia

### **2.2.2. Clasificación de las cenizas**

Según la norma de ASTM C-618 (American Society for Testing and Materials), existen principalmente dos tipos de cenizas volantes:

- **Clase N**

Puzolanas naturales calcinadas o sin calcinar, como algunas tierras diatomáceas; horstenos opalinos y pizarras; tobas y cenizas volcánicas o pumíticas, calcinadas 10 o sin calcinar; y materiales varios que requieren de calcinación para inducir propiedades satisfactorias; como algunas arcillas y pizarras

- **Clase F**

Se puede obtener en grandes cantidades. Se produce en la combustión de antracita o lignito. Generalmente contiene pequeñas cantidades de cal (normalmente inferior al 15%) y una superior combinación de sílice, aluminio y hierro que la clase C.

- **Clase C**

Proviene de la combustión de lignito, que es aquel tipo de carbón que produce cenizas volantes con una cantidad superior de cal (normalmente superior al 15%, y a menudo hasta un 30%). Se utiliza en aquellos casos en los que se requiera altas resistencias iniciales, como por ejemplo en hormigón pretensado. También se prefiere en estabilización de suelos, ya que la clase C puede no requerir a adición de cal. (*Canals, 2007, pág. 10*)

### **2.2.3. Composición química de las cenizas**

Las cenizas están compuestas principalmente por óxidos mayores que se clasifican en óxidos básicos ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$  y  $\text{K}_2\text{O}$ ), óxidos ácidos ( $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  y  $\text{TiO}_2$ ) y otros óxidos ( $\text{SO}_3$  y  $\text{P}_2\text{O}_5$ ). Excepto para los elementos de oxígeno y de azufre, que normalmente constituyen las cenizas los residuos de la combustión de carbón pueden agruparse de la siguiente manera: los elementos principales (es decir, elementos en concentraciones superiores al 0,5% en el total del carbón, y éstas se incluyen el aluminio, calcio, hierro y silicio), elementos menores (es decir, aquellos en el rango de concentración de alrededor de 0,02 a 0,5% en el carbón, y los más típicos son el potasio, magnesio, sodio y el titanio y algunas veces fósforo, bario, estroncio, boro y otros, dependiendo de la zona geológica), y oligoelementos (es decir, todos los demás elementos inorgánicos que se detectan en el carbón en menos del 0,02% (200 ppm) hasta partes por billón e inferiores). La mayoría de los elementos no metálicos, a

pesar de que son más volátiles que los metales, dejan un residuo detectable en cenizas de carbón. (J. Willey, 2005) (Peña, 1999)

**Tabla 3.** Composición química de las cenizas.

Elementos	Símbolos	Corteza leñosa % en seco	Astillas % en seco
Carbono	C	50,4	47,1
Hidrogeno	H	5,7	6,1
Oxigeno	O	38,5	41,9
Nitrógeno	N	0,48	0,54
Potasio	K	0,24	0,26
Azufre	S	0,85	0,43
Cobre	CU	0,87	0,73
Zinc	Zn	0,62	0,38
Cobalto	Co	0,23	0,15
Molibdeno	Mo	0,05	0,1
Arsénico	As	0,11	0,18
Níquel	Ni	0,94	0,6
Cromo	Cr	0,13	0,54
Plomo	Pb	0,25	0,25
Cadmio	Cd	0,03	0,05
Vanadio	V	0,58	0,42
Silicio	Si	0,26	0,28
	%TOTAL	100	100

**Fuente:** Francescato, V. Antonini E, Asociación Española De Valoración Energética de la Biomasa, Manual de Combustibles de Madera. Pg. 23. España, 2008.

#### 2.2.4. Propiedades de las cenizas de carbón

De acuerdo con Alonso M.C et al (1995) las cenizas volantes presentan las siguientes propiedades:

- Capacidad reactiva, lo que las hace aptas para múltiples aplicaciones. Otra de sus propiedades es la puzolánica e hidráulica, aunque se necesita de un período más o menos largo de tiempo para que se manifieste su reactividad puzolánica.
- Las cenizas aumentan la trabajabilidad del material en estado plástico, debido a un aumento en la dispersión de las partículas del sistema.

- Las cenizas volantes en los morteros disminuyen las expansiones asociadas a la reacción árido-álcalis, disminuyendo la pérdida por durabilidad.
- Contribuye a nivelar el PH de suelos arcillosos.

Este subproducto industrial posee muchas ventajas para ser empleado en la construcción. Al tener un alto volumen de producción garantiza los volúmenes de suministro que se requieren en este sector; se constituye, además, en un material con una reactividad tal que en determinadas condiciones puede comportarse de manera similar como lo hace un cemento Portland y al presentarse en estado pulverulento, hace innecesario cualquier tipo de transformación previa a su uso constituyéndose además en una materia prima viable económicamente. (*Criado, Palomo, & Fernández, 2006, p. 11-49*)

### **2.3. Suelos arcillosos de alta compresibilidad**

Son aquellos susceptibles a experimentar grandes deformaciones al ser sometidos a cargas mayores a las que actualmente tienen debidas a su peso propio.

La definición de suelo expansivo se hace clara y concisa del autor Beltrán M. de 1991:

“Un suelo expansivo puede definirse, como un tipo de suelo que se hincha y contrae causando daños, frecuentemente presenta un contenido coloidal alto, con valores altos de límite líquido, altos índices de plasticidad y de actividad. Pueden ser de origen variado, duros en estado seco, pero se vuelven blandos cuando se les permite absorber agua y pueden ejercer grandes presiones de expansión. La permeabilidad es muy baja salvo cuando el suelo esta fisurado, seco y el agua puede circular por las grietas abiertas”

Los suelos expansivos son aquellos que parcial o totalmente saturados aumentan significativamente su volumen cuando aumenta su contenido de humedad, a carga constante.

Este término implica también la disminución de volumen o contracción si la humedad se pierde, pero debe tener presente que la contracción es simplemente el proceso inverso a la expansión.

Los materiales arcillosos que son susceptibles de sufrir hinchamiento, permitiendo una gran incorporación de agua, son principalmente los pertenecientes al grupo de las esméticas. Esto se debe al tipo de enlace débil presente entre las láminas de su estructura. Además, cuando el catión interlamilar es el Na, las esméticas tienen gran capacidad de expansión, pudiendo llegar a producirse la completa disociación o separación de las láminas, teniendo un máximo desarrollo de propiedades coloidales, dando lugar a propiedades especiales (lodos estabilizadores tixotrópicos o bentonitas). Si, por el contrario, tienen Ca o Mg como cationes de cambio su capacidad de hinchamiento será mucho más reducida. (Zapata, 2018, p, 17)

“Son todas aquellas arcillas que tienen la capacidad de incluir agua en su estructura de láminas, lo cual genera un ensanchamiento o expansión de la estructura cristalina original que puede llegar a producir problemas en las fundaciones de edificios, casas y carreteras.” Estas arcillas son a su vez capaces de absorber grandes cantidades de agua, por lo tanto, experimentan cambios de volumen cuando cambia su contenido de humedad. Al aumentar la humedad del terreno se producirán hinchamientos, mientras que si disminuye la humedad (deseccación) se producirán retracciones. Cuando se está frente a un terreno arcilloso potencialmente expansivo y se produce una variación de la humedad se producen cambios de volumen que generan problemas tales como: Grietas verticales e inclinadas en ambos sentidos ocasionados por la variación de tensiones en la cimentación, fisuración y rotura de elementos estructurales y deformación de pavimentos entre otros.

**Tabla 4.** Grupo de las esméticas.

<b>Grupo de las esméticas (arcillas expansivas más representativas)</b>		
<b>Montmorillonita</b>	<b>Nontronita</b>	<b>Saponita</b>
$((\text{Na}, \text{Ca})_{0,3}(\text{Al}, \text{Mg})_2\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2 \cdot n\text{H}_2\text{O})$	$(\text{Na}_{0,3}\text{Fe}^{3+}(\text{Si}, \text{Al})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2 \cdot n\text{H}_2\text{O})$	$((\text{Ca}/_2, \text{Na})_{0,3}(\text{Mg}, \text{Fe}^{2+})_3(\text{Si}, \text{Al})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_{2,4}\text{H}_2\text{O})$

**Fuente:** Tipos de suelos: caracterización de suelos arcillosos y limosos.

### **2.3.1. Origen**

Los suelos arcillosos de alta compresibilidad presentan alto contenido de materia orgánica y alto contenido de minerales de montmorillonita.

#### **2.3.1.1. El montmorilonítico**

(Que se debe su nombre a Montmorillon, Francia), al cual pertenecen las bentonitas, se forman por la superposición indefinida de una lámina alumínica entre dos laminas silíceas, pero con una unión débil entre sus retículas, lo que hace que el agua pueda penetrar en su estructura con facilidad. Estas arcillas sufren fuerte expansión en contacto con agua, lo que provoca inestabilidad en ellas. *(Crespo villalaz, 2004, pág. 23)*

#### **2.3.2. Proceso de expansión**

En cuanto a esta teoría se dice que las moléculas de agua están siempre rodeando a las partículas de arcilla en forma de agua absorbida, considerándose estas como parte de la superficie de la arcilla, es así que cuando se trata de analizar su comportamiento, el agua influye en sus propiedades físicas como resistencia, plasticidad y permeabilidad. De acuerdo con Sharma (1998) el humedecimiento puede ocurrir por cualquiera de las siguientes formas:

- Por hidratación o incorporación en la estructura cristalina, la cual es el mecanismo principal;
- Por atracción intermolecular entre la superficie sólida de la materia y el agua sobre un pequeño rango como resultado de las fuerzas de van der Waals; y
- Por enlaces de hidrógeno expuestos a átomos de oxígeno en la superficie de la arcilla.

Al considerar la presencia de una película de agua absorbida por las partículas de arcilla, se puede dar una explicación o un análisis a una teoría llamada la Capa Doble Difusa (CDD), es así como Chapman describe una película de agua alrededor de una partícula de arcilla, en la cual la concentración de cationes varía en forma continua desde alta concentración en la superficie mineral a bajas concentraciones a medida que se aleja de la superficie. La posición de los cationes está gobernada por los efectos de

oposición y atracción electrostática hacia la superficie y difusión a medida que decrece la concentración. La CDD está compuesta por la superficie de la arcilla y el enjambre de cationes cerca de ella, lo cual nos permite entender un poco la razón por la cual la arcilla en presencia de agua aumenta su plasticidad.

### 2.3.3. Compresibilidad

La compresibilidad es la propiedad que tiene un suelo de reducir su volumen cuando es sometido a un incremento de esfuerzos, y se puede analizar parcialmente mediante el proceso de consolidación. La consolidación se refiere al proceso de cambio de esfuerzos efectivos que se produce por la disipación de presión de poro, debido a la expulsión del agua contenida en los poros del suelo (Díaz Rodríguez, 2014); la expulsión de agua produce una reducción en el volumen del suelo, y se presenta en función del tiempo.

La compresibilidad posee influencia en las propiedades de los suelos ya que un cambio en la compresibilidad modificaría la permeabilidad, dando como resultado una alteración de fuerzas existentes entre las partículas y una modificación de la resistencia del suelo al esfuerzo cortante provocando desplazamientos. (Fonseca, 2006)

Hay que tener en cuenta que en el proceso de remoldear un suelo siempre va a tener una modificación en su compresibilidad y este efecto se logra controlar con procesos de compactación.

La compresibilidad es la propiedad de un suelo de reducir su volumen cuando se le somete a un incremento de esfuerzo  $\Delta\sigma$ . Se expresa como la relación entre el cambio de volumen  $\Delta v$  o el cambio de la relación de vacíos  $\Delta e$  y la magnitud del incremento de esfuerzo aplicado. Al referirse a la compresibilidad, no se alude explícitamente a la variable de tiempo. Una curva característica de compresibilidad se muestra en la figura. (Díaz-Rodríguez, pág. 169)

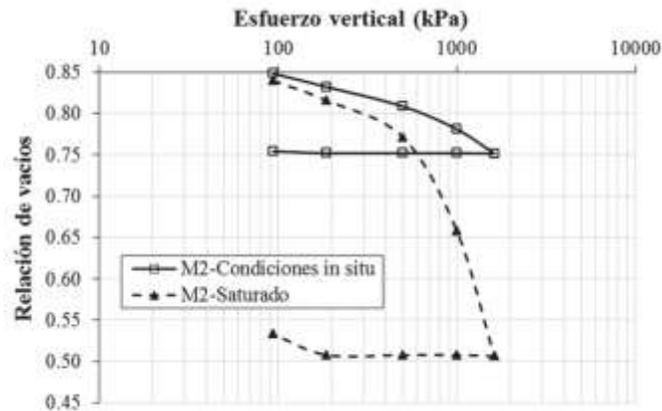
Los suelos de grano fino que contienen por lo menos 50% de limo + arcilla, pueden clasificarse con arreglo a tres clases de compresibilidad sobre la base de su límite líquido. Estas clases son las siguientes:

Compresibilidad baja= LL inferior a 30;

Compresibilidad media=LL de 30 a 50;

Compresibilidad alta=LL superior a 50

**Gráfico 1.** Curva de compresibilidad de un espécimen de suelo.



**Fuente:** Google imágenes.

Como lo mencionan Poliotti & Sierra, “Todos los materiales, al ser sujetos a cambios en las condiciones de esfuerzos, experimentan deformaciones, que pueden o no ser dependientes del tiempo”. Las relaciones entre los esfuerzos, las deformaciones y el tiempo, varían según el material a analizar. Las características esfuerzo-deformación-tiempo de un suelo dependerán no solo del tipo de suelo y su estado de consistencia, sino también de la forma en que es cargado, de su ubicación estratigráfica, etc. Es necesario estudiar estas características del suelo, debido a que en general éstos sufren deformaciones superiores a las de la estructura que le transmite la carga y no siempre se producen instantáneamente ante la aplicación misma de la carga. (Poliotti & Sierra, 2011, p.3)

En los suelos finos arcillosos, la permeabilidad es muy baja, por lo que el flujo de agua es muy lento, y la disipación del exceso de presión neutra es muy lenta. En consecuencia, el suelo puede continuar deformándose durante varios años después de finalizada la construcción de la obra que trasmite la carga.

## **2.4. Caracterización de los suelos**

La caracterización del material consiste en determinar con qué tipo de suelo se está trabajando, para caracterizar el mismo se requiere determinar su granulometría, límites de Atterberg y propiedades físicas. Para determinar la granulometría del suelo, se requiere separar el mismo según su rango de tamaño de grano, se utiliza una granulometría por vía seca para partículas mayores a 0,075mm, para tamaños menores se debe usar el método de sedimentación a través del hidrómetro.

Con los porcentajes obtenidos en estos ensayos y los resultados de los límites de Atterberg, se puede realizar la clasificación del material mediante el método de la SUCS, para conocer con qué tipo de suelo se está trabajando y correlacionar con los posibles resultados que se puede obtener en los ensayos de expansibilidad.

### **2.4.1. Gravedad específica**

La gravedad específica es la relación entre la masa de un cierto volumen de sólidos a una temperatura dada y la masa del mismo volumen de agua destilada y libre de gas a igual temperatura. La temperatura generalmente usada como referencia es 20° C. Norma 128-13.

Este ensayo hace relación a las partículas de minerales que aparecen naturalmente y que prácticamente no son solubles en agua. Por lo tanto, la gravedad específica de materiales que contengan sustancias extrañas (como cemento, cal, etc.), materiales solubles en agua (como cloruro de sodio) y suelos que contengan sustancias con gravedad específica menor de uno, requieren un tratamiento especial o una definición diferente de la gravedad específica.

La gravedad específica para suelos arcillosos y limosos varía desde 2.6 hasta 2.9. La tabla muestra la gravedad específica de algunos minerales comunes que se encuentra en los suelos. (*Braja M. das, 2014, p. 33*)

**Tabla 5.** Gravedad específica de los minerales más importantes.

Mineral	Gravedad específica, Ge
Cuarzo	2,65
Colinita	2,6
Ilita	2,8
Montmorillonita	2,65-2,80
Haolisita	2,0-2,55
Feldespatos de potasio	2,57
Feldespatos de sodio y calcio	2,62-2,76
Clorita	2,6-2,9
Biotita	2,8-3,2
Muscovita	2,76-3,1
Hornblenda	3,0-3,47
Limonita	3,6-4,0
Olivino	3,27-3,37

**Fuente:** Braja M. Das, fundamentos de ingeniería geotécnica 4ta edición ,2014

#### 2.4.2. Granulometría

La granulometría es una de las propiedades más importantes de un suelo y es además la más representativa de un suelo, hasta el punto de que en un lenguaje poco técnico distingue los suelos según los distintos tamaños de las fracciones del suelo que son: grava, arena, arcilla, limo, etc. Además, el tipo de ensayo para determinar la granulometría determina de manera cuantitativa la distribución de los distintos tamaños de las partículas que se encuentran en los suelos (*Morales, 2015, p.27*).

Este ensayo puede ser realizado de dos métodos; por tamizado que se realiza a partículas de suelo mayores de 75  $\mu\text{m}$  y por medio de hidrómetro menores de 75  $\mu\text{m}$ .

**Tabla 6.** Clasificación de los suelos según el tamaño de partículas.

Descripción de las partículas	Normas británicas	AASHTO	ASTM	Unificado
Grava	60-2	75-2	>2	75-4,75
Arena	2-0,06	2-0,05	2-0,075	4,75-0,075
Limo	0,06-0,002	0,05-0,002	0,075-0,005	<0,075 finos
Arcilla	<0,002	<0,002	<0,005	

**Fuente:** (Peter L. Berry-David Reid, 2001, p. 4)

#### **2.4.2.1. Método del lavado**

El objetivo de este ensayo es graficar una curva granulométrica para poder establecer la distribución de los tamaños de los granos presentes en una masa de suelo

- **Descripción breve del ensayo**

Se tamiza una muestra de suelo que pase el tamiz N°10 se toma una muestra de 500 gr aproximadamente , la muestra se debe dejar reposar en agua hasta que sature completamente ,sin perder material se introduce la muestra en el tamiz N°200,luego se procede a lavar el suelo hasta que el agua pasante tenga un aspecto claro ,luego el material que se retiene en la malla N° 200, se lo introduce dentro de un plato para realizar un secado del suelo y se procede a tamizar por las mallas N°40 y N°200 y por último se procede a pesar el material retenido en cada una de las mallas.

#### **2.4.2.2. Método del hidrómetro**

El hidrómetro se usa para determinar el porcentaje de partículas de suelos dispersados, que permaneces en suspensión en un determinado tiempo. Conocer el porcentaje de limo y arcilla contiene cierta muestra de suelo.

- **Descripción breve del ensayo**

se toma una porción de muestra ya secada en el horno, cuando se requiere más precisión en el análisis del hidrómetro se debe tamizar una fracción de suelo que pase el tamiz N°200 luego de eso se debe dejar saturar la muestra con el agente dispersante en este caso el hexametafosfato de sodio durante 24hrs.

Después pasado el tiempo se debe vaciar el contenido en una probeta de 1000 ml y aumentar agua destilada hasta llegar los 1000 ml. Se procede a agitar la muestra evitando pérdidas durante un minuto. Luego de sacudir la probeta se introduce el hidrómetro tomando lecturas en los intervalos de tiempo dados.

### 2.4.2.3. Peso específico

El objetivo es determinar el peso específico de nuestra muestra porque es un valor que necesitaremos para hacer el cálculo del análisis granulométrico mediante el método del hidrómetro y para el ensayo de consolidación.

- **Descripción breve del ensayo**

Primero se pesa 80 gr de suelo húmedo, colocar la muestra en un plato y mezclar hasta formar pasta suave, luego se introduce dentro del frasco la pasta y batir hasta que se forme una suspensión uniforme y llenar con agua hasta el 50% de su capacidad se debe extraer todo el aire atrapado dentro de los suelos rolando el frasco, someter el frasco de agua con suelo a efectos de temperatura dentro de un baño maría hasta alcanzar los 60° C en el centro del frasco, someter a un enfriamiento el frasco para repetir el proceso a diferentes temperaturas en un rango de 30°C a 15°C.

**Figura 3.** Ensayo de peso específico.



**Fuente.** Elaboración Propia

### 2.4.3. Plasticidad de los suelos

Los límites de Atterberg o límites de consistencia se basan en el concepto de que los suelos finos, presentes en la naturaleza, pueden encontrarse en diferentes estados, dependiendo del contenido de agua. Así un suelo se puede encontrar en un estado sólido, semisólido, plástico, semilíquido y líquido. La arcilla, por ejemplo, al agregarle

agua, pasa gradualmente del estado sólido al estado plástico y finalmente al estado líquido.

El contenido de agua con que se produce el cambio de estado 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), es decir, la propiedad que presenta los suelos hasta cierto límite sin romperse

El método usado para medir estos límites de humedad fue ideado por Atterberg a principios de siglo a través de dos ensayos que definen los límites del estado plástico.

Los límites de Atterberg son propiedades índices de los suelos, con que se definen la plasticidad y se utilizan en la identificación y clasificación de un suelo.

“La plasticidad es una propiedad del suelo, que le permite ser moldeado sin fractura. Por moldeado se entiende un cambio brusco en el suelo, de manera inducida, hace que este cambio se convierta en fijo. Esto se debe a las propiedades de los minerales que componen los suelos finos (las arcillas); en esencia, la plasticidad se da porque los minerales y el agua que presenta (agua absorbida) están cargados eléctricamente y estas cargas permiten que la estructura se conserve con mayores alteraciones. El estado de plasticidad del suelo está en función a la presencia de la humedad y de las propiedades de sus componentes” (Morales, 2015, p.28)

Para poder conocer la cuantificación de la plasticidad es necesario realizar los límites de Atterberg.

#### **2.4.3.1. Limite liquido**

El límite líquido se define como el contenido de humedad expresada en por ciento con respecto al peso de la muestra, con el cual el suelo cambia del estado líquido al plástico. De acuerdo con esta definición, los suelos plásticos tienen en el límite líquido una resistencia muy pequeña al esfuerzo de corte, pero definida, y según Atterberg es de 25g/cm<sup>2</sup>. La cohesión de un suelo en el límite líquido es prácticamente nula. (Crespo Villalaz, 2004)

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

Cuando el suelo puede moldearse, es decir, cuando el suelo pasa de un estado semilíquido a un estado plástico. (Braja, 2012, p. 17)

- **Descripción breve del ensayo**

Se tamiza la muestra seca a través de la malla #40 hasta obtener unos 200 gr. aproximadamente, luego se mezcla el material en el plato con agua hasta la consistencia de una masa espesa, se deposita en la cuchara de casa grande o copa de Casagrande, y se golpea consecutivamente contra la base del aparato, hasta que el surco previamente se ha recortado, se cierran en una longitud de 12 mm. Si el número de golpes para que se cierre el surco es de 25, la humedad del suelo corresponde al límite líquido.

**Figura 4.** Dispositivo de límite líquido y herramienta de ranurado.



Fuente: Braja M. Das, Henderson, Nevada

#### **2.4.3.2. Límite plástico**

“Se define como el contenido de humedad en el que el suelo se agrieta al formar un rollito de 3,18 mm de diámetro. La prueba se lleva a cabo enrollando repetidamente a

mano sobre una placa de vidrio una masa de suelo de forma elipsoidal (Designación de prueba ASTM D- 4318)”.

El objetivo es hallar el contenido de humedad expresado en porcentaje cuando este se halle en el límite entre el estado plástico y el estado semisólido del suelo, según el procedimiento establecido en las normas. Al igual que el estado líquido se usaron muestras de suelo natural y mezcladas con cenizas de carbón al 10%,15%,20%,25% y 30%.

El índice de plasticidad permite clasificar bastante bien a un suelo. Un IP alto corresponde a un suelo de alta plasticidad. Por el contrario, un IP bajo es característico de un suelo de baja plasticidad. (*Braja, 2012, p.16*)

#### **2.4.3.3. Índice de plasticidad**

Se denomina Índice de Plasticidad o Índice plástico (I.P) a la diferencia numérica entre los límites líquido y plástico tal como lo definen los ensayos. Tanto el límite líquido como el límite plástico dependen de la cantidad y tipo de arcilla del suelo; sin embargo, el índice plástico depende generalmente de la cantidad de arcilla del suelo. Comparando el índice de Plasticidad con el que marcan las especificaciones respectivas se puede decir si un determinado suelo presenta las características adecuadas para cierto uso. (*Crespo Villalaz, 2004*)

Esta propiedad se refiere al contenido de humedad en donde se da a notar como un suelo se comporta de manera plástica. Expresado en números es la resta entre los límites mencionados anteriormente: límite líquido y límite plástico (*Morales, 2015, p.22*)

Es la diferencia entre el límite líquido (LL) y límite plástico (LP) de un suelo, para la realización de esta prueba se sigue el procedimiento establecido en la normatividad NTP 339.129 (ASTM D-4318).

$$IP = LL - LP$$

Donde:

IP= Índice de plasticidad.

LL= Limite líquido.

LP=Limite plástico.

**Tabla 7.** Clasificación de los suelos según el IP.

Índice de plasticidad	Plasticidad	Característica
IP>20	Alta	Suelos muy arcillosos
IP≤20	Media	Suelos arcillosos
IP>7	Baja	Suelos poco arcillosos
IP<7		
IP=0	No plástico	Suelos exentos de arcilla

**Fuente:** Manual de carreteras, suelos geología y pavimentos

“Se debe considerar que en un suelo un porcentaje elevado de arcilla es riesgoso, debido a su alta vulnerabilidad al agua”.

Un IP alto indica que tenemos un suelo con alto contenido de arcilla; y un IP bajo indica que el suelo es poco arcilloso. (*Ministerio de Transportes y Comunicaciones (2013)*).

**Figura 5.** Prueba de limite plástico.



**Fuente:** Braja M. Das, Henderson, Nevada

#### 2.4.4. Clasificación de los suelos

Los suelos con propiedades similares pueden ser clasificados en grupos y subgrupos en función de las características mecánicas y su comportamiento para la ingeniería. Los sistemas de clasificación proporcionan un lenguaje común para expresar de forma concisa las características generales de los suelos, que son infinitamente variadas, sin una descripción detallada. En la actualidad, dos elaborados sistemas de clasificación

que utilizan la distribución granulométrica y la plasticidad de los suelos son comúnmente utilizados para aplicaciones ingenieriles. Se trata de AASHTO y SUCS.

Un Sistema de Clasificación de los Suelos es una agrupación de éstos con características semejantes. El propósito es estimar en forma fácil las propiedades de un suelo por comparación con otros del mismo tipo, cuyas características se conocen. Son tantas las propiedades y combinaciones en los suelos y múltiples los intereses ingenieriles, que las clasificaciones están orientadas al campo de ingeniería para el cual se desarrollaron, por consiguiente, sólo se explicarán las clasificaciones empleadas en obras viales. (Braja, 2014, p. 78)

#### **2.4.4.1. Clasificación SUCS (Sistema Unificado de Clasificación de los Suelos)**

Utilizado en ingeniería geotécnica principalmente, describe la extensión y la contextura de las partículas del suelo, habiéndose realizado antes un análisis granulométrico con tamices ya que puede clasificar un suelo con tamaños menores a 3” pulgadas. Fue presentado por Arthur Casagrande.

Inicialmente este tipo de sistema de clasificación fue elaborado por Casagrande en el año 1942, para su utilización en el área de construcción de proyecto de aeropuertos, inicial por el cuerpo de Ingenieros pertenecientes al ejército cuando se daba inicio a la Segunda Guerra Mundial. Hoy por hoy, los ingenieros se basan en este tipo de clasificación, ya que este sistema separa a los suelos en dos grandes categorías.

Suelos que de grano grueso los cuales son identificados como tipo grava y arenosa que contengan 50% menos después de haber pasado por la malla N°200. Los símbolos para identificar a este grupo de suelos comienzan con un prefijo G o S. El prefijo G que nos indicaría que se está hablando de grava o suelo gravoso y el prefijo S que nos indicaría que se está hablando de arena o suelo arenoso.

Otros símbolos utilizados por este sistema de clasificación son: prefijo W que es utilizado para nombrar a suelos bien graduados, prefijo P para suelos mal graduado, prefijo L para suelos de baja plasticidad ( $LL < 50$ ) y finalmente H para suelos de alta plasticidad ( $LL > 50$ ) (Dass, 2008, p.39)

**Tabla 8.** Símbolos (SUCS).

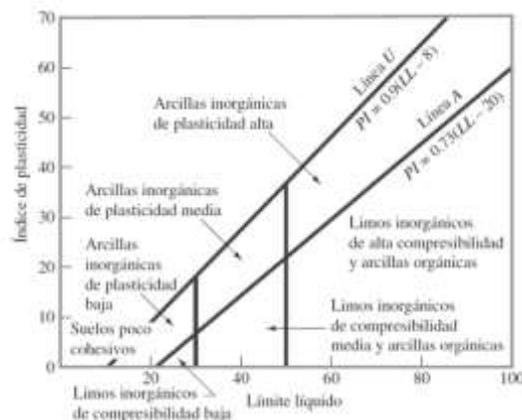
Símbolo	Definición
G	Grava
S	Arena
M	Limo
C	Arcilla
O	Orgánico

**Fuente:** Elaboración propia.

**Tabla 9.** Letras (SUCS).

Letra	Definición
P	Pobremente graduado (tamaño de partícula uniforme)
W	Bien graduado (tamaños de partícula diversos)
H	Alta plasticidad
L	Baja plasticidad

**Fuente:** Elaboración propia.

**Gráfico 2.** Carta de plasticidad (SUCS).

**Fuente:** Braja M. Das. Fundamentos de ingeniería geotécnica 4ta edición 2014.

#### 2.4.5. Compactación de los suelos

En general, la compactación es la densificación del suelo por remoción de aire, lo que requiere energía mecánica. El grado de compactación de un suelo se mide en términos de su peso específico seco.

Cuando se agrega agua al suelo durante la compactación, esta actúa como agente ablandador de las partículas del suelo, que hace que se deslicen entre sí y se muevan a una posición de empaque más denso. El peso específico seco después de la compactación se incrementa primero conforme aumenta el contenido de agua. (*Braja M., 2001*)

La compactación es un tratamiento para lograr la estabilidad volumétrica, siendo un tratamiento eficaz y económico para mejorar los suelos y otros materiales para que resistan las solicitaciones indicadas con deformaciones permanentes admisibles, logrando como objetivo que los materiales que forman la infraestructura no experimenten asentamientos irregulares por las solicitaciones mencionadas. La compactación logra una disminución de los huecos del suelo ocupados por aire. (*A. Rico y H. Del Castillo., 1978*)

La compactación en obra se lo puede realizar con múltiples equipos y maquinarias entre estas existen: los rodillos de ruedas lisas, los rodillos patas de cabra, los rodillos con neumáticos de hule, especialmente se utiliza el rodillo vibratorio para la densificación de los suelos granulares. (*D.Morales, 2015*)

#### **2.4.5.1. Prueba T-99 Proctor Estándar**

La prueba de Proctor se refiere a la determinación del peso por unidad de volumen de un suelo que ha sido compactado por un procedimiento definido para diferentes contenidos de humedad. Esta prueba tiene por objeto: (*Crespo Villalaz, 2004*)

- Determinar el peso volumétrico seco máximo que puede alcanzar un material, así como la humedad óptima  $W_o$  a que deberá hacerse la compactación
- Determinar el grado de compactación alcanzado por el material durante la construcción o cuando ya se encuentran construidos los caminos, aeropuertos y calles relacionando el peso volumétrico en el lugar con el peso volumétrico máximo Proctor.

En este ensayo se determinará el contenido de humedad óptimo del suelo natural y mezclando cenizas de carbón en los porcentajes dados 10%,15%,20%,25% y 30% y con los valores determinados realizar las muestras correspondientes para el ensayo de consolidación.

- **Descripción breve del ensayo**

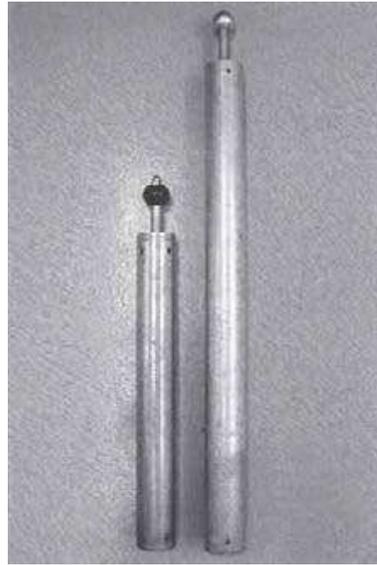
Se trabajó con una muestra ya secada en el horno, se tamiza la muestra que pase por el tamiz N°4, adoptamos valores del contenido de humedad para los distintos tipos de suelos, mezclamos completamente la muestra, con agua suficiente para obtener 2 puntos de porcentaje por debajo y 2 puntos los cuales excedan el contenido óptimo de humedad. Los golpes deben estar uniformemente distribuidos con el martillo para el ensayo T-99 Proctor estándar se realizan 3 capas a 25 golpes.

**Figura 6.** Martillos utilizados en las pruebas Proctor estándar y modificada.



**Fuente:** (Cortesía de ELE International).

**Figura 7.** Martillos utilizados en las pruebas Proctor estándar y modificada.



Fuente: Braja M. Das, Henderson, Nevada

## **2.5. Determinación de la expansión**

Para identificar estos suelos existen tres métodos: el primero es el que se refiere a la identificación mineralógica, la segunda trata sobre métodos directo y el tercero son mediciones indirectas.

Conforme al Sistema Unificado de Clasificación de suelos (SUCS), el suelo en estudio se ubica como un suelo expansivo, que se familiariza con el grupo de las arcillas y limos de alta compresibilidad (CH, OH, MH). (Juárez, 2006)

### **2.5.1. En base al índice de plasticidad y limite liquido**

Este tipo de métodos se basa en el análisis de las propiedades índice de los suelos (límite líquido, límite plástico y límite de contracción volumétrica) para identificar primero, y luego clasificar los suelos expansivos. La determinación del potencial expansivo mediante métodos indirectos se basa en los ensayos de Límite de Atterberg, la contracción lineal, el contenido coloidal y cambio de volumen potencial, entre otros.

Para la determinación de este material es indispensable tener como base los ensayos de limite liquido (LL) el cual está regido por la norma INV-E 125 26 esta norma lo explica como el contenido de humedad de un suelo, el cual es expresado porcentualmente y

secado al horno, cuando éste se halla en el límite entre el estado líquido y el estado plástico. Además de otros dos factores como índice de plasticidad (IP) INV-E 126 y la succión del suelo con humedad natural según norma INV E – 157; de acuerdo a lo anterior se mostrará una tabla donde se presentan especificaciones tangibles para caracterizar este tipo de suelo como expansivo.

**Tabla 10.** Predicción de la expansividad a partir de LL e IP.

Grado de expansión	Límite Líquido		Índice de plasticidad		
	Chen (1975)	Norma IS-1948	Holtz y Gibbs	Chen (1975)	Norma IS-1948
<b>Bajo</b>	<30	20 - 35	<20	0-15	<12
<b>Medio</b>	30 - 40	35 - 50	12-34	10-35	12-33
<b>Alto</b>	40 - 60	50-70	23-45	20-55	23-32
<b>Muy alto</b>	>60	70-90	>32	>35	>32

**Fuente:** Elaboración propia.

**Tabla 11.** Grado de expansividad en función de propiedades geotécnicas.

Expansividad	Límite de retracción	Índice de plasticidad	Límite líquido	Contenido en fino	Hinchamiento en superficie (cm)	Presión de hinchamiento (kpa)
<b>Baja</b>	>15	<15	<30	<30	0-1	<50
<b>Media</b>	11-15	15 -30	30-45	30-60	1-2	50-12
<b>Alta</b>	<11	>30	>45	>60	2-3	>12

**Fuente:** Tipos de suelos: caracterización de suelos arcillosos y limosos

**Tabla 12.** Clasificación de suelos expansivos basado en el ÍP.

IP Kansas Highway Commission (1974)	Potencial de Expansión	IP Chen (1988)	Potencial de Expansión
<15	Bajo a nulo	0 - 15	Bajo
		10 - 35	Medio
15 - 35	Medio	20-55	Alto
>35	Alto	>35	Muy Alto

**Fuente:** Elaboración Propia

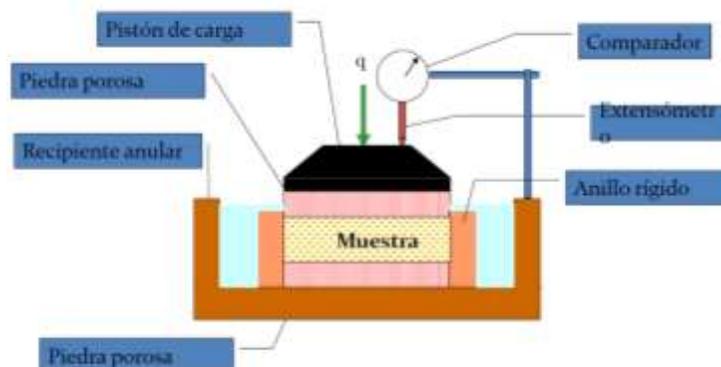
Mineralmente las arcillas expansivas son caracterizadas por propiedades básicas, mediante técnicas adecuadas de laboratorio, los minerales que conforman a la arcilla se pueden evaluar cuantitativamente. La montmorillonita está denotada por su fórmula general  $(\text{Na}, \text{Ca})_{0,3}(\text{Al}, \text{Mg})_2\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$  esta es un filosilicato que está ubicada en el grupo de las esmécticas, las cuales tienen las siguientes características:

- Es muy expansiva, de alta plasticidad y de muy baja permeabilidad y tiene un alto intercambio catiónico de 75-150 m.e.q.
- Efervescencia con ataque ácido indica que es Montmorillonita cálcica o magnésica.
- Las unidades están enlazadas por fuerzas de Van der Waals (sistema de capa triple o-t-o). Cada enlace es roto fácilmente por corte, por lo tanto, la Montmorillonita es pegajosa y suave cuando se enrolla entre los dedos.

### 2.5.2. Consolidación unidimensional de los suelos

Consolidómetro: llamado también edómetro u odómetro; instrumento utilizado en el laboratorio para evaluar las características de compresibilidad, consolidación y de potencial de expansión del suelo. Consiste en un anillo de bronce en el que se coloca la muestra de suelo y un conjunto de mecanismos de aplicación y medición de carga, y de medición de las deformaciones resultantes. (Norma ASTM D2435).

**Figura 8.** Partes de un consolidómetro.



**Fuente:** Elaboración propia.

### 2.5.3. Duración de la consolidación de suelos

La duración del proceso de consolidación es un tema crítico y depende en gran medida de la permeabilidad del suelo sometido a la carga y de las vías de drenaje. En general, la consolidación en suelos arenosos es un proceso rápido (que ocurre posiblemente inmediatamente durante la construcción) mientras que el proceso puede durar muchos años o incluso décadas en suelos arcillosos.

El procedimiento de consolidación se divide comúnmente en 3 etapas:

- Consolidación inicial: una rápida pérdida de volumen de la masa del suelo asociada con la aplicación de estrés externo que comprime el aire dentro de los huecos del suelo.
- Consolidación primaria: asentamiento del suelo durante el cual el exceso de presión del agua de los poros se transfiere al esqueleto del suelo.
- Consolidación secundaria: un procedimiento de asentamiento posterior que ocurre después de la consolidación primaria y está asociado con cambios internos en la estructura del suelo mientras está sujeto a una carga casi constante. Este proceso se conoce comúnmente como fluencia.

### 2.5.4. Parámetros derivados de la prueba del edómetro

Las siguientes propiedades del suelo se derivan de la prueba del edómetro:

- La presión de preconsolidación: la tensión máxima efectiva que ha sufrido la muestra de suelo en su historia geológica.
- El índice de compresión  $C_c$ :  $C_c$  es un índice asociado con la compresibilidad del suelo. En particular, se mide como la pendiente de la curva entre la relación de vacíos y la tensión efectiva. La relación de vacíos se representa en una escala normal, mientras que la tensión efectiva se representa en una escala logarítmica.

Para las arcillas normalmente consolidadas, el índice suele oscilar entre 0,20 y 0,50 y para los limos entre 0,16 y 0,24. Para las arenas, el índice varía entre 0,01 y 0,06, aunque este no es un parámetro particularmente significativo para una arena.

- El índice de recompresión  $C_r = C_r$  se usa para derivar la compresibilidad de un suelo sobreconsolidado y se obtiene usando la pendiente de la curva de rebote-recompresión. Para suelos inorgánicos,  $C_r$  es 0,1-0,2 del valor  $C$ .
- El coeficiente de consolidación  $C_v$ :  $C_v$  es un parámetro que describe la velocidad a la que evoluciona el proceso de consolidación durante una prueba.

### **2.5.5. Determinación del coeficiente de consolidación, $C_v$**

#### **2.5.5.1. Método de la raíz cuadrada de Taylor del tiempo (1948)**

En este método, las lecturas del dial se grafican contra la raíz cuadrada del tiempo. El coeficiente de consolidación,  $C_v$ , se determina estimando el tiempo al 90% de consolidación ( $t_{90}$ ), como se muestra en la breve animación / presentación a continuación. Entonces,  $C_v$  se puede estimar como:

$$C_v = 0,848 * (H_{dr}^2 / t_{90})$$

donde  $H_{dr}$  es la ruta de drenaje promedio (típicamente, la mitad de la altura de la muestra).

### **2.5.6. Suelos Normalmente Consolidados y Sobreconsolidados**

- Suelos normalmente consolidados: Aquélla que nunca estuvo sometida a esfuerzos mayores a las actualmente existentes
- Suelos sobreconsolidados: Aquélla que alguna vez estuvo sometida a esfuerzos mayores a las actualmente existentes.

### **2.5.7. Expansividad de suelos**

Existen suelos que se hinchan cuando aumenta su cantidad de agua y se retraen cuando esta cantidad disminuye. Debe distinguirse el término “potencial de expansión”, de la “expansión” proviene dicha pérdida de agua. Las arcillas expansivas producen presiones verticales y horizontales afectando las cimentaciones, empujando muros y destruyendo pisos y tuberías enterradas, con esfuerzos que superan los 20 Kg/cm<sup>2</sup>, ocasionalmente.

*Tabla 13. Grado de expansión de acuerdo con el ensayo de consolidación.*

<b>Grado de expansión</b>	<b>Porcentaje de expansión cons. (Holtz Gibbs)</b>	<b>Porcentaje de expansión cons. (seed)</b>
Bajo	<10	0-1,5
Medio	10-20	1,5-5
Alto	20-30	5-25
Muy alto	>30	>25

**Fuente:** Elaboración propia

El ensayo de consolidómetro se usó para determinar la presión de expansión, se realizaron muestras de suelo natural y muestras suelo natural más cenizas de carbón mezclados con los porcentajes establecidos 10%,15%,20%,25% y 30% y con los contenidos de humedad óptimos obtenido en el ensayo de Proctor estándar.

- **Descripción breve del ensayo**

Se arma la cámara de consolidación con el anillo y se coloca la muestra seca previamente pesada con dos piedras porosas, una en la parte superior del espécimen y otra en el fondo, las muestras usualmente tienen las dimensiones de 63.5mm y 25.4 mm de espesor. La carga sobre el espécimen se aplica por medio de un brazo de palanca y la compresión se mide por medio de un micrómetro calibrado. El espécimen se mantiene bajo agua durante la prueba. La muestra debe saturar durante 24 hrs aplicando un peso. Posteriormente se realiza el proceso de consolidación de la muestra, se aplica una presión vertical de 2, 6, 8, 16,32 kg. Con cada presión mantenida se realiza la lectura de la deformación en diferentes tiempos.

## **2.6. Marco referencial**

- Del artículo científico “Evaluación de aditivos usados en el tratamiento de arcillas expansivas” se concluye:

Una concentración del 25% de cenizas en el suelo puede resultar muy beneficiosa, modificando directamente su estructura debido a que sus partículas son altamente atraídas entre sí, formando una masa compacta, reduciendo los espacios vacíos y floculando los porcentajes de arcillas del suelo reduciendo el límite líquido y el índice plástico del suelo.

- Del artículo científico “Caracterización de un material compuesto por suelo arenoso, ceniza de cáscara de arroz y cal potencialmente útil para su uso en pavimentación” se concluye:

En suelos arenosos se logra un aumento considerable de CBR de la mezcla del suelo con 20% de cenizas y 10% de cal, con 28 días de cura con respecto al suelo natural, permitiendo afirmar que el material así producido podría ser empleado como capa de sub- base de pavimentos.

- De la tesis “Estabilización de suelos arcillosos con cenizas de carbón para su uso como subrasante mejorada y/o subbase de pavimentos” se concluye:

La mezcla de ceniza volante con el suelo arcilloso presenta un mejor comportamiento que el suelo puro, para su empleo como capa de sub-base y subrasante mejorada de pavimentos, examinado factores como tiempo de curado, tiempo de compactación contenido de agua que influyen directamente en el comportamiento de la mezcla final.

## **2.7. Marco normativo**

- Granulometría de los suelos ASTM D-422, AASHTO T88.
- Determinación del peso específico de los suelos ASTM D-854, AASHTO T100.
- Análisis granulométrico por medio del hidrómetro ASTM D-422.
- Determinación del límite plástico e índice de plasticidad ASTM D-4318, AASHTO T90.
- Determinación del límite líquido ASTM D-4318, AASHTO T90.
- Clasificación de los suelos SUCS.
- Ensayo de compactación T-99 Proctor estándar AASHTO T272.
- Consolidación unidimensional de los suelos ASTM D-2435, AASHTO T-216.

## **2.8. Posición del autor**

Con este proyecto de investigación se pretende analizar la influencia que tienen las cenizas de carbón en la expansión en estos suelos arcillosos de alta compresibilidad en base a un material común en nuestro medio, que se pueda realizar un reciclado del mismo, como lo son las cenizas de carbón, ya que como dijimos anteriormente se

obtienen a un bajo costo y de fácil obtención, posteriormente realizar los ensayos de laboratorio indicados, el fin de este trabajo aparte de analizar la influencia de las cenizas de carbón en dichos suelos es también tener una alternativa más para reducir la expansión en este tipo de suelos ,ya que en nuestro departamento y nuestro país existen este tipo de suelos inestables y son necesarias sus mejoras no solo para el uso en carreteras sino también para estructuras.

Previamente al ensayo del consolidómetro tendremos una caracterización de los suelos y Proctor estándar adicionando cenizas en los porcentajes establecidos, con el fin de obtener la humedad optima y densidad máxima, ya que con estos valores se procederá a realizar los moldes que serán llevados al aparato de consolidación ver el comportamiento del suelo, observando la incidencia de las cenizas de carbón.

## CAPÍTULO III

### RELEVAMIENTO DE LA INFORMACIÓN

#### 3.1. Criterios del diseño metodológico

##### 3.1.1. Unidad de muestra

La unidad de muestra se considera un ensayo de laboratorio de suelos.

##### 3.1.2. Población

La población tomada en cuenta es de modo infinito, es decir que para la presente investigación se toma en cuenta todos los ensayos de laboratorio de suelos.

##### 3.1.3. Muestra

Tabla 14. Muestra.

N°	Etapa	Ensayo	Ni
	Ensayos realizados	Granulometría	5
1		Peso específico	8
2		Hidrómetro	15
3		Limite liquido del suelo	68
4		Limite plástico del suelo	68
5		Ensayo de compactación del suelo	46
6		Ensayo de consolidación del suelo	90
Total			300

Fuente: Elaboración propia.

##### 3.1.4. Tamaño de la muestra

Para el cálculo del tamaño de la muestra se tomará en cuenta la ecuación de muestreo estratificado:

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

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

**Tabla 15.** Planilla de cálculo del tamaño de la muestra.

N°	Etapa	Ensayo	Ni	$\sigma^2$	Ni* $\sigma^2$	fi	ni
1	Ensayos	Granulometría	5	0,1	0,5	0,017	2
2		Peso específico	8	0,1	0,8	0,027	3
3		Hidrómetro	15	0,1	1,5	0,050	5
4		Limite liquido del suelo	68	0,1	6,8	0,227	23
5		Limite plástico del suelo	68	0,1	6,8	0,227	23
6		Ensayo de compactación	46	0,1	4,6	0,153	16
7		Ensayo de consolidación	90	0,1	9	0,300	30
Total			300		30		<b>102</b>

Fuente: Elaboración propia

Donde se tomará en cuenta un nivel de confianza de 95% y de acuerdo a la variable estandarizada es  $Z=1.96$ , con un margen de error  $e=0,05\%$  que es deducido del nivel de confianza, y por el corto tiempo establecido se asume una varianza de  $\sigma^2=0,10$ .

Reemplazando se tiene:

$$n = \frac{30}{\left(300 * \left(\frac{0,05}{1,96}\right)^2\right) + \frac{30}{300}}$$

Tamaño de la muestra (n):

$$n = 102$$

Se tomará en cuenta 102 muestras de suelo para nuestros diferentes ensayos a realizar con nuestros aditivos.

**Tabla 16.** Tamaño de la muestra.

N°	Etapa	Ensayo	Ni
1	Ensayos realizados	Granulometría	2
2		Peso específico	3
3		Hidrómetro	5
4		Limite liquido del suelo	24
5		Limite plástico del suelo	24
6		Ensayo de compactación del suelo	12
7		Ensayo de consolidación del suelo	32
Total			102

Fuente: Elaboración propia

### 3.2. Ubicación de los materiales

Se extrajeron dos muestras de material arcilloso de los barrios Juan Nicolai y San Blas,

Geográficamente, según Datum WGS-84, la primera muestra de extracción se ubica en las coordenadas UTM 321274.37 Este y 7613827.26 Sur. La segunda muestra de extracción se ubica en las coordenadas UTM 323251 Este y 7617580,00 Sur.

Las cenizas de carbón fueron extraídas de una Fábrica de cerámica ubicada en el barrio Miraflores todas las muestras de material están en la ciudad de Tarija

**Figura 9.** Localización del área del material del barrio San Blas.



**Fuente:** Google Earth.

**Figura 10.** Localización de extracción del material barrio Juan Nicolai.



**Fuente:** Google Earth.

### **3.3. Ensayos de laboratorio**

Los ensayos de laboratorio fueron realizados para clasificar al suelo arcilloso como tal y también se realizaron con la mezcla de las cenizas de carbón en las proporciones dadas, para conocer las propiedades y parámetros geotécnicos.

Los ensayos de laboratorio fueron realizados en laboratorio de Mecánica de Suelos de la Facultad de Ingeniería Civil de la universidad Juan Misael Saracho. Los ensayos se realizaron según la guía de laboratorio normas ASTM.

- Granulometría de los suelos ASTM D-422, AASHTO T88.
- Determinación del peso específico de los suelos ASTM D-854, AASHTO T100.
- Análisis granulométrico por medio del hidrómetro ASTM D-422.
- Determinación del límite plástico e índice de plasticidad ASTM D-4318, AASHTO T90.
- Determinación del límite líquido ASTM D-4318, AASHTO T90.
- Clasificación de los suelos SUCS.
- Ensayo de compactación T-99 Proctor estándar AASHTO T272.
- Consolidación unidimensional de los suelos ASTM D-2435, AASHTO T-216.

### **3.4. Caracterización de los suelos**

#### **3.4.1. Resultados de ensayos de laboratorio**

Se presenta e interpreta los resultados de los ensayos de laboratorio obtenido a las muestras de los suelos arcillosos de alta compresibilidad mezclados con cenizas de carbón adicionadas en los porcentajes dados.

Los porcentajes establecidos de cenizas de carbón se basaron tomando en cuenta el proyecto experimental “Estabilización de suelos con cenizas de carbón para su uso como subrasante mejorada”, Autor: Carolina Pérez Collantes, Universidad Nacional de Ingeniería, Lima-Perú.

**Tabla 17.** Tabla de abreviaciones.

<b>Abreviación</b>	<b>Descripción</b>
M-1	Muestra Juan Nicolai
M-2	Muestra San Blas
C.C.	Cenizas de carbón

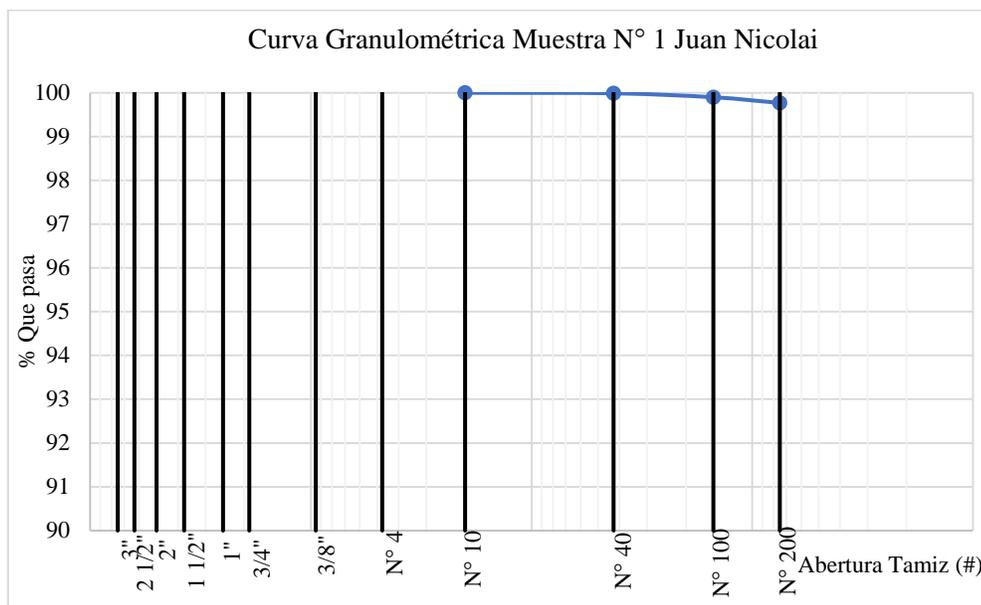
**Fuente:** Elaboración propia.

### 3.4.2. Resultado granulométrico método del lavado

**Tabla 18.** Gradación granulométrica M-1.

<b>Muestra N°1 Juan Nicolai</b>						
<b>Denominación</b>	<b>Abertura (mm)</b>	<b>Masa Retenida (gr)</b>	<b>Masa Retenida Acumulada(gr)</b>	<b>% Retenido</b>	<b>% Retenido Acumulado</b>	<b>% Que Pasa</b>
<b>3"</b>	<b>75</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00
<b>2 1/2"</b>	<b>63</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00
<b>2"</b>	<b>50</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00
<b>1 1/2"</b>	<b>37,5</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00
<b>1"</b>	<b>25</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00
<b>3/4"</b>	<b>19</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00
<b>3/8"</b>	<b>9,5</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00
<b>N° 4</b>	<b>4,75</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00
<b>N° 10</b>	<b>2</b>	0,06	0,06	0,01	0,01	99,99
<b>N° 40</b>	<b>0,425</b>	0,45	0,51	0,09	0,10	99,90
<b>N° 100</b>	<b>0,15</b>	0,65	1,16	0,13	0,23	99,77
<b>N° 200</b>	<b>0,075</b>	0,56	1,72	0,11	0,34	99,66
<b>Base</b>		498,28		99,66	100,00	
<b>TOTAL</b>		500,00		100,00		

**Fuente:** Elaboración propia.

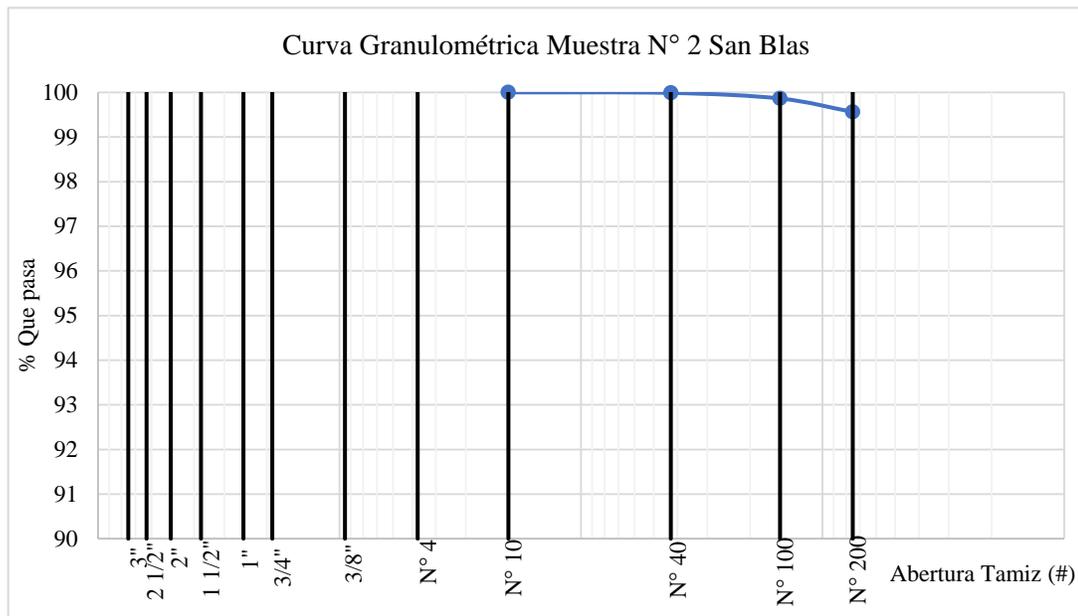
**Gráfico 3.** Curva granulométrica M-1.

**Fuente:** Elaboración propia.

**Tabla 19.** Curva granulométrica M-2.

Muestra N° 2 San Blas						
Denominación	Abertura (mm)	Masa Retenida (gr)	Masa Retenida Acumulada (gr)	% Retenido	% Retenido Acumulado	% Que Pasa
3"	75	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00
2 1/2"	63	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00
2"	50	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00
1 1/2"	37.5	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00
1"	25	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00
3/4"	19	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00
3/8"	9.5	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00
N° 4	4.75	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00
N° 10	2	0,06	0,06	0,01	0,01	99,99
N° 40	0.425	0,63	0,69	0,13	0,14	99,86
N° 100	0,15	1,50	2,19	0,30	0,44	99,56
N° 200	0,075	1,62	3,81	0,32	0,76	99,24
<b>Base</b>		496,19		99,24	100,00	
<b>TOTAL</b>		500,00		100,00		

**Fuente:** Elaboración propia.

**Gráfico 4.** Curva granulométrica M-2.

**Fuente:** Elaboración propia.

Los resultados del análisis granulométrico de ambas muestras mostrados en las tablas 20 el porcentaje retenido en el tamiz 200 es del 0,33% perteneciente a arcillas y el porcentaje de finos es del 99,67% y en la tabla el porcentaje retenido en el tamiz 200 es del 0,75% perteneciente a arcillas y el porcentaje de finos es del 99,25%.

**Figura 11.** Lavado de suelo fino.

**Fuente.** Elaboración propia

**Figura 12.** Muestra de suelo final.



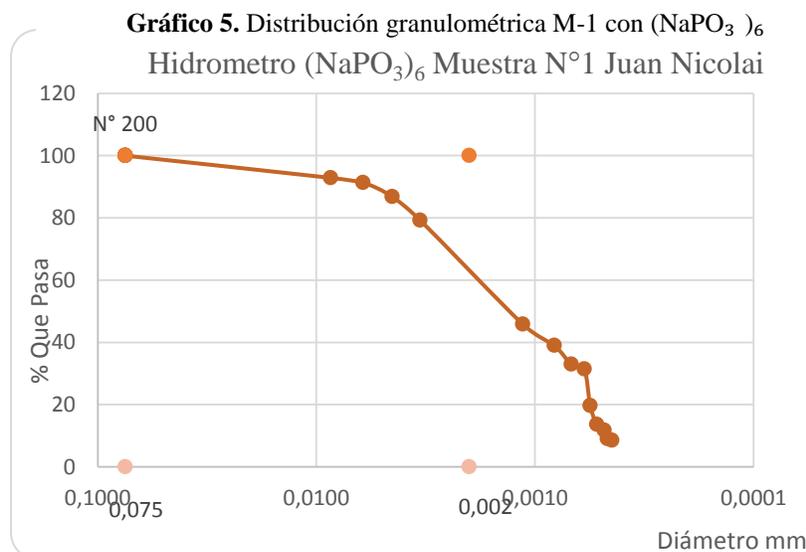
**Fuente.** Elaboración propia

### 3.4.3. Resultado granulométrico método del hidrómetro

**Tabla 20.** Resultado de ensayo de análisis granulométrico por hidrómetro.

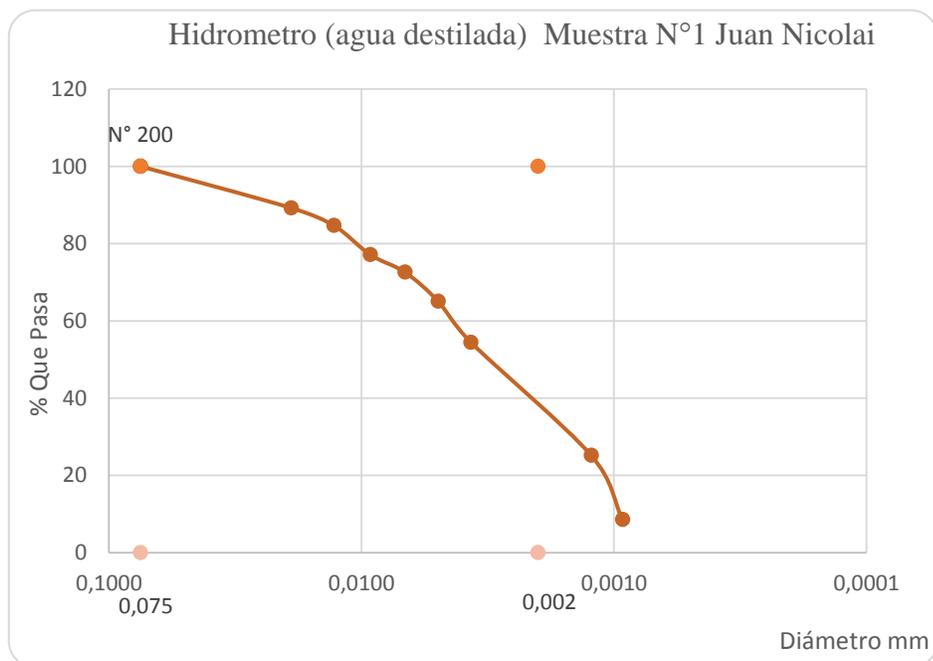
N°	Agente dispersante	Muestra	Análisis granulométrico	
			% arcillas	limos%
1	hexametafosfato de sodio	M-1	63,28	36,37
2		M-2	39,34	59,90
1	Agua destilada	M-1	61,51	38,15
2		M-2	46,39	52,85

**Fuente:** Elaboración propia.



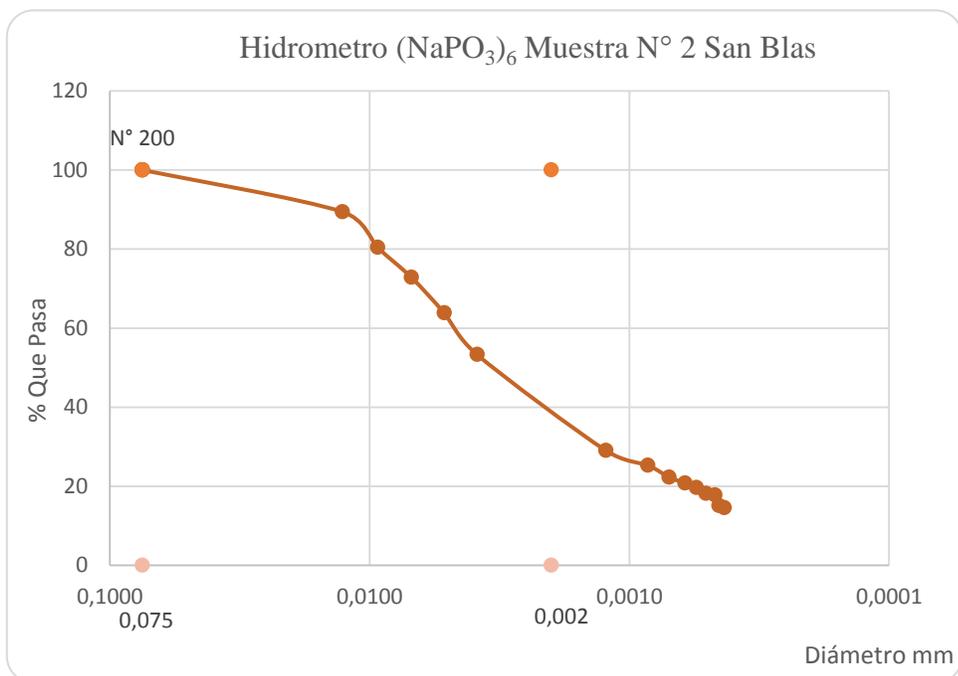
**Fuente:** Elaboración propia.

**Gráfico 6.** Distribución granulométrica M-1 con agua destilada.

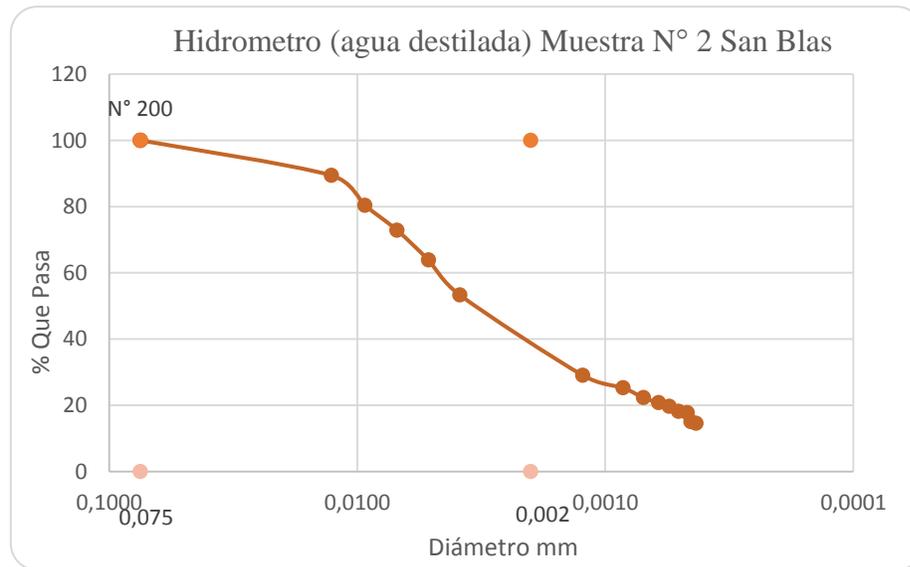


**Fuente:** Elaboración propia.

**Gráfico 7.** Distribución granulométrica M-2 con  $(\text{NaPO}_3)_6$



**Fuente:** Elaboración propia.

**Gráfico 8.** Distribución granulométrica M-2 con agua destilada.

**Fuente:** Elaboración propia.

Por otra parte, analizando los resultados por el método del hidrómetro con el agente dispersante hexametáfosfato de sodio se tiene que la muestra M-1 tiene un porcentaje de arcillas de 63,28% y 36,72% de limos y la muestra M-2 tiene un 39,34% de arcillas y 60,66% de limos.

Usando como agente dispersante el agua destilada se puede corroborar que la muestra M-1 tiene un porcentaje mayor de arcillas con 52,76 % y 47,24% de limos, y que la M-2 tiene arcillas en proporciones menores con 23,12% y 76,88 % de limos.

#### 3.4.4. Resultados de peso específico

**Tabla 21.** Resultados de peso específico de sólidos.

Muestra	Peso Específico	
M-1	2,713	(g/cm <sup>3</sup> )
M-2	2,757	(g/cm <sup>3</sup> )
C.C.	2,415	(g/cm <sup>3</sup> )

**Fuente:** Elaboración propia.

### 3.4.5. Resultados de límites de consistencia e índice de expansión

En las tablas posteriores se encontrarán los resultados de los ensayos de límite líquido, plástico e índice de expansión de las 2 muestras, tanto en estado natural y adicionado con la ceniza de carbón a los diferentes porcentajes.

**Tabla 22.** Resultados de límites de consistencia M-1.

<b>Muestra N° 1 Juan Nicolai</b>			
<b>Muestra</b>	<b>Límites de consistencia</b>		
	<b>Límite líquido %</b>	<b>Límite plástico %</b>	<b>Índice de plasticidad %</b>
<b>M-1</b>	66,73	23,50	43,23
	66,73	23,92	42,80
<b>M-1+10% C.C</b>	65,31	33,01	32,30
	64,78	32,49	32,28
<b>M-1+15% C.C</b>	65,22	40,92	24,30
	64,72	39,88	24,84
<b>M-1+20% C.C</b>	65,04	41,79	23,24
	64,37	41,00	23,37
<b>M-1+25% C.C</b>	63,27	42,14	21,13
	63,55	42,61	20,94
<b>M-1+30% C.C</b>	62,88	42,88	20,00
	62,95	43,27	19,69

**Fuente:** Elaboración propia.

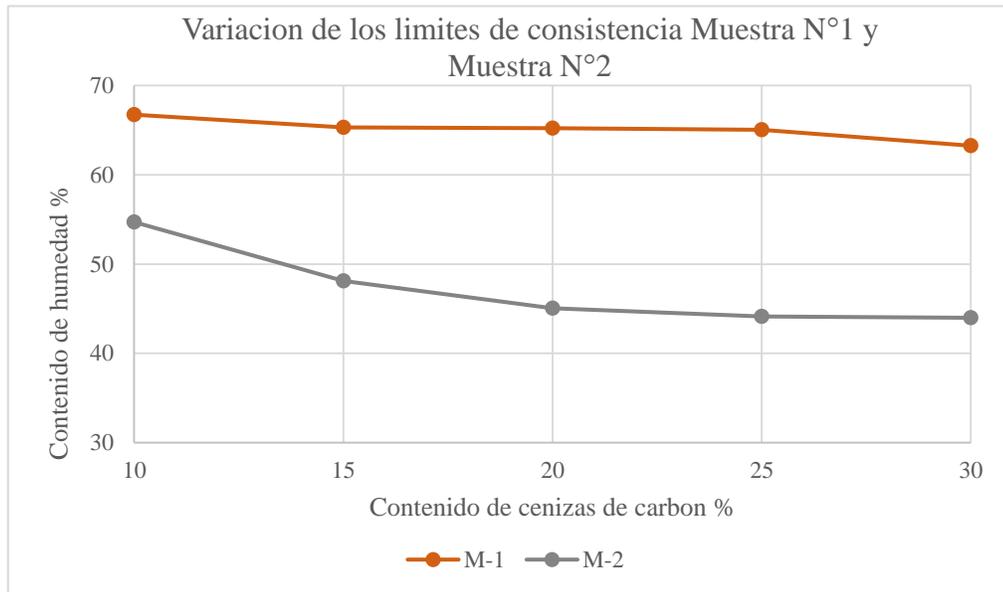
**Tabla 23.** Resultados límites de consistencia M-2.

<b>Muestra N° 2 San Blas</b>			
<b>Muestra</b>	<b>Límites de consistencia</b>		
	<b>Límite líquido %</b>	<b>Límite plástico %</b>	<b>Índice de plasticidad %</b>
<b>M-2</b>	54,72	19,87	34,85
	51,74	20,02	31,72
<b>M-2+10% C.C</b>	48,13	30,15	17,98
	48,50	30,48	18,02
<b>M-2+15% C.C</b>	45,07	31,29	13,78
	45,69	31,38	14,30
<b>M-2+20% C.C</b>	44,14	32,81	11,33
	44,00	32,53	11,47
<b>M-2+25% C.C</b>	43,47	33,99	9,48
	43,82	33,17	10,64
<b>M-2 +30% C.C</b>	43,47	33,99	9,48
	43,35	34,15	9,20

**Fuente:** Elaboración propia.

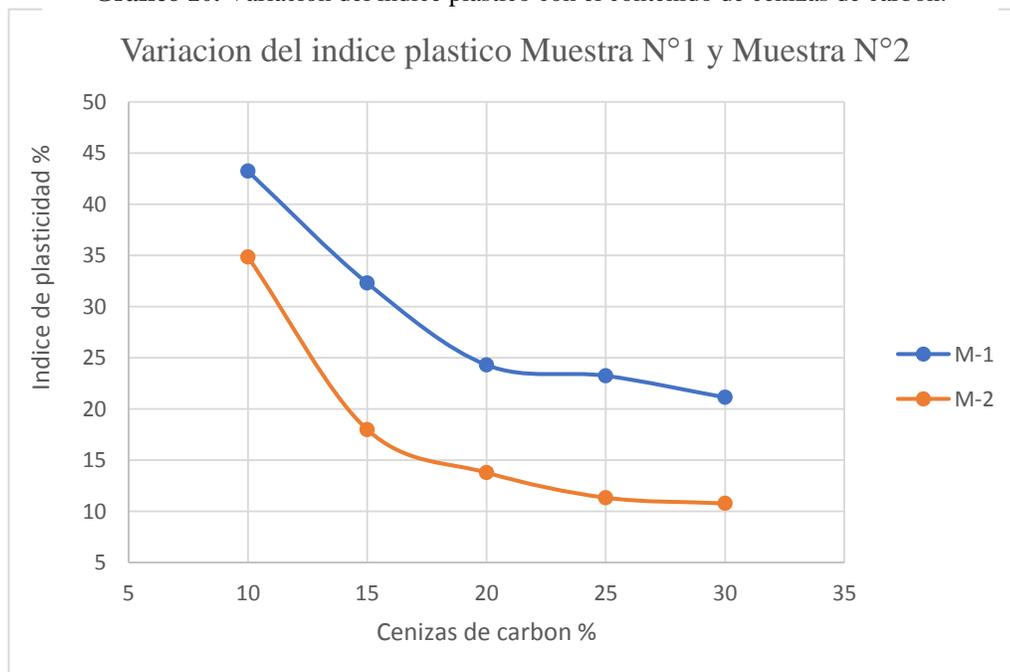
De los resultados obtenidos del ensayo de límites de consistencia en las **tablas** la muestra M-1 y M-2 presentan un límite líquido mayor a 50% y un límite plástico mayor a 20% lo cual clasifican a estos suelos como arcillas de alta compresibilidad.

**Gráfico 9.** Variación de los límites de consistencias con las cenizas de carbón.



**Fuente:** Elaboración propia.

**Gráfico 10.** Variación del índice plástico con el contenido de cenizas de carbón.



**Fuente:** Elaboración propia.

En los gráficos de los resultados de los límites de consistencia de los suelos arcillosos y sus combinaciones respectivas, se puede observar que a medida que se incrementa las cenizas de carbón el límite líquido y el índice de plasticidad disminuyen y el límite plástico aumenta.

**Figura 13.** Preparación de muestra para el ensayo.



Fuente. Elaboración propia

- **Expansividad a partir del límite líquido e índice de plasticidad**

**Tabla 24.** Resultados de la expansividad basados en el índice plástico M-1.

<b>Muestra N° 1 Juan Nicolai</b>			
<b>Muestra</b>	<b>IP</b>	<b>Potencial de expansión Chen (1988)</b>	<b>Potencial de expansión Higway Comisión (1974)</b>
<b>M-1</b>	43,23	Muy alto	Alto
	41,84	Muy alto	Alto
<b>M-1+10%</b>	32,3	Alto	Medio
<b>C.C.</b>	32,28	Alto	Medio
<b>M-1+15%</b>	24,3	Alto	Medio
<b>C.C.</b>	24,84	Alto	Medio
<b>M-1+20%</b>	23,24	Alto	Medio
<b>C.C.</b>	23,37	Alto	Medio
<b>M-1+25%</b>	21,13	Alto	Medio
<b>C.C.</b>	20,94	Medio	Medio
<b>M-1+30%</b>	20,00	Medio	Medio
<b>C.C.</b>	19,69	Medio	Medio

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 25.** Resultados de la expansividad basados en el índice plástico M-2.

<b>Muestra N° 2 San Blas</b>			
<b>Muestra</b>	<b>IP</b>	<b>Potencial de expansión Chen (1988)</b>	<b>Potencial de expansión Higway Commission (1974)</b>
<b>M-2</b>	34,85	Alto	Medio
	31,72	Alto	Medio
<b>M-2+10%</b>	17,98	Medio	Medio
<b>C.C</b>	18,02	Medio	Medio
<b>M-2+15%</b>	13,78	Medio	Bajo
<b>C.C</b>	14,30	Medio	Bajo
<b>M-2+20%</b>	11,33	Medio	Bajo
<b>C.C</b>	11,47	Medio	Bajo
<b>M-2+25%</b>	10,77	Medio	Bajo
<b>C.C</b>	10,64	Medio	Bajo
<b>M-2+30%</b>	9,48	Bajo	Bajo
<b>C.C</b>	9,20	Bajo	Bajo

**Fuente:** Elaboración propia.

Analizando las tablas de los resultados obtenidos en base a los límites de consistencia se puede observar que a medida que se incrementa las cenizas de carbón el índice de plasticidad va variando lo que lleva a que el índice de expansión disminuya que pasen de un potencial de expansión alto a bajo

**Tabla 26.** Resultados de la expansividad basados en el límite líquido M-1.

<b>Muestra N° 1 Juan Nicolai</b>		
<b>Muestra</b>	<b>Límite líquido</b>	<b>Grado de expansión Chen (1975)</b>
<b>M-1</b>	66,73	Muy alto
	65,76	Muy alto
<b>M-1+10% C.C</b>	65,31	Muy alto
	64,78	Muy alto
<b>M-1+15% C.C</b>	65,22	Muy alto
	64,72	Muy alto
<b>M-1+20% C.C</b>	65,04	Muy alto

	64,37	Muy alto
<b>M-1+25% C.C</b>	63,27	Muy alto
	63,55	Muy alto
<b>M-1+30% C.C</b>	62,88	Muy alto
	62,95	Muy alto

**Fuente:** Elaboración propia.

**Tabla 27.** Resultados de la expansividad basados en el límite líquido M-2.

<b>Muestra N° 2 San Blas</b>		
<b>Muestra</b>	<b>Límite líquido</b>	<b>Grado de expansión Chen (1975)</b>
<b>M-2</b>	54,72	Alto
	51,74	Alto
<b>M-2+10% C.C</b>	48,13	Alto
	48,50	Alto
<b>M-2+15% C.C</b>	45,07	Alto
	45,69	Alto
<b>M-2+20% C.C</b>	44,14	Alto
	44,00	Alto
<b>M-2+25% C.C</b>	43,99	Alto
	43,82	Alto
<b>M-2+30% C.C</b>	43,47	Alto
	43,35	Alto

**Fuente:** Elaboración propia.

Analizando la tabla de la muestra todos los resultados obtenidos arrojan un grado de expansión muy alto. El porcentaje de cenizas de carbón ya sea en un porcentaje mayor o menor a los establecidos no es significativo para un cambio en el resultado basado en el Límite líquido.

Sin embargo, si analizamos la tabla en este suelo si presenta cambios pasa de un grado de expansión marginal a un grado de expansión bajo.

### 3.4.6. Resultados de ensayos de clasificación SUCS

**Tabla 28.** Resultados de clasificación SUCS M-1.

<b>Muestra N° 1 Juan Nicolai</b>		
<b>Muestra/Mezcla</b>	<b>Clasificación SUCS</b>	<b>Material</b>
<b>M-1</b>	CH	Arcilla inorgánica de alta plasticidad
<b>M-1+10% C.C</b>	MH	Limos de baja plasticidad
<b>M-1+15% C.C</b>	MH	Limos de baja plasticidad
<b>M-1+20% C.C</b>	MH	Limos de baja plasticidad
<b>M-1+25% C.C</b>	MH	Limos de baja plasticidad
<b>M-1+30% C.C</b>	MH	Limos de baja plasticidad

**Fuente:** Elaboración propia.

**Tabla 29.** Resultados de clasificación SUCS M-2.

<b>Muestra N° 2 San Blas</b>		
<b>Muestra/Mezcla</b>	<b>Clasificación SUCS</b>	<b>Material</b>
<b>M-2</b>	CH	Arcilla inorgánica de alta plasticidad
<b>M-2+10% C.C</b>	MH	Limos de baja plasticidad
<b>M-2+15% C.C</b>	MH	Limos de baja plasticidad
<b>M-2+20% C.C</b>	MH	Limos de baja plasticidad
<b>M-2+25% C.C</b>	MH	Limos de baja plasticidad
<b>M-2+30% C.C</b>	MH	Limos de baja plasticidad

**Fuente:** Elaboración propia.

Analizando las tablas de resultados de ambas muestras se puede apreciar el cambio que existe pasando de ser un suelo arcilloso de alta plasticidad CH a un suelo limoso de baja plasticidad MH.

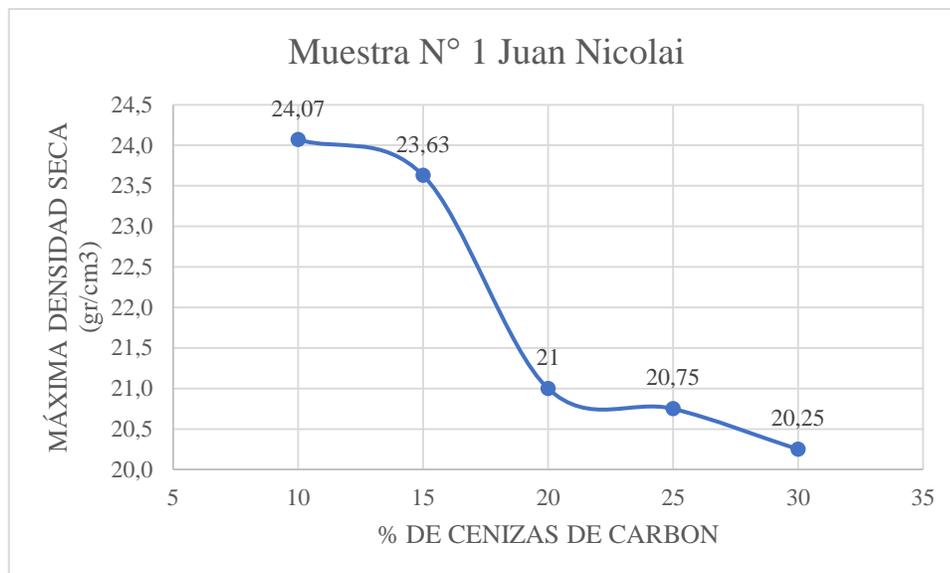
### 3.4.7. Resultados del ensayo de Proctor estándar

**Tabla 30.** Contenido de humedad óptima y densidad máxima M-1.

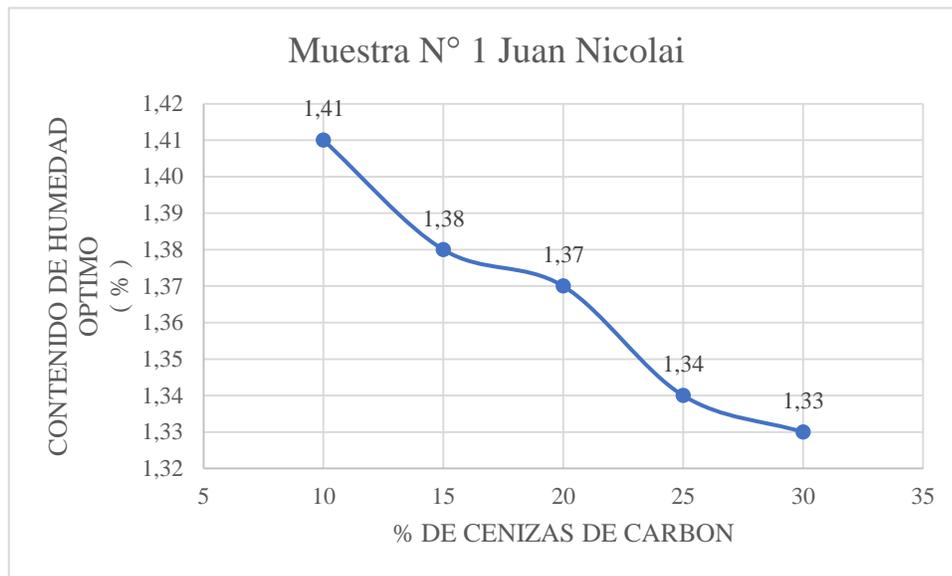
Muestra N° 1 Juan Nicolai		
Muestra	Proctor Estándar	
	Contenido de Humedad Óptimo (%)	Máxima densidad seca (gr/cm <sup>3</sup> )
M-1	26,2	1,43
M-1 + 10% C.C.	24,07	1,41
M-1 + 15% C.C.	23,63	1,38
M-1 + 20% C.C.	21,00	1,37
M-1 + 25% C.C.	20,75	1,34
M-1 + 30% C.C.	20,25	1,33

**Fuente:** Elaboración propia.

**Gráfico 11.** Densidad máxima vs. % de cenizas de carbón M-1.



**Fuente:** Elaboración propia.

**Gráfico 12.** Contenido de humedad vs. % de cenizas de carbón M-1.

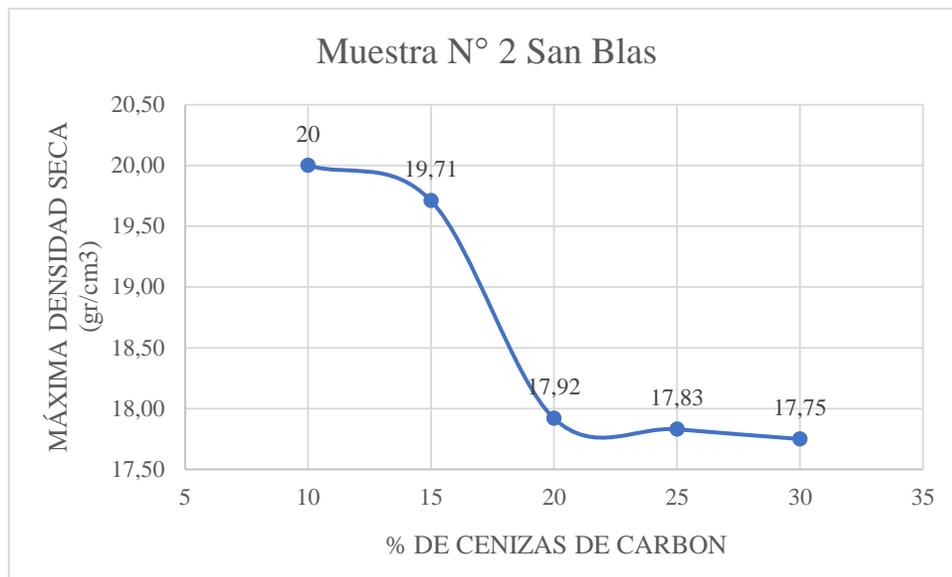
**Fuente:** Elaboración propia.

**Tabla 31.** Contenido de humedad optima y densidad máxima M-2.

<b>Muestra N° 2 San Blas</b>		
<b>Muestra</b>	<b>Proctor Estándar</b>	
	<b>Contenido de Humedad Óptimo (%)</b>	<b>Máxima densidad seca (gr/cm<sup>3</sup>)</b>
<b>M-2</b>	20,75	1,55
<b>M-2 + 10% C.C.</b>	20,00	1,49
<b>M-2 + 15% C.C.</b>	19,71	1,48
<b>M-2 + 20% C.C.</b>	17,92	1,48
<b>M-2 + 25% C.C.</b>	17,83	1,48
<b>M-2 + 30% C.C.</b>	17,75	1,48

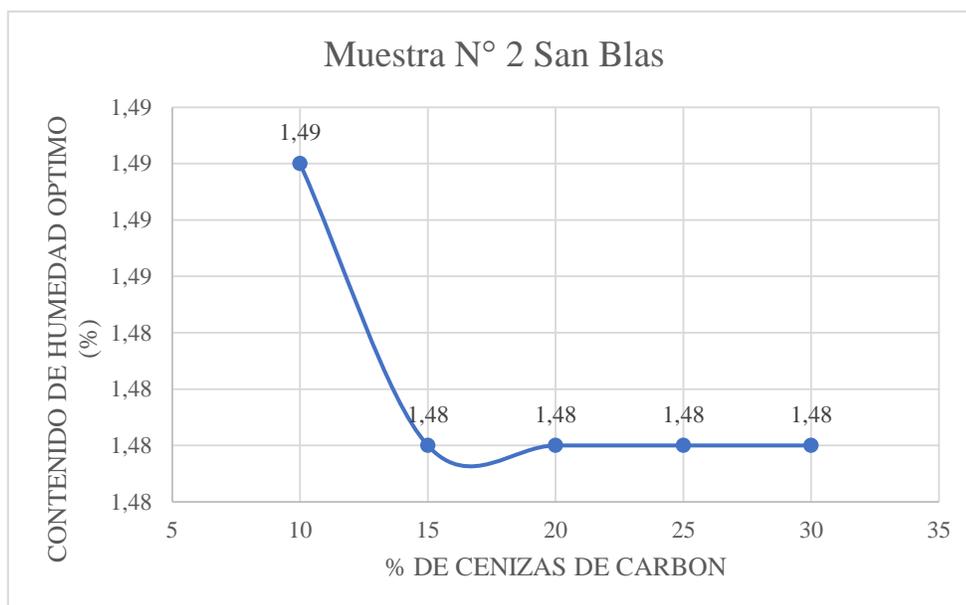
**Fuente:** Elaboración propia.

**Gráfico 13.** Densidad máxima vs % de cenizas de carbón M-2.



**Fuente:** Elaboración propia.

**Gráfico 14.** Contenido de humedad vs % de cenizas de carbón M-2.



**Fuente:** Elaboración propia.

**Tabla 32.** Resumen de resultados de muestras de suelos.

Ítem	Muestra N°1 Juan Nicolai	Muestra N° 2 San Blas	Ceniza de Carbón
Granulometría (pasa el tamiz N° 200)	99,66%	99,24%	-
Hidrómetro (hexametáfosfato de sodio)	63.28% Arcilla - 36.72% Limo	39.34% Arcilla - 60,66% Limo	-
Hidrómetro (Agua destilada)	61,85% Arcilla - 38,15% Limo	46,39% Arcilla - 53,61% Limo	89,53% - 10,47%
Peso específico	2,715 (gr/cm <sup>3</sup> )	2,757 (gr/cm <sup>3</sup> )	2,415 (gr/cm <sup>3</sup> )
Limite líquido	66,73%	53,23%	-
Limite plástico	23,83%	19,95%	-
Índice de plasticidad	43,02%	33,29%	-
Potencial de expansión (Chen 1988)	Muy alto	Alto	-
Potencial de expansión (Highway C. 1974)	Alto	Medio	-
Clasificación SUCS	CH (Arcilla inorgánica de alta plasticidad)	CH (Arcilla inorgánica de alta plasticidad)	-
Humedad Óptima	26,20%	20,75%	-
Densidad Máxima	1,43 (gr/cm <sup>3</sup> )	1,55 (gr/cm <sup>3</sup> )	-

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 33.** Resumen de resultados de ensayos de suelos con ceniza de carbón.

Ítem	Muestra N°1 Juan Nicolai	Muestra N° 2 San Blas
Limite líquido (10% Ceniza de carbón)	65,05%	48,32%
Limite líquido (15% Ceniza de carbón)	64,97%	45,38%
Limite líquido (20% Ceniza de carbón)	64,71%	44,07%
Limite líquido (25% Ceniza de carbón)	63,41%	43,65%
Limite líquido (30% Ceniza de carbón)	62,92%	43,41%
Limite plástico (10% Ceniza de carbón)	32,75%	30,32%
Limite plástico (15% Ceniza de carbón)	40,40%	31,34%
Limite plástico (20% Ceniza de carbón)	41,40%	32,67%
Limite plástico (25% Ceniza de carbón)	42,38%	33,58%
Limite plástico (30% Ceniza de carbón)	43,08%	34,07%
Índice de plasticidad (10% Ceniza de carbón)	32,30%	18,00%
Índice de plasticidad (15% Ceniza de carbón)	24,57%	14,05%
Índice de plasticidad (20% Ceniza de carbón)	23,31%	11,40%
Índice de plasticidad (25% Ceniza de carbón)	21,04%	10,07%
Índice de plasticidad (30% Ceniza de carbón)	19,84%	9,34%
Potencial de expansión (Chen 1988) 10% C.C.	Alto	Medio

Potencial de expansión (Chen 1988) 15% C.C.	Alto	Medio
Potencial de expansión (Chen 1988) 20% C.C.	Alto	Medio
Potencial de expansión (Chen 1988) 25% C.C.	Alto	Medio
Potencial de expansión (Chen 1988) 30% C.C.	Medio	Bajo
Potencial de expansión (Highway C. 1974) 10% C.C.	Medio	Medio
Potencial de expansión (Highway C. 1974) 15% C.C.	Medio	Bajo
Potencial de expansión (Highway C. 1974) 20% C.C.	Medio	Bajo
Potencial de expansión (Highway C. 1974) 25% C.C.	Medio	Bajo
Potencial de expansión (Highway C. 1974) 30% C.C.	Medio	Bajo
Clasificación SUCS (10% Ceniza de Carbón)	MH (Limos de baja plasticidad)	MH (Limos de baja plasticidad)
Clasificación SUCS (15% Ceniza de Carbón)	MH (Limos de baja plasticidad)	MH (Limos de baja plasticidad)
Clasificación SUCS (20% Ceniza de Carbón)	MH (Limos de baja plasticidad)	MH (Limos de baja plasticidad)
Clasificación SUCS (25% Ceniza de Carbón)	MH (Limos de baja plasticidad)	MH (Limos de baja plasticidad)
Clasificación SUCS (30% Ceniza de Carbón)	MH (Limos de baja plasticidad)	MH (Limos de baja plasticidad)
Humedad Optima (10% Ceniza de Carbón)	24,07%	20,00%
Humedad Optima (15% Ceniza de Carbón)	23,63%	19,71%
Humedad Optima (20% Ceniza de Carbón)	21,00%	17,92%
Humedad Optima (25% Ceniza de Carbón)	20,75%	17,83%
Humedad Optima (30% Ceniza de Carbón)	20,25%	17,75%
Densidad Máxima (10% Ceniza de Carbón)	1,41 (gr/cm <sup>3</sup> )	1,49 (gr/cm <sup>3</sup> )
Densidad Máxima (15% Ceniza de Carbón)	1,38 (gr/cm <sup>3</sup> )	1,48 (gr/cm <sup>3</sup> )
Densidad Máxima (20% Ceniza de Carbón)	1,37 (gr/cm <sup>3</sup> )	1,48 (gr/cm <sup>3</sup> )
Densidad Máxima (25% Ceniza de Carbón)	1,34 (gr/cm <sup>3</sup> )	1,48 (gr/cm <sup>3</sup> )
Densidad Máxima (30% Ceniza de Carbón)	1,33 (gr/cm <sup>3</sup> )	1,48 (gr/cm <sup>3</sup> )

**Fuente:** Elaboración propia.

## CAPÍTULO IV

### PROCESAMIENTO Y VALIDACIÓN DE RESULTADOS

#### 4.1. Resultados obtenidos de consolidación

##### 4.1.1. Resultados muestra – 1

##### 4.1.1.1. Cálculo del tiempo T90

Tabla 34. Resultados del tiempo T90.

<b>Muestra N° 1 Juan Nicolai</b>				
<b>Adicionando 10% de cenizas de carbón</b>				
<b>N° de ensayos</b>	<b>6 kg</b>	<b>8 kg</b>	<b>16 kg</b>	<b>32 kg</b>
<b>1</b>	1,21	1,00	1,32	1,23
<b>2</b>	0,64	0,81	0,81	1,00
<b>3</b>	1,00	0,81	1,21	1,44
<b>Adicionando 15% de cenizas de carbón</b>				
<b>N° de ensayos</b>	<b>6 kg</b>	<b>8 kg</b>	<b>16 kg</b>	<b>32 kg</b>
<b>1</b>	0,81	1,10	3,61	2,25
<b>2</b>	1,00	0,81	1,44	1,44
<b>3</b>	1,00	1,21	1,00	0,64
<b>Adicionando 20% de cenizas de carbón</b>				
<b>N° de ensayos</b>	<b>6 kg</b>	<b>8 kg</b>	<b>16 kg</b>	<b>32 kg</b>
<b>1</b>	1,00	1,21	1,44	1,44
<b>2</b>	1,44	0,81	1,00	3,61
<b>3</b>	0,81	1,00	0,81	0,81
<b>Adicionando 25% de cenizas de carbón</b>				
<b>N° de ensayos</b>	<b>6 kg</b>	<b>8 kg</b>	<b>16 kg</b>	<b>32 kg</b>
<b>1</b>	1,00	1,21	1,44	1,69
<b>2</b>	1,00	1,00	1,21	1,44
<b>3</b>	1,00	1,00	1,44	1,44
<b>Adicionando 30% de cenizas de carbón</b>				
<b>N° de ensayos</b>	<b>6 kg</b>	<b>8 kg</b>	<b>16 kg</b>	<b>32 kg</b>
<b>1</b>	1,00	1,00	1,21	1,44
<b>2</b>	0,81	1,00	1,00	1,21
<b>3</b>	0,81	1,00	1,00	1,21

**Fuente:** Elaboración propia.

#### 4.1.1.2. Coeficiente de consolidación

Tabla 35. Resultados coeficiente de consolidación.

<b>Muestra N° 1 Juan Nicolai</b>				
<b>Adicionando 10% de cenizas de carbón</b>				
<b>N° de ensayos</b>	<b>6 kg</b>	<b>8 kg</b>	<b>16 kg</b>	<b>32 kg</b>
<b>1</b>	0,0000641	0,0000848	0,0000641	0,0000688
<b>2</b>	0,0001325	0,0001047	0,0001047	0,0000848
<b>3</b>	0,0000848	0,0001047	0,0000701	0,0000589
<b>Adicionando 15% de cenizas de carbón</b>				
<b>N° de ensayos</b>	<b>6 kg</b>	<b>8 kg</b>	<b>16 kg</b>	<b>32 kg</b>
<b>1</b>	0,0001047	0,0000769	0,0000235	0,0000377
<b>2</b>	0,0000848	0,0001047	0,0000701	0,0000589
<b>3</b>	0,0000848	0,0000701	0,0000848	0,0001325
<b>Adicionando 20% de cenizas de carbón</b>				
<b>N° de ensayos</b>	<b>6 kg</b>	<b>8 kg</b>	<b>16 kg</b>	<b>32 kg</b>
<b>1</b>	0,0000848	0,0000701	0,0000589	0,0000589
<b>2</b>	0,0000589	0,0001047	0,0000848	0,0000235
<b>3</b>	0,0000848	0,0001047	0,0000848	0,0001047
<b>Adicionando 25% de cenizas de carbón</b>				
<b>N° de ensayos</b>	<b>6 kg</b>	<b>8 kg</b>	<b>16 kg</b>	<b>32 kg</b>
<b>1</b>	0,0000848	0,0000701	0,0000589	0,0000502
<b>2</b>	0,0000848	0,0000848	0,0000701	0,0000589
<b>3</b>	0,0000848	0,0000848	0,0000589	0,0000589
<b>Adicionando 30% de cenizas de carbón</b>				
<b>N° de ensayos</b>	<b>6 kg</b>	<b>8 kg</b>	<b>16 kg</b>	<b>32 kg</b>
<b>1</b>	0,0000848	0,0000848	0,0000701	0,0000589
<b>2</b>	0,0001047	0,0000848	0,0000848	0,0000701
<b>3</b>	0,0001047	0,0000848	0,0000848	0,0000701

Fuente: Elaboración propia.

## 4.1.1.3. Altura final de la muestra

Tabla 36. Resultados de altura final de la muestra.

<b>Muestra N° 1 Juan Nicolai</b>			
<b>Adicionando 10% de cenizas de carbón</b>			
<b>Presión (KN/m2)</b>	<b>N° de ensayos</b>		
	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>
0,00	20,00	20,00	20,00
305.58	20,24	20,35	20,32
407.44	20,04	19,97	20,13
814.87	19,57	19,44	19,80
1629.75	19,05	18,79	18,74
<b>Adicionando 15% de cenizas de carbón</b>			
<b>Presión (KN/m2)</b>	<b>N° de ensayos</b>		
	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>
0,00	20,00	20,00	20,00
305,58	20,38	20,33	20,30
407,44	20,11	20,12	20,11
814,87	19,78	19,73	19,47
1629,75	18,77	18,76	18,72
<b>Adicionando 20% de cenizas de carbón</b>			
<b>Presión (KN/m2)</b>	<b>N° de ensayos</b>		
	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>
0,00	20,00	20,00	20,00
305,58	20,37	20,33	20,36
407,44	20,26	20,08	20,11
814,87	19,81	19,75	19,77
1629,75	18,76	18,89	18,72
<b>Adicionando 25% de cenizas de carbón</b>			
<b>Presión (KN/m2)</b>	<b>N° de ensayos</b>		
	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>
0,00	20,00	20,00	20,00
305,58	19,91	19,90	19,94
407,44	19,78	19,74	19,78
814,87	19,33	19,34	19,38
1629,75	18,59	18,60	18,64
<b>Adicionando 30% de cenizas de carbón</b>			
<b>Presión (KN/m2)</b>	<b>N° de ensayos</b>		
	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>
0,00	20,00	20,00	20,00
305,58	19,83	19,83	19,83

407,44	19,65	19,67	19,66
814,87	18,96	19,04	19,04
1629,75	18,09	18,23	18,22

Fuente: Elaboración propia.

#### 4.1.1.4. Altura de sólidos

Tabla 37. Resultados altura de sólidos.

<b>Muestra N° 1 Juan Nicolai</b>			
<b>Adicionando 10% de cenizas de carbón</b>			
<b>Hs (mm)</b>	<b>N° de ensayos</b>		
	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>
	15,34	15,92	15,19
<b>Adicionando 15% de cenizas de carbón</b>			
<b>Hs (mm)</b>	<b>N° de ensayos</b>		
	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>
	15,80	16,00	15,95
<b>Adicionando 20% de cenizas de carbón</b>			
<b>Hs (mm)</b>	<b>N° de ensayos</b>		
	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>
	16,29	16,54	16,44
<b>Adicionando 25% de cenizas de carbón</b>			
<b>Hs (mm)</b>	<b>N° de ensayos</b>		
	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>
	16,27	16,52	16,42
<b>Adicionando 30% de cenizas de carbón</b>			
<b>Hs (mm)</b>	<b>N° de ensayos</b>		
	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>
	15,01	15,25	15,16

Fuente: Elaboración propia.

#### 4.1.1.5. Altura de vacíos

Tabla 38. Resultados altura de vacíos.

<b>Muestra N° 1 Juan Nicolai</b>			
<b>Adicionando 10% de cenizas de carbón</b>			
<b>Presión (KN/m2)</b>	<b>N° de ensayos</b>		
	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>
0,00	0,30	0,26	0,32
305,58	0,32	0,28	0,34

407.44	0,31	0,25	0,33
814.87	0,28	0,22	0,30
1629.75	0,24	0,18	0,23
<b>Adicionando 15% de cenizas de carbón</b>			
Presión (KN/m2)	N° de ensayos		
	1	2	3
0,00	0,27	0,25	0,25
305.58	0,29	0,27	0,27
407.44	0,27	0,26	0,26
814.87	0,25	0,23	0,22
1629.75	0,19	0,17	0,17
<b>Adicionando 20% de cenizas de carbón</b>			
Presión (KN/m2)	N° de ensayos		
	1	2	3
0,00	0,23	0,21	0,22
305.58	0,25	0,23	0,24
407.44	0,24	0,21	0,22
814.87	0,22	0,19	0,20
1629.75	0,15	0,14	0,14
<b>Adicionando 25% de cenizas de carbón</b>			
Presión (KN/m2)	N° de ensayos		
	1	2	3
0,00	0,23	0,21	0,22
305,58	0,22	0,20	0,21
407,44	0,22	0,20	0,20
814,87	0,19	0,17	0,18
1629,75	0,14	0,13	0,14
<b>Adicionando 30% de cenizas de carbón</b>			
Presión (KN/m2)	N° de ensayos		
	1	2	3
0,00	0,33	0,31	0,32
305,58	0,32	0,30	0,31
407,44	0,31	0,29	0,30
814,87	0,26	0,25	0,26
1629,75	0,21	0,20	0,20

Fuente: Elaboración propia.

#### 4.1.1.6. Coeficiente de compresibilidad

Tabla 39. Resultados de coeficiente de compresibilidad.

<b>Muestra N° 1 Juan Nicolai</b>			
<b>Adicionando 10% de cenizas de carbón</b>			
<b>Presión (KN/m2)</b>	<b>N° de ensayos</b>		
	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>
0,00			
305.58	0,000051	0,000071	0,000070
407.44	0,000124	0,000232	0,000125
814.87	0,000076	0,000082	0,000054
1629.75	0,000042	0,000050	0,000085
<b>Adicionando 15% de cenizas de carbón</b>			
<b>Presión (KN/m2)</b>	<b>N° de ensayos</b>		
	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>
0,00			
305.58	0,000079	0,000067	0,000061
407.44	0,000167	0,000126	0,000117
814.87	0,000052	0,000059	0,000098
1629.75	0,000078	0,000075	0,000058
<b>Adicionando 20% de cenizas de carbón</b>			
<b>Presión (KN/m2)</b>	<b>N° de ensayos</b>		
	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>
0,00			
305.58	0,000074	0,000066	0,000072
407.44	0,000065	0,000150	0,000151
814.87	0,000068	0,000049	0,000050
1629.75	0,000079	0,000064	0,000079
<b>Adicionando 25% de cenizas de carbón</b>			
<b>Presión (KN/m2)</b>	<b>N° de ensayos</b>		
	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>
0,00			
305.58	0,000018	0,000021	0,000013
407.44	0,000082	0,000092	0,000092
814.87	0,000067	0,000060	0,000060
1629.75	0,000056	0,000055	0,000055
<b>Adicionando 30% de cenizas de carbón</b>			
<b>Presión (KN/m2)</b>	<b>N° de ensayos</b>		
	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>
0,00			
305.58	0,000036	0,000037	0,000037

407.44	0,000118	0,000104	0,000107
814.87	0,000114	0,000100	0,000101
1629.75	0,000070	0,000066	0,000066

Fuente: Elaboración propia.

#### 4.1.1.7. Coeficiente de compresibilidad volumétrica

Tabla 40. Resultados de compresibilidad volumétrica.

<b>Muestra N° 1 Juan Nicolai</b>			
<b>Adicionando 10% de cenizas de carbón</b>			
<b>Presión (KN/m2)</b>	<b>N° de ensayos</b>		
	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>
0,00			
305.58	0,000039	0,000057	0,000053
407.44	0,000095	0,000185	0,000095
814.87	0,000058	0,000065	0,000041
1629.75	0,000032	0,000039	0,000065
<b>Adicionando 15% de cenizas de carbón</b>			
<b>Presión (KN/m2)</b>	<b>N° de ensayos</b>		
	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>
0,00			
305.58	0,000062	0,000053	0,000049
407.44	0,000132	0,000100	0,000093
814.87	0,000041	0,000047	0,000078
1629.75	0,000062	0,000060	0,000046
<b>Adicionando 20% de cenizas de carbón</b>			
<b>Presión (KN/m2)</b>	<b>N° de ensayos</b>		
	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>
0,00			
305.58	0,000061	0,000054	0,000059
407.44	0,000053	0,000124	0,000124
814.87	0,000056	0,000041	0,000041
1629.75	0,000064	0,000053	0,000065
<b>Adicionando 25% de cenizas de carbón</b>			
<b>Presión (KN/m2)</b>	<b>N° de ensayos</b>		
	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>
0,00			
305.58	0,000014	0,000017	0,000010
407.44	0,000067	0,000076	0,000076
814.87	0,000054	0,000050	0,000050

1629.75	0,000046	0,000045	0,000045
<b>Adicionando 30% de cenizas de carbón</b>			
<b>Presión (KN/m2)</b>	<b>N° de ensayos</b>		
	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>
0,00			
305.58	0,000027	0,000028	0,000028
407.44	0,000088	0,000080	0,000081
814.87	0,000086	0,000076	0,000077
1629.75	0,000053	0,000050	0,000050

Fuente: Elaboración propia.

#### 4.1.1.8.Esfuerzo de compresión

Tabla 41. Resultados de esfuerzo de compresión.

<b>Muestra N° 1 Juan Nicolai</b>			
<b>Adicionando 10% de cenizas de carbón</b>			
<b>Presión</b>	<b>N° de ensayos</b>		
	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>
	920,00	500,00	590,00
<b>Adicionando 15% de cenizas de carbón</b>			
<b>Presión</b>	<b>N° de ensayos</b>		
	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>
	710,00	700,00	600,00
<b>Adicionando 20% de cenizas de carbón</b>			
<b>Presión</b>	<b>N° de ensayos</b>		
	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>
	700,00	650,00	700,00
<b>Adicionando 25% de cenizas de carbón</b>			
<b>Presión</b>	<b>N° de ensayos</b>		
	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>
	650,00	700,00	690,00
<b>Adicionando 30% de cenizas de carbón</b>			
<b>Presión</b>	<b>N° de ensayos</b>		
	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>
	550,00	600,00	610,00

Fuente: Elaboración propia.

#### 4.1.1.9. Índice de compresión

**Tabla 42.** Resultados de índice de compresión.

<b>Muestra N° 1 Juan Nicolai</b>			
<b>Adicionando 10% de cenizas de carbón</b>			
<b>Cc</b>	<b>N° de ensayos</b>		
	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>
	0,20	0,08	0,12
<b>Adicionando 15% de cenizas de carbón</b>			
<b>Cc</b>	<b>N° de ensayos</b>		
	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>
	0,10	0,14	0,18
<b>Adicionando 20% de cenizas de carbón</b>			
<b>Cc</b>	<b>N° de ensayos</b>		
	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>
	0,21	0,23	0,25
<b>Adicionando 25% de cenizas de carbón</b>			
<b>Cc</b>	<b>N° de ensayos</b>		
	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>
	0,17	0,16	0,13
<b>Adicionando 30% de cenizas de carbón</b>			
<b>Cc</b>	<b>N° de ensayos</b>		
	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>
	0,18	0,17	0,18

**Fuente:** Elaboración propia.

#### 4.1.1.10. Índice de recompresión

**Tabla 43.** Resultados de índice de recompresión.

<b>Muestra N° 1 Juan Nicolai</b>			
<b>Adicionando 10% de cenizas de carbón</b>			
<b>Cr</b>	<b>N° de ensayos</b>		
	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>
	0,10	0,19	0,10
<b>Adicionando 15% de cenizas de carbón</b>			
<b>Cr</b>	<b>N° de ensayos</b>		
	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>
	0,14	0,10	0,10

<b>Adicionando 20% de cenizas de carbón</b>			
<b>Cr</b>	<b>N° de ensayos</b>		
	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>
	0,05	0,12	0,12
<b>Adicionando 25% de cenizas de carbón</b>			
<b>Cr</b>	<b>N° de ensayos</b>		
	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>
	0,07	0,07	0,08
<b>Adicionando 30% de cenizas de carbón</b>			
<b>Cr</b>	<b>N° de ensayos</b>		
	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>
	0,10	0,09	0,02

Fuente: Elaboración propia.

#### 4.1.1.11. Índice de hinchamiento

Tabla 44. Resultados de índice de hinchamiento.

<b>Muestra N° 1 Juan Nicolai</b>			
<b>Adicionando 10% de cenizas de carbón</b>			
<b>Cs</b>	<b>N° de ensayos</b>		
	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>
	0,03	0,04	0,07
<b>Adicionando 15% de cenizas de carbón</b>			
<b>Cs</b>	<b>N° de ensayos</b>		
	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>
	0,02	0,07	0,04
<b>Adicionando 20% de cenizas de carbón</b>			
<b>Cs</b>	<b>N° de ensayos</b>		
	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>
	0,02	0,05	0,05
<b>Adicionando 25% de cenizas de carbón</b>			
<b>Cs</b>	<b>N° de ensayos</b>		
	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>
	0,03	0,04	0,01
<b>Adicionando 30% de cenizas de carbón</b>			
<b>Cs</b>	<b>N° de ensayos</b>		
	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>
	0,02	0,02	0,02

Fuente: Elaboración propia.

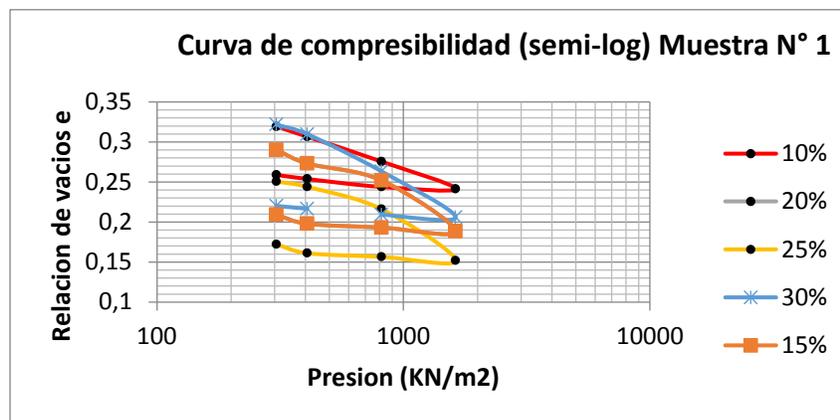
#### 4.1.1.12. Compresibilidad de la muestra

Tabla 45. Resultados de compresibilidad de la muestra.

Muestra N° 1 Juan Nicolai	
% Cenizas	$\sigma'_0 > \sigma'_c$
10%	Sobre consolidado
15%	Sobre consolidado
20%	Sobre consolidado
25%	Sobre consolidado
30%	Sobre consolidado

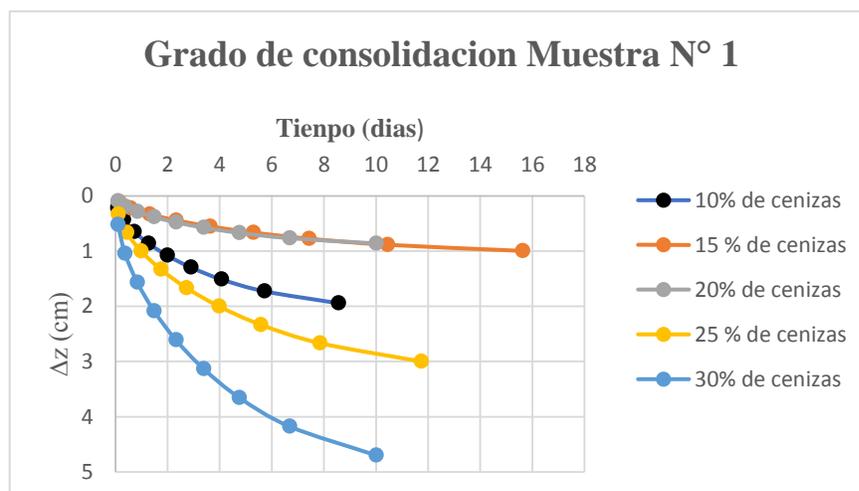
Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 15. Curva de compresibilidad.



Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 16. Grado de consolidación.



Fuente: Elaboración propia.

#### 4.1.2. Resultados muestra – 2

##### 4.1.2.1. Cálculo del tiempo T90

Tabla 46. Resultados del tiempo T90.

Muestra N° 2 San Blas					
Adicionando 10% de cenizas de carbón					
N° de ensayos	2 kg	6 kg	8 kg	16 kg	32 kg
1	0,90	0,98	0,98	1,00	2,20
2	0,90	0,90	1,00	1,00	1,10
3	0,80	0,90	1,00	1,00	0,90
Adicionando 15% de cenizas de carbón					
N° de ensayos	2 kg	6 kg	8 kg	16 kg	32 kg
1	0,60	0,90	1,00	1,10	1,20
2	0,80	0,90	1,00	1,10	1,10
3	0,00	1,00	1,00	0,90	1,10
Adicionando 20% de cenizas de carbón					
N° de ensayos	2 kg	6 kg	8 kg	16 kg	32 kg
1	0,80	1,00	0,90	0,90	1,00
2	1,00	1,00	1,10	1,10	1,10
3	1,00	1,00	1,10	1,10	1,10
Adicionando 25% de cenizas de carbón					
N° de ensayos	2 kg	6 kg	8 kg	16 kg	32 kg
1	0,70	1,00	0,90	0,90	1,00
2	1,00	1,00	0,80	0,90	1,00
3	0,80	1,00	0,80	0,90	1,00
Adicionando 30% de cenizas de carbón					
N° de ensayos	2 kg	6 kg	8 kg	16 kg	32 kg
1	0,60	1,00	0,90	0,90	0,80
2	0,60	1,00	0,90	0,90	0,80
3	0,80	1,10	1,00	1,00	0,90

Fuente: Elaboración propia.

##### 4.1.2.2. Coeficiente de consolidación

Tabla 47. Resultados coeficiente de consolidación.

Muestra N° 2 San Blas					
Adicionando 10% de cenizas de carbón					
N° de ensayos	2 kg	6 kg	8 kg	16 kg	32 kg
1	0,0001047	0,0000980	0,0000883	0,0000848	1,7521E-05
2	0,0001047	0,0001047	0,0000848	0,0000848	7,0083E-05
3	0,0001325	0,0001047	0,0000848	0,0000848	0,00010469

<b>Adicionando 15% de cenizas de carbón</b>					
<b>N° de ensayos</b>	<b>2 kg</b>	<b>6 kg</b>	<b>8 kg</b>	<b>16 kg</b>	<b>32 kg</b>
<b>1</b>	0,0002356	0,0001047	0,0000848	0,0000701	5.8889E-05
<b>2</b>	0,0001325	0,0001047	0,0000848	0,0000701	7.0083E-05
<b>3</b>	0,0001325	0,0000848	0,0000848	0,0001047	7.0083E-05
<b>Adicionando 20% de cenizas de carbón</b>					
<b>N° de ensayos</b>	<b>2 kg</b>	<b>6 kg</b>	<b>8 kg</b>	<b>16 kg</b>	<b>32 kg</b>
<b>1</b>	0,0001325	0,0000848	0,0001047	0,0001047	0,0000848
<b>2</b>	0,0000848	0,0000848	0,0000701	0,0000701	7.0083E-05
<b>3</b>	0,0000848	0,0000848	0,0000701	0,0000701	7.0083E-05
<b>Adicionando 25% de cenizas de carbón</b>					
<b>N° de ensayos</b>	<b>2 kg</b>	<b>6 kg</b>	<b>8 kg</b>	<b>16 kg</b>	<b>32 kg</b>
<b>1</b>	0,0001731	0,0000848	0,0001047	0,0001047	0,0000848
<b>2</b>	0,0000848	0,0000848	0,0001325	0,0001047	0,0000848
<b>3</b>	0,0001325	0,0000848	0,0001325	0,0001047	0,0000848
<b>Adicionando 30% de cenizas de carbón</b>					
<b>N° de ensayos</b>	<b>2 kg</b>	<b>6 kg</b>	<b>8 kg</b>	<b>16 kg</b>	<b>32 kg</b>
<b>1</b>	0,0002356	0,0000848	0,0001047	0,0001047	0,0001325
<b>2</b>	0,0002356	0,0000848	0,0001047	0,0001047	0,0001325
<b>3</b>	0,0001325	0,0000701	0,0000848	0,0000848	0,00010469

Fuente: Elaboración propia.

#### 4.1.2.3. Altura final de la muestra

Tabla 48. Resultados de altura final de la muestra.

<b>Muestra N° 2 San Blas</b>			
<b>Adicionando 10% de cenizas de carbón</b>			
<b>Presión (KN/m2)</b>	<b>N° de ensayos</b>		
	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>
0,00	20,00	20,00	20,00
101.86	20,19	20,21	20,22
305.58	19,90	19,90	19,91
407.44	19,79	19,79	19,79
814.87	19,43	19,42	19,42
1629.75	18,93	18,88	18,88
<b>Adicionando 15% de cenizas de carbón</b>			
<b>Presión (KN/m2)</b>	<b>N° de ensayos</b>		
	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>
0,00	20,00	20,00	20,00
101.86	20,18	20,20	20,21
305.58	19,96	19,89	19,90
407.44	19,87	19,82	19,83
814.87	19,56	19,53	19,54

1629.75	19,05	19,19	19,20
<b>Adicionando 20% de cenizas de carbón</b>			
<b>Presión (KN/m2)</b>	<b>N° de ensayos</b>		
	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>
0,00	20,00	20,00	20,00
101.86	20,14	20,15	20,15
305.58	19,97	19,85	19,85
407.44	19,88	19,77	19,77
814.87	19,53	19,48	19,48
1629.75	18,89	19,14	19,14
<b>Adicionando 25% de cenizas de carbón</b>			
<b>Presión (KN/m2)</b>	<b>N° de ensayos</b>		
	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>
0,00	20,00	20,00	20,00
101.86	20,14	20,14	20,13
305.58	19,97	19,83	19,82
407.44	19,88	19,76	19,75
814.87	19,53	19,46	19,46
1629.75	18,89	19,13	19,12
<b>Adicionando 30% de cenizas de carbón</b>			
<b>Presión (KN/m2)</b>	<b>N° de ensayos</b>		
	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>
0,00	20,00	20,00	20,00
101.86	20,14	20,14	20,14
305.58	19,97	19,95	19,96
407.44	19,88	19,86	19,88
814.87	19,53	19,52	19,52
1629.75	18,89	18,90	18,91

Fuente: Elaboración propia.

#### 4.1.2.4. Altura de sólidos

Tabla 49. Resultados altura de sólidos.

<b>Muestra N° 2 San Blas</b>			
<b>Adicionando 10% de cenizas de carbón</b>			
<b>Hs (mm)</b>	<b>N° de ensayos</b>		
	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>
	18,09	18,34	18,24
<b>Adicionando 15% de cenizas de carbón</b>			
<b>Hs (mm)</b>	<b>N° de ensayos</b>		
	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>
	17,29	17,53	17,53

<b>Adicionando 20% de cenizas de carbón</b>			
<b>Hs (mm)</b>	<b>N° de ensayos</b>		
	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>
	15,82	16,07	16,07
<b>Adicionando 25% de cenizas de carbón</b>			
<b>Hs (mm)</b>	<b>N° de ensayos</b>		
	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>
	15,82	16,07	15,97
<b>Adicionando 30% de cenizas de carbón</b>			
<b>Hs (mm)</b>	<b>N° de ensayos</b>		
	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>
	15,82	16,07	15,97

Fuente: Elaboración propia.

#### 4.1.2.5. Altura de vacíos

Tabla 50. Resultados altura de vacíos.

<b>Muestra N° 2 San Blas</b>			
<b>Adicionando 10% de cenizas de carbón</b>			
<b>Presión (KN/m2)</b>	<b>N° de ensayos</b>		
	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>
0,00	0,11	0,09	0,10
101,86	0,12	0,10	0,11
305,58	0,10	0,09	0,09
407,44	0,09	0,08	0,09
81,87	0,07	0,06	0,06
1629,75	0,05	0,03	0,04
<b>Adicionando 15% de cenizas de carbón</b>			
<b>Presión (KN/m2)</b>	<b>N° de ensayos</b>		
	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>
0,00	0,16	0,14	0,14
101,86	0,17	0,15	0,15
305,58	0,15	0,13	0,14
407,44	0,15	0,13	0,13
814,87	0,13	0,11	0,11
1629,75	0,10	0,09	0,10
<b>Adicionando 20% de cenizas de carbón</b>			
<b>Presión (KN/m2)</b>	<b>N° de ensayos</b>		
	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>
0,00	0,26	0,24	0,24
101,86	0,27	0,25	0,25
305,58	0,26	0,24	0,24

407,44	0,26	0,23	0,23
814,87	0,23	0,21	0,21
1629,75	0,19	0,19	0,19
<b>Adicionando 25% de cenizas de carbón</b>			
Presión (KN/m2)	N° de ensayos		
	1	2	3
0,00	0,26	0,24	0,25
101,86	0,27	0,25	0,26
305,58	0,26	0,23	0,24
407,44	0,26	0,23	0,24
814,87	0,23	0,21	0,22
1629,75	0,19	0,19	0,20
<b>Adicionando 30% de cenizas de carbón</b>			
Presión (KN/m2)	N° de ensayos		
	1	2	3
0,00	0,26	0,24	0,25
101,86	0,27	0,25	0,26
305,58	0,26	0,24	0,25
407,44	0,26	0,24	0,24
814,87	0,23	0,22	0,22
1629,75	0,19	0,18	0,18

Fuente: Elaboración propia.

#### 4.1.2.6. Coeficiente de compresibilidad

Tabla 51. Resultados de coeficiente de compresibilidad.

Muestra N° 2 San Blas			
Adicionando 10% de cenizas de carbón			
Presión (KN/m2)	N° de ensayos		
	1	2	3
0,00	-	-	-
101,86	0,0001031	0,0001121	0,0001159
305,58	0,0000776	0,0000815	0,0000825
407,44	0,0000597	0,0000629	0,0000632
814,87	0,0000499	0,0000497	0,0000500
1629,75	0,0000338	0,0000359	0,0000361
Adicionando 15% de cenizas de carbón			
Presión (KN/m2)	N° de ensayos		
	1	2	3
0,00	-	-	-
101,86	0,00010223	0,0001103	0,0001164

305,58	0,00006191	0,0000846	0,0000848
407,44	0,00005021	0,0000433	0,0000433
814,87	0,00004453	0,0000408	0,0000408
1629,75	0,00003592	0,0000236	0,0000236
<b>Adicionando 20% de cenizas de carbón</b>			
<b>Presión (KN/m2)</b>	<b>N° de ensayos</b>		
	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>
0,00	-	-	-
101,86	0,0000881	0,0000939	0,0000939
305,58	0,0000542	0,0000932	0,0000932
407,44	0,0000530	0,0000473	0,0000473
814,87	0,0000552	0,0000445	0,0000445
1629,75	0,0000490	0,0000257	0,0000257
<b>Adicionando 25% de cenizas de carbón</b>			
<b>Presión (KN/m2)</b>	<b>N° de ensayos</b>		
	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>
0,00			
101,86	0,0000881	0,0000852	0,0000808
305,58	0,0000542	0,0000937	0,0000942
407,44	0,0000530	0,0000473	0,0000476
814,87	0,0000552	0,0000445	0,0000448
1629,75	0,0000490	0,0000257	0,0000259
<b>Adicionando 30% de cenizas de carbón</b>			
<b>Presión (KN/m2)</b>	<b>N° de ensayos</b>		
	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>
0,00			
101,86	0,0000881	0,0000855	0,0000836
305,58	0,0000542	0,0000588	0,0000537
407,44	0,0000530	0,0000522	0,0000488
814,87	0,0000552	0,0000516	0,0000559
1629,75	0,0000490	0,0000478	0,0000470

**Fuente:** Elaboración propia.

## 4.1.2.7. Coeficiente de compresibilidad volumétrica

Tabla 52. Resultados de compresibilidad volumétrica.

<b>Muestra N° 2 San Blas</b>			
<b>Adicionando 10% de cenizas de carbón</b>			
<b>Presión (KN/m<sup>2</sup>)</b>	<b>N° de ensayos</b>		
	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>
101,86	0,0000933	0,0001028	0,0001057
305,58	0,0000702	0,0000748	0,0000753
407,44	0,0000540	0,0000576	0,0000576
814,87	0,0000452	0,0000456	0,0000456
1629,75	0,0000306	0,0000329	0,0000329
<b>Adicionando 15% de cenizas de carbón</b>			
<b>Presión (KN/m<sup>2</sup>)</b>	<b>N° de ensayos</b>		
	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>
101,86	0,00008836	0,00009670	0,00010200
305,58	0,00005351	0,00007417	0,00007437
407,44	0,00004339	0,00003799	0,00003799
814,87	0,00003848	0,00003574	0,00003574
1629,75	0,00003105	0,00002067	0,00002067
<b>Adicionando 20% de cenizas de carbón</b>			
<b>Presión (KN/m<sup>2</sup>)</b>	<b>N° de ensayos</b>		
	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>
101,86	0,0000697	0,0000754	0,0000754
305,58	0,0000429	0,0000748	0,0000748
407,44	0,0000419	0,0000380	0,0000380
814,87	0,0000437	0,0000357	0,0000357
1629,75	0,0000388	0,0000207	0,0000207
<b>Adicionando 25% de cenizas de carbón</b>			
<b>Presión (KN/m<sup>2</sup>)</b>	<b>N° de ensayos</b>		
	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>
101,86	0,0000697	0,0000684	0,0000645
305,58	0,0000429	0,0000753	0,0000753
407,44	0,0000419	0,0000380	0,0000380
814,87	0,0000437	0,0000357	0,0000357
1629,75	0,0000388	0,0000207	0,0000207
<b>Adicionando 30% de cenizas de carbón</b>			
<b>Presión (KN/m<sup>2</sup>)</b>	<b>N° de ensayos</b>		
	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>
101,86	0,0000697	0,0000687	0,0000668

305,58	0,0000429	0,0000473	0,0000429
407,44	0,0000419	0,0000419	0,0000390
814,87	0,0000437	0,0000415	0,0000447
1629,75	0,0000388	0,0000384	0,0000376

Fuente: Elaboración propia.

#### 4.1.2.8. Índice de compresión

Tabla 53. Resultados de índice de compresión.

Muestra N° 2 San Blas			
Adicionando 10% de cenizas de carbón			
Cc	N° de ensayos		
	1	2	3
	0,03	0,09	0,03
Adicionando 15% de cenizas de carbón			
Cc	N° de ensayos		
	1	2	3
	0,11	0,08	0,08
Adicionando 20% de cenizas de carbón			
Cc	N° de ensayos		
	1	2	3
	0,08	0,05	0,05
Adicionando 25% de cenizas de carbón			
Cc	N° de ensayos		
	1	2	3
	0,11	0,09	0,05
Adicionando 30% de cenizas de carbón			
Cc	N° de ensayos		
	1	2	3
	0,13	0,12	0,12

Fuente: Elaboración propia.

#### 4.1.2.9. Índice de recompresión

Tabla 54. Resultados de índice de recompresión.

Muestra N° 2 San Blas			
Adicionando 10% de cenizas de carbón			
Cr	N° de ensayos		
	1	2	3
	0,03	0,03	0,04

<b>Adicionando 15% de cenizas de carbón</b>			
<b>Cr</b>	<b>N° de ensayos</b>		
	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>
	0,03	0,04	0,04
<b>Adicionando 20% de cenizas de carbón</b>			
<b>Cr</b>	<b>N° de ensayos</b>		
	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>
	0,02	0,04	0,04
<b>Adicionando 25% de cenizas de carbón</b>			
<b>Cr</b>	<b>N° de ensayos</b>		
	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>
	0,02	0,04	0,04
<b>Adicionando 30% de cenizas de carbón</b>			
<b>Cr</b>	<b>N° de ensayos</b>		
	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>
	0,02	0,03	0,02

Fuente: Elaboración propia.

#### 4.1.2.10. Índice de hinchamiento

Tabla 55. Resultados de índice de hinchamiento.

<b>Muestra N° 2 San Blas</b>			
<b>Adicionando 10% de cenizas de carbón</b>			
<b>Cs</b>	<b>N° de ensayos</b>		
	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>
	0,03	0,03	0,04
<b>Adicionando 15% de cenizas de carbón</b>			
<b>Cs</b>	<b>N° de ensayos</b>		
	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>
	0,02	0,04	0,04
<b>Adicionando 20% de cenizas de carbón</b>			
<b>Cs</b>	<b>N° de ensayos</b>		
	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>
	0,03	0,06	0,06
<b>Adicionando 25% de cenizas de carbón</b>			
<b>Cs</b>	<b>N° de ensayos</b>		
	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>
	0,06	0,06	0,05
<b>Adicionando 30% de cenizas de carbón</b>			
<b>Cs</b>	<b>N° de ensayos</b>		
	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>
	0,03	0,06	0,06

Fuente: Elaboración propia.

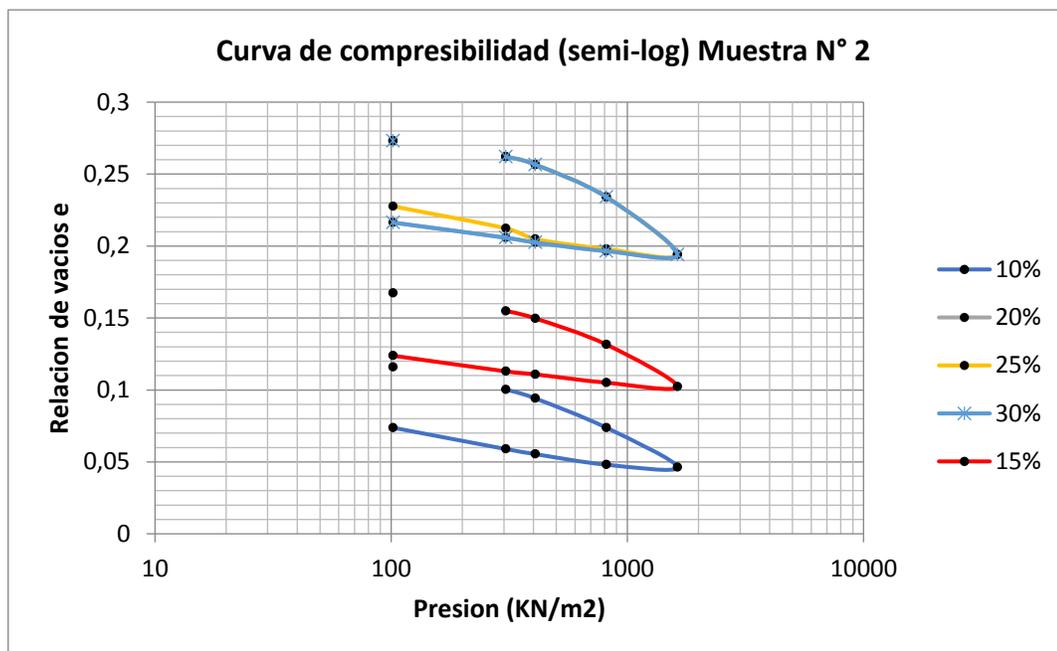
#### 4.1.2.11. Compresibilidad de la muestra

Tabla 56. Resultados de compresibilidad de la muestra.

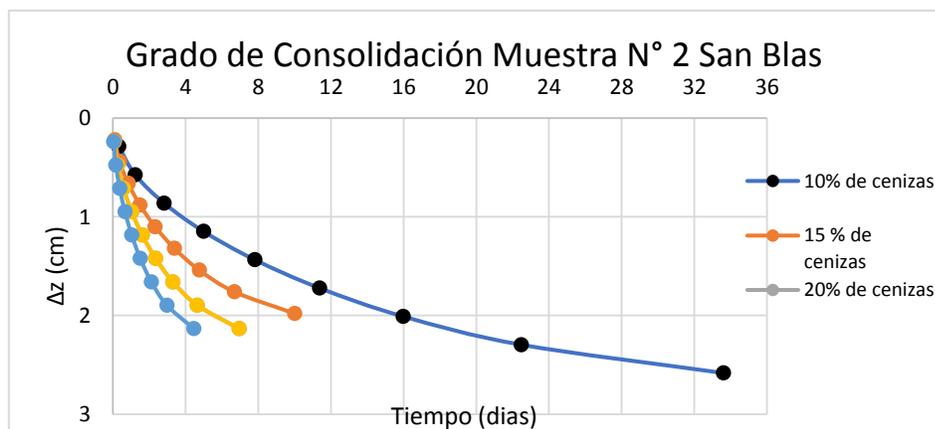
Muestra N° 2 San Blas	
% Cenizas	$\sigma'_0 > \sigma'_c$
10%	Sobre consolidado
15%	Sobre consolidado
20%	Sobre consolidado
25%	Sobre consolidado
30%	Sobre consolidado

Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 17. Curva de compresibilidad.



Fuente: Elaboración propia.

**Gráfico 18.** Grado de consolidación.

Fuente: Elaboración propia.

## 4.2. Análisis de resultados

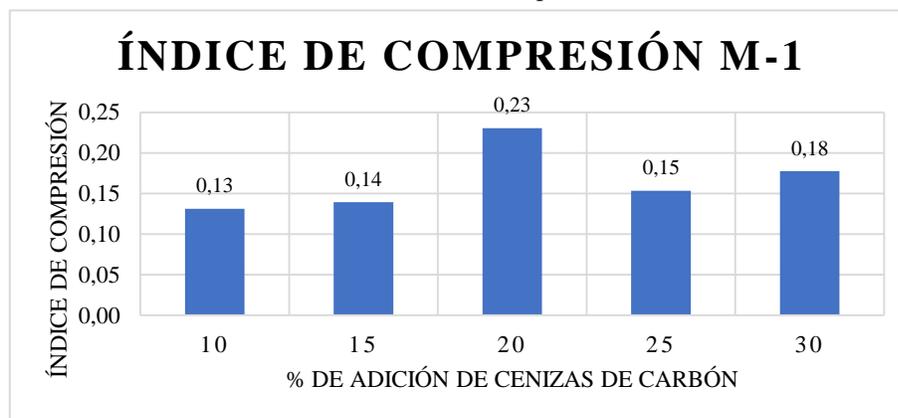
### 4.2.1. Índice de compresión muestra 1

Tabla 57. Índice de compresión + cenizas de carbón.

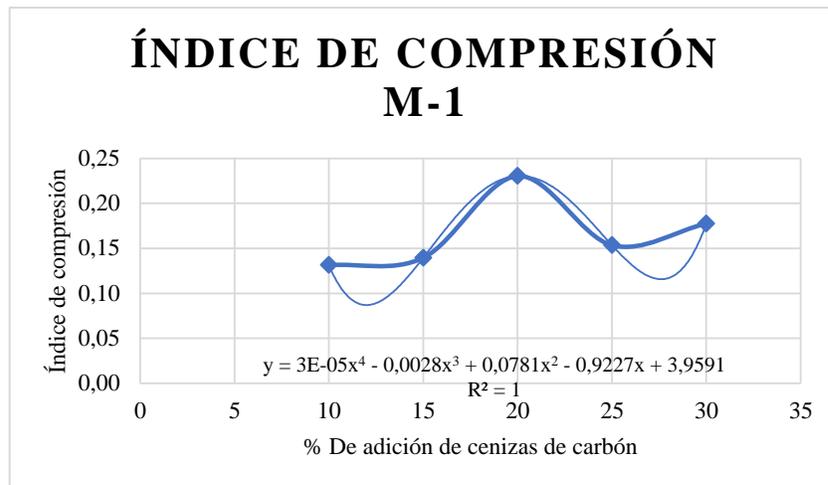
Muestra N° 1 Juan Nicolai	
Cc	% de adición
0,13	10
0,14	15
0,23	20
0,15	25
0,18	30

Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 19. Índice de compresión M-1.



Fuente: Elaboración propia.

**Gráfico 20.** Variación del índice de compresión M-1.

**Fuente:** Elaboración propia.

Con estos gráficos y resultados obtenidos el índice de compresibilidad del suelo natural de 0,16 disminuye para los porcentajes de 10,15,25 y 30% sin embargo para el porcentaje del 20% este aumenta, con estos resultados según Sowers y Sowers. Londres 1978. el tipo de suelo se clasifica de compresibilidad ligera a baja.

Para las arcillas normalmente consolidadas, el índice suele oscilar entre 0,20 y 0,50 y para los limos entre 0,16 y 0,24. Para las arenas, el índice varía entre 0,01 y 0,06, aunque este no es un parámetro particularmente significativo para una arena.

#### 4.2.2. Compresibilidad de la muestra M-1

**Tabla 58.** Compresibilidad de la muestra 1.

<b>Muestra N° 1 Juan Nicolai</b>	
<b>% Cenizas</b>	<b><math>\sigma'_0 &gt; \sigma'_c</math></b>
<b>10%</b>	<b>Sobre consolidado</b>
<b>15%</b>	<b>Sobre consolidado</b>
<b>20%</b>	<b>Sobre consolidado</b>
<b>25%</b>	<b>Sobre consolidado</b>
<b>30%</b>	<b>Sobre consolidado</b>

**Fuente:** Elaboración propia.

Con el resultado obtenido se dé la tabla al adicionar cenizas de carbón este suelo a estado sometido a mayores esfuerzos de los que fueron dados en laboratorio, eso se

logró evidenciar al momento de hacer en ensayo ya que dicha muestra no presentaba reacción al someter una carga de 0,5 kg

#### 4.2.3. Análisis de la expansión método consolidómetro

**Tabla 59.** Análisis de expansión.

<b>Muestra N° 1 Juan Nicolai</b>					
<b>% Cenizas Carbón</b>	<b>H<sub>c</sub> cm</b>	<b>H<sub>o</sub> cm</b>	<b>Expansión cm</b>	<b>Expansión %</b>	<b>Holtz Gibbs</b>
0	0,06	2	2,06	3,00	Bajo
10	0,054	2	2,054	2,70	Bajo
15	0,046	2	2,0463	2,32	Bajo
20	0,048	2	2,048	2,40	Bajo
25	0,03	2	2,0303	1,52	Bajo
30	0,025	2	2,025	1,25	Bajo

**Fuente:** Elaboración propia.

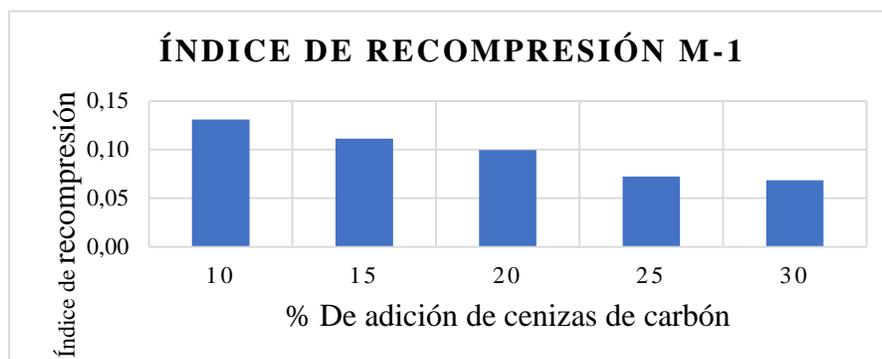
Con la lectura inicial y final se halló la lectura de expansión, con este valor de acuerdo a la tabla de Holtz y Gibbs del ensayo de consolidómetro el grado de expansión al adicionar las cenizas de carbón es medio, también se puede evidenciar que va disminuyendo el grado de expansión a medida que se adiciona las cenizas.

#### 4.2.4. Índice de recompresión muestra 1

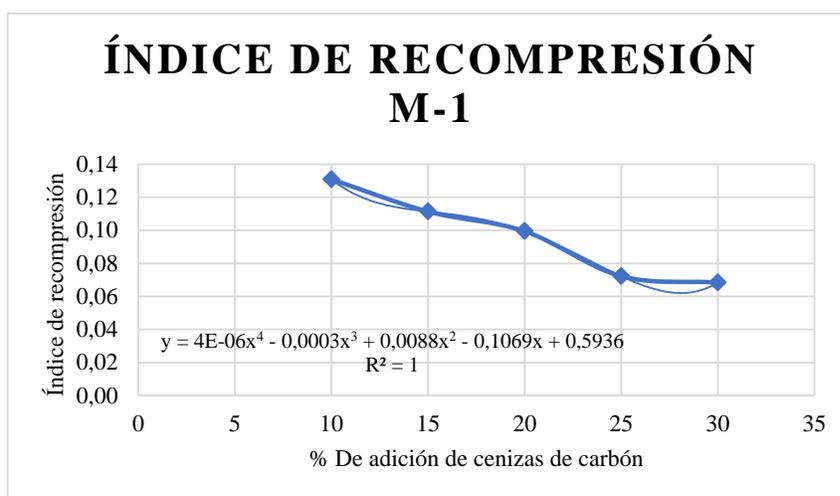
**Tabla 60.** Índice de recompresión M-1.

<b>Muestra N° 1 Juan Nicolai</b>	
<b>Cr</b>	<b>% de adición</b>
0,13	10
0,11	15
0,10	20
0,07	25
0,07	30

**Fuente:** Elaboración propia.

**Gráfico 21.** Índice de recompresión M-1.

Fuente: Elaboración propia.

**Gráfico 22.** Variación de índice de recompression M-1.

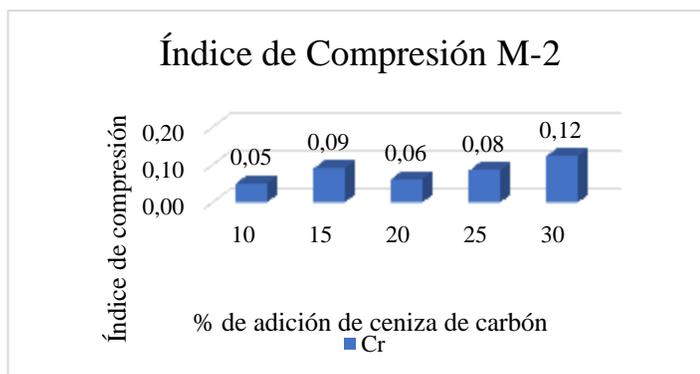
Fuente: Elaboración propia.

#### 4.2.5. Índice de compresión muestra 2

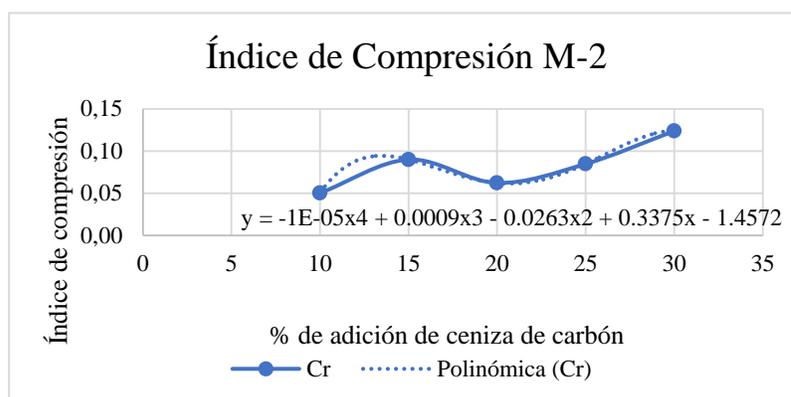
**Tabla 61.** Índice de compresión + ceniza de carbón.

Muestra N° 2 San Blas	
% de adición	Cr
10	0,05
15	0,09
20	0,06
25	0,08
30	0,12

Fuente: Elaboración propia.

**Gráfico 23.** Variación de índice de compresión.

**Fuente:** Elaboración propia.

**Gráfico 24.** Ecuación de índice de compresión + ceniza de carbón.

**Fuente:** Elaboración propia.

Observando los gráficos de compresión de la muestra 2 se evidencia que este incrementa su valor, y el suelo sigue clasificado como suelo de baja compresibilidad.

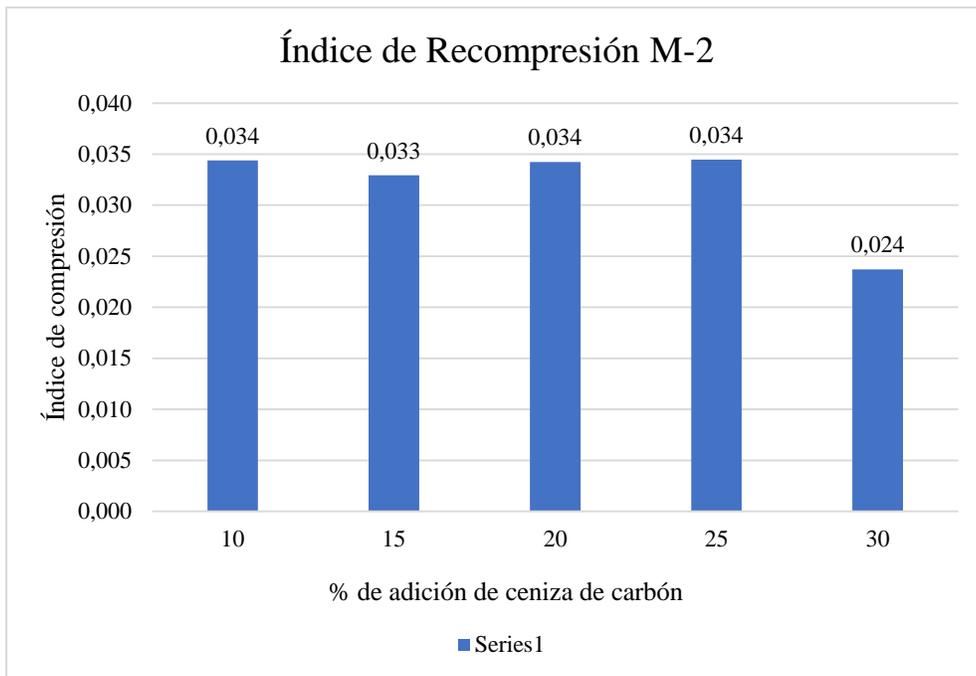
#### 4.2.6. Índice de recompresión muestra 2

**Tabla 62.** Índice de recompresión + ceniza de carbón.

Muestra N° 2 San Blas	
% de adición	Cr
10	0,034
15	0,033
20	0,034
25	0,034
30	0,024

**Fuente:** Elaboración propia.

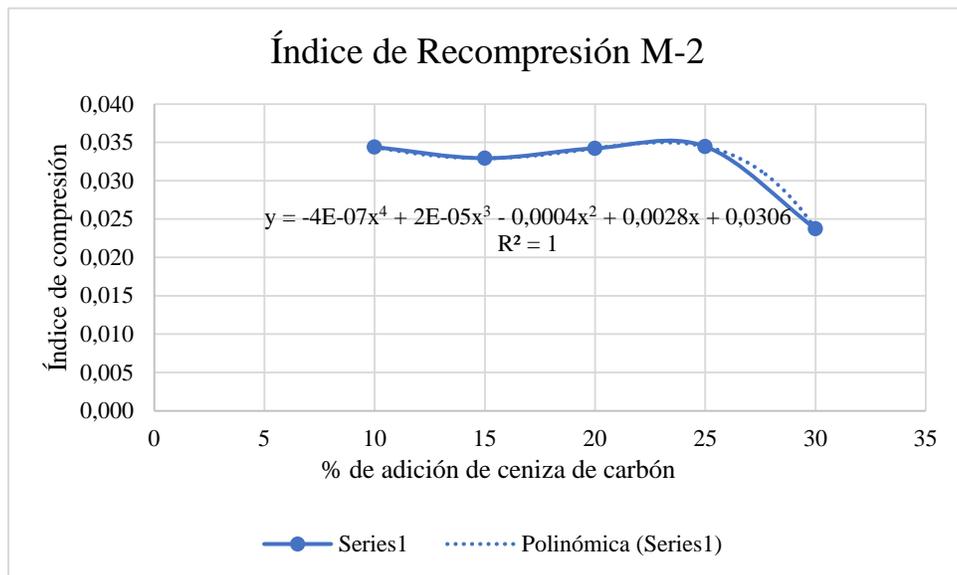
**Gráfico 25.** Índice de recompresión.



**Fue**

**nte:** Elaboración propia.

**Gráfico 26.** Índice de recompresión.



**Fuente:** Elaboración propia.

#### 4.2.7. Compresibilidad de la muestra

Tabla 63. Compresibilidad de la muestra.

Muestra N° 2 San Blas	
% Cenizas	$\sigma'_0 > \sigma'_c$
10%	Sobre consolidado
15%	Sobre consolidado
20%	Sobre consolidado
25%	Sobre consolidado
30%	Sobre consolidado

Fuente: Elaboración propia.

Con este resultado que se obtuvo de la muestra 2 al igual que la primera muestra 1 este suelo también estuvo alguna vez sometido a esfuerzos mayores a los existentes.

#### 4.2.8. Análisis de expansión Método consolidómetro

Tabla 64. Análisis de expansión por consolidómetro.

Muestra N° 2 San Blas					
% Cenizas Carbón	$H_e$	$H_0$	Expansión cm	Expansión %	Holtz Gibbs
0	0,04	2	2,0400	2,000	Bajo
10	0,025	2	2,0247	1,235	Bajo
15	0,023	2	2,0227	1,135	Bajo
20	0,017	2	2,0173	0,865	Bajo
25	0,017	2	2,0170	0,850	Bajo
30	0,013	2	2,0133	0,665	Bajo

Fuente: Elaboración propia.

Al igual que la muestra 1, la muestra 2 reacciona de la misma manera su expansión va reduciendo al adicionar las cenizas de carbón, y según la tabla de Holtz y Gibbs su grado de expansión es **Bajo**.

También se observa de los resultados obtenidos del suelo natural respecto a la relación que existe entre los límites de consistencia y los porcentajes de cenizas de carbón muestran una reducción proporcional de los límites de consistencia.

Se aprecia una reducción del límite líquido y el índice de plasticidad y un incremento del límite plástico en ambos suelos.

Se observa que el potencial de expansión basados en el índice plástico de la M1 es muy alto y que al incrementarse las cenizas de carbón este suelo reduce su potencial de expansión a medio en el 30 % de cenizas de carbón.

Por otra parte, la muestra M2 presenta un potencial de expansión alto y que al incrementar las cenizas de carbón en un 30 % esta reduce su potencial de expansión a bajo como se muestra en la tabla 59.

### 4.3. Prueba de hipótesis

#### 4.3.1. Prueba de “t Student”

- Hipótesis de la investigación:

“La adición de ceniza de carbón a una arcilla de alta compresibilidad disminuye su potencial de expansión”

m1: Es la media del potencial de expansión sin cenizas de carbón

m2: Es la media del potencial de expansión con cenizas de carbón

$$\mu_d = m_1 - m_2 < 0$$

Donde:

$H_0$ =Hipótesis nula

$H_1$ =Hipótesis alternativa

$$H_0; \mu_d \geq 0$$

$$H_1; \mu_d < 0$$

- **Prueba de hipótesis Muestra N°1**

**Tabla 65.** Prueba de hipótesis Muestra N° 1.

N°	Expansión Muestra N°1 Suelo natural	Expansión Muestra N°1 +C. carbón	Diferencia (cm)
1	2,06	2,051	0,009
2	2,06	2,054	0,006
3	2,06	2,057	0,003
4	2,06	2,047	0,013
5	2,06	2,051	0,009
6	2,06	2,049	0,011
7	2,06	2,046	0,014
8	2,06	2,048	0,012
9	2,06	2,05	0,01
10	2,06	2,03	0,03
11	2,06	2,031	0,029
12	2,06	2,03	0,03
13	2,06	2,026	0,034
14	2,06	2,024	0,036
15	2,06	2,025	0,035

**Fuente:** Elaboración propia.

- Promedio de Diferencias.

$$d=0,019$$

- Numero de muestras

$$n=15$$

- Desviación estándar de las diferencias

$$S_d = \sqrt{\frac{(d_i - d)^2}{n - 1}}$$

$$S_d = 0,01192516$$

- Valor crítico

$$Gl = (n_1 - 1)$$

$$Gl = 14$$

- Nivel de significancia:

$$\alpha = 5\% = 0,05$$

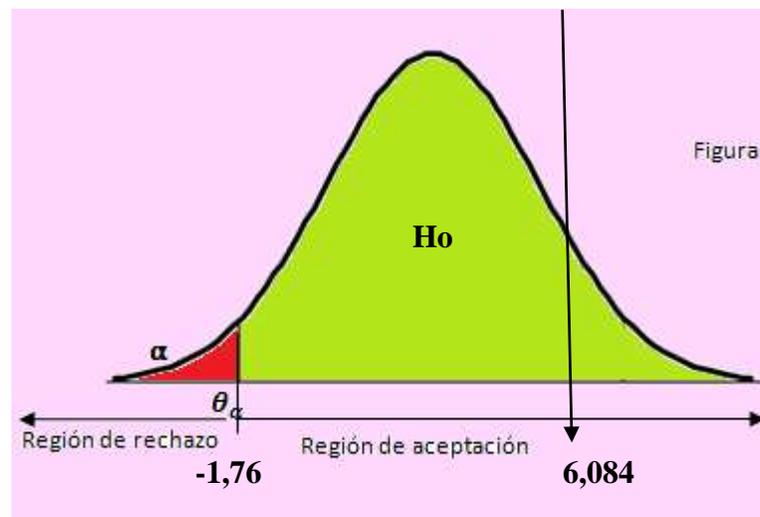
$$t < t_{(\alpha), (n-1)} = -1,76$$

- **t**: Estadístico t calculado

$$t = \frac{d}{s_d/\sqrt{n}}$$

$$t = 6,084$$

**Figura 14.** Curva de Gauss.



Fuente. Elaboración propia

$$H_0; \mu d \geq 0$$

La hipótesis nula **H<sub>0</sub>** se acepta

Entonces la hipótesis alternativa  $H_1 \rightarrow$  se rechaza

Por lo tanto, la hipótesis de la investigación es falsa.

### Prueba de Hipótesis de la Muestra N°2

Tabla 66. Prueba de hipótesis Muestra N° 2.

N°	Expansión Muestra N°2 Suelo natural	Expansión Muestra N°2 +C. carbón	Diferencia (cm)
1	2,04	2,024	0,016
2	2,04	2,024	0,016
3	2,04	2,026	0,014
4	2,04	2,02	0,02
5	2,04	2,023	0,017
6	2,04	2,025	0,015
7	2,04	2,016	0,024
8	2,04	2,018	0,022
9	2,04	2,018	0,022
10	2,04	2,016	0,024
11	2,04	2,017	0,023
12	2,04	2,018	0,022
13	2,04	2,016	0,024
14	2,04	2,016	0,024
15	2,04	2,016	0,024

Fuente. Elaboración propia

- Promedio de Diferencias.

$$d = 0,020$$

- Numero de muestras

$$n=15$$

- Desviación estándar de las diferencias

$$Sd = \sqrt{\frac{(d_i - d)^2}{n - 1}}$$

$$S_d = 0,00377712$$

- Valor crítico

$$Gl = (n_1 - 1)$$

$$Gl = 14$$

- Nivel de significancia:

$$\alpha = 5\% = 0,05$$

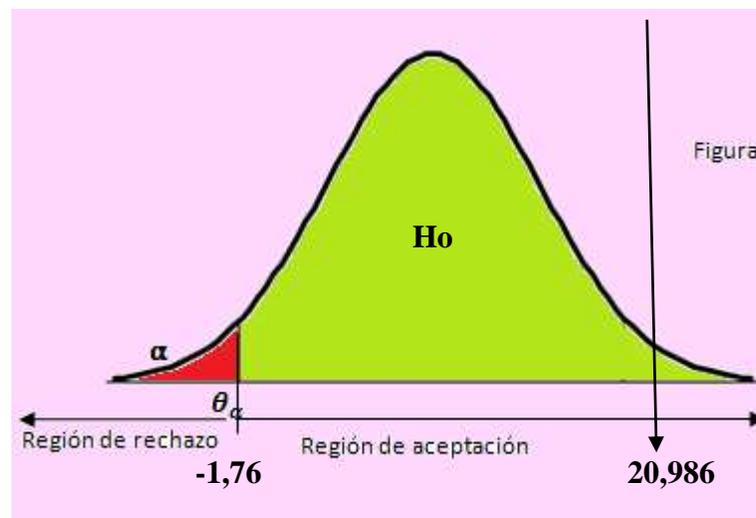
$$t < t_{(\alpha), (n-1)} = -1,76$$

- **t**: Estadístico t calculado

$$t = \frac{d}{s_d / \sqrt{n}}$$

$$t = 20,986$$

Figura 15. Curva de Gauss.



Fuente. Elaboración propia

$$H_0; \mu d \geq 0$$

La hipótesis nula  $H_0$  se acepta

Entonces la hipótesis alternativa  $H_1 \rightarrow$  se rechaza

Por lo tanto, la hipótesis de la investigación es falsa.

#### **4.3.2. Conclusión de la prueba de hipótesis**

Como conclusión de todas las pruebas realizadas para cada porcentaje de aditivo para nuestro suelo arcilloso de alta compresibilidad, se tiene que la hipótesis nula se acepta y se rechaza la hipótesis alternativa, es decir, que nuestra hipótesis planteada es **falsa** de que se reduce la expansión del suelo adicionando ceniza de carbón, esto significa que las cenizas de carbón logran reducir la expansión pero no de una manera significativa en nuestro suelo, ya que se pretende reducir la expansión en el suelo para no tener problemas en las obras que se quieran realizar en estos tipos de suelos.

## CAPÍTULO V

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 5.1. Conclusiones

- El presente trabajo tiene como uno de los objetivos estudiar las características de los suelos arcillosos de alta compresibilidad, de los cuales se estudiaron dos suelos naturales del barrio Juan Nicolai y el barrio San Blas, se realizó una caracterización y un estudio de su grado de expansión. Dentro de la caracterización ambos suelos la cantidad de finos resulto mayor al 90%.

El grado de expansión de un suelo está relacionado a su contenido de arcilla, por este motivo se realizó el ensayo del hidrómetro.

Por otro lado, mediante la clasificación mediante la SUCS se obtiene que ambas muestras son arcillas de alta plasticidad CH. Para obtener los límites de consistencia de los suelos se procedió a utilizar el método de Casagrande y que presentan un límite líquido mayor al 50%.

- Tomando en cuenta los límites de Atteberg como el límite líquido y el índice de plasticidad el potencial de expansión de la Muestra N°1 Juan nicolai y de la Muestra N°2 San Blas, según Chen (1988) y Higway comission (1974) son clasificados potencialmente expansivos (muy altos).

A pesar de que estos ensayos son muy fáciles de realizar cabe recalcar que no todos sus valores son 100% confiables

- En la actualidad el ensayo de consolidación es de fácil acceso evitando el retraso en la programación y presupuesto de una obra civil.

En ambas muestras al realizar el análisis de expansión añadiendo los diferentes porcentajes de cenizas de carbón el potencial de expansión resulta bajo, si bien se logra reducir no es de una manera significativa y se puede apreciar mejor al añadir un 30% de dichas cenizas de carbón.

- Del presente estudio habiendo realizado la prueba de hipótesis se concluye que: La hipótesis nula se acepta. Entonces la hipótesis alternativa se rechaza  
Por lo tanto, la hipótesis de la investigación es falsa.

Lo que quiere decir que las cenizas de carbón no influyen de una manera significativa en el potencial de expansión, si bien es cierto se logra reducir el margen es mínimo y se concluye con firmeza que las cenizas de carbón no es una solución alternativa para reducir el potencial de expansión.

- Las cenizas de carbón es un material que se obtiene de la combustión de madera que se usa para la quema de ladrillos es desechado, por lo cual tiene bajo costo y resulta factible en suelos de alta compresibilidad donde se busca reducir la expansión.
- Se puede apreciar que las muestras de suelos estudiados tienen un límite líquido mayor del 51 % e índice de plasticidad elevados y que al adicionar cenizas de carbón estas muestras muestran cambios favorables ya que reducen sus valores de la muestra n°1 66,73 % pasa a 62,92 % y de la muestra n°2 53,23 % pasa a 43,41% pero muestran un cambio negativo ya que el límite plástico aumenta al adicionar cenizas. LP muestra n°1 23,71% a 43,08 % y LP muestra n°2 19,95% a 34,07%
- La presente investigación cumple con los objetivos establecidos cumpliendo con el propósito del proyecto de investigación combinando cenizas de carbón con suelos arcillosos de alta compresibilidad.

## **5.2. Recomendaciones**

- Esta investigación se realizó a suelos arcillosos de alta compresibilidad CH, se recomienda realizar estudios a otro tipo de suelos mejorando otro tipo de propiedades con más ensayos de laboratorio para poder verificar el caso.
- Se recomienda trabajar con otro tipo de porcentajes mayores al 30% para lograr mejores resultados y más notorios.
- Se recomienda iniciar con pesos mayores de 2 kg en el ensayo de consolidación ya que con suelos de alta compresibilidad se logró evidenciar que no presenta cambio alguno.
- Para el ensayo de consolidación se recomienda que la muestra sature 24 hrs y no exceda el tiempo ya que los resultados pueden variar a gran escala.
- Se recomienda desechar las impurezas que puedan contener las cenizas de carbón, ya que estos pueden generar resultados negativos en nuestros ensayos.

Se debe utilizar el tamiz N° 40 para la eliminación de impurezas, es decir que se debe elegir las cenizas de carbón que pasen este tamiz, y desechar el material que sea retenido en el mismo.

- Se debe tomar en cuenta la disponibilidad de los materiales a utilizar como aditivos ya que no en cualquier lugar se encontrará los mismos, la elección del aditivo a utilizar tendrá mucha influencia en el costo.
- A pesar que los ensayos de límites de consistencia son fáciles de realizar para determinar el potencial de expansión ,es necesario realizar ensayos más certeros como el de consolidometro para obtener información más certera; con este tipo de información en los proyectos de construcciones livianas (como por ejemplo proyectos viales), es posible determinar o proyectar el asentamiento a largo plazo, determinar si el suelo es potencialmente expansivo y evitar posibles daños a construcciones civiles que se traducen en costos.