

# **CAPÍTULO I**

## **INTRODUCCIÓN**

# CAPÍTULO I

## INTRODUCCIÓN

### 1.1 Antecedentes

Debido al grado de deterioro de la Mayoría de las redes viales, ha surgido entre los técnicos viales la necesidad de hacer un estudio previo de las mismas, aprovechando al máximo los materiales locales.

Los materiales estabilizantes que se emplean con frecuencia son el cemento y los agentes estabilizadores asfálticos, entre estos últimos contamos con las emulsiones asfálticas y zeolita natural.

Por ser un tema que se lo analiza de manera superficial, sin entrar en un profundo estudio del mismo, se quiere hacer conocer los métodos, técnicas y alternativas para el estudio de las propiedades de subrasantes con suelo limo arcilloso estabilizados con zeolita natural en donde los agregados pueden provenir de la recuperación de áridos de un camino sin pavimentar.

La estabilización de suelos se refiere al proceso de someter a los suelos naturales a ciertos tratamientos para aprovechar sus mejores cualidades de manera que puedan soportar las condiciones adversas inherentes al diseño rindiendo en todo tiempo el servicio adecuado que de ellos se espera, es decir dar a los suelos resistencia al esfuerzo cortante, a la deformabilidad o compresibilidad, dar estabilidad volumétrica ante la presencia del agua, siempre buscando, una mejoría sustancial en el comportamiento esfuerzo deformación de los suelos y/o de la estructura que se coloque sobre ellos, a lo largo de su vida útil. Existen varios procedimientos que se emplean para lograr la mejoría de los suelos, pero uno de los más frecuentes es la técnica de estabilización por medios mecánicos y por medios químicos, este último es de mayor interés en este estudio y se logra por la adición de agentes estabilizantes específicos, como la cal, el cemento, el asfalto, cenizas u otros.

En Bolivia y en diversos países del mundo la estabilización química de suelos cuenta con una gama de datos a base de estudios realizados dando como resultados especificaciones, manuales y algunos proyectos de investigación que sirven como guías que pueden seguirse

para lograr la mejoría de las propiedades de los suelos.

En los últimos años cualquier obra de ingeniería civil se debe contemplar el no dañar (en lo menor posible) el medio ambiente, por lo cual una de las ramas principales de la ingeniería que es la construcción vial debe ser mejorada, esta área es una de las más agresivas con el medio ambiente, debido a que en la construcción de una vía se daña considerablemente el lugar en donde se emplaza la obra, destruyendo así parte de nuestra valiosa fauna silvestre.

El objetivo de la estabilización de suelos es obtener una técnica constructiva con buenas condiciones de servicio para mejorar la red vial y con ello una mejora en la calidad de vida de los habitantes de la zona, sus aspectos sociales y económicos.

## **1.2 Situación problemática**

La estabilización con zeolita natural es una gran innovación en el campo de construcción y estudio de las propiedades de la subrasante lo cual permite mejorar el nivel de servicio en forma económica y ecológica.

Actualmente en nuestro país, este método no ha sido utilizado en el análisis previo de las propiedades de una subrasante arcillosa y/o limosa, debido a esto, es de mucha importancia realizar un estudio que nos permita realizar el análisis y estudio de las características que este nuevo tipo de agente pueda influir en una estabilización de subrasantes.

La estabilización de una subrasante es muy importante en la construcción de una calle, camino o carretera ya que si esta no cumpliera con sus propiedades mínimas para el diseño el colapso de la carpeta asfáltica sería inminente por la mala capacidad estructural de esta capa, ya que de la calidad de esta depende, en gran parte, el espesor que debe tener un pavimento, sea flexible o rígido.

Las subrasantes limo arcillosas se pretenden estabilizar con zeolita natural y a diferentes porcentajes de inyección del mismo y una cantidad óptima de agua previamente determinada, que es de gran importancia para el manejo del proceso constructivo. Las subrasantes de este tipo contienen un elevado límite líquido por lo que son propensas a la expansión y a la desecación temprana (asentamientos, agrietamientos), es por este motivo que con la técnica de zeolita

natural se pretende modificar las propiedades de la misma para realizar un análisis a fondo de los resultados obtenidos y determinar si cumple con las características adecuadas.

El no realizar un buen control y monitoreo previo de las propiedades mecánicas de las subrasantes, es una de las causas por las que el pavimento tiende a fallar o deteriorarse a corto tiempo una vez ya emplazado y puesto al servicio del usuario. Debemos evitar todos estos impactos ambientales a través de nuevas tecnologías menos contaminantes como el método de estabilización con zeolita natural que se ve influenciado positivamente en el mejoramiento de la capacidad estructural de la Mayoría de los agregados.

Es posible que, mediante un estudio de las propiedades mecánicas de la subrasante estabilizada con zeolita natural, podría mejorar las condiciones de trabajo garantizando la resistencia de diseño sin reducir ni afectar dichas propiedades y más al contrario verificar si en todo caso llega a incrementar.

### **1.2.1 Problema**

¿La estabilización con zeolita natural podrá mejorar las propiedades mecánicas de subrasantes limo arcillosas que serán utilizadas como estructura de fundación y soporte para pavimentos en nuestra región?

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

En nuestro país, el uso de zeolita natural granular en el análisis y estabilización de subrasantes limo arcillosas aún no ha sido implementado de manera sistemática. Este vacío en la práctica técnica destaca la necesidad de realizar un estudio que permita evaluar las propiedades que esta adición puede ofrecer para mejorar la estabilidad estructural de las subrasantes.

La estabilización de la subrasante es crucial para la construcción de pavimentos, ya que una subrasante inadecuadamente estabilizada puede comprometer la capacidad del paquete estructural aumentando el riesgo de fallas prematuras. Además, la calidad de esta capa influye directamente en el espesor necesario del paquete estructural, tanto en diseños de pavimentos flexibles como rígidos. Por lo tanto, un análisis adecuado de nuevos métodos de estabilización, como el uso de zeolita natural, no solo podría mejorar el desempeño estructural, sino también optimizar los recursos materiales y económicos en el diseño de infraestructuras viales.

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

La investigación se realizó en un período de aproximadamente 3 a 4 meses y se centró en la ciudad de Tarija, Bolivia, específicamente en áreas con suelos limo arcillosos representativos para la estabilización en subrasantes de caminos y carreteras. Durante este tiempo, se llevaron a cabo las actividades de recolección de muestras, preparación de los suelos y los ensayos de laboratorio necesarios para evaluar el efecto de la zeolita natural en las propiedades mecánicas del suelo. La duración de estas fases permitió obtener resultados confiables y representativos para el contexto local, asegurando así la validez y aplicabilidad del estudio en condiciones reales.

Los ensayos necesarios para esta investigación se llevaron a cabo en el laboratorio de la Universidad Autónoma Juan Misael Saracho, considerando cuidadosamente los equipos requeridos para la correcta caracterización de los suelos limo arcillosos. Se seleccionaron los instrumentos y procedimientos más adecuados para asegurar que las propiedades del suelo fueran analizadas con precisión, garantizando la validez y confiabilidad de los resultados obtenidos durante el desarrollo.

### **1.3 Justificación**

El deterioro de las subrasantes, es el constante problema en el que se ven envueltos y perjudicados los usuarios, sobre todo en el periodo de lluvia, a esto se le suma la dejadez de nuestros caminos que ocasionan asentamientos, fallas y ausencia de seguridad cuando son transitados, por tal motivo se hace evidente la necesidad de encarar el estudio de las propiedades de los materiales de la subrasante estabilizados con zeolita natural como una nueva alternativa de solución al problema.

La aplicación de zeolita natural en estabilizaciones es relativamente una técnica nueva, que nos permite producir mejoramientos a las propiedades de las capas con diferencias sustanciales a los sistemas tradicionales.

Se pretende modificar las propiedades del suelo con zeolita natural manualmente y en condiciones controladas, para usarlo como agente estabilizante de la capa subrasante en ensayos C.B.R. con agregados limo arcillosos obtenidos de distintos lugares de la ciudad de Tarija, para determinar el mejoramiento de sus propiedades mecánicas básicas después

de ser estabilizadas a base de zeolita natural.

Se obtendrán resultados, una experimentación practica que arroje como resultados las características físicas y mecánicas de la subrasante limo arcillosa estabilizada con zeolita natural, y así poder compararlas con las propiedades básicas que tenía antes de la estabilización, brindado información sobre la viabilidad de un método de estabilización nuevo y ambientalmente amigable que mejore las deficiencias de los suelos limo arcillosos.

De esta forma, se podrá actuar en el momento más oportuno previniendo que los defectos puedan comprometer las condiciones normales que debe tener la subrasante y así no afectar la viabilidad y seguridad o agravarse de tal forma que las actuaciones correctoras posteriores sean mucho más costosas que las que hubieran realizado con un buen análisis de sus propiedades con la estabilización de esta capa a su debido tiempo.

#### **1.4 Hipótesis**

**“Si se realiza la mezcla de zeolita natural a materiales de subrasantes limo arcillosas, entonces se logrará su estabilización obteniendo así una mejora en las propiedades mecánicas de los mismos”.**

#### **1.5 Objetivos**

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

Analizar la influencia de Zeolita Natural como estabilizante en subrasantes limo arcillosas empleando diferentes porcentajes para que mejoren las propiedades mecánicas de las subrasantes estabilizadas.

##### **1.5.2 Objetivos específicos**

- Realizar la caracterización de los suelos finos que se utilizaran en combinación con zeolita natural.
- Realizar ensayos “C.B.R.” con zeolita natural en subrasantes limo arcillosas para determinar sus propiedades mecánicas y la aplicabilidad del mismo como una técnica innovadora en la estabilización de suelos.

- Evaluar el efecto de los porcentajes de zeolita natural en las propiedades mecánicas del suelo, generando gráficos que relacionen el porcentaje de zeolita natural con la expansión y el CBR de las subrasantes.
- Realizar un análisis técnico, económico, social y ambiental sobre la aplicabilidad de la Zeolita Natural en las subrasantes.

## **1.6 Operacionalización de las variables**

### **1.6.1 Variable independiente**

- Estabilización con Zeolita Natural.

### **1.6.2 Variable dependiente**

Propiedades mecánicas de la estabilización especialmente:

- Capacidad portante del suelo.
- Expansión del suelo.

**Tabla 1.1:** Variable independiente:

Variable	Conceptualización	Dimensión	Indicador	Valor Acción
Estabilización con Zeolita Natural en suelos Limo Arcillosos	Se adicionará a la muestra de suelo seco un porcentaje de zeolita natural para su posterior prueba de laboratorio para poder realizar el estudio de las propiedades con los ensayos de CBR y así determinar si resulta haber una mejora en las propiedades mecánicas de importancia en las subrasantes.	Cantidad de zeolita natural	Porcentaje (%)	Calculado respecto al peso total de la muestra
		Mezcla de suelo – Zeolita natural	Gramos (g)	Mezcla del suelo Limo arcilloso con Zeolita natural

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 1.2:** Variables dependientes:

Variable	Conceptualización	Dimensión	Indicador	Valor Acción
Propiedades mecánicas de la estabilización	Son las propiedades de resistencia a la deformación o capacidad de soporte por esfuerzo cortante bajo cargas de tránsito.	Tipo de Propiedades	Capacidad portante del suelo	Determinado por el ensayo C.B.R.
			Expansión	Determinado por el ensayo C.B.R.

Fuente: Elaboración propia

### 1.7 Identificación del tipo de investigación

La metodología que se detalla a continuación fue empleada de manera independiente, presentando una solución técnica para la construcción de estructuras viales. Esta metodología varía según los requerimientos, las características de cada obra y los objetivos planteados, así como el nivel de desempeño deseado en las condiciones de la estructura.

## 1.8 Unidades de estudio y decisión muestral

### 1.8.1 Unidad de estudio

La presente investigación comprende el Análisis de Propiedades de Materiales de Subrasante, que se realiza a través de un proceso de estabilización con Zeolita Natural.

### 1.8.2 Población

La presente investigación comprende el Análisis de Propiedades de Materiales de Subrasante, que se realiza a través de un proceso de estabilización con Zeolita Natural.

**Tabla 1.3:** Clasificación de suelos según AASTHO

CLASIFICACIÓN GENERAL	Materiales Granulares							Materiales Limo - Arcillosos			
	(Igual o menor del 35% pasa el tamiz N° 200)							(más del 35% que pasa el tamiz N° 200)			
GRUPOS	A-1		A-3	A-2				A-4	A-5	A-6	A-7
SUB - GRUPOS	A-1-a	A-1-b		A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7				A-7-5
% que pasa el Tamiz											
N° 10	50 máx.										
N° 40	30 máx.	50 máx.	51 máx.								
N° 200	15 máx.	25 máx.	10 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.	36 mín.	36 mín.	36 mín.	36 mín.
Características del Material que pasa el tamiz N° 40											
Límite líquido			NO PLÁSTICO	40 máx.	41 mín.	40 máx.	41 mín.	40 máx.	41 mín.	40 máx.	41 máx.
Índice de Plasticidad	6 máx.	6 máx.		10 máx.	10 máx.	11 mín.	11 mín.	10 máx.	10 máx.	11 mín.	11 mín.
Índice de Grupo	0	0	0	0	0	4 máx.	4 máx.	8 máx.	12 máx.	16 máx.	20 máx.
Tipo de Material	fragmentos de piedra grava y arena		Arena fina	Grava, arenas limosas y arcillosas				Suelos Limosos		Suelos Arcillosos	
Terreno de Fundación	Excelente a Bueno						Regular a Deficiente				

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 1.4:** El Sistema Unificado de Clasificación de Suelos - SUCS (Unified Soil Classification System (USCS))

Clasificación modificada de Casagrande

<b>Primera y/o segunda letra</b>	
<b>Símbolo</b>	<b>Definición</b>
<b>G</b>	grava
<b>S</b>	arena
<b>M</b>	limo
<b>C</b>	arcilla
<b>O</b>	orgánico

<b>Segunda letra</b>	
<b>Letra</b>	<b>Definición</b>
<b>P</b>	pobrementemente gradado (tamaño de partícula uniforme)
<b>W</b>	bien gradado (tamaños de partícula diversos)
<b>H</b>	alta plasticidad
<b>L</b>	baja plasticidad

Divisiones mayores			Símbolo del grupo	Nombre del grupo
Suelos granulares gruesos más del 50% retenido en el tamiz N° 200 (0,075 mm)	Grava > 50% de la fracción gruesa retenida en el tamiz N° 4 (4,75 mm)	grava limpia menos del 5% pasa el tamiz N° 200	<b>GW</b>	Grava bien gradada, grava fina a gruesa
			<b>GP</b>	Grava pobremente gradada
		grava con más de 12% de finos pasantes del tamiz N° 200	<b>GM</b>	Grava limosa
			<b>GC</b>	Grava arcillosa
	Arena ≥ 50% de fracción gruesa que pasa el tamiz N° 4	Arena limpia	<b>SW</b>	Arena bien gradada, arena fina a gruesa
			<b>SP</b>	Arena pobremente gradada
		Arena con más de 12% de finos pasantes del tamiz N° 200	<b>SM</b>	Arena limosa
			<b>SC</b>	Arena arcillosa
Suelos de grano fino más de 50% pasa el tamiz N° 200	limos y arcillas	inorgánico	<b>ML</b>	Limo
			<b>CL</b>	Arcilla
	límite líquido < 50	orgánico	<b>OL</b>	Limo orgánico, arcilla orgánica
	limo y arcilla	inorgánico	<b>MH</b>	Limo de alta plasticidad, limo elástico
			<b>CH</b>	Arcilla de alta plasticidad
límite líquido ≥ 50	orgánico	<b>OH</b>	Arcilla orgánica, limo orgánico	
Suelos altamente orgánicos			<b>Pt</b>	Turba

Fuente: Elaboración propia

Una vez realizada la respectiva clasificación de los materiales utilizados para el estudio de aplicación se definirá exactamente a qué grupo de suelo pertenece.

### 1.8.3 Muestra

Se utilizaron dos tipos de suelos, limo arcilloso (A-4) y arcilloso (A-6), recolectados en la ciudad de Tarija, en cantidades necesarias para llevar a cabo los ensayos de laboratorio requeridos. Estos suelos fueron seleccionados debido a su representatividad en las condiciones locales y su uso frecuente en infraestructuras viales de la región.

Cada tipo de suelo fue sometido a un proceso de estabilización con zeolita natural,

aplicando diferentes porcentajes del estabilizante para evaluar su efecto en las propiedades mecánicas de las subrasantes.

La zeolita natural utilizada en los ensayos fue proporcionada por un proveedor nacional, quien suministró la ficha técnica correspondiente.

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

Lo que se va muestrear van a ser el agregado fino de la mezcla con zeolita natural, se recibirá sellados desde el proveedor y serán distribuidos en porcentajes de acuerdo de estabilización que se pretende realizar, la muestra de los agregados limosos y arcillosos que se utilizaran para la estabilización será de los bancos de préstamo extraídos de zonas específicas en la ciudad de Tarija que serán colocados en bolsas de yute en cantidades necesarias.

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

En este proyecto se busca presentar los métodos, técnicas y alternativas más efectivas para el análisis de las propiedades de las subrasantes limo arcillosas estabilizadas con zeolita natural.

Los agregados los obtendremos de una carretera y una calle en estado de construcción, ambos dispuestos en la ciudad de Tarija, para ver en qué condiciones cuál de los materiales estabiliza mejor o mejora sus propiedades.

La metodología se basa en la adición de porcentajes de zeolita natural a subrasantes para su estabilización del mismo.

Se dispondrá la utilización de moldes de CBR para la verificación de la estabilización con la adición de zeolita natural.

En cuanto a los ensayos se realizará:

1. Ensayos de calidad de los agregados: sin estabilizar:

Granulometría.

Ensayos de hidrómetro

Peso específico y absorción.

Índice de plasticidad

Clasificación del suelo

2. Ensayos de resistencia:

CBR

Compactación

NOTA: todos los ensayos serán realizados tomando en cuenta los requisitos mínimos necesarios para materiales de capa subrasante para así determinar en qué condiciones sus propiedades mejoran o no.

### **1.10 Alcance del estudio de aplicación**

El presente proyecto tiene como propósito fundamental determinar si la estabilización con zeolita natural es capaz de cumplir con los requisitos técnicos mínimos exigidos para subrasantes compuestas por suelos limo arcillosos, según lo establecido en las especificaciones vigentes en infraestructura vial. Bajo el título

"ESTABILIZACIÓN DE SUELOS LIMO ARCILLOSOS EN SUBRASANTE CON LA APLICACIÓN DE ZEOLITA NATURAL" se busca explorar una técnica novedosa que contribuya al desarrollo de métodos más eficientes y sostenibles para la mejora de suelos en la construcción de carreteras. Este estudio tiene como propósito ofrecer alternativas viables para las regiones que presentan suelos con propiedades problemáticas, como baja capacidad portante y alta expansión, que dificultan su utilización en proyectos de infraestructura. Etapas del estudio:

El proyecto está compuesto por varias fases que permiten realizar un análisis integral de la estabilización de suelos con zeolita natural, comenzando con la selección y caracterización de los suelos. En este sentido, se pretende:

Conseguir agregados finos, principalmente limo arcillosos, de bancos de préstamo de la región, que serán sometidos a un riguroso proceso de caracterización en el laboratorio. Esta etapa es fundamental para determinar las propiedades inherentes de los suelos que podrían afectar su capacidad portante y su tendencia a la expansión. Se evaluará la granulometría, la plasticidad, la humedad óptima y la densidad seca de los suelos, entre otros parámetros.

Una vez obtenidos los resultados de la caracterización, se procederá con la mezcla del suelo con zeolita natural en proporciones determinadas. La zeolita natural utilizada provendrá de una distribuidora en Cochabamba, seleccionada por su alta pureza y

disponibilidad comercial. Se verificará si la zeolita natural, debido a sus propiedades únicas de intercambio catiónico y absorción, es capaz de mejorar las propiedades mecánicas de los suelos estudiados.

#### Ensayos de laboratorio

Se llevarán a cabo diversos ensayos de laboratorio que permitirán validar la efectividad de la mezcla suelo-zeolita natural. Entre los ensayos más relevantes están:

**Ensayo CBR (California Bearing Ratio):** Este ensayo es crucial para medir la capacidad portante de los suelos estabilizados. A través del CBR, se determinará si la estabilización con zeolita natural logra mejorar significativamente la resistencia de los suelos limosos y arcillosos, adecuándolos para su uso en subrasantes de carreteras.

**Medición de la expansión del suelo:** Se evaluará el comportamiento expansivo de los suelos estabilizados al estar sometidos a diferentes niveles de saturación. Específicamente, se busca comprobar si la mezcla con zeolita natural reduce la expansión a niveles que cumplen con los estándares establecidos para subrasantes, asegurando así una mayor estabilidad del pavimento.

#### Análisis de resultados

Una vez completados los ensayos, se procederá al análisis de los datos obtenidos, centrándose en los cambios en las propiedades mecánicas y físicas de los suelos estabilizados. Se evaluarán parámetros como la densidad seca máxima, la humedad óptima, la capacidad portante y la reducción de la expansión. Estos resultados permitirán determinar si la estabilización con zeolita natural satisface los requisitos técnicos mínimos necesarios para su uso en la construcción de carreteras y caminos.

#### Conclusión del estudio

Finalmente, el estudio proporcionará un análisis detallado sobre la viabilidad técnica y de la estabilización con zeolita natural en suelos limosos y arcillosos. Los resultados obtenidos no solo permitirán determinar si este método cumple con los estándares requeridos, sino que también ofrecerán una nueva alternativa para mejorar la durabilidad y eficiencia de los sustratos en infraestructura vial. Además, el uso de un estabilizante natural como la zeolita natural tiene el potencial de generar beneficios adicionales, como la sostenibilidad ambiental y la reducción de costos a largo plazo, lo que podría ser de gran interés para la implementación de proyectos futuros en diversas regiones del país.

**CAPÍTULO II**  
**GENERALIDADES Y**  
**DEFINICIONES**

## **CAPÍTULO II**

### **GENERALIDADES Y DEFINICIONES**

#### **2.1 Suelo**

El suelo se define como una mezcla no cementada de granos minerales y partículas orgánicas, que contiene agua y aire en sus poros, y se encuentra en la superficie terrestre. Su principal función es servir como soporte para las construcciones humanas, ya sea como cimiento de viviendas y edificios, componente en la elaboración de morteros y hormigones, o como parte integral.

En términos generales, los suelos pueden clasificarse como gravas, arenas, limos o arcillas, según el tamaño predominante.

El suelo es el resultante de la compleja mezcla de material rocoso y erosionado, de materiales disueltos y redepositados, y de restos de cosas anteriormente vivas. Estos componentes son mezclados por la construcción de madrigueras por los animales, la presión de las raíces de las plantas y el movimiento de agua subterránea. (Martínez Velasco, 2017)

##### **2.1.1 Arcilla**

La arcilla es un tipo de suelo compuesto por partículas extremadamente finas, con un diámetro menor a 0,002 mm. Estas partículas poseen una estructura laminar o en escamas y están constituidas principalmente por silicatos de aluminio hidratados, aunque también pueden contener otros minerales como magnesio, hierro y calcio. La arcilla es altamente cohesiva, lo que significa que sus partículas están fuertemente unidas por fuerzas internas significativas, lo que influye en su comportamiento bajo distintas condiciones de humedad. En ambientes húmedos, la arcilla se vuelve plástica y maleable, mientras que en condiciones secas tiende a endurecerse y agrietarse.

Los suelos arcillosos se forman a partir de la desintegración de materiales que son transportados por el agua o el viento, y posteriormente se depositan en forma de sedimentos. Estos sedimentos se compactan con el tiempo debido al peso de las sucesivas capas de material, formando capas y estratos bien definidos. (Das, BM (2013) Principios de ingeniería geotécnica)

### **2.1.2 Limo**

Limo es un tipo de suelo compuesto por partículas finas con un diámetro que varía entre 0,0039 mm y 0,0625 mm, lo que lo sitúa entre la arcilla y la arena en cuanto a tamaño de partícula. Estas partículas provienen de la desintegración de rocas y minerales, y son transportadas por el agua o el viento para finalmente depositarse en forma de sedimentos. A diferencia de la arcilla, el limo es un sedimento no cohesivo, lo que significa que sus partículas no se adhieren entre sí de manera significativa.

Los suelos limosos suelen encontrarse en lechos de ríos, llanuras aluviales y áreas afectadas por la erosión. Su textura es suave al tacto y, en condiciones húmedas, puede ser resbaladizo, mientras que en condiciones secas se vuelve polvoriento. A pesar de su capacidad para retener agua, la limusina tiene una baja cohesión, lo que lo hace inestable y menos adecuado para soportar grandes cargas sin estabilización.

**El limo se clasifica en orgánico e inorgánico.** El limo orgánico se forma en el suelo de ecosistemas húmedos. Es una mezcla de residuos vegetales, animales y minerales, útil en la preparación de los suelos para la agricultura. El limo inorgánico está compuesto sólo por polvo rocoso. Y cuando se presenta en forma de roca se denomina limolita y lutita, de acuerdo a su consolidación.

Se conoce además que el limo es un sedimento no cohesivo que puede construirse sobre suelos limosos siempre que se realice un buen trabajo de cimentación. En el campo de la construcción el limo se emplea como relleno secundario. Es un elemento masivo, pero de baja calidad. (Das, BM (2013) Principios de ingeniería geotécnica)

## **2.2 Caracterización de los suelos**

Los ensayos de caracterización de suelos que se emplearán para el desarrollo del presente proyecto serán los siguientes:

### **2.2.1 Contenido de humedad**

El comportamiento del suelo en cuanto a la retención de agua puede compararse con el de una esponja, debido a su capacidad para almacenar agua dentro de su estructura porosa. La cantidad de agua que un suelo puede retener depende en gran medida de las características de sus partículas, como su textura y estructura. El contenido de humedad

del suelo se define como la relación entre la masa de agua presente en los poros del suelo y la masa de las partículas sólidas. Este contenido de humedad incluye el agua libre, capilar e higroscópica, que se encuentra retenida de diferentes maneras en el suelo.

El ensayo de contenido de humedad tiene como objetivo cuantificar la cantidad de agua presente en una muestra de suelo, proporcionando información esencial para evaluar su comportamiento mecánico y su capacidad de soporte en proyectos de ingeniería civil. Conocer el contenido de humedad es fundamental para definir las condiciones óptimas de compactación y estabilidad del suelo en diversas aplicaciones constructivas. (Das, BM (2013) Principios de ingeniería geotécnica)

### **2.2.2 Límites de atterberg**

Albert Mauritz Atterberg desarrolló los límites de consistencia para los suelos finos con el objetivo de caracterizar su comportamiento a diferentes niveles de humedad. Estos límites, fundamentales para la clasificación de suelos, incluyen el Límite Líquido (LL) , el Límite Plástico (LP) y el Límite de Contracción (LC) , aunque en un principio también mencionaron otros límites como el de cohesión y pegajosidad.

**Límite Líquido (LL):** Se refiere al porcentaje de humedad por encima del cual un suelo pasa de un comportamiento plástico a uno de fluido viscoso. Cuando el contenido de agua supera el límite líquido, el suelo se comporta como un líquido viscoso. Este parámetro no solo es esencial para clasificar los suelos, sino que también permite estimar la susceptibilidad de un suelo a problemas de expansión volumétrica, consolidación y determinar la densidad óptima en estudios de compactación.

**Límite Plástico (LP):** Marca la transición entre el estado plástico y el estado semisólido del suelo. En ensayos de laboratorio, el límite de plástico se define como el contenido de humedad en el cual finos rollitos de suelo (de aproximadamente 3 mm de diámetro) comienzan a desmoronarse y agrietarse. Cabe destacar que, aunque Atterberg introdujo este concepto, fue Karl Terzaghi quien propuso el diámetro específico de los rollitos, ya que Atterberg no proporcionó ese detalle.

**Índice de Plasticidad (IP):** Es la diferencia entre los valores del Límite Líquido y el Límite Plástico. Un bajo índice de plasticidad indica que el suelo es altamente sensible a pequeños cambios en el contenido de humedad, pasando rápidamente del estado semisólido al

líquido. En cambio, un índice de plasticidad alto sugiere que el suelo necesita una cantidad significativa de agua para experimentar este cambio, siendo menos sensible a variaciones de humedad. (Das, BM (2013) Principios de ingeniería geotécnica)

**Figura 2.1:** Estados del suelo, límite de plasticidad

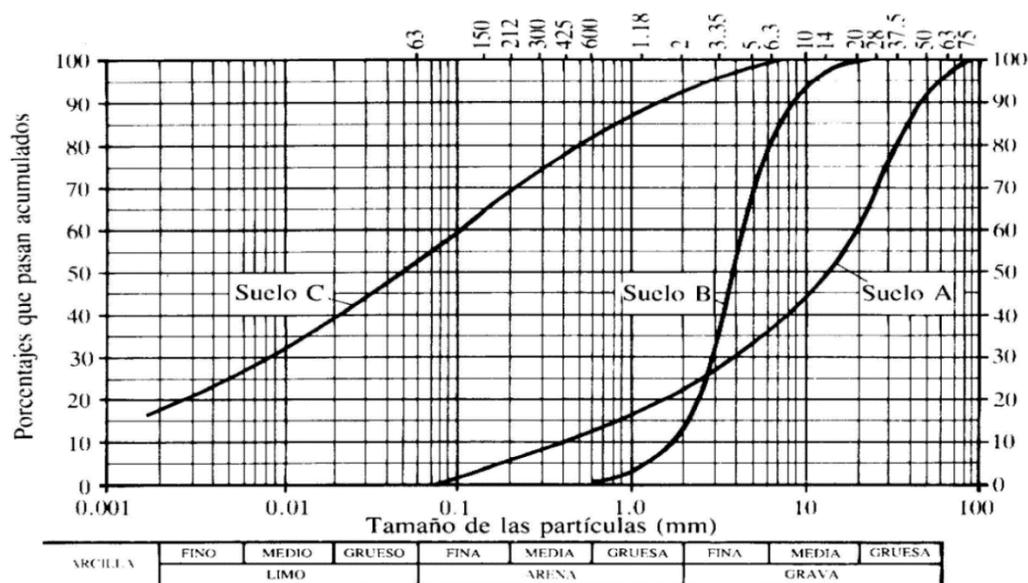


Fuente: Manual de procedimiento de ensayos de suelos UMNG

### 2.2.3 Granulometría

El análisis granulométrico es un proceso utilizado para determinar la distribución de tamaños de partículas en una muestra de suelo. Este análisis permite clasificar las partículas en rangos de tamaño mediante el uso de mallas o tamices con aberturas de diferentes diámetros, organizados de manera progresiva. El método más utilizado es el tamizado mecánico, en el cual la muestra de suelo se coloca en una serie de tamices con aberturas cuadradas y se somete a un proceso de agitación para separar las partículas. Posteriormente, el material retenido en cada tamiz se pesa, y el resultado se expresa como un porcentaje en peso de la muestra total.

Una clasificación importante dentro del análisis granulométrico es la que separa los suelos en finos y gruesos, tomando como referencia la malla No. 200 (0,075 mm). Las partículas que pasan a través de esta malla se consideran suelos finos (limos y arcillas), mientras que las partículas que quedan retenidas son clasificadas como suelos gruesos (arenas y gravas). (Das, BM (2013) Principios de ingeniería geotécnica)

**Gráfica 2.1:** Estados del suelo, límite de plasticidad.

Fuente: Manual de procedimiento de ensayos de suelos UMNG.

**Tabla 2.1:** Rangos de granulometría para estabilización.

Tamiz	Porcentaje que debe pasar (%)
No. 4 (4,75 mm)	100%
No. 10 (2 mm)	85-100%
No. 40 (0.425 mm)	50-85%
No. 200 (0.075 mm)	10-30%
Límite Líquido	< 50%
Índice de Plasticidad	< 20%

Fuente: Manual de Carreteras de la ABC (Administradora Boliviana de Carreteras).

## 2.2.4 Hidrómetro

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

Se asume que la ley de Stokes puede ser aplicada a una masa de suelo dispersado, con partículas de varias formas y tamaños.

El hidrómetro se usa para determinar el porcentaje de partículas de suelos dispersados,

que permanecen en suspensión en un determinado tiempo. Para ensayos de rutina con fines de clasificación, el análisis con hidrómetro se aplica a partículas de suelos que pasan el tamiz de 2,00 mm (No.10) para suelos granulares.

Cuando se quiere más precisión, el análisis con hidrómetro se debe realizar a la fracción de suelo que pase el tamiz de 75  $\mu$ m (No.200) para suelos finos. (Ing. Laura Karina Soto Salgado (2015) Mecánica de suelos 1 y laboratorio)

### 2.2.5 Peso específico

Gs” y se presenta en condición adimensional.

Los valores típicos del peso específico para suelos varían según el tipo de material. Por ejemplo, los suelos predominantemente compuestos por minerales como el cuarzo suelen tener un peso específico entre 2,65 y 2,75, mientras que los suelos con un alto contenido de materia orgánica o arcillas expansivas pueden presentar valores más bajos, generalmente entre 2,5 y 2,65. Los suelos con minerales pesados, como los que contienen hierro o minerales ferromagnesianos, pueden tener valores más altos, que oscilan entre 2,75 y 3,0. (Das, BM (2013) Principios de ingeniería geotécnica)

Joseph Bowels presenta en su “Manual De Laboratorio De Suelos En Ingeniería Civil” valores típicos para algunos tipos de suelos, los cuales se muestran a continuación:

**Tabla 2.2:** Rangos de gravedad específica propuestos por Bowels

Tipo de Suelo	Rango Gravedad específica
Arena	2,65-2,67
Arena Limosa	2,67-2,70
Arcilla inorgánica	2,70-2,80
Suelos con micas o hierro	2,75-3,00
suelos Orgánicos	Variable. Puede ser inferior a 2,00

Fuente: Manual de procedimiento de ensayos de suelos UMNG

### 2.2.6 Compactación del suelo

La compactación del suelo es el proceso por el cual las partículas del suelo se comprimen para reducir el volumen de vacíos (espacios llenos de aire) mediante la aplicación de energía mecánica, como el uso de rodillos, vibradores o impactos. Este proceso aumenta la densidad seca del suelo, mejorando su capacidad de carga y estabilidad, lo que es esencial en proyectos de construcción. El suelo compacto es menos susceptible a los asentamientos, más resistente y tiene menor permeabilidad, lo que ayuda a prevenir el movimiento de agua dentro de la estructura del suelo.

El objetivo principal del ensayo de compactación es determinar las condiciones óptimas de compactación de un suelo, es decir, la densidad seca máxima que el suelo puede alcanzar un determinado contenido de humedad óptimo. A través de este ensayo, se busca: Maximizar la capacidad de carga del suelo para garantizar una base sólida para estructuras. Minimizar asentamientos futuros, que pueden causar problemas en las infraestructuras construidas sobre el suelo.

Controlar la permeabilidad del suelo, reduciendo el flujo de agua a través de la capa compactada.

Estabilizar el suelo, aumentando su resistencia y reduciendo el riesgo de deslizamientos o fallas estructurales.

**Figura 2.2:** Proctor Modificado



Fuente: Braja M. Das 2015

El ensayo más utilizado para evaluar la compactación es el ensayo Proctor (estándar o modificado), en el cual una muestra de suelo se compacta en capas bajo condiciones controladas, aplicando golpes de un martillo o impacto estándar. A partir de este ensayo, se obtiene una curva de compactación, que relaciona la densidad seca del suelo con su contenido de humedad, y permite identificar el contenido óptimo de humedad para lograr la máxima densidad seca posible. (Das, BM (2013) Principios de ingeniería geotécnica)

### 2.2.7 C.B.R. (california bearing ratio)

**Figura 2.3:** C.B.R. (California bearing ratio)



Fuente: Elaboración propia

La abreviación “CBR” corresponde al California Bearing Ratio, método de análisis de materiales desarrollado en el año de 1929 por la División de Carreteras de California, con el fin de darle una clasificación a la capacidad del suelo para ser utilizado en proyectos de construcción. También denominado ensayo de relación de soporte, es el procedimiento por medio del cual mediante pruebas de laboratorio y bajo condiciones de humedad y densidad controlada se puede medir la resistencia de un suelo en el estado en que este se encuentre en ese momento.

Es un ensayo geotécnico utilizado para evaluar la capacidad de soporte de suelos, incluidos los suelos finos como arcillas y limos. Aunque este ensayo es tradicionalmente más eficaz en suelos granulares (como gravas y arenas), también se puede aplicar a suelos finos para obtener una estimación de su capacidad de carga cuando se utilizan en capas de pavimento o carreteras.

El método de CBR es normalmente utilizado para analizar materiales cuyo diámetro máximo de partículas es de  $\frac{3}{4}$ ".

En ensayo de CBR permite igual brindar información sobre la expansión esperada en el suelo bajo la estructura de pavimento cuando el suelo se satura e indicando la pérdida de resistencia debida a la saturación en el campo. A continuación, se presenta una tabla donde con base a los valores de CBR se establece una clasificación general para el suelo.

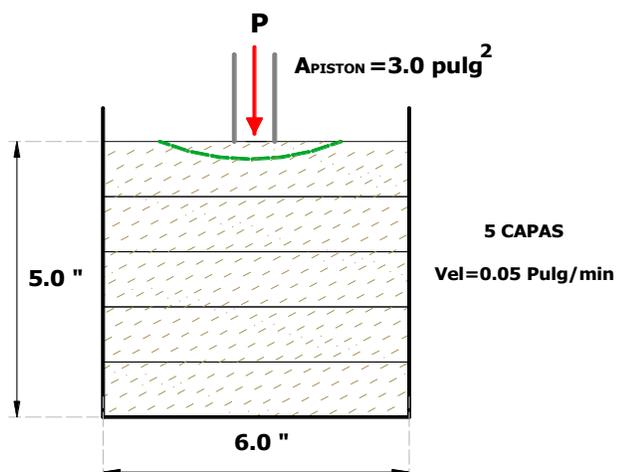
**Tabla 2.3:** Clasificación de suelos según C.B.R.

Valor CBR	Clasificación General	Usos
0--3	Muy Pobre	Subrasante
3--7	Pobre a Regular	Subrasante
7--20	Regular	Sub-Base
20--50	Bueno	Base, Sub-Base
>50	Excelente	Base

Fuente: Manual de laboratorios de suelos Joseph Bowles

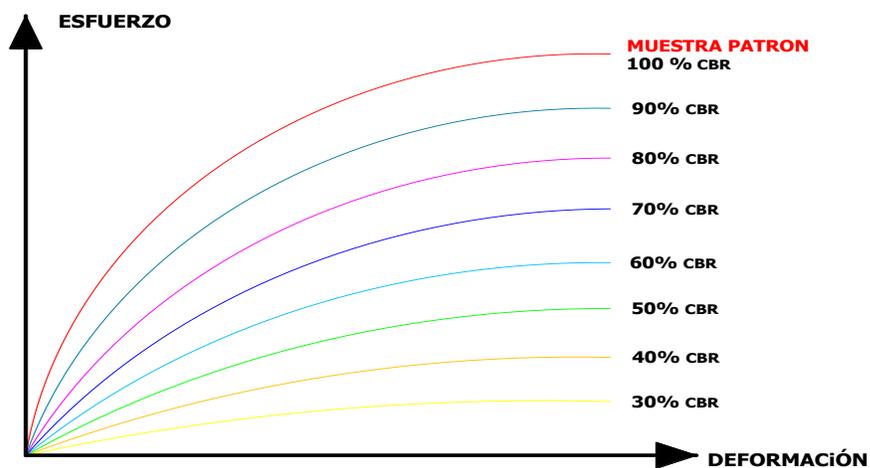
Los suelos por debajo del nivel superior de la subrasante, en una profundidad no menor a 0,60m, deberán ser suelos adecuados y estables con  $CBR \geq 6\%$ . En caso el suelo, debajo del nivel superior de la subrasante, tenga un  $CBR < 4\%$  (Subrasante pobre o subrasante inadecuada), corresponde estabilizar los suelos, para lo cual se debe analizar según la naturaleza del suelo alternativas de solución, como la estabilización mecánica, el reemplazo del suelo de cimentación, estabilización química de suelos, etc...

**Figura 2.4:** Vista del equipo CBR en perfil.



Fuente: Elaboración Propia

**Gráfica 2.2:** Esfuerzo vs deformación a distintos CBR.



Fuente: Elaboración Propia

Se toma como deformación máxima en el ensayo CBR, 0,5 pulg (1,25 mm), debido a que, a esta magnitud de deformación plástica o Mayor, se considera que el suelo ha fallado. El valor de CBR en suelos no estabilizados, se determina a 0,1" y 0,2" de deformación, porque a esos niveles son las sollicitaciones normales que soportan los suelos.

**Tabla 2.4:** Especificaciones del CBR y expansión.

PARÁMETRO	VALOR
CBR mínimo requerido (%)	6
Expansión máxima requerida (%)	3

Fuente: Elaboración propia

### **Equipo y materiales**

#### **Prensa de ensaye**

Está conformada por un marco de carga con una capacidad mínima de 44,5 kN (10.000 lbf) y una gata mecánica capaz de desplazar una base metálica rígida a una velocidad uniforme y sin pulsaciones, de 1,27 mm/min., contra el pistón de penetración. Este último debe estar equipado con un dispositivo indicador de carga de una capacidad mínima de 26,7 kN (6.000 lbf), que permita registrar lecturas con una precisión mínima de 50 N. El pistón debe llevar, además, sujeto a él, un dial de penetración graduado en milésimas de pulgada (0,025 mm).

#### **Moldes**

Metálicos, cilíndricos, con un diámetro interno de  $152,4 \pm 0,7$  mm y una altura de  $177,8 \pm 0,5$  mm. Deben tener un collar de extensión metálico de 50,8 mm de altura y una placa base metálica de 9,5mm de espesor con perforaciones de un diámetro menor o igual que 1,6 mm.

#### **Disco espaciador**

Metálico, cilíndrico, con un diámetro de  $150,8 \pm 0,8$  mm y una altura de  $61,4 \pm 0,2$  mm.

#### **Pisón**

Debe cumplir con lo especificado en la Tabla S0404\_1.

**Tabla 2.5:** Características del pistón a usar

PISÓN					
Ensayo	Masa	Altura de caída	Volumen del molde	Capas	Golpes por capa
Método del martillo de 2,5 kg	2,5 kg	300 mm	1000 cm <sup>3</sup>	5	56
Método del martillo de 4,5 kg	4,5 kg	450 mm	1000 cm <sup>3</sup>	5	56
Proctor (estándar)	2,49 kg (5,5 lbs)	305 mm (12 pulg)	944 cm <sup>3</sup> (1/30 pie <sup>3</sup> )	5	56
Proctor (modificado)	4,49 kg (10 lbs)	457 mm (18 pulg)	944 cm <sup>3</sup> (1/30 pie <sup>3</sup> )	5	56
Método del martillo vibratorio	Se utiliza un molde CBR para compactar una muestra de aproximadamente 2,360 cm <sup>3</sup> de volumen mediante el uso de un martillo vibratorio; el suelo se compacta en 5 capas iguales en 120 segundos de vibración				

Fuente: El manual de caminos UMSS

#### **Aparato medidor de expansión (hinchamiento)**

Compuesto por:

- Una placa metálica de  $149,2 \pm 1,6$  mm de diámetro, por cada molde. La placa debe tener perforaciones de un diámetro menor o igual que 1,6 mm, y estar provista de un vástago ajustable de metal en el centro, con un sistema de tornillo y contratuerca que permita regular y fijar su altura.
- Un trípode metálico por cada molde, cuyas patas puedan apoyarse en el borde de éste, y que lleve montado en el centro un calibre comparador con indicador de dial, con precisión de lectura 0,025 mm. El vástago debe desplazarse libremente y coincidir con el de la placa, de forma tal que permita controlar la posición de ésta y medir el hinchamiento (ver Figura S0404\_1).
- Un dial para medir expansión, por cada molde, con precisión de lectura 0,025 mm.

#### **Cargas**

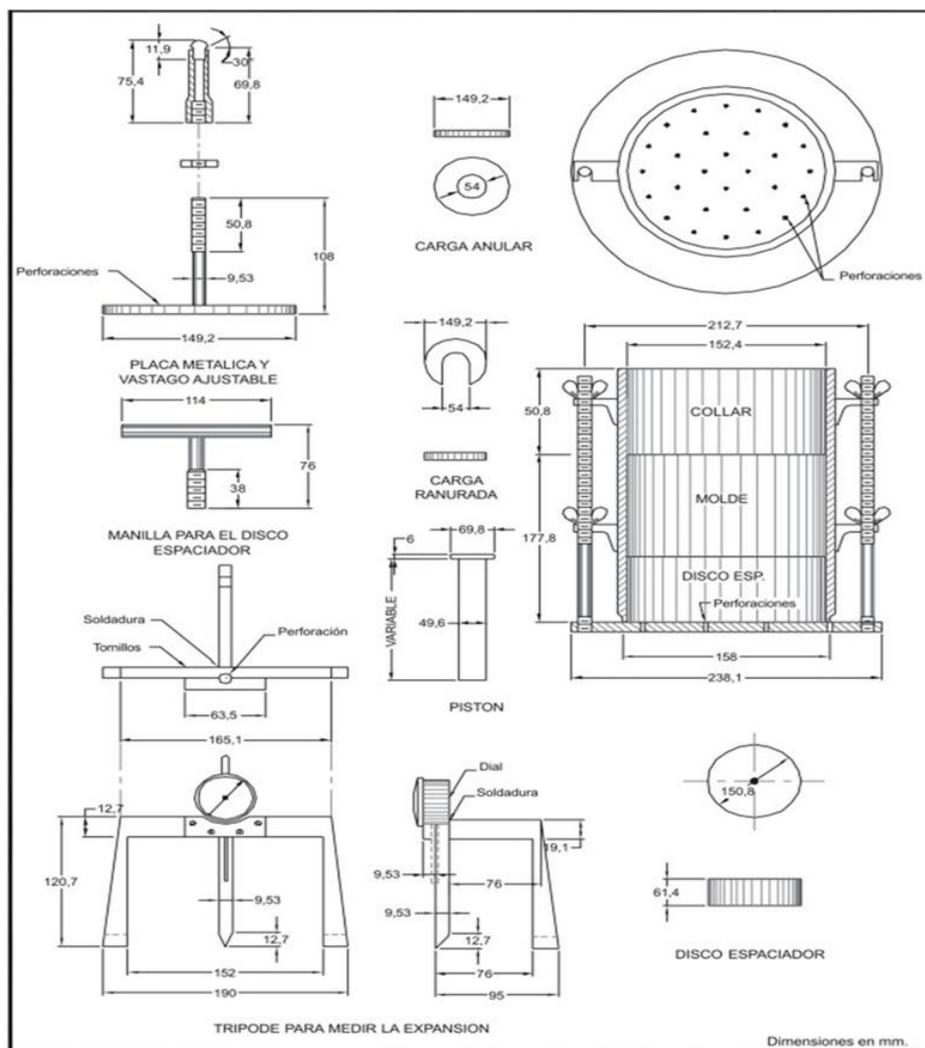
Para cada molde se debe disponer de una carga metálica anular y varias cargas ranuradas de  $2,27 \pm 0,05$  Kg. cada una. La carga anular, de diámetro exterior de  $149,2 \pm 1,6$  mm, debe disponer de una perforación u orificio en el centro de aproximadamente 54 mm de diámetro (ver Figura S0404\_1).

Nota: Para disminuir el número de discos de carga necesarios para el ensaye, se pueden utilizar combinadamente discos confeccionados en plomo y en acero.

### Otros equipos y accesorios

- Un tambor o depósito de capacidad suficiente para la inmersión de los moldes en agua, ubicado en un lugar tal que ésta no alcance su punto de congelación.
- Un horno con circulación de aire y temperatura regulable, que permita el secado de muestras a  $110 \pm 5$  ° C.
- Balanza de 20 Kg. de capacidad y precisión 1 g.
- Balanza de 2 Kg. de capacidad y precisión 0,1 g.

**Figura 2.5:** Aparato CBR



Fuente: Manual de caminos UMSS

Otros: recipientes, probetas graduadas, poruñas, espátulas, reglas, brochas, discos de papel filtro, cronómetro, etc. (Yurquina Flores Guía, laboratorio suelos II)

Todas las obras de ingeniería civil se apoyan sobre el suelo de una u otra forma, y muchas de ellas además utilizan la tierra como elemento de construcción para terraplenes, diques y rellenos en general por lo que en consecuencia, su estabilidad y comportamiento funcional y estético estarán determinados, entre otros factores, por el desempeño del material de asiento situado dentro de las profundidades de influencia de los esfuerzos que se generan, o por el del suelo utilizado para conformar los rellenos. (Martínez Velasco, 2017)

Si se sobrepasan los límites de la capacidad resistente del suelo o si, aún sin llegar a ellos, las deformaciones son considerables, se pueden producir esfuerzos secundarios en los miembros estructurales, quizás no tomados en consideración en el diseño, productores a su vez de deformaciones importantes, fisuras, grietas, desplomos que pueden producir, en casos extremos el colapso de la obra o su inutilización y abandono.

En consecuencia, las condiciones del suelo como elemento de sustentación y construcción y las del cimiento como dispositivo de transición entre aquel y la subestructura, han de ser siempre observadas, aunque esto se haga en proyectos pequeños fundados sobre suelos normales a la vista de datos estadísticos y experiencias locales, y en proyectos de mediana a gran importancia o en suelos dudosos, infaliblemente, a través de una correcta investigación de mecánica de suelos.

En este capítulo se presenta “La estabilización de suelos” como una de las técnicas utilizadas con mayor frecuencia en la actualidad cuando los suelos, en su estado natural no cumplen los requisitos indispensables para ser empleados en una obra de ingeniería civil. El “Mejoramiento del suelo” consiste en modificar las características físico-mecánicas de los suelos mediante la aplicación de energía y/o sustancias que hacen que este mejore sus propiedades, donde el suelo una vez estabilizado pueda ser aprovechado con nuevas propiedades para el diseño y construcción de diversas obras.

Generalmente el mejoramiento de suelos tiene como principales objetivos aumentar la resistencia de los suelos, proporcionar o disminuir la permeabilidad en función de su uso, y reducir los cambios volumétricos (asentamientos y expansiones).

## 2.3 Estudio de la subrasante

### 2.3.6 Definición

La subrasante es la capa de suelo situada directamente bajo la estructura del pavimento en una carretera o vía. Esta capa puede estar constituida por el suelo natural existente en el lugar (subrasante natural) o puede ser creada mediante el uso de materiales adicionales compactados sobre el terreno (subrasante artificial), como en el caso de los terraplenes. La subrasante es la base fundamental sobre la que se asientan las capas superiores de un pavimento. La Subrasante se compone principalmente de material limoso, arcilloso, arenas y algunas gravas pequeñas.

### 2.3.7 Función de la subrasante

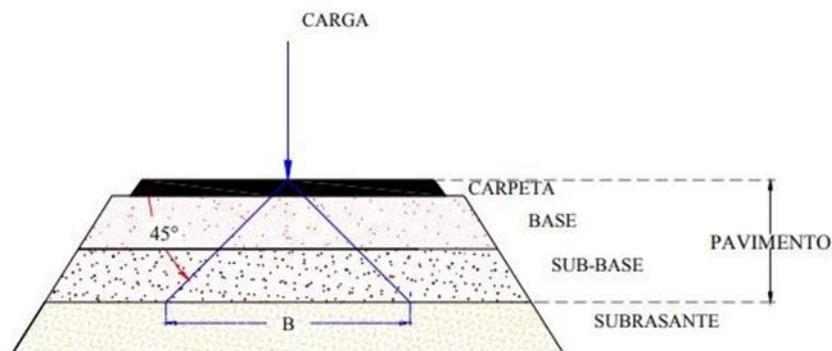
La función de la subrasante es soportar las cargas que transmite el pavimento y darle sustentación, además de considerarse la cimentación del pavimento. Entre mejor calidad se tenga en esta capa el espesor del pavimento será más reducido y habrá un ahorro en costos sin mermar la calidad; es por eso que se debe verificar la calidad de la misma con estudios previos y si es necesario estabilizarla para mejorar su calidad.

Otra de las funciones de la subrasante es evitar que el terraplén contamine al pavimento y que sea absorbido por las terracerías.

Las principales funciones de la capa subrasante son:

- 1.- recibir y resistir las cargas del tránsito que le son permitidas por el pavimento.
- 2.- transmitir y distribuir de modo adecuado las cargas del tránsito al cuerpo del terraplén.

**Figura 2.6:** Transmisión de cargas en capas inferiores



Fuente: Manual de caminos UMSS

Entre las cualidades de una subrasante, que generalmente son deseables por los ingenieros de vías, se tienen las siguientes.

- Una alta resistencia.
- Permanencia de la resistencia por lo menos durante la vida útil del pavimento.
- Una buena uniformidad en todas las direcciones.
- Una alta densidad.
- Poco susceptibles a los cambios volumétricos.
- Poco susceptibles a la acción del agua.
- Buena trabajabilidad durante el proceso de compactación.
- Permanencia de las propiedades inducidas mediante la compactación.

### **2.3.8 Posibilidad de mejoramiento de la subrasante**

Procedimientos para mejorar los suelos:

Métodos Físicos:

Consolidación previa (suelos finos)

Confinamiento (suelos granulares)

Mezclas de suelos

Métodos Químicos:

Sal (suelos finos)

Cemento (suelos con fracción granular)

Cal (suelos finos)

**Mineral (zeolita natural)**

Otros (Dynasolo, Aceite quemado, Cenizas, escorias)

Métodos Mecánicos:

Compactación

## 2.4 Estabilización

La estabilización de suelos mediante los métodos físico y químico es fundamental para mejorar las propiedades del suelo en proyectos de ingeniería civil, asegurando que sea adecuado para soportar las cargas estructurales requeridas.

Al estabilizar un suelo se alteran sus propiedades iniciales en cuanto a resistencia y deformación.

### 2.4.6 Métodos de estabilización de suelos

#### Estabilización mecánica

El método físico o mecánico de estabilización de suelos consiste en mejorar las propiedades del suelo mediante compresión, mezcla o compactación sin añadir ningún agente químico. El objetivo es aumentar la densidad y resistencia del suelo reduciendo los espacios vacíos entre las partículas y mejorando su capacidad de carga.

#### Estabilización física

Compactación mecánica: Se utilizan rodillos, vibradores o compactadoras para reducir el volumen de vacíos en el suelo.

Mezcla de suelos: Combinar suelos de diferentes tipos para mejorar las características de resistencia. Por ejemplo, añadir arena a suelos arcillosos para reducir su plasticidad.

Geotextiles: Usar capas de materiales como mallas o telas sintéticas para reforzar el suelo.

#### Estabilización química

Materiales comunes en la estabilización química:

Cemento: Se mezcla con el suelo para mejorar su resistencia y reducir su plasticidad.

Cal: Se usa principalmente en suelos arcillosos para reducir la expansividad, mejorar la capacidad de carga y hacer que el suelo sea más resistente al agua.

**Zeolita natural:** Mejora las propiedades del suelo al absorber el agua y proporcionar estabilidad estructural.

Bitumen: Utilizado en suelos arenosos o granulares para incrementar la cohesión y resistencia al agua.

### **2.4.7 Estabilización química**

Este método para estabilizar se utiliza generalmente en suelos finos ya que las arcillas son susceptibles a los cambios en su estructura interna.

El método químico de estabilización de suelos implica la adición de aditivos que reaccionan químicamente con los componentes del suelo para modificar sus propiedades. Estos aditivos mejoran la resistencia, reducen la expansividad y aumentan la durabilidad del suelo.

#### **2.4.7.1 Estabilización con zeolita natural**

La estabilización de suelos con zeolita natural es una técnica emergente que ha ganado interés en proyectos de infraestructura vial, debido a las propiedades físicas y químicas de este material que lo hacen idóneo para mejorar la calidad de los suelos, especialmente los limosos y arcillosos. Las zeolitas, un grupo de minerales aluminosilicatos con estructura porosa, tienen la capacidad de intercambiar cationes y absorber agua, lo que puede ser beneficioso en la estabilización de suelos, reduciendo su expansividad y mejorando su capacidad de soporte.

En términos de estabilización de suelos, la zeolita natural presenta varias ventajas potenciales. Al ser utilizada como aditivo en la mezcla de suelos, puede mejorar su capacidad portante, reducir la plasticidad y mitigar la expansión, que son características clave para la construcción de subrasantes en carreteras y caminos. Además, debido a su estructura microporosa, la zeolita puede contribuir a la reducción de la retención de agua en suelos arcillosos, disminuyendo así el riesgo de expansión por saturación.

### **Suelos Apropriados**

Se recomienda suelos con una composición básica de arena y arcilla, la segunda actuará, como un cementante de la primera. La fracción fina de un suelo debe contener suficiente arcilla para formar una pasta delgada alrededor de las partículas más gruesas.

Suelos arcillosos ocasionan demasiado encogimiento y rajaduras, además el constante aumento y disminución de volumen en presencia de agua producen adobes fácilmente

erosionables; suelos con excesiva arena no tienen suficiente ligazón entre partículas, generando adobes de poca fuerza cohesiva que se desmoronan.

Suelos con excesivo contenido de materia orgánica no son aptos por su gran encogimiento, baja resistencia y poca duración ante la humedad.

Las sales y álcalis aún en cantidades reducidas ocasionan deterioro en los adobes expuestos a ciclos de humedecido y secado.

El problema principal radica en la identificación de los elementos nocivos y en los porcentajes máximos admisibles.

#### **2.4.8 Propiedades y características de la estabilización**

El mecanismo básico de la estabilización con zeolita natural clinoptilolita es la mejora de las propiedades del suelo mediante la reducción de la plasticidad y la capacidad de intercambio iónico, optimizando así la resistencia y estabilidad del terreno. La zeolita rellena los espacios entre partículas, mejorando la compactación y creando una estructura más homogénea.

Además, se logra un aumento en la capacidad portante debido a la interacción entre las partículas de suelo y la zeolita, lo cual fortalece el suelo mediante procesos de adsorción y estabilización química. Esta técnica es efectiva para reducir la expansividad de suelos limo arcillosos, disminuyendo problemas relacionados con la variación de humedad y minimizando deformaciones.

Se pueden utilizar distintos porcentajes de zeolita, ajustados según las características del suelo. A mayor cantidad de finos, es necesario incrementar el porcentaje de zeolita para garantizar una estabilización eficiente y lograr las propiedades deseadas para infraestructuras viales.

#### **2.4.9 Ventajas de la estabilización**

- Permiten el empleo de los suelos de la traza, mejorando sus características.

- Proporcionan una elevada capacidad de soporte a la explanación, con lo que aumenta la vida de servicio del firme.
- Aseguran la estabilidad de la explanación, tanto por su insensibilidad al agua y a situaciones climáticas extremas (como las heladas), evitando así cambios de volumen por hinchamiento o retracción, como por su resistencia a la erosión.
- Disminuye las tracciones en las capas del firme, aumentando con ello la vida útil.

#### **2.4.10 Ventajas económicas**

- Un mayor empleo de suelos y otros materiales de la traza, a veces de características iniciales inadecuadas.
- Un ahorro en el transporte de materiales.
- Un acortamiento en el plazo de ejecución. (Estabilización)

#### **2.4.11 Definición de zeolita**

El termino zeolita fue acuñado originalmente en 1756 por el mineralogista sueco Axel Fredrik Cronstedt, quien observo que al calentar rápidamente stilbita, se producen grandes cantidades de vapor de agua que había sido absorbida por el material. Con base a esto, llamo zeolita al material, donde el ζέω griego (zeo) significa "hervir" y λίθος (lithos), "piedra".

Los principales materiales geológicos donde yacen zeolitas son en rocas sedimentarias y en estratos volcánicos de diverso tipo. En cuanto a ambientes geológicos las zeolitas tienden a formarse en ambientes específicos que pueden clasificarse así: lagunas salinas o alcalinas, superficies y suelos salinos o alcalinos, sedimentos de fondo oceánico, zonas donde agua percola en sistemas hidrológicos abiertos, zonas de alteración hidrotermal y durante la diagénesis de sedimentos. (Carreño Miranda, 2018)

Las Zeolitas son minerales aluminosilicatos micro porosos presente de forma natural en rocas de origen volcánico que contiene oxido de aluminio ( $Al_2O_3$ ) y cuarzo ( $SiO_2$ ), con cavidades de dimensiones moleculares de 3 a 10 angstrom. Este mineral tiene iones grandes y moléculas de agua con libertad de movimiento, lo cual le permite el intercambio iónico. Destacan por su capacidad de hidratarse y deshidratarse de un modo reversible. Las zeolitas naturales se encuentran, tanto en rocas sedimentarias como en

volcánicas y metamórficas.

## 2.5 Especificaciones técnicas de la zeolita natural del proveedor

Datos del proveedor:

Distribuidora del Sur

Tienda de suministros y mayoristas – Compras y ventas minoristas.

**Figura 2.7:** Zeolita Natural



Fuente: Elaboración propia

Distribuidora del Sur. Productos al por mayor y menor carbón activado, zeolita clinoptilolita, resina catiónica, arena de silicio, arenas de remoción de hierro y manganeso, caolín, tierra diatomea, calcita, azufre, dióxido de manganeso, tisa, yeso agrícola, fertilizantes orgánicos, semillas de girasol de colores Hippeastrum, amaryllis.

### Zeolita Clinoptilolita

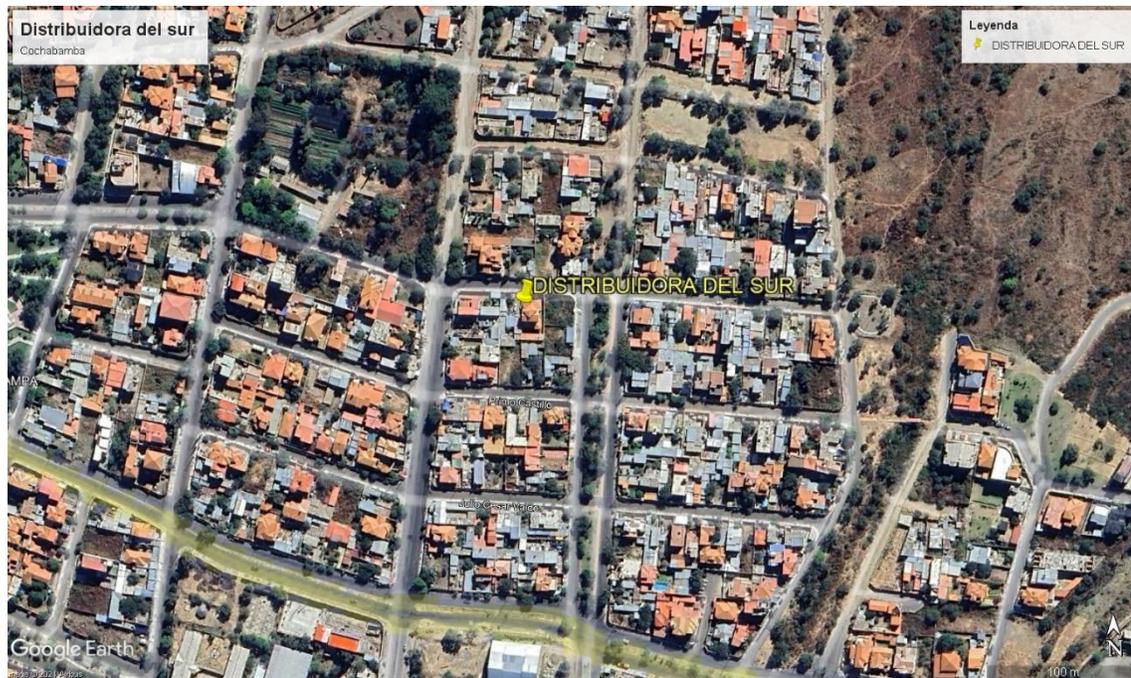
Zeolita Clinoptilolita granulada de origen Slovakia, para tratamiento de aguas, ablandador, filtrante, remoción de hierro y manganeso, mercurio, boro, piscinas. Se regenera hasta 200 veces solo con agua de sal en grano. Bolsas de 25 kg.

Más detalles al 71760154.

Correo: rodrigoebly@gmail.com

Dirección: Augusto Guzman Martinez, Cochabamba, Bolivia.

**Figura 2.8:** Ubicación de la Distribuidora del Sur



Fuente: Google Earth

“Y” NORTE: 802571.00 m E

“X” ESTE: 8078988.00 m S

“Z” Elevación: 2758 m.s.n.m

### 2.5.6 Especificaciones de la zeolita natural

**Tabla 2.6:** Ficha Técnica de Zeolita Natural.

<b>ESPECIFICACIÓN TÉCNICA DE MATERIA PRIMA</b>	
Producto: <b>Zeolita Natural</b>	Fecha de Elab: 01/05/2023
LOTE 31A21	Vencimiento: 3 años posteriores a la elaboración.

Datos Técnicos Básicos		
	UNIDAD	VALOR
Capacidad de intercambio catiónico	meq/g	1,2-2,5
Capacidad de adsorción de agua	%	30-50
Densidad de partículas sólidas	g/cm <sup>3</sup>	2,1-2,2
Densidad Aparente	g/cm <sup>3</sup>	0,5-1
ANÁLISIS QUÍMICO		
	UNIDAD	VALOR
Dióxido de silicio (SiO <sub>2</sub> )	%	64,14
Óxido de aluminio Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%	11,05
Óxido de hierro (III) Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%	0,073
Óxido de calcio, CaO	%	2,01
Óxido de magnesio, MgO	%	0,87
Óxido de sodio, Na <sub>2</sub> O	%	3,45
Óxido de potasio, K <sub>2</sub> O	%	1,41
Trióxido de Azufre SO <sub>3</sub>	%	0,053
Perdida por Calc. A 750°C	%	13,93
Cateones Metálicos Canjeables	meq / 100 g	11,2
Clinoptilolita	%	96
MÉTODO: ASTM		
Determinación de Arsénico, Plomo Y Mercurio: digestión multiácida y posterior lectura por espectrometría de emisión atómica por plasma inductivo (ICP - OES)		
	ANALITO	10445 - 1
Arsénico	Mg/g	< 2
Plomo	Mg/g	10
Mercurio	Mg/g	< 10,1
CARACTERÍSTICAS ORGANOLÉPTICAS		

Color	Blanco
Textura	Granulosa
Sabor	Ligeramente terroso
Olor	Inodora
Aspecto Visual	Porosa cristalina

Fuente: Distribuidora del Sur

### 2.5.7 Propiedades de la zeolita natural

La zeolita natural es un mineral microporoso con una estructura cristalina única, compuesta principalmente por silicatos de aluminio y otros minerales. Sus propiedades especiales la hacen útil en diversas aplicaciones, incluyendo la estabilización de suelos en ingeniería civil. Aquí se destacan las propiedades más importantes de la zeolita natural:

#### 1. Alta capacidad de intercambio catiónico:

La estructura de la zeolita está formada por cavidades y canales donde se alojan cationes, como calcio, magnesio, sodio y potasio. Estos cationes pueden ser intercambiados fácilmente con otros cationes presentes en el medio, lo que le otorga la capacidad de modificar la composición química del entorno en el que se aplica, siendo útil para mejorar suelos o absorber contaminantes.

#### 2. Absorción y retención de agua:

La zeolita tiene una alta capacidad de absorción y retención de agua debido a su estructura porosa. Esto es beneficioso para mejorar la estabilidad de suelos, especialmente en aquellos que son propensos a la expansión o contracción, como los suelos limo arcillosos. La zeolita puede ayudar a regular el contenido de humedad en el suelo, lo que disminuye el riesgo de deformaciones o fallas estructurales.

#### 3. Estabilidad térmica:

La zeolita natural es estable a altas temperaturas, lo que la hace adecuada para aplicaciones en suelos sometidos a cambios térmicos. Su capacidad de mantener su estructura a diferentes temperaturas contribuye a su durabilidad en proyectos de infraestructura.

#### 4. Baja densidad:

Debido a su estructura porosa, la zeolita tiene una baja densidad, lo que facilita su manejo y aplicación en procesos de estabilización de suelos. Esta propiedad también ayuda a reducir el peso total de los materiales en proyectos de ingeniería.

#### 5. Compatibilidad con estabilizantes químicos:

La zeolita puede interactuar favorablemente con otros agentes estabilizantes como la cal y el cemento, mejorando aún más las propiedades mecánicas de los suelos estabilizados. Esto permite su uso combinado en aplicaciones geotécnicas para lograr una mayor resistencia y estabilidad del suelo.

#### 6. Resistencia a la compresión:

La zeolita proporciona una mejora en la resistencia a la compresión del suelo cuando se utiliza en combinación con otros materiales estabilizantes. Esto la hace efectiva en la mejora de la capacidad de soporte de suelos que de otra manera serían inestables o demasiado blandos para soportar estructuras pesadas. (Das, BM (2013) Principios de ingeniería geotécnica)

### 2.5.8 Clasificación de la zeolita natural

La zeolita natural es un grupo de minerales aluminosilicatos que se caracterizan por su estructura cristalina porosa, lo que les permite actuar como intercambiadores de iones y adsorber diversas moléculas. La clasificación de la zeolita natural se basa en varios criterios, incluyendo su estructura cristalina, composición química y propiedades físicas. A continuación, se presentan las principales clasificaciones:

**Clinoptilolita:** La más utilizada en aplicaciones industriales y agrícolas debido a su alta capacidad de intercambio catiónico y estabilidad térmica.

Heulandita: Similar a la clinoptilolita, pero con una estructura más flexible y capacidad de intercambio catiónico moderada.

Mordenita: Tiene una alta capacidad de adsorción y es utilizada en la purificación de gases y líquidos.

Chabazita: Zeolita con una estructura más abierta, utilizada principalmente en la adsorción de gases como el dióxido de carbono.

### **2.5.9 Ventajas de la zeolita natural**

La zeolita natural clinoptilolita granular ofrece numerosas ventajas debido a sus propiedades únicas, lo que la hace muy útil en diversas aplicaciones, especialmente en ingeniería civil, agricultura y remediación ambiental. A continuación, se detallan algunas de sus principales ventajas:

#### **1. Alta capacidad de intercambio catiónico (CEC)**

La clinoptilolita granular tiene una capacidad excepcional para intercambiar cationes como calcio, potasio, sodio y magnesio. Esta capacidad le permite mejorar la fertilidad del suelo al retener nutrientes esenciales y liberarlos gradualmente, lo que es muy beneficioso en agricultura. Además, ayuda a adsorber contaminantes en el tratamiento de aguas y suelos, eliminando metales pesados y compuestos tóxicos del medio ambiente.

#### **2. Excelente absorción de agua**

La estructura microporosa de la clinoptilolita le permite absorber y retener grandes cantidades de agua. Esta propiedad es crucial para mejorar la estabilidad de los suelos, especialmente en zonas áridas o en suelos limo arcillosos que tienden a expandirse o contraerse con los cambios de humedad. En aplicaciones agrícolas, esta retención de agua contribuye a reducir la necesidad de riego y mejorar la eficiencia en el uso del agua.

#### **3. Estabilidad térmica y química**

La clinoptilolita es altamente resistente a cambios de temperatura y condiciones químicas adversas, lo que la convierte en un material ideal para aplicaciones en entornos industriales y medioambientales donde se requieren materiales duraderos. Su estabilidad a altas temperaturas y su resistencia a la revisión química permiten su uso en procesos que involucran calor o reactivos químicos.

#### **4. Mejora la capacidad de carga de suelos**

Cuando se utiliza en la estabilización de suelos, la clinoptilolita granular mejora significativamente la capacidad de carga del suelo. Esta ventaja es particularmente útil en la construcción de carreteras, pavimentos y otras infraestructuras, donde se requiere un suelo estable para soportar cargas pesadas.

#### **5. Reducción de contaminantes y remediación ambiental**

La clinoptilolita es muy eficaz en la adsorción de contaminantes como metales pesados (plomo, zinc, cadmio) y amoníaco. Esto la hace ideal para su uso en la remediación de

suelos contaminados y en el tratamiento de aguas. Al actuar como un filtro natural, puede ayudar a mejorar la calidad del agua y reducir la toxicidad en ambientes contaminados.

#### 6. Compatibilidad con otros estabilizantes

La clinoptilolita puede combinarse con otros materiales, como el cemento o la cal, para mejorar aún más la estabilidad de los suelos. Esta compatibilidad permite crear mezclas más eficientes en aplicaciones de construcción y estabilización de suelos, incrementando la durabilidad y la capacidad estructural del suelo.

#### 7. Reducción de olores y gases

En aplicaciones industriales y ganaderas, la clinoptilolita ha demostrado ser eficaz en la reducción de olores, especialmente en la adsorción de gases como el amoníaco. Esto la convierte en un material ideal para su uso en instalaciones de tratamiento de residuos, corrales y vertederos. (Ming, DW y Mumpton, FA (1989) Zeolitas naturales)

### **2.5.10 Aplicaciones de la zeolita natural**

La zeolita natural tiene una amplia variedad de aplicaciones debido a sus propiedades únicas, como su capacidad de intercambio catiónico, su alta porosidad y su estabilidad química. A continuación, se describen algunas de sus principales aplicaciones:

#### 1. Estabilización de suelos en ingeniería civil

En la construcción de carreteras y pavimentos, la zeolita se utiliza para estabilizar suelos, especialmente aquellos que son problemáticos, como los suelos arcillosos y limo arcillosos. La zeolita mejora la capacidad de carga, y reduce la expansión y contracción del suelo causada por la humedad, lo que resulta en una base más estable para las infraestructuras.

#### 2. Tratamiento de aguas

La zeolita es muy efectiva en la adsorción de metales pesados y el amonio en aguas residuales y contaminadas. Se utiliza en sistemas de tratamiento de aguas para purificar el agua y eliminar contaminantes. Su alta capacidad de intercambio catiónico la convierte en una opción ideal para filtrar y limpiar el agua en plantas de tratamiento de agua potable y en la remediación de cuerpos de agua contaminados.

#### 3. Agricultura

En la agricultura, la zeolita se utiliza para mejorar la retención de agua y nutrientes en los suelos. Esto ayuda a reducir la necesidad de fertilizantes y riego, ya que la zeolita libera gradualmente los nutrientes y el agua que ha absorbido, mejorando la eficiencia en el uso del agua y el crecimiento de las plantas. También se utiliza en el manejo de suelos en áreas áridas o semiáridas.

#### 4. Remediación ambiental

Debido a su capacidad para adsorber contaminantes, la zeolita se utiliza en la remediación de suelos y aguas contaminadas por metales pesados, hidrocarburos y otros tóxicos. Es eficaz en la limpieza de derrames de petróleo, residuos industriales y otros desechos contaminantes, actuando como un filtro natural que captura las toxinas y evita que se propaguen.

#### 5. Industria ganadera

En el manejo de desechos animales, la zeolita se usa para controlar olores y mejorar la calidad de los desechos orgánicos, debido a su capacidad para adsorber amoníaco y otros gases responsables de malos olores. Esto hace que sea útil en granjas y corrales para reducir la contaminación del aire y el suelo.

#### 6. Industria de la construcción

En la industria de la construcción, la zeolita se mezcla con otros materiales, como el cemento y la cal, para mejorar las propiedades de las mezclas de construcción. Se utiliza como un aditivo en el hormigón para mejorar la durabilidad, la resistencia al fuego y la impermeabilidad, reduciendo la formación de grietas y aumentando la vida útil de las estructuras.

#### 7. Producción de materiales:

La zeolita se usa en la industria química como catalizador en la producción de petroquímicos y en procesos de refinación de petróleo. También se emplea en la producción de detergentes como un sustituto de los fosfatos, mejorando la eficiencia del lavado y reduciendo el impacto ambiental. (Ming, DW y Mumpton, FA (1989) Zeolitas naturales).

Utilización de Nanotecnología: cemento – zeolita sintética, en la estabilización de suelos arcillosos con fines de base para pavimento flexible. Arequipa – Perú 2017 (Rodríguez Vargas Maira Del Rosario) Universidad Alas Peruanas (UAP).

Estabilizamos el suelo arcilloso para utilizarlo como base de un pavimento flexible, con un 10% de cemento portland y 1% de zeolita sintética, con la siguiente dosificación por m<sup>3</sup>.

Zeolita sintética: 1,65 kg/m<sup>3</sup>

Cemento portland IP: 165 kg/m<sup>3</sup>

Agua: OCH 19% (+2%)

Se determinaron las propiedades físicas y mecánicas del suelo arcilloso natural (CH) A-7-5 a estabilizar.

**Tabla 2.7:** Resultados Nanotecnología: cemento – zeolita sintética

Límites de Atterberg		Índice de plasticidad	Peso específico de los sólidos (Gs)	Humedad óptima (%)	Densidad máxima (g/cm <sup>3</sup> )	Expansión (%)	CBR al 100% MD	CBR al 95% MD
Limite Líquido	Limite Plástico							
82,47%	75,76%	46,65%	2,80%	21,60%	1,57	5,75%	2,35%	2,20%

Se definieron las propiedades físicas y mecánicas del suelo estabilización con cemento portland IP y zeolita sintética.

Límites de Atterberg		Índice de plasticidad	Humedad óptima (%)	Resistencia a la compresión a los 7 días (kg/cm <sup>2</sup> )	Resistencia a la compresión a los 28 días (kg/cm <sup>2</sup> )	Expansión (%)	CBR al 100% MD	CBR al 95% MD
Limite Líquido	Limite Plástico							
50,06 %	46,14 %	21,60%	19,01%	14,22	19,66	1,34%	74,15 %	64,14 %

Fuente: Arequipa – Perú 2017 (Rodríguez Vargas Maira Del Rosario) Universidad Alas Peruanas (UAP).

**CAPÍTULO III**  
**CARACTERIZACIÓN**  
**Y ANÁLISIS DE**  
**PROPIEDADES DE**  
**LOS MATERIALES**

## CAPÍTULO III

### CARACTERIZACIÓN Y ANÁLISIS DE PROPIEDADES DE LOS MATERIALES

#### 3.2 Introducción

Una vez realizadas las pruebas de laboratorio correspondientes y obtenidos los datos necesarios, es esencial analizar y discutir los resultados obtenidos para evaluar la efectividad de la zeolita natural como estabilizante de suelos. En esta sección, se presentarán y analizarán los resultados de los ensayos realizados sobre las muestras de suelos limo arcillosos y arcillosos.

El propósito principal de este análisis es determinar cómo la adición de zeolita natural influye en las propiedades mecánicas de los suelos, con énfasis en la capacidad portante y la reducción de la expansión del suelo. A lo largo de esta sección, se compararán los resultados obtenidos para suelos estabilizados frente a aquellos no tratados, evaluando el comportamiento del material bajo las condiciones de prueba.

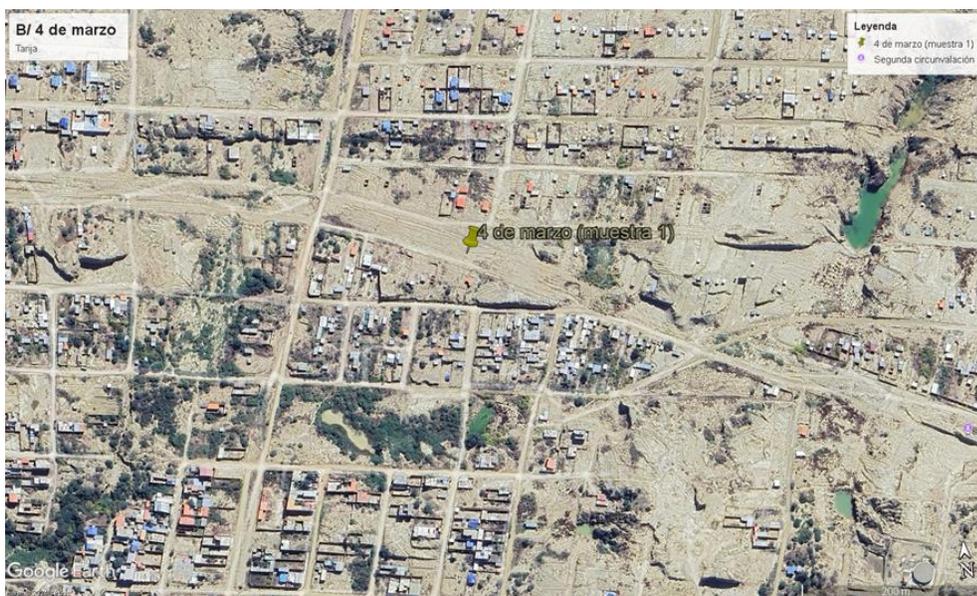
Los datos presentados en los gráficos y tablas permitirán identificar el porcentaje óptimo de zeolita natural para mejorar la estabilidad de los suelos en las subrasantes, asegurando un mejor rendimiento estructural y durabilidad en aplicaciones viales. Las pruebas se realizaron sobre muestras de suelos obtenidas en dos tramos de camino ubicados en las localidades del Barrio 4 marzo y Barrio Tarijeños en progreso. Todas las pruebas se llevaron a cabo en el Laboratorio de Suelos de la Universidad Autónoma Juan Misael Saracho (U.A.J.M.S.), y se siguieron los procedimientos establecidos en las normativas vigentes.

El procedimiento para el diseño de la estabilización sigue las indicaciones del Manual de Carreteras de la Administradora Boliviana de Carreteras (ABC), ajustado para la incorporación de la zeolita natural como material estabilizante.

### 3.3 Reconocimiento y ubicación del sitio de estudio

El primer tramo donde se realizó la toma de muestras, está ubicado en la ciudad de Tarija, en las siguientes coordenadas:

**Figura 3.1:** Ubicación del primer sitio de estudio: Barrio 4 de marzo



Fuente: Google Earth.

“X” Este: 322835.00 m E

“Y” Norte: 7620757.00 m S

“Z” Elevación 1925 m.s.n.m

Se seleccionó esta zona para la toma de muestras debido a que el tramo estudiado forma parte de una calle proyectada para conectarse con una nueva circunvalación actualmente en construcción. Aunque existen viviendas en el área, los alrededores aún no están completamente desarrollados, lo que sugiere un potencial de crecimiento urbano significativo en el futuro. Esto anticipa la construcción de nuevas obras civiles y vías de acceso en los próximos años, lo que hace de esta ubicación un entorno propicio para evaluar las condiciones del suelo en una zona de expansión.

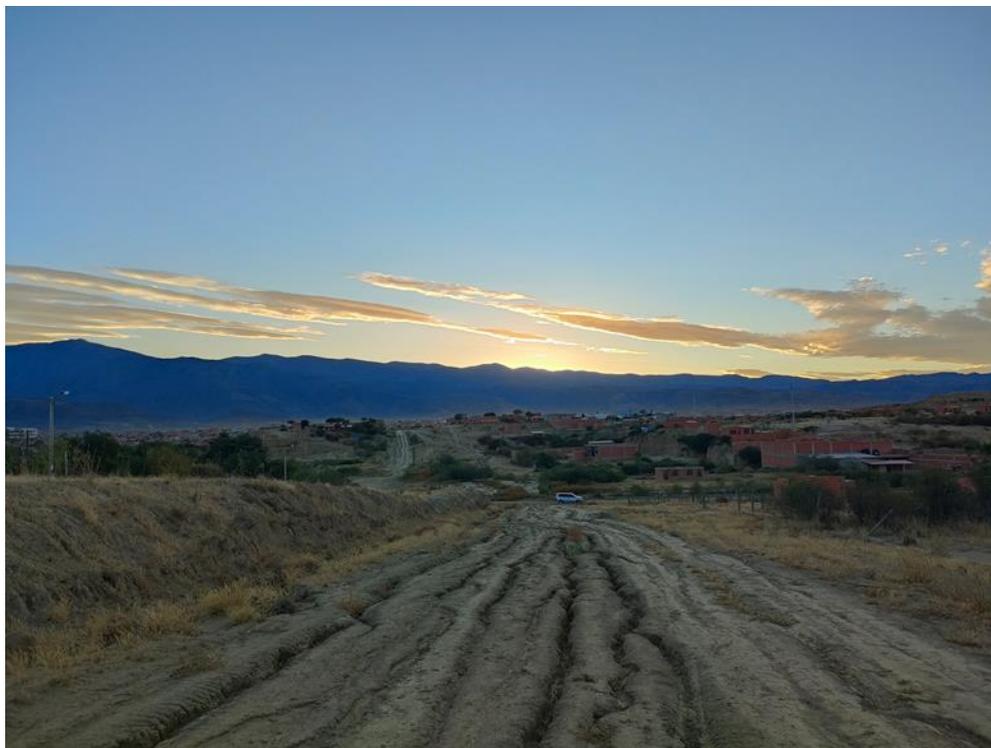
En los alrededores predominan los suelos finos limo arcillosos, por tanto, suelos

expansivos, lo que afectaría en gran manera a las obras que se construyan en el lugar, y a las que se encuentran en construcción.

**Figura 3.2:** Tramo donde se extrajo la muestra de suelo: Barrio 4 de marzo 2da circunvalación



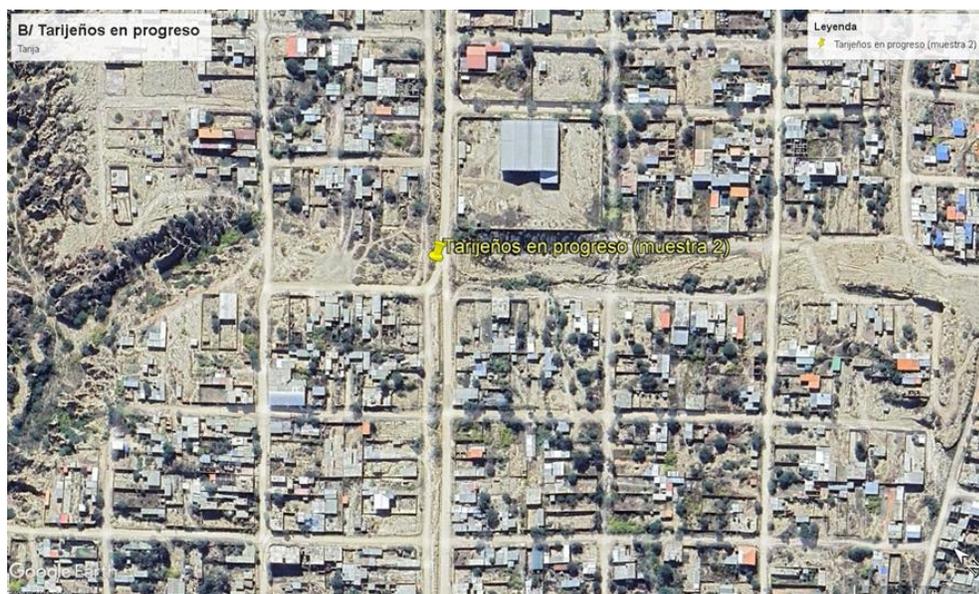
Fuente: Elaboración propia



Fuente: Elaboración propia

El segundo lugar donde se realizó la toma de muestras, está ubicado en la ciudad de Tarija, en las siguientes coordenadas:

**Figura 3.3:** Ubicación del segundo sitio de estudio: Barrio Tarijeños en progreso



Fuente: Google Earth.

“X” Este: 323958.00 m E

“Y” Norte: 7619850.00 m S

“Z” Elevación 1935 m.s.n.m

Se eligió esta zona para la toma de muestras porque el tramo corresponde a una avenida en proceso de mantenimiento y construcción, que vincula al Barrio Tarijeños en Progreso. Aunque esta avenida es similar a otras en su estructura, su importancia radica en que facilita la conectividad con este barrio en desarrollo. La zona está parcialmente poblada, aunque no en su totalidad, lo que sugiere que, en el futuro cercano, se espera la construcción de nuevas obras civiles y vías de acceso adicionales, impulsando el crecimiento urbano y la consolidación del área.

**Figura 3.4:** Tramo donde se extrajo la muestra: Barrio Tarijeños en progreso Av./ gran chaco



Fuente: Elaboración propia



Fuente: Elaboración propia



Fuente: Elaboración propia

### **3.4 Unidad de estudio y decisión muestral**

La presente investigación comprende el Análisis de Propiedades de Materiales de Sub rasante, que se realiza a través de un proceso de estabilización con Zeolita Natural.

#### **3.4.6 Muestra**

El comportamiento de las propiedades mecánicas de los materiales de sub rasante estabilizados con zeolita natural, determinado mediante los ensayos de laboratorio. Para la obtención de los materiales de sub rasante, se recolectarán muestras de material limo arcillosos ubicados en la ciudad de Tarija en cantidades necesarias para realizar la caracterización de los mismos y los ensayos de laboratorio necesarios para el estudio de las propiedades mecánicas de las sub rasantes estabilizadas con adición de zeolita natural.

La zeolita natural será obtenida de un proveedor nacional el cual proporcionará la ficha técnica del mismo.

#### **3.4.7 Muestreo**

En el proceso de muestreo, se realizó la mezcla de la zeolita natural con el sustrato para llevar a cabo la estabilización del suelo. El objetivo de este muestreo fue variar los porcentajes de zeolita natural incorporados, con el fin de evaluar el impacto en las propiedades mecánicas y físicas de la subrasante. A través de este procedimiento, se buscó determinar la cantidad óptima de zeolita natural necesaria para mejorar la estabilidad del suelo, su capacidad de carga y su comportamiento ante cambios en el contenido de humedad.

#### **3.4.8 Selección de las técnicas de muestreo**

Lo que se va muestrear van a ser el agregado fino de la mezcla con zeolita natural, se recibirá sellados desde el proveedor y serán distribuidos en porcentajes de acuerdo de estabilización que se pretende realizar, la muestra de los agregados limosos y arcillosos que se utilizaran para la estabilización será de los bancos de préstamo extraídos de zonas específicas en la ciudad de Tarija que serán colocados en bolsas

de yute en cantidades necesarias.

### **3.4.9 Métodos y técnicas empleadas**

El método utilizado en este trabajo será de tipo correlacional, mediante el cual se estudiarán, seleccionarán y agruparán las variables a analizar para evaluar las propiedades mecánicas de los materiales (subrasantes). En este proceso se incorporará zeolita natural, obtenida de un proveedor especializado, cuya ficha técnica será revisada y adjuntada para asegurar la correcta aplicación del material. La zeolita se utilizará para estabilizar el suelo, mejorando su resistencia característica y su comportamiento bajo condiciones de carga.

Se realizarán todos los ensayos necesarios para la caracterización de los suelos mezclados con la zeolita natural, permitiendo evaluar su impacto sobre las propiedades mecánicas del suelo tratado. Los resultados incluirán el análisis de la vida útil del suelo estabilizado en función de la capacidad de la zeolita para reducir la expansión y contracción del suelo, mejorando así su estabilidad.

De acuerdo con las técnicas empleadas, se determinará la resistencia final de las subrasantes estabilizadas con zeolita natural, permitiendo realizar comparaciones entre las propiedades empíricas iniciales y los resultados finales. La zeolita utilizada fue suministrada por un proveedor, y se garantizaron sus especificaciones técnicas mediante la consulta detallada de su ficha técnica.

### **3.5 Ensayos de caracterización de agregados**

Para llevar a cabo la caracterización de los agregados de la subrasante, se realizaron una serie de ensayos geotécnicos clave, que incluyeron **granulometría, hidrómetro, peso específico, límites de Atterberg, compactación y el ensayo de C.B.R. (California Bearing Ratio)**. Estos ensayos se efectuaron con el objetivo de determinar el comportamiento mecánico del agregado, evaluando sus propiedades fundamentales para la estabilización del suelo. Los resultados obtenidos permiten definir la idoneidad del material para mejorar la resistencia, capacidad de carga y estabilidad de la subrasante en proyectos de infraestructura vial.

**Tabla 3.1:** Ensayos de laboratorio para caracterización de suelo puro

<b>Ensayos de Caracterización de Suelos</b>	
<b>Ensayo</b>	<b>Norma ABC</b>
Análisis granulométrico	S0204. (ASTM D421 ASTM D2217 AASHTO T87)
Contenido de humedad del suelo	S0301. (ASTM D2216)
Análisis granulométrico por tamizado	S0302. (ASTM D422 AASHTO T88)
Análisis granulométrico - hidrómetro	S0303. (ASTM D422)
Límite líquido	S0304. (ASTM D4318 AASHTO T89)
Límite plástico e índice de plasticidad	S0305. (ASTM D4318 AASHTO T90)
Peso específico	S0307. (ASTM D854 AASHTO T100)
Compactación	S0402. (ASTM D698 AASHTO T180)
C.B.R.	ASTM D 1883 – 07

Fuente: Elaboración propia

### 3.5.6 Contenido de humedad

Este ensayo tiene como objetivo determinar el contenido de agua presente en una muestra de suelo.

La medición del contenido de humedad es fundamental, ya que influye directamente en las propiedades mecánicas del suelo, como la cohesión, la consistencia, los cambios de volumen y la estabilidad mecánica. Conocer el contenido de humedad permite evaluar cómo el suelo se comportará bajo diferentes condiciones de carga y durante su estabilización, proporcionando información clave para su manejo y mejora en proyectos de infraestructura.

**Figura 3.5:** Taras con muestra de suelo.



Fuente: Elaboración propia

### **Preparación de muestras**

Seleccionar un recipiente de referencia y masa conocida. Una vez seleccionada la muestra a ensayar, depositar la misma dentro del recipiente y determinar la masa del conjunto (recipiente + muestra).

Se procede a dejar el recipiente con la muestra dentro del horno, a una temperatura constante de  $110 \pm 5^\circ \text{C}$ . Se debe dejar en el horno el tiempo suficiente para que se alcance una masa constante. Para tener seguridad de lo anterior se deben hacer mediciones de masa en intervalos de tiempo.

Una vez se haya secado el material se retira del horno y se deja secar a temperatura constante para luego determinar su peso seco.

**Tabla 3.2:** Resultados de contenido de humedad promedio de suelos 1 y 2.

<b>M. Suelo 4 de marzo</b>	% de humedad (% w)
	2,01
<b>M. Suelo Tarijeños en progreso</b>	% de humedad (% w)
	4,35

Fuente: Elaboración propia

**Análisis Técnico.**

Los contenidos de humedad calculados para ambos materiales resultaron ser relativamente bajos, lo que se relaciona con factores como las condiciones atmosféricas predominantes y las características específicas del lugar de extracción de las muestras. En zonas donde las lluvias generan acumulaciones de agua, los suelos tienden a retener mayor humedad, mientras que en áreas con alta exposición solar o durante períodos secos, la evaporación se intensifica, disminuyendo naturalmente el contenido de humedad. Adicionalmente, aspectos como la topografía y el tipo de suelo influyen directamente en su capacidad de retención de agua, variables cruciales para la evaluación geotécnica y el diseño de estabilización en ingeniería civil.

En este estudio, se trabaja con el contenido de humedad obtenido de muestras representativas de las condiciones reales del sitio, garantizando que las propiedades del suelo sean correctamente evaluadas. Este enfoque técnico asegura que los ensayos realizados, como el CBR, reflejen con precisión el comportamiento mecánico del suelo estabilizado bajo condiciones operativas. La evaluación de este contenido de humedad es esencial, ya que afecta directamente la compactación, la resistencia al corte y la capacidad de soporte de la subrasante.

**3.5.7 Peso específico**

El peso específico, también conocido como gravedad específica, se define como la relación entre el peso de un volumen determinado de partículas sólidas de un material y el peso de un volumen equivalente de agua a una temperatura específica, normalmente

20°C. Este ensayo permite determinar la densidad relativa de las partículas sólidas del suelo o material en estudio, lo que es fundamental para evaluar sus propiedades físicas y mecánicas. La información obtenida del peso específico es clave para comprender el comportamiento del material bajo diferentes condiciones de carga y es un parámetro crítico en el diseño y construcción de infraestructuras.

**Figura 3.6:** Ensayo de peso específico



Fuente: Elaboración propia

### **Preparación de mezclas**

Para la ejecución del ensayo, se tomaron 80 gramos de material, previamente tamizado a través del tamiz N°10.

La muestra se colocó en un plato y se le agregó la cantidad de agua necesaria para diluir

completamente el material, asegurando la eliminación de todo el aire atrapado entre las partículas. Posteriormente, se agitó la mezcla durante 10 minutos, logrando una pasta homogénea.

Posteriormente se procedió como un ensayo de suelo común como indica el procedimiento y uso de materiales del ensayo “**S0307. Determinación del peso específico de los suelos (ASTM D854 AASHTO T100)**”, Es importante resaltar que, para los ensayos, se utilizó el mismo frasco calibrado, el cual es ampliamente reconocido por su precisión y consistencia en las mediciones. Al emplear este frasco, se garantiza la uniformidad en los resultados obtenidos, eliminando posibles variaciones que podrían surgir al cambiar de equipo. La exactitud de este frasco en la determinación del peso específico asegura que los resultados sean confiables y comparables a lo largo de los ensayos realizados.

**Tabla 3.3:** Resultados de peso específico de suelos 1 y 2.

<b>M. Suelo 4 de marzo</b>	Peso específico (g/cm <sup>3</sup> )
	2,672
<b>M. Suelo Tarijeños en progreso</b>	Peso específico (g/cm <sup>3</sup> )
	2,548

Fuente: Elaboración propia

### **Análisis Técnico.**

Después de determinar el peso específico relativo de las 2 muestras de suelo se procede a comparar con los datos de la **tabla 2.2** del capítulo 2 donde podemos verificar que los resultados obtenidos son próximos a los especificados en la misma:

**Tabla 3.4:** Comparación de peso específico de suelos 1 y 2.

<b>M. Suelo 4 de marzo</b>	Calculado	Tabla 2.2
	Peso específico (g/cm <sup>3</sup> )	Limos inorgánicos arcillosos
	2,672	2,65-2,70
<b>M. Suelo Tarijeños en progreso</b>	Peso específico (g/cm <sup>3</sup> )	Arcilla Inorgánica
	2,564	2,65-2,75

Fuente: Elaboración propia

La muestra de suelo obtenida del Barrio 4 de marzo se clasifica como un limo arcilloso

inorgánico, según los rangos especificados en la Tabla 2.2. Este tipo de suelo presenta una cohesión moderada y una baja plasticidad, características que lo hacen adecuado para considerarse como material de subrasante en proyectos de infraestructura vial. Sin embargo, su capacidad de carga en estado natural es limitada, lo que resalta la necesidad de procesos de estabilización para mejorar su desempeño estructural. La aplicación de aditivos químicos, como la zeolita natural, se presenta como una solución técnica para aumentar su resistencia, minimizar su susceptibilidad a las deformaciones bajo cargas repetitivas y optimizar su compactación, asegurando una base más estable y duradera para pavimentos y otras estructuras.

Por otro lado, la muestra de suelo obtenida del Barrio Tarijeños en Progreso se clasifica principalmente como una arcilla inorgánica, cuyas propiedades se ajustan a los rangos establecidos para este tipo de suelos. Este suelo es característico por su alta cohesión y baja permeabilidad, condiciones favorables para ciertas aplicaciones geotécnicas. Sin embargo, su composición incluye una cantidad significativa de material orgánico, lo que introduce un factor de variabilidad en su comportamiento mecánico. La presencia de material orgánico puede influir negativamente en su compresibilidad y capacidad de carga, aspectos críticos en el diseño de subrasantes para carreteras y otras infraestructuras sometidas a cargas dinámicas y cíclicas.

Ambos tipos de suelo presentan retos técnicos que hacen necesario el uso de técnicas de estabilización, como la incorporación de zeolita natural, para mejorar sus propiedades mecánicas. En el caso del limo arcilloso, se busca incrementar su capacidad portante y reducir su deformabilidad, mientras que, para la arcilla inorgánica con contenido orgánico, el objetivo es mitigar los efectos negativos de su compresibilidad y garantizar su estabilidad estructural. Estas intervenciones son esenciales para asegurar la durabilidad y el desempeño adecuado de las infraestructuras viales construidas sobre estos materiales.

### **3.5.8 Análisis granulométrico por tamizado**

El análisis granulométrico es un proceso que permite la clasificación de las partículas de suelo según su tamaño, utilizando una serie de mallas o tamices con aberturas cuadradas de diferentes dimensiones. Este procedimiento consiste en agitar la muestra de suelo sobre los tamices para separar las partículas en fracciones de diferentes tamaños. Las porciones

retenidas en cada tamiz se pesan, y el resultado se expresa como el porcentaje en peso respecto a la muestra total. Aunque es prácticamente imposible determinar el tamaño exacto de cada partícula, este ensayo permite agruparlas en rangos de tamaños definidos. La malla N° 200 (con una abertura de 0,075 mm) se utiliza universalmente como línea divisoria para clasificar los suelos en fino o grueso. Las partículas retenidas en mallas con aperturas superiores a la N° 200 se consideran parte de los suelos horribles, mientras que las que pasan por esta malla pertenecen a la fracción de suelos finos.

**Figura 3.7:** Tamizado.



Fuente: Elaboración propia

### **Preparación de muestras**

En primer lugar, se lleva a cabo un muestreo utilizando el método del cuarteo, que consiste en dividir la muestra para obtener una representación homogénea del material, asegurando que se incluyan todas las fracciones de partículas, especialmente aquellas de menor tamaño, propias de los suelos finos.

La muestra representativa se coloca en una bandeja, donde se determina la masa total de la bandeja con el material para registrar el peso inicial. Posteriormente, se procede a lavar la muestra utilizando el tamiz N° 200 (0,075 mm) para eliminar impurezas como arcillas y residuos finos, asegurando que los materiales más gruesos queden libres de partículas no deseadas. Este proceso de lavado es esencial para preparar adecuadamente los suelos finos y garantizar la precisión en la granulometría.

Una vez lavado, el material se seca en un horno para eliminar cualquier traza de

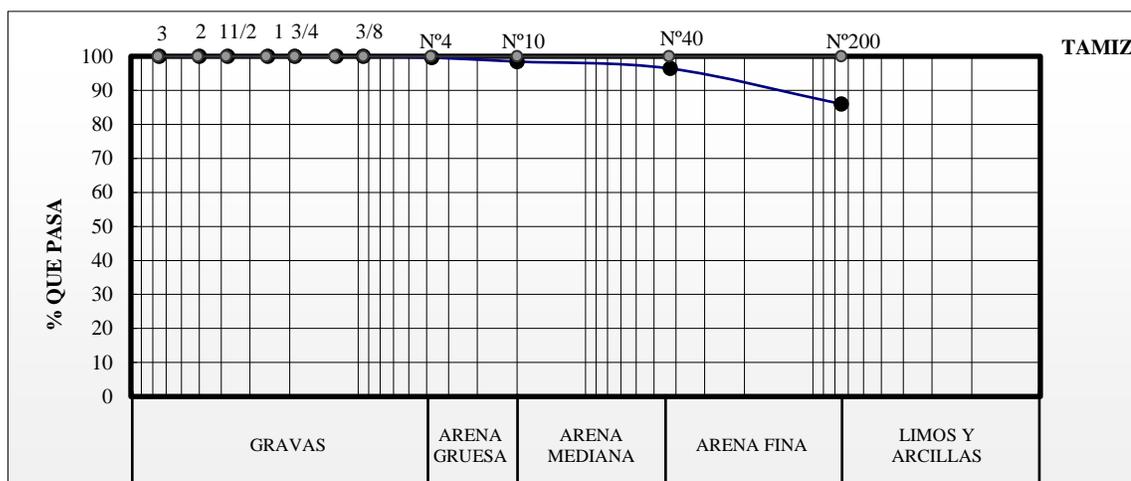
humedad. Después del secado, la muestra se tamiza mediante un conjunto de tamices de diferente apertura (como los tamices de 3/8", N°4, N°10, N°40, y N°200) para clasificar las partículas según su tamaño. El equipo de tamizado se utiliza para facilitar el paso o la retención de partículas en cada tamiz, obteniendo una distribución precisa de los tamaños de grano presentes en la muestra de suelo fino. Los resultados del ensayo se expresan en porcentajes basados en el peso total del material que pasa a través de cada tamiz de dimensiones conocidas. Para ello, se pesa la cantidad de material retenido en cada tamiz y se suma de manera acumulativa con el material de los tamices de mayor tamaño. Estos pesos acumulados se dividen entre el peso total de la muestra ensayada y se multiplican por 100, obteniendo así el porcentaje acumulado de material retenido.

Para determinar el porcentaje de material que pasa por cada tamiz, se resta este valor acumulado de 100. De esta manera, se obtiene el porcentaje de partículas que logran atravesar el tamiz correspondiente. Los resultados detallados de este ensayo se presentan en las tablas siguientes, donde se puede observar la distribución granulométrica del material evaluado., los resultados de este ensayo se pueden ver en las siguientes Tablas:

**Tabla 3.5:** Granulometría promedio suelo 4 de marzo

<b>Peso Total Seco</b>	<b>3000,0 g</b>		<b>Abertura</b>
Tamiz	Muestra 4 de marzo		Tamiz
N°	Peso Ret.	% Que Pasa	mm.
<b>1 1/2"</b>	0	100	37,5
<b>1"</b>	0	100	25,0
<b>3/4"</b>	0	100	19,0
<b>1/2"</b>	0	100	12,5
<b>3/8"</b>	0	100	9,5
<b>N°4</b>	11,73	99,60	4,75
<b>N°10</b>	34,45	98,44	2,0
<b>N°40</b>	60,70	96,40	0,425
<b>N°200</b>	309,47	85,96	0,075
<b>BASE</b>	0	85,96	-
<b>TOTAL</b>	416,35		

Fuente: Elaboración propia

**Gráfica 3.1:** Curva Granulométrica – suelo 4 de marzo.

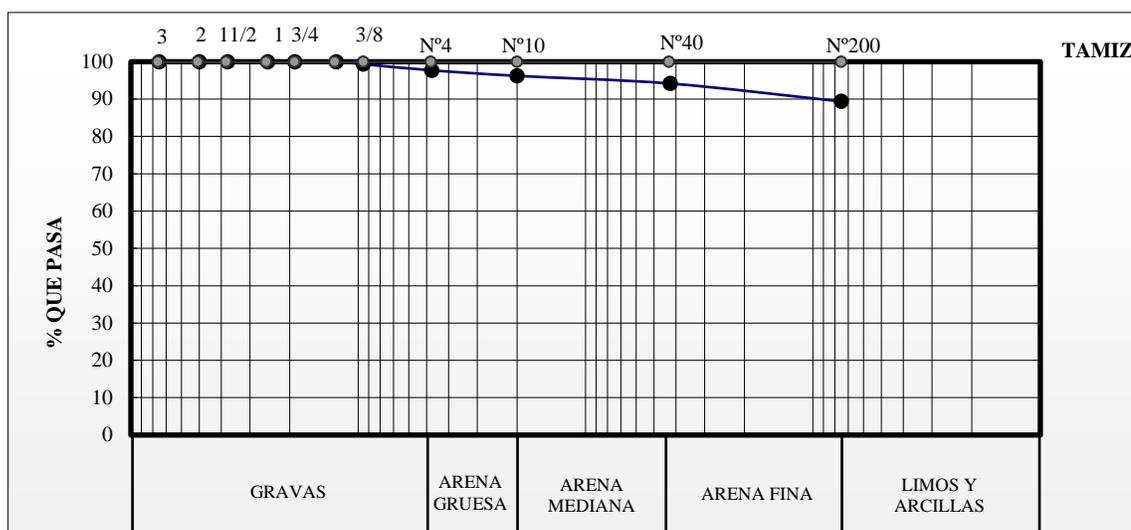
Fuente: Elaboración propia

**Tabla 3.6:** Granulometría promedio suelo Tarijeños en progreso

Peso Total Seco	1207,60 g		Abertura
Tamiz	Muestra Tarijeños en progreso		Tamiz
N°	Peso Ret.	% Que Pasa	mm.
1 1/2"	0	100	37,5
1"	0	100	25,0
3/4"	0	100	19,0
1/2"	0	100	12,5
3/8"	7,68	99,33	9,5
N°4	18,93	97,70	4,75
N°10	17,18	96,21	2,0
N°40	23,68	94,16	0,425
N°200	55,38	89,36	0,075
BASE	0,13	89,35	-
<b>TOTAL</b>	123,00		

Fuente: Elaboración propia

**Gráfica 3.2:** Curva Granulométrica – suelo Tarijeños en progreso



Fuente: Elaboración propia

### Análisis Técnico.

Al analizar las curvas de granulometría de las dos muestras estudiadas, se observa que en ambos casos el porcentaje de partículas que pasa por el tamiz N° 200 (0,075 mm de diámetro) supera el 50%, lo que indica que se trata de un material fino compuesto predominantemente por limos o arcillas. Estas características granulométricas son relevantes en el diseño y evaluación de subrasantes en proyectos de infraestructura vial, ya que influyen directamente en su capacidad portante y en su aptitud para ser estabilizados químicamente.

Comparando estos resultados con la Tabla 2.1 del capítulo 2, se verifica que la granulometría de ambas muestras cumple con los requisitos mínimos establecidos para la estabilización con zeolita natural. Esto asegura que los suelos analizados poseen la distribución granulométrica adecuada para interactuar eficazmente con el estabilizante, mejorando su capacidad para soportar cargas vehiculares y garantizar un desempeño estable a largo plazo:

**Tabla 3.7:** Comparación granulometría de suelos 1 y 2 con tabla.

Tabla 2.1		Calculado	
requisitos	Porcentaje que debe pasar (%)	4 de marzo	Tarijeños en progreso
Nº4	100	99,60	97,70
Nº40	50-85	96,40	94,16
Nº200	10-30	85,96	89,35

Fuente: Elaboración propia

### 3.5.9 Análisis granulométrico por hidrómetro

Este ensayo permite clasificar los gramos que componen un suelo según su tamaño y presentar los resultados de manera gráfica. Se basa en la ley de Stokes, que establece una relación entre la velocidad de caída de una esfera en un fluido y su diámetro, para evaluar cómo las diferentes partículas se asientan a distintas velocidades. Utilizando un hidrómetro, se mide el porcentaje de partículas de suelo dispersas que permanecen en suspensión tras un tiempo específico.

Mediante este ensayo de laboratorio determinamos el porcentaje de arcillas y limos contenidos en una determinada muestra.

**Figura 3.8:** Ensayos de hidrómetro finales.

Fuente: Elaboración propia

#### Preparación de muestras

Para este ensayo, se utilizaron muestras de 50 gramos de ambos suelos, consistiendo en

material que ha pasado por el tamiz N°200. Antes de proceder con el análisis, estas muestras se saturaron con silicato de sodio durante 15 minutos para asegurar una completa separación de las partículas.

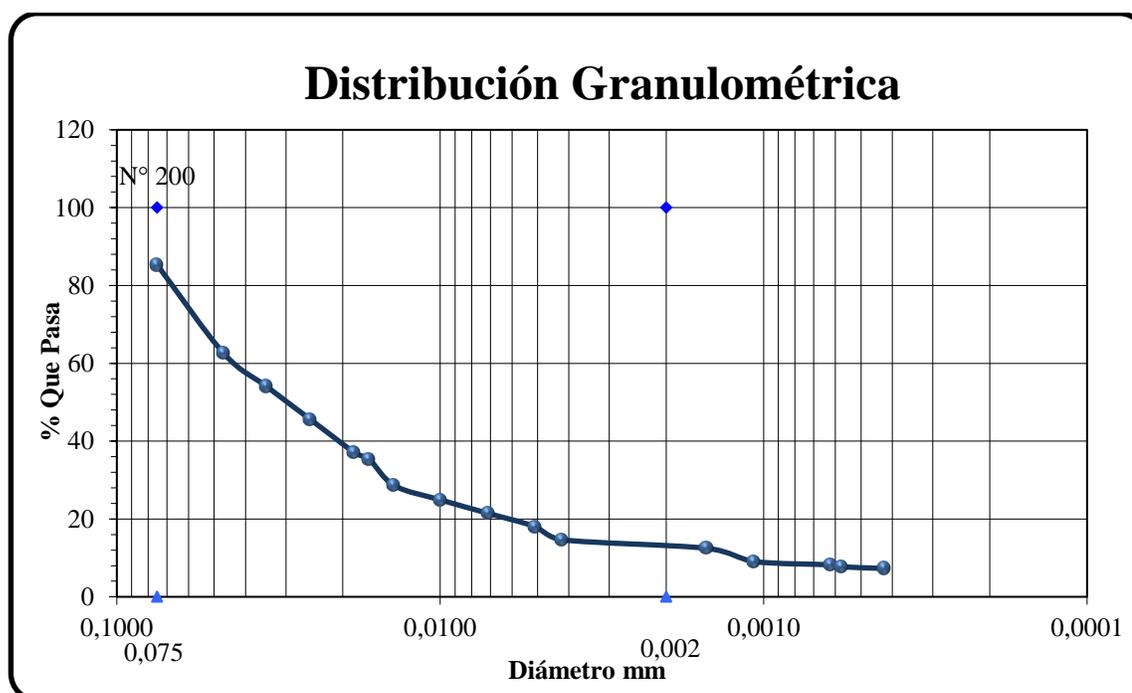
Posteriormente, las muestras saturadas se vertieron en una probeta, que se llenó con agua destilada. A continuación, se siguieron meticulosamente los pasos y protocolos especificados en el ensayo “S0303. Análisis granulométrico por medio del Hidrómetro (ASTM D422)” para determinar la distribución del tamaño de las partículas.

**Tabla 3.8:** Resultados hidrómetro de suelos 1 y 2.

<b>M. Suelo 4 de marzo</b>	% de limos	87,14
	% de arcillas	12,86
<b>M. Suelo Tarijeños en progreso</b>	% de arcillas	55,47
	% de limos	44,53

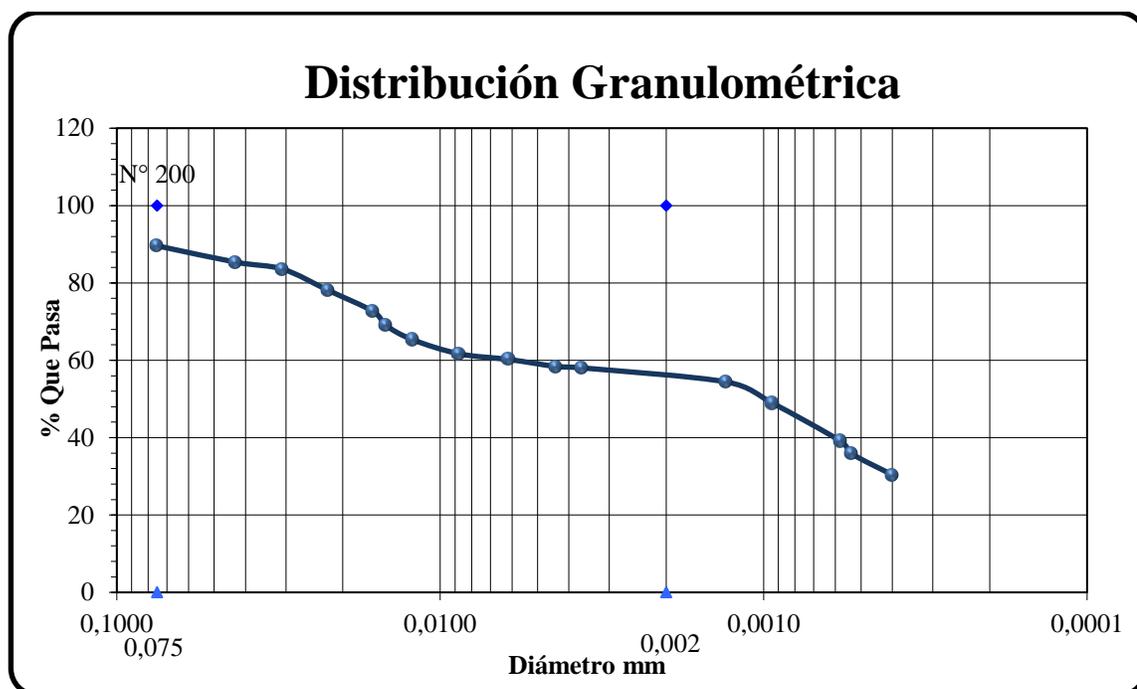
Fuente: Elaboración propia

**Gráfica 3.3:** Granulometría hidrómetro – suelo 4 de marzo



Fuente: Elaboración propia

**Gráfica 3.4:** Granulometría hidrómetro – suelo Tarijeños en progreso



Fuente: Elaboración propia

### **Análisis Técnico.**

El análisis de las curvas granulométricas obtenidas mediante el ensayo de hidrómetro para las dos muestras de suelo confirma que más del 50% del material pasa por el tamiz N° 200 (0,075 mm de abertura), lo que caracteriza a ambas muestras como materiales predominantemente finos, compuestos por limos y arcillas. Este tipo de material es crucial en el diseño geotécnico, especialmente para su aplicación en subrasantes estabilizadas.

Según los resultados, el suelo del Barrio 4 de marzo está compuesto por un 87,14% de limos y un 12,86% de arcillas, lo que lo clasifica como un material mayoritariamente limoso. Por su parte, el suelo del Barrio Tarijeños en Progreso presenta un 55,47% de arcillas y un 44,53% de limos, indicando un comportamiento más característico de suelos arcillosos.

La composición granulométrica influye directamente en el comportamiento mecánico de las subrasantes, especialmente en términos de capacidad portante y respuesta a procesos de estabilización química. La alta proporción de limos en el suelo del Barrio 4 de marzo sugiere una mayor susceptibilidad a problemas relacionados con compactación y drenaje, mientras que el mayor contenido de arcilla en el suelo del Barrio Tarijeños en Progreso

puede aumentar su cohesión, aunque a costa de una menor permeabilidad.

### 3.5.10 Límite líquido y límite plástico

Este ensayo se enfoca en determinar el límite líquido de diversas muestras de suelo utilizando la copa de Casagrande.

El **límite líquido** se define como el contenido de humedad, expresado en porcentaje respecto a la masa de suelo seco remoldeado, que permite que dos mitades de una muestra de suelo, colocadas en la copa de Casagrande, confluyan a lo largo de una distancia de 12 mm bajo el impacto de 35 golpes consecutivos. Este parámetro es crítico para evaluar la plasticidad del suelo y su comportamiento bajo variaciones de humedad.

**Figura 3.9:** Copa de Casagrande con muestra para ensayo de límite líquido.



Fuente: Elaboración propia

#### Preparación de muestras

Se toman 200 gramos de material seco que pasa el tamiz N°40 (0,425mm).

Posteriormente se procede a ejecutar el ensayo como indica el procedimiento y uso de materiales del ensayo “S0304. Determinación del límite líquido de los suelos (ASTM D4318 AASHTO T89)”

El **límite plástico** de los suelos se define como la humedad mínima, expresada en porcentaje respecto a la masa de suelo seco remoldeado, necesaria para cambiar de un

estado semisólido a un estado plástico sin que el material se disgregue o se rompa. Este parámetro marca la transición entre el comportamiento plástico y no plástico del suelo. Al combinarse con el límite líquido, permite calcular el índice de plasticidad del suelo, que es crucial para su clasificación geotécnica y para evaluar su potencial de expansión.

### **Preparación de muestras**

Este ensayo se realizó utilizando una porción de suelo previamente humedecida, preparada para el ensayo de límite líquido. Se tomó aproximadamente 60 gramos de la muestra, que fue amasada manualmente hasta formar un cilindro largo. Cuando el cilindro empezó a mostrar fisuras, se trasladó a una tara para su pesaje inicial. Posteriormente, la muestra fue colocada en un horno para secarse completamente. Una vez seca, se pesó nuevamente para determinar la pérdida de humedad y calcular así el contenido de agua en el suelo.

De esta manera se siguieron los procedimientos y uso de materiales del ensayo “S0305. Determinación del límite plástico e índice de plasticidad (ASTM D4318 AASHTO T90)”

**Figura 3.10:** Ensayo de limite plástico.



Fuente: Elaboración propia

**Tabla 3.9:** Resultados de limite liquido de suelos 1 y 2.

<b>M. Suelo 4 de marzo</b>	Límite Líquido (LL)
	25,21
<b>M. Suelo Tarijeños en progreso</b>	Límite Líquido (LL)
	38,92

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 3.10:** Resultados de limite Plástico de suelos 1 y 2.

<b>M. Suelo 4 de marzo</b>	Límite Plástico (LP)
	22,84
<b>M. Suelo Tarijeños en progreso</b>	Límite Plástico (LP)
	24,48

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 3.11:** Resultados de índice de plasticidad de suelos 1 y 2.

<b>M. Suelo 4 de marzo</b>	Índice de plasticidad (IP)
	2,37
<b>M. Suelo Tarijeños en progreso</b>	Índice de plasticidad (IP)
	14,44

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 3.12:** Resultados de índice de grupo de suelos 1 y 2.

<b>M. Suelo 4 de marzo</b>	Índice de grupo (IG)
	(8)
<b>M. Suelo Tarijeños en progreso</b>	Índice de grupo (IG)
	(10)

Fuente: Elaboración propia

**Análisis Técnico.**

El análisis de los límites líquidos e índices de plasticidad de las muestras obtenidas permite caracterizar los suelos y comprender su comportamiento mecánico en el contexto de estabilización de subrasantes

Para el suelo del Barrio 4 de marzo, el límite líquido es inferior a 50, y su índice de plasticidad, menor al 4%, indica una predominancia de limos con una proporción baja de arcillas. Este suelo se clasifica como limo arcilloso según el índice de grupo, destacándose

por una menor cohesión y una mayor susceptibilidad a problemas de compactación y drenaje. Aunque su baja plasticidad reduce el riesgo de expansión, su composición podría influir en la retención de agua y en su capacidad de estabilización, lo que es relevante en proyectos de infraestructura vial donde la compactación y resistencia son esenciales.

En el caso del suelo del Barrio Tarijeños en Progreso, el límite líquido también es inferior a 50, lo que indica que no presenta características de alta plasticidad típicas de algunas arcillas y limos altamente expansivos. Sin embargo, su índice de plasticidad, superior al 10%, refleja una mayor proporción de arcillas en la composición del material. Según el índice de grupo, que confirma su clasificación como un suelo fino, este comportamiento es consistente con un material predominantemente arcilloso, lo que implica una mayor cohesión, pero también una mayor susceptibilidad a la expansión y posibles deformaciones. Estas características son críticas para la ingeniería civil, ya que influyen en la estabilidad y capacidad portante del suelo, haciéndolo un candidato clave para procesos de estabilización con zeolita natural.

Ambos suelos cumplen con las especificaciones mínimas mencionadas en la Tabla 2.1 del capítulo 2 para su estabilización con zeolita natural, lo que los convierte en materiales viables para este proceso. Estas características destacan la importancia de aplicar un diseño de estabilización adaptado a las condiciones específicas de cada suelo, optimizando sus propiedades para mejorar la capacidad portante y garantizar el desempeño estructural a largo plazo:

**Tabla 3.13:** Comparación de resultados con tabla 2.1 en suelos 1 y 2.

Tabla 2.1		Calculado	
requisitos	rangos	4 de marzo	Tarijeños en progreso
L. liquido	< 50	25,21	38,92
I. de plasticidad	< 20	2,37	14,44

Fuente: Elaboración propia

### 3.5.11 Clasificación de suelos

Para la clasificación del tipo de suelo en las dos zonas en estudio, se aplicó el mismo procedimiento para la determinación de la humedad, granulometría y plasticidad, registrando los datos y resultados en hojas de cálculo Excel (ver Anexos N° 1). El

procedimiento y la metodología utilizada se basaron en la Guía de Laboratorio de Suelos (UNIVERSIDAD AUTONOMA JUAN MISAEL SARACHO, Guía de Laboratorio de Mecánica De Suelos – Escrita por el Ing. Luis Alberto Yurquina Flores). Para la clasificación del suelo, se emplearon las tablas y diagramas de los métodos AASHTO y SUCS, y los resultados fueron verificados mediante el programa "Clasificación de Suelos" para la calculadora HP 50G, desarrollado por el Ing. Omar Trujillo”.

Los resultados del análisis de las 2 muestras se tabularon en la siguiente tabla:

**Tabla 3.14:** Resumen de clasificación de los suelos 1 y 2.

<b>Clasificación Suelo 4 de marzo</b>		<b>Descripción</b>
<b>AASHTO:</b>	A-4 (8)	suelo limo arcilloso con baja plasticidad
<b>SUCS:</b>	ML	Limos inorgánicos arcillosos
<b>Clasificación Suelo Tarijeños en progreso</b>		<b>Descripción</b>
<b>AASHTO:</b>	A-6 (10)	suelo arcilloso con baja plasticidad
<b>SUCS:</b>	CL	arcilla inorgánica con partículas de arena

Fuente: Elaboración propia

### **Análisis Técnico.**

La muestra de suelo obtenida del Barrio 4 de marzo se clasifica, según el sistema AASHTO, como A-4, lo que indica que corresponde a un suelo limo arcilloso. De acuerdo con la clasificación SUCS, el suelo se clasifica como CL-ML, lo que lo identifica como un limo arcilloso de baja plasticidad. Ambas clasificaciones son consistentes y confirman que este suelo presenta una baja plasticidad y baja compresibilidad, propiedades que lo hacen menos susceptible a deformaciones volumétricas bajo carga. Estas características ofrecen una base adecuada para procesos de estabilización, ya que la estructura inicial del material permite que los estabilizantes, como la zeolita natural, interactúen eficazmente para mejorar su capacidad portante y comportamiento bajo tráfico vehicular.

Por otro lado, la muestra de suelo obtenida del Barrio Tarijeños en Progreso se clasifica según el sistema AASHTO como A-6, lo que corresponde a un suelo arcilloso. En la

clasificación SUCS, el suelo se identifica como CL, indicando un material arcilloso de baja plasticidad. Estas clasificaciones coinciden y validan los resultados obtenidos, destacando que este suelo, aunque tiene mayor cohesión y menor permeabilidad en comparación con el suelo del Barrio 4 de marzo, podría requerir un tratamiento más específico para garantizar su estabilidad estructural. La estabilización con zeolita natural es una solución viable, ya que permite mitigar las limitaciones de compresibilidad y mejorar su capacidad de soporte.

Ambos suelos, aunque con diferencias en su composición y propiedades, cumplen con los requisitos necesarios para ser estabilizados mediante zeolita natural, lo que refuerza la aplicabilidad de este método en proyectos de infraestructura vial. Este análisis técnico destaca la importancia de entender las características de cada suelo para diseñar soluciones específicas que optimicen su desempeño y durabilidad en condiciones reales de servicio.

#### **3.5.12 Compactación estándar**

Este ensayo se divide en dos métodos: la prueba Proctor modificado y la prueba Proctor estándar, ambos diseñados para determinar el peso específico seco máximo y el contenido de humedad óptimo del suelo. Este ensayo es aplicable únicamente a suelos con menos del 30% en peso de partículas retenidas en el tamiz de 19 mm.

Para realizar la prueba Proctor modificado, se utilizó un molde con un volumen de 943,3 cm<sup>3</sup> (1/30 pie<sup>3</sup>). El suelo fue compactado en cinco capas mediante un pisón que pesa 44,5 N ( $\pm 0,01$  kg), con una caída de 457,2 mm ( $\pm 1,6$  mm). La cara de golpe del pisón tiene un diámetro de 50,8 mm ( $\pm 0,25$  mm), y debe reemplazarse cuando este diámetro se desgaste o expanda a 12 mm.

El número de golpes del pisón por cada capa se mantiene en 56. El pisón debe estar equipado con un tubo que facilite su desplazamiento durante la caída. Este tubo debe contar con al menos cuatro agujeros en cada extremo, espaciados 90° entre sí, con un diámetro mínimo de 9,5 mm para permitir la correcta ventilación.

#### **Preparación de muestras**

La muestra debe estar seca, suelta y disgregada, y es esencial conocer previamente la granulometría del material, ya que esta determinará la elección del método adecuado, ya

sea el Proctor estándar o el Proctor modificado.

Dependiendo del método seleccionado, la compactación debe realizarse en capas uniformes, utilizando la misma cantidad de material para cada capa y aplicando distintas humedades, variables en un rango del 5% a -20% en nuestro caso. Esto permite evaluar el comportamiento del suelo en diferentes condiciones de humedad, optimizando su compactación para lograr el peso específico seco máximo.

De esta manera se siguieron los procedimientos y uso de materiales del ensayo “S0402. Compactación estándar (ASTM D698 AASHTO T99)”

**Figura 3.11:** Compactación



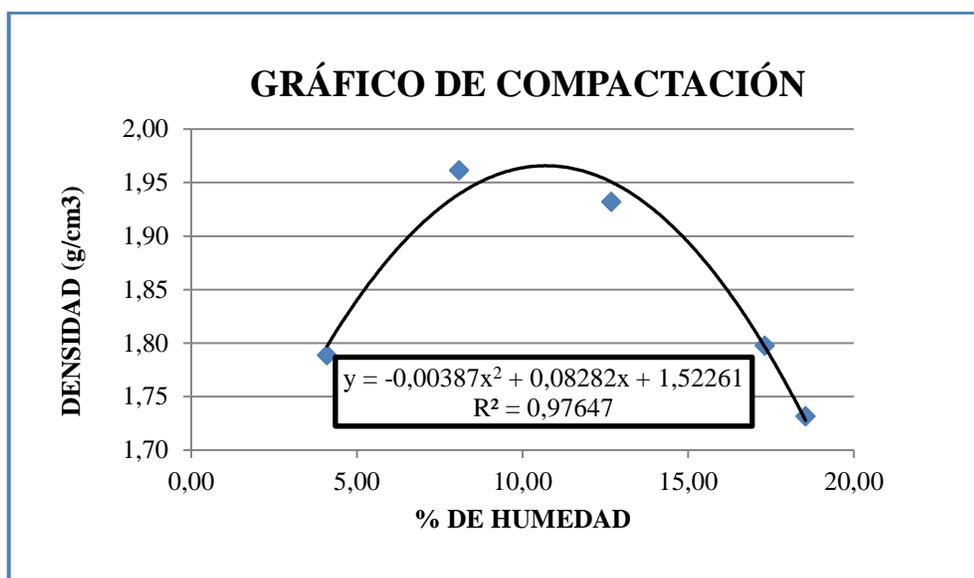
Fuente: Elaboración propia

**Tabla 3.15:** Resultados de compactación promedio suelo 1.

<b>M. Suelo 4 de marzo</b>	Densidad máxima(g/cm <sup>3</sup> )
	1,97
	Humedad optima (%)
	10,70

Fuente: Elaboración propia

Gráfica 3.5: Curva Proctor modificado T-180 suelo 1.



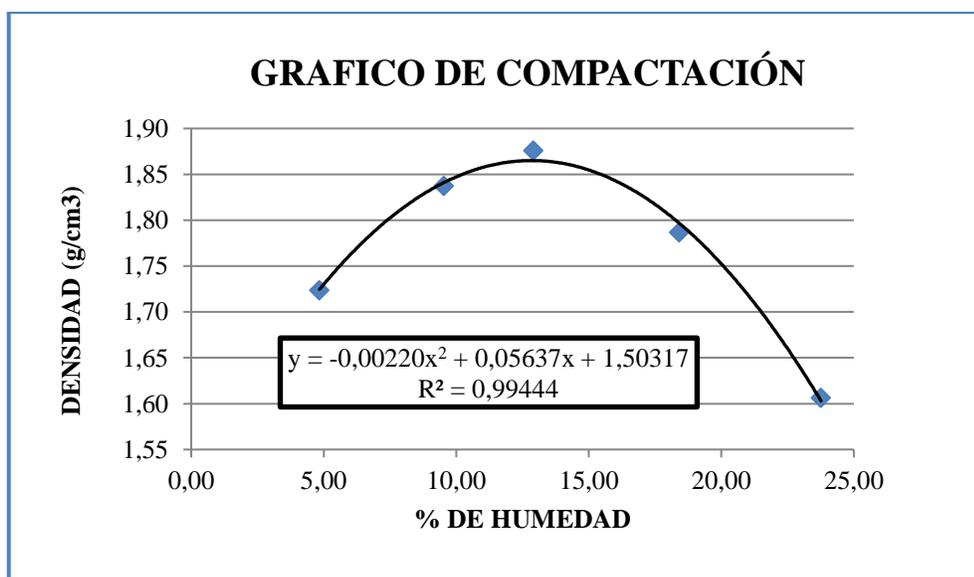
Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.16: Resultados de compactación promedio suelo 2.

<b>M. Suelo Tarijeños en progreso</b>	Densidad máxima(gr/cm <sup>3</sup> )
	1,86
	Humedad optima (%)
	12,81

Fuente: Elaboración propia

Gráfica 3.6: Curva Proctor modificado T-180 suelo 2.



Fuente: Elaboración propia

### **Análisis Técnico.**

Para el suelo del Barrio 4 de marzo, se identificó una densidad seca media y una humedad óptima de compactación superior al 10%, características propias de suelos limo arcillosos. Este tipo de suelo requiere un contenido de agua moderado para alcanzar su compactación óptima, lo que sugiere que presenta un comportamiento relativamente favorable en términos de trabajabilidad. Sin embargo, su densidad inicial puede limitar su capacidad portante, lo que resalta la importancia de la estabilización con zeolita natural para mejorar su desempeño mecánico, incrementando su resistencia y reduciendo su susceptibilidad a deformaciones bajo cargas dinámicas.

En contraste, el suelo del Barrio Tarijeños en Progreso se clasifica como un material con densidad seca baja y una humedad óptima de compactación elevada, típico de suelos arcillosos. Estos suelos, debido a su mayor plasticidad y alta capacidad de retención de agua, requieren un mayor contenido de humedad para alcanzar su máxima compactación. Esto los hace más complicados de manejar, especialmente en proyectos de infraestructura vial, ya que presentan desafíos relacionados con la estabilidad estructural y la compresibilidad. Sin embargo, al ser tratados con zeolita natural, estos suelos pueden experimentar una mejora significativa en su densidad y capacidad portante, reduciendo los problemas asociados a su naturaleza plástica.

#### **3.5.13 Ensayo de C.B.R. (California bearing ratio)**

La abreviatura "CBR" se refiere al California Bearing Ratio, un método de análisis de materiales desarrollado en 1929 por la División de Carreteras de California. Este método fue diseñado para clasificar la capacidad de soporte del suelo, determinando si es adecuado para ser utilizado como material de base o subbase en proyectos de infraestructura. También conocido como el ensayo de relación de soporte, este procedimiento permite medir la resistencia de un suelo bajo condiciones controladas de humedad y densidad a través de pruebas de laboratorio. El CBR evalúa la capacidad del suelo en su estado actual para resistir la carga.

Este método se aplica principalmente a suelos y materiales cuyo tamaño máximo de partículas no exceda las  $\frac{3}{4}$  de pulgada (aproximadamente 19 mm). Para suelos con partículas más grandes, existen metodologías alternativas, pero estas no se detallarán aquí

ya que no forman parte del alcance de este manual.

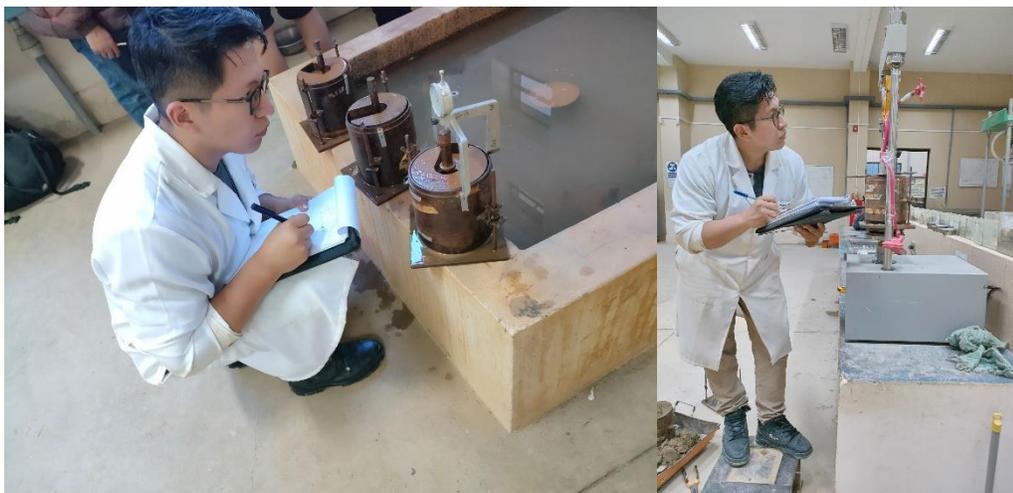
### **Preparación de muestras**

Como se mencionó anteriormente, la muestra a ensayar debe tener un tamaño máximo de partículas de 19 mm. Para realizar el ensayo, se debe preparar una muestra de al menos 5,0 kg, cuya humedad corresponda a la determinada como óptima en el ensayo de compactación.

Según lo recomendado por Joseph Bowles en su manual de procedimientos (1980), si se busca asegurar una distribución más uniforme de la humedad en el suelo, es recomendable mezclar el material con el porcentaje adecuado de humedad y almacenarlo en un recipiente sellado durante un período de 12 a 24 horas antes de proceder con el ensayo.

Finalmente, se debe tomar una muestra representativa del material previamente mezclado y humedecido para determinar el porcentaje de humedad inicial.

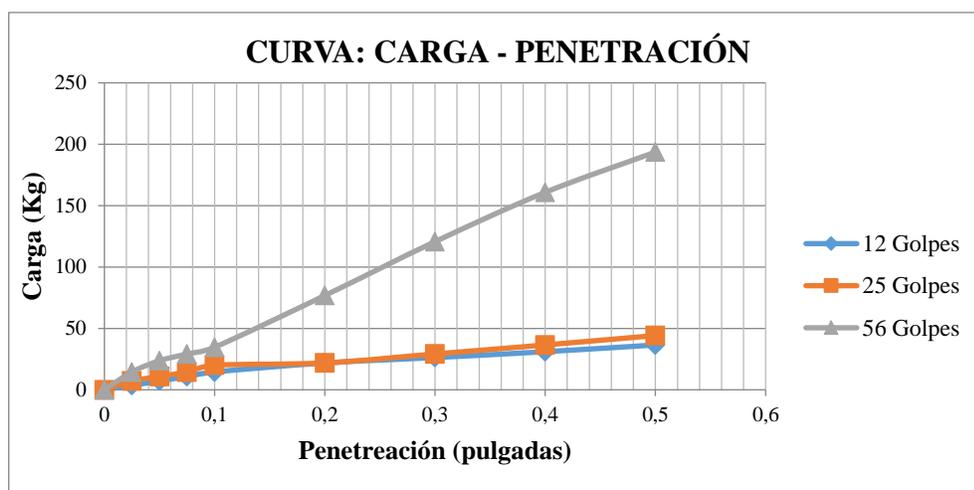
**Figura 3.12:** Lecturas CBR



Fuente: Elaboración propia

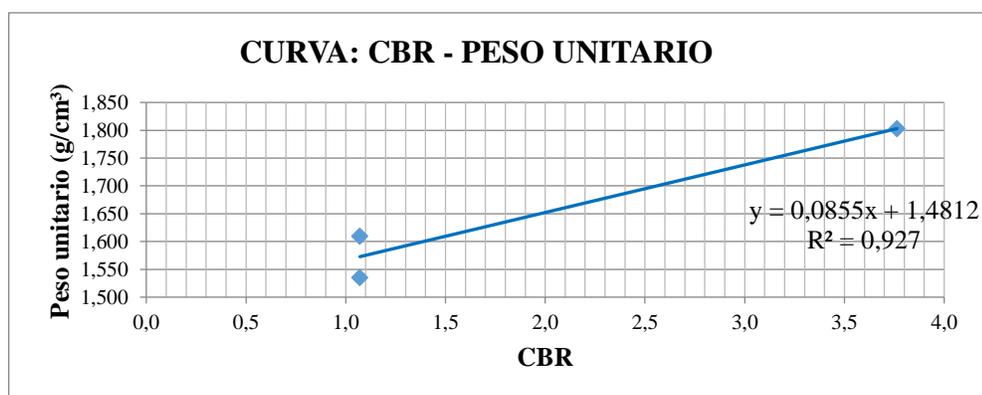
**C.B.R. (MUESTRA 1) 4 DE MARZO**

**Gráfica 3.7:** Curva carga-penetración (CBR 1) suelo 1



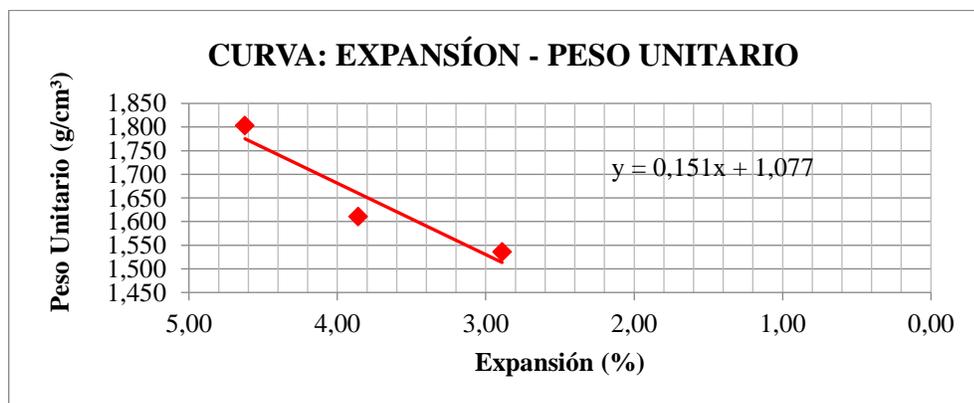
Fuente: Elaboración propia

**Gráfica 3.8:** Curva CBR-peso unitario (CBR 1) suelo 1



Fuente: Elaboración propia

**Gráfica 3.9:** Curva Expansión-peso unitario (CBR 1) suelo 1



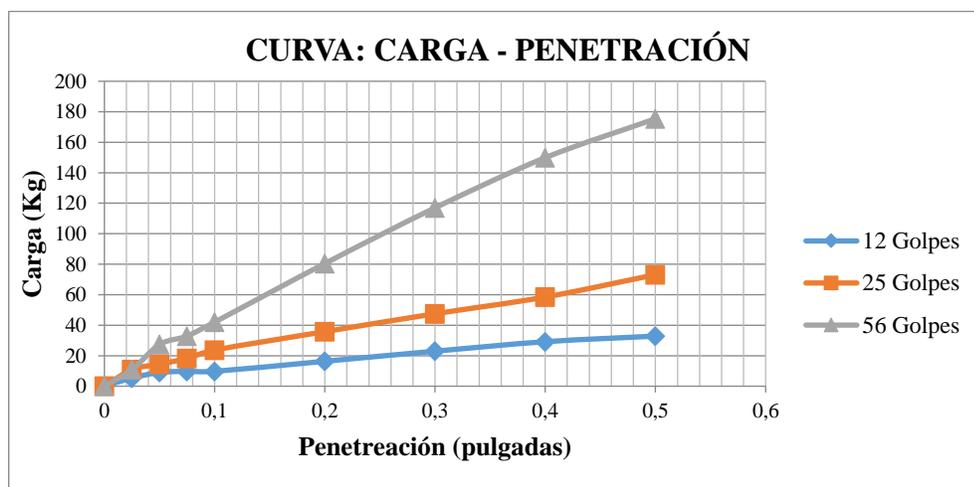
Fuente: Elaboración propia

**Tabla 3.17:** Resultados de ensayo CBR 1, suelo 1.

<b>M. Suelo 4 de marzo (CBR 1)</b>	CBR 100% D. Max
	5,72
	CBR 95% D. Max
	5,43
	Expansión (%)
	5,91

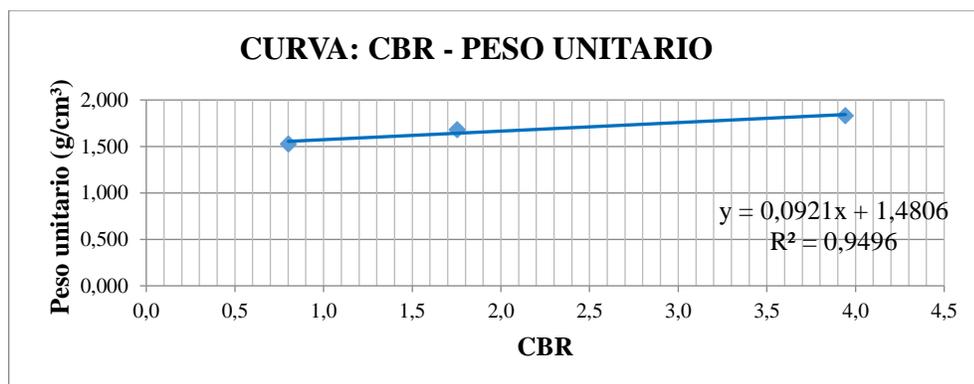
Fuente: Elaboración propia

**Gráfica 3.10:** Curva carga-penetración (CBR 2) suelo 1

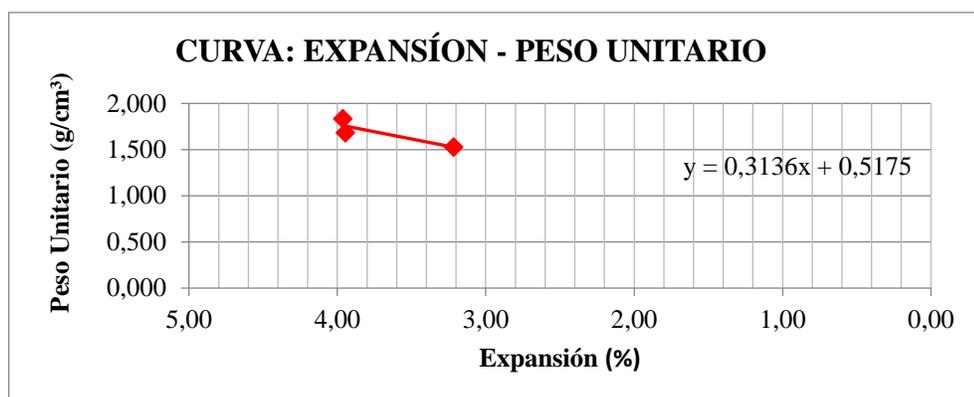


Fuente: Elaboración propia

**Gráfica 3.11:** Curva CBR-peso unitario (CBR 2) suelo 1.



Fuente: Elaboración propia

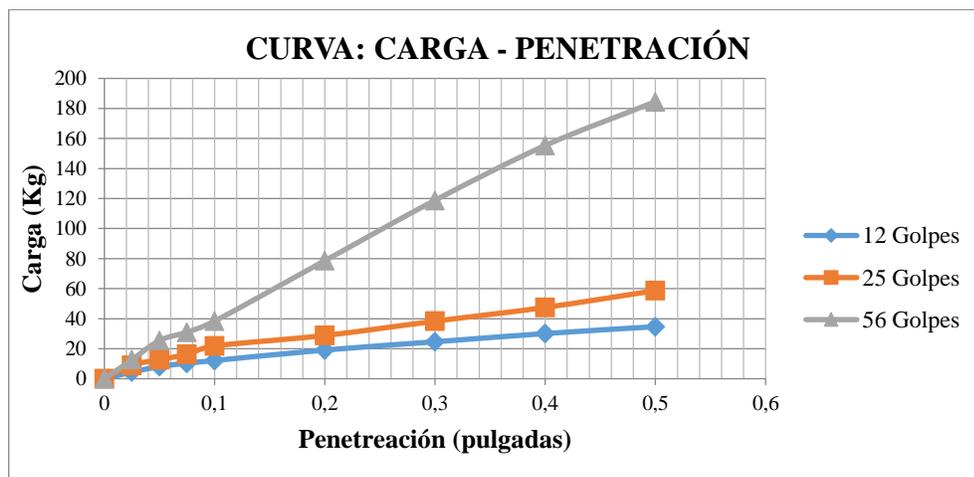
**Gráfica 3.12:** Curva Expansión-peso unitario (CBR 2) suelo 1

Fuente: Elaboración propia

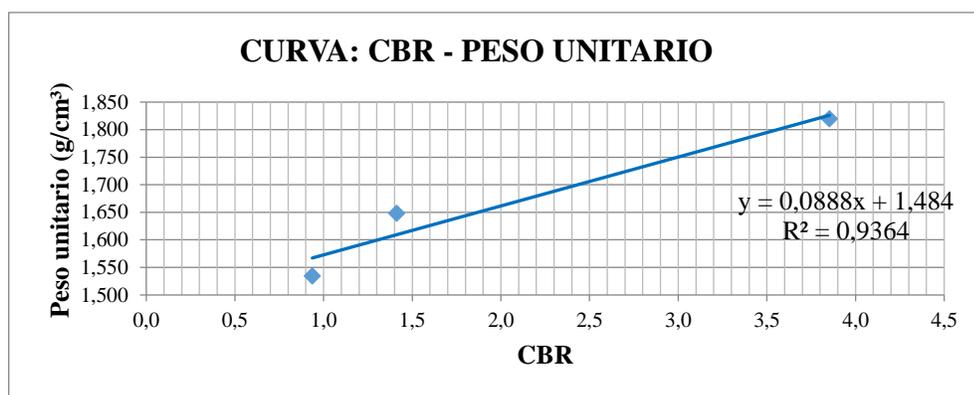
**Tabla 3.18:** Resultados de ensayo CBR 2, suelo 1.

<b>M. Suelo 4 de marzo (CBR 2)</b>	CBR 100% D. Max
	5,31
	CBR 95% D. Max
	5,05
	Expansión (%)
	4,63

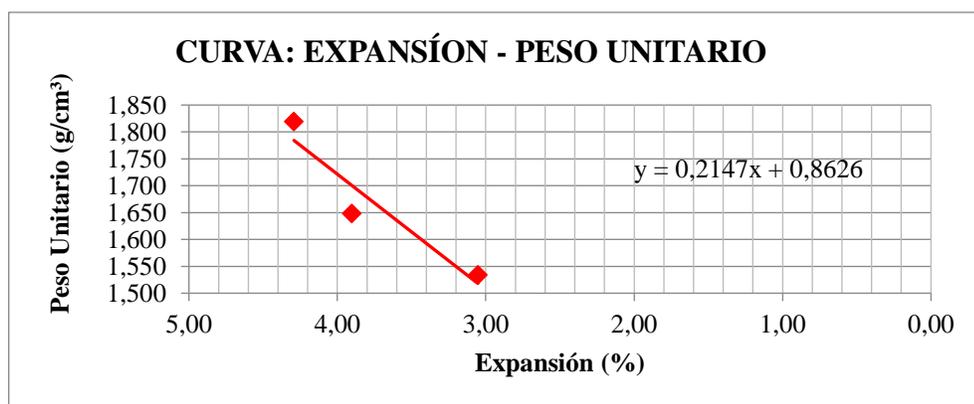
Fuente: Elaboración propia

**Gráfica 3.13:** Curva carga-penetración (CBR 3) suelo 1.

Fuente: Elaboración propia

**Gráfica 3.14:** Curva CBR-peso unitario (CBR 3) suelo 1.

Fuente: Elaboración propia

**Gráfica 3.15:** Curva Expansión-peso unitario (CBR 3) suelo 1

Fuente: Elaboración propia

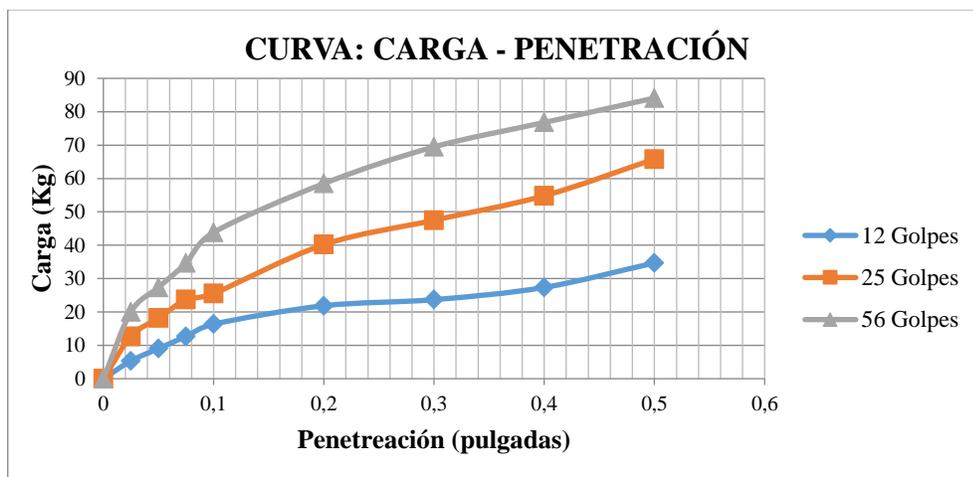
**Tabla 3.19:** Resultados de ensayo CBR 3 suelo 1.

<b>M. Suelo 4 de marzo (CBR 3)</b>	CBR 100% D. Max
	5,47
	CBR 95% D. Max
	5,20
	Expansión (%)
	5,16

Fuente: Elaboración propia

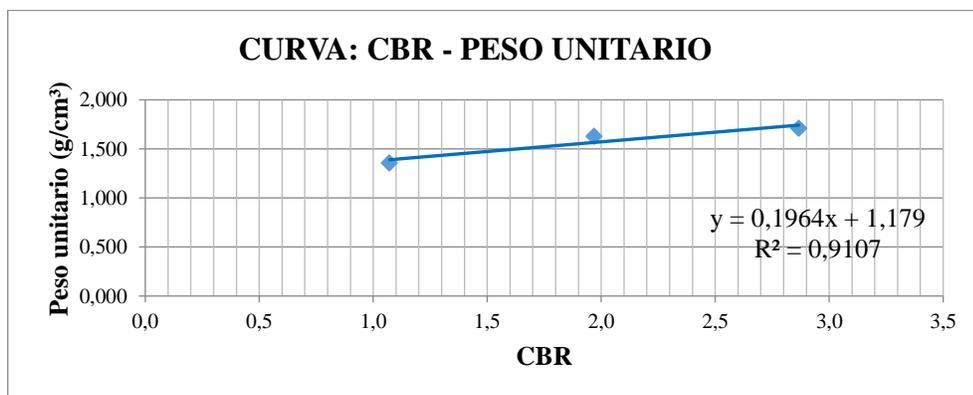
### C.B.R. (MUESTRA 2) TARIJEÑOS EN PROGRESO

Gráfica 3.16: Curva carga-penetración (CBR 1) suelo 2.

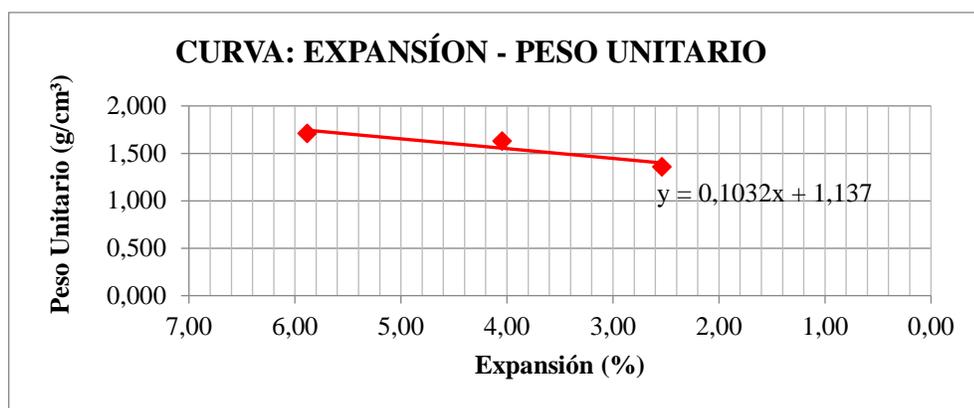


Fuente: Elaboración propia

Gráfica 3.17: Curva CBR-peso unitario (CBR 1) suelo 2



Fuente: Elaboración propia

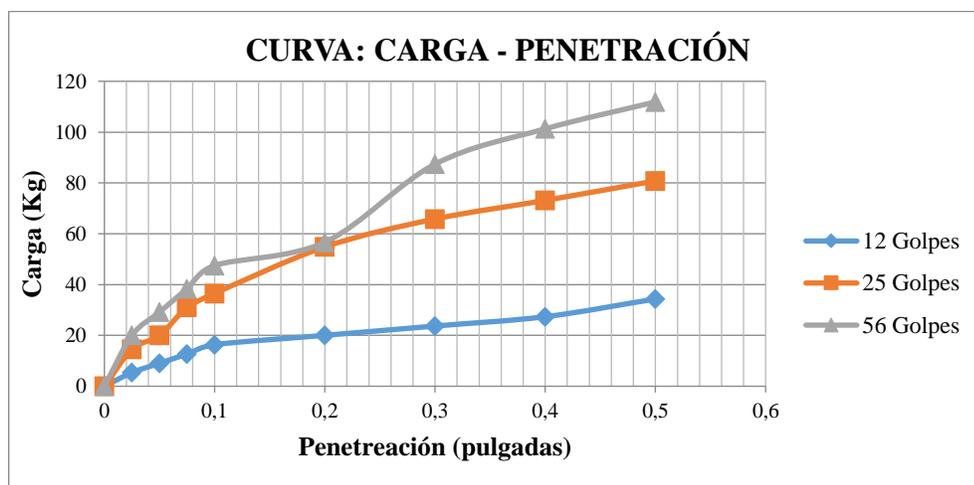
**Gráfica 3.18:** Curva Expansión-peso unitario (CBR 1) suelo 2.

Fuente: Elaboración propia

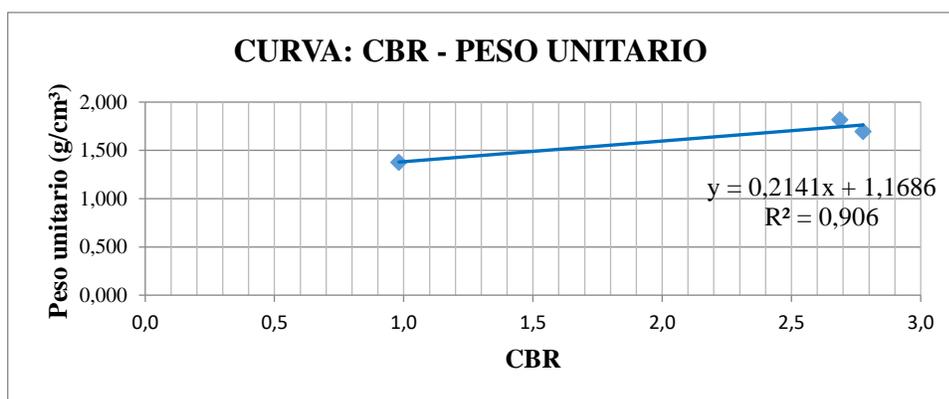
**Tabla 3.20:** Resultados de ensayo CBR 1, suelo 2.

<b>M. Suelo Tarijeños en progreso (CBR 1)</b>	CBR 100% D. Max
	3,47
	CBR 95% D. Max
	3,29
	Expansión (%)
	7,01

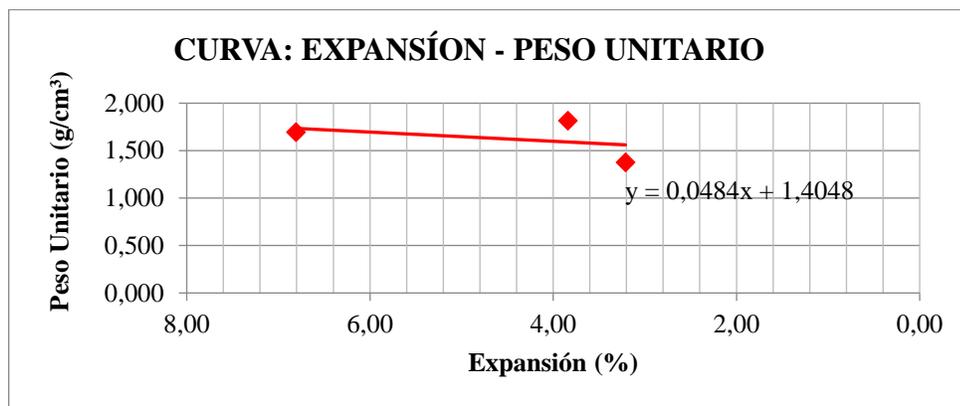
Fuente: Elaboración propia

**Gráfica 3.19:** Curva carga-penetración (CBR 2) suelo2.

Fuente: Elaboración propia

**Gráfica 3.20:** Curva CBR-peso unitario (CBR 2) suelo 2.

Fuente: Elaboración propia

**Gráfica 3.21:** Curva Expansión-peso unitario (CBR 2) suelo 2.

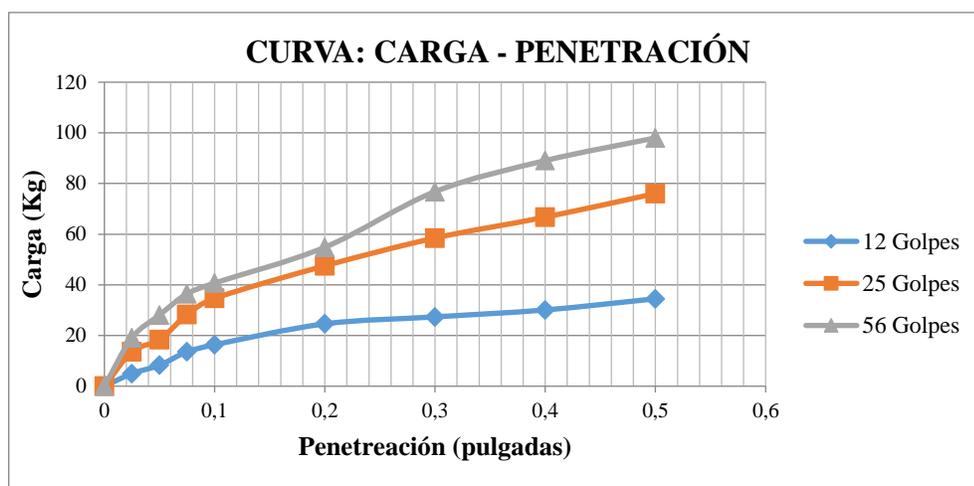
Fuente: Elaboración propia

**Tabla 3.21:** Resultados de ensayo CBR 2, suelo 2.

<b>M. Suelo Tarijeños en progreso (CBR 2)</b>	CBR 100% D. Max
	3,23
	CBR 95% D. Max
	3,07
	Expansión (%)
	9,40

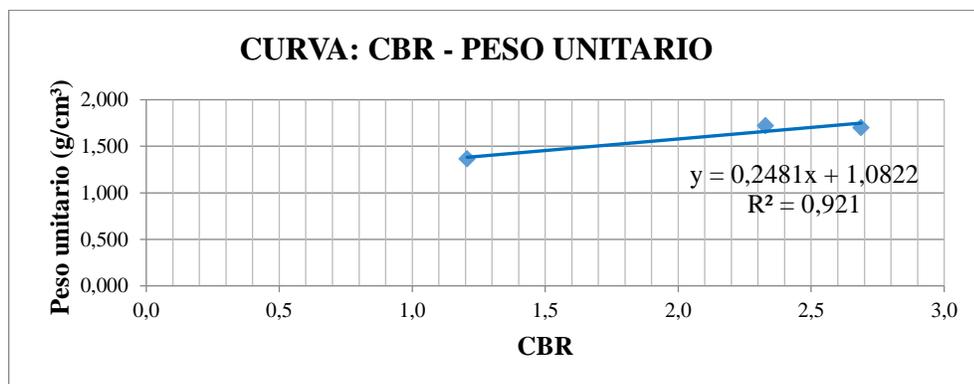
Fuente: Elaboración propia

**Gráfica 3.22:** Curva carga-penetración (CBR 3) suelo 2.



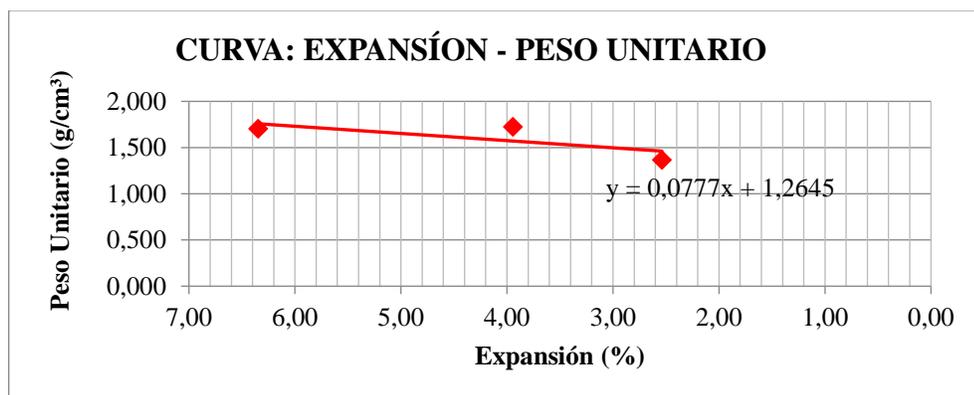
Fuente: Elaboración propia

**Gráfica 3.23:** Curva CBR-peso unitario (CBR 3) suelo 2.



Fuente: Elaboración propia

**Gráfica 3.24:** Curva Expansión-peso unitario (CBR 3) suelo 2.



Fuente: Elaboración propia

**Tabla 3.22:** Resultados de ensayo CBR 3, suelo 2.

<b>M. Suelo Tarijeños en progreso (CBR 3)</b>	CBR 100% D. Max
	3,14
	CBR 95% D. Max
	2,98
	Expansión (%)
	7,66

Fuente: Elaboración propia

### **Análisis Técnico.**

A partir del promedio de los resultados obtenidos de los tres ensayos CBR realizados en cada muestra de suelo, se procederá a realizar la estabilización utilizando diferentes porcentajes de zeolita natural. Estos resultados iniciales servirán como referencia para evaluar cómo varían las propiedades resistentes de los suelos una vez estabilizados:

**Tabla 3.23:** Resultados de ensayo CBR promedio suelo 1.

<b>M. Suelo 4 de marzo (Resultados promedio)</b>	CBR 100% D. Max
	5,47
	CBR 95% D. Max
	5,20
	Expansión (%)
	5,16

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 3.24:** Resultados de ensayo CBR promedio suelo 2.

<b>M. Suelo Tarijeños en progreso (Resultados promedio)</b>	CBR 100% D. Max
	3,27
	CBR 95% D. Max
	3,11
	Expansión (%)
	7,69

Fuente: Elaboración propia

Realizando una comparación de los resultados con los datos de la **tabla 2.3** del capítulo 2 tenemos los siguientes análisis:

**Tabla 3.25:** Resultados de ensayo CBR promedio suelo 2.

Tabla 2.3			Calculado	
valor CBR	clasificación general	usos	4 de marzo	Tarijeños en progreso
0 a 3	muy pobre	subrasante	5,20	3,11
3 a 7	pobre a regular	subrasante		

Fuente: Elaboración propia

El análisis del material natural que conforma los suelos de las zonas en estudio, Barrio 4 de marzo y Barrio Tarijeños en Progreso, revela que presentan características expansivas y un bajo valor de soporte, lo que los hace inadecuados en su estado natural para su uso como subrasantes en proyectos de infraestructura vial. Según las Especificaciones Técnicas Bolivianas para la conformación de subrasantes, establecidas en el Manual de Carreteras - Especificaciones Técnicas Generales para la Construcción (ABC), la expansión del suelo debe ser inferior al 3% y el valor de CBR debe ser superior al 4% para cumplir con los requisitos mínimos de estabilidad y capacidad portante.

En el caso de ambos suelos, los valores actuales no cumplen con estas especificaciones, evidenciando limitaciones significativas que afectan su desempeño estructural. La expansividad de los suelos puede generar problemas como deformaciones volumétricas bajo condiciones de variaciones de humedad, mientras que su bajo CBR refleja una insuficiente capacidad para soportar cargas vehiculares sin sufrir deformaciones permanentes.

#### **3.5.14 Selección y Justificación de los porcentajes de zeolita natural**

La selección de los porcentajes de zeolita natural se basó inicialmente en una tesis de referencia realizada en Perú, en la que se determinó un porcentaje óptimo de 1% al utilizar la zeolita en combinación con otro agente estabilizante. Sin embargo, en esta investigación, la zeolita natural será empleada de forma independiente como único estabilizante, lo que requerirá un análisis adaptado a estas condiciones particulares.

A partir de este punto de referencia, se realizarán pruebas preliminares para evaluar el comportamiento de la subrasante al aplicar únicamente zeolita. Si en estos ensayos se observa que el valor de CBR disminuye en vez de aumentar al trabajar con porcentajes bajos, se procederá a incrementar gradualmente el porcentaje de zeolita hasta identificar

un nivel en el que las propiedades mecánicas del suelo se optimicen. Por esta razón, se definirán diferentes niveles de adición de zeolita para cada tipo de suelo: 1%, 3,5%, 7%, 10,5% y 14% para el suelo limo arcilloso, y 1%, 3,5%, 7%, 10,5%, 14% para el suelo arcilloso.

Justificación del Incremento del 3,5%

Base en Ensayos Graduales:

Se opta por un incremento del 3,5% como un intervalo suficientemente pequeño para observar cambios graduales en las propiedades del suelo, pero lo suficientemente amplio como para evitar ensayos innecesarios y minimizar el tiempo y recursos invertidos.

Cobertura de un Rango Amplio de Posibilidades:

Este intervalo permite abarcar una amplia gama de porcentajes de zeolita, desde valores bajos (1%) hasta niveles altos (14% o 17,5%), logrando identificar el porcentaje óptimo sin omitir puntos clave de inflexión en el comportamiento del suelo.

Optimización de Recursos y Análisis:

Un intervalo menor (por ejemplo, del 1%) implicaría realizar un mayor número de ensayos, incrementando el tiempo y los costos del estudio. Por otro lado, intervalos mayores (como 5% o más) podrían pasar por alto puntos intermedios importantes que podrían influir significativamente en las propiedades mecánicas del suelo.

Basado en Referencias Técnicas y Estudios Previos:

En estudios previos de estabilización de suelos, como los realizados con cal o cemento, se ha observado que intervalos similares (del 3% al 5%) son efectivos para detectar cambios relevantes en las propiedades del suelo. Siguiendo esta lógica, el 3,5% se ajusta como un valor intermedio que permite un análisis detallado y eficiente.

Precisión en la Determinación del Porcentaje Óptimo:

Incrementos de 3,5% permiten identificar de manera precisa el punto donde se obtiene la mayor resistencia mecánica (ensayo CBR) sin llegar a niveles donde la adición de más estabilizante resulte en un comportamiento decreciente.

**CAPÍTULO IV**  
**ANÁLISIS DE**  
**RESULTADOS**

## CAPÍTULO IV

### ANÁLISIS DE RESULTADOS

#### 4.1 Estabilización con zeolita natural

Para la estabilización del suelo con zeolita natural, se utilizarán diferentes porcentajes de este estabilizante, evaluando sus características técnicas a través de los ensayos de Compactación Proctor Modificado T-180 y CBR. El objetivo es analizar cómo la variación en el porcentaje de zeolita logra mejorar las propiedades mecánicas del suelo.

Aunque en investigaciones previas los porcentajes óptimos de estabilización se obtuvieron utilizando combinaciones de estabilizantes, este estudio se centrará exclusivamente en la zeolita natural, con el propósito de investigar su eficacia como único agente estabilizador. Dado que la zeolita tiene propiedades favorables como el intercambio iónico y la absorción de humedad, se espera que, por sí sola, pueda mejorar significativamente la capacidad de soporte y la estabilidad del suelo. Este enfoque innovador permitirá determinar si la zeolita puede ser utilizada como un estabilizante eficaz sin la necesidad de combinarla con otros materiales.

##### 4.1.1 Determinación de la humedad optima y la máxima densidad utilizando diferentes porcentajes de zeolita natural como estabilizante

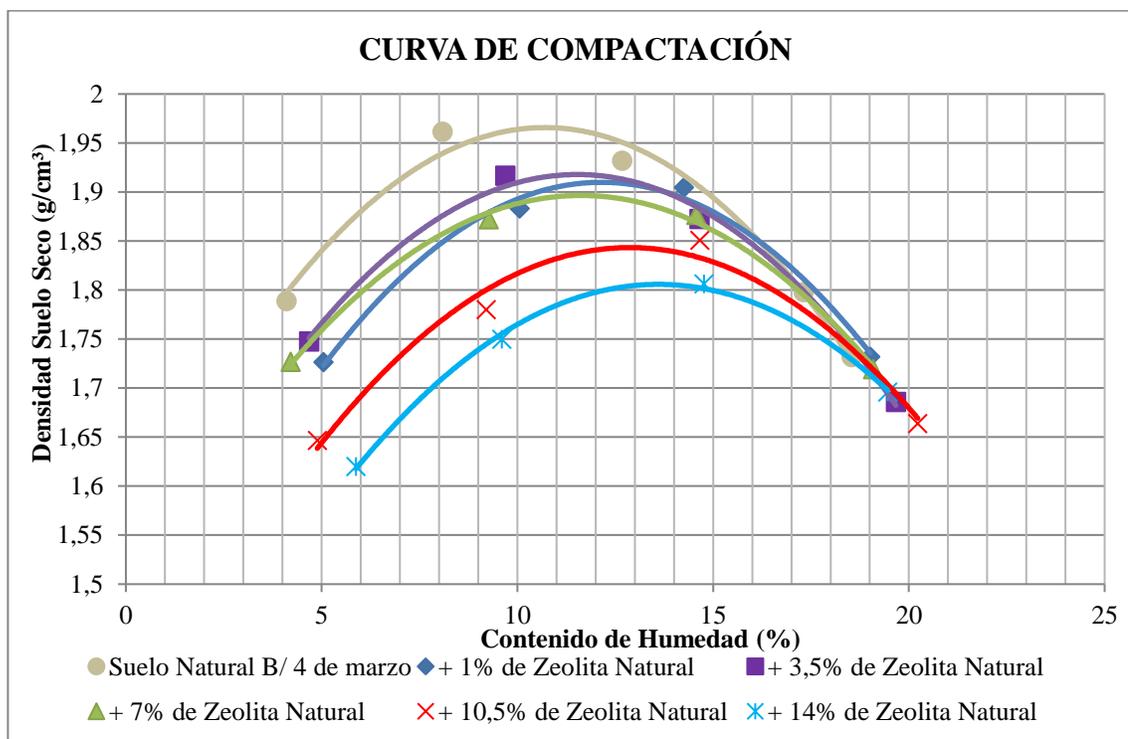
#### Muestra de suelo de 4 de marzo

**Tabla 4.1:** Humedad optima y máxima densidad alcanzada a diferentes porcentajes de suelo 1 – zeolita natural

Muestra suelo +	Suelo Natural	1% Zeolita N.	3,5% Zeolita N.	7% Zeolita N.	10,5% Zeolita N.	14% Zeolita N.
Humedad optima (%)	10,70	12,16	11,52	11,64	12,85	13,61
Densidad seca (g/cm <sup>3</sup> )	1,97	1,91	1,92	1,90	1,84	1,81

Fuente: Elaboración propia

**Gráfica 4.1:** Curvas de compactación para la mezcla suelo 1 – Zeolita natural a diferentes porcentajes de estabilizante.



Fuente: Elaboración propia

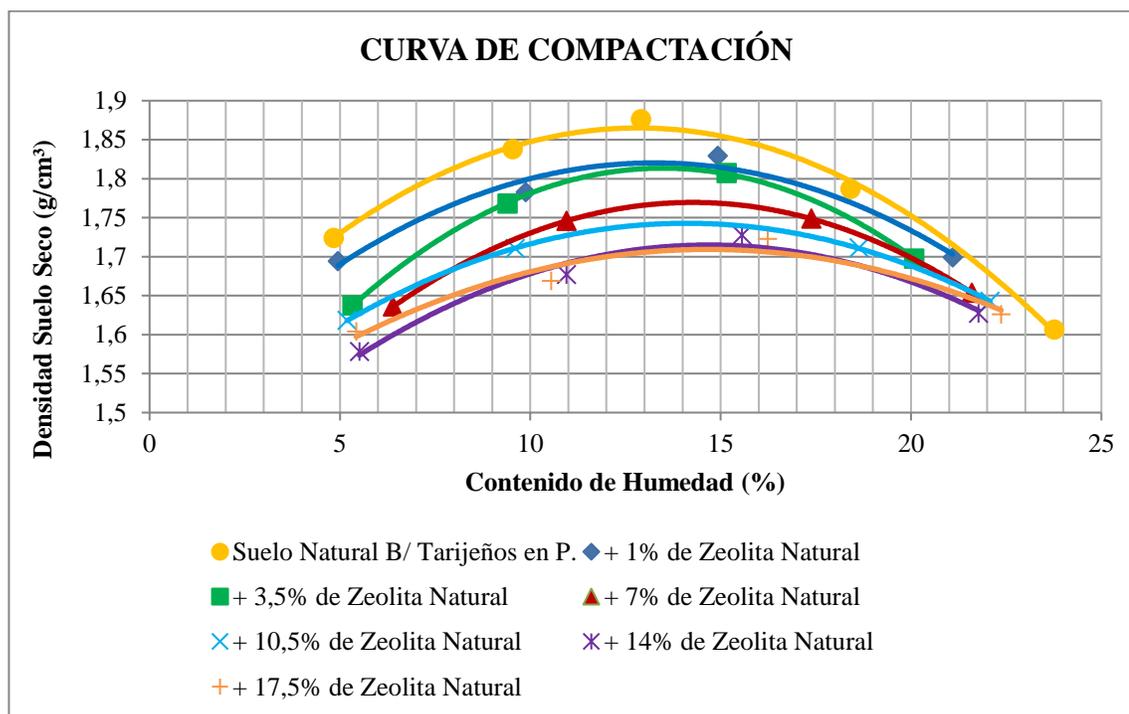
### Muestra de suelo de Tarijeños en progreso

**Tabla 4.2:** Humedad óptima y máxima densidad alcanzada a diferentes porcentajes de suelo 2 – zeolita natural

Muestra suelo +	Suelo Natural	1% Zeolita N.	3,5% Zeolita N.	7% Zeolita N.	10,5% Zeolita N.	14% Zeolita N.	17,5% Zeolita N.
Humedad óptima (%)	12,81	13,23	13,46	14,25	14,11	14,66	14,70
Densidad seca (g/cm <sup>3</sup> )	1,86	1,82	1,81	1,77	1,74	1,71	1,71

Fuente: Elaboración propia

**Gráfica 4.2:** Curvas de compactación para la mezcla suelo 2 – Zeolita natural a diferentes porcentajes de estabilizante.



### Análisis Técnico.

Los resultados obtenidos en el estudio confirman que los valores asumidos de zeolita natural como estabilizante para los dos tipos de suelo analizados son adecuados y efectivos para mejorar sus propiedades. La zeolita natural, gracias a su estructura microporosa y su capacidad de absorber agua, influye directamente en la densidad seca máxima de los suelos. Se observa que, a medida que se incrementa el contenido de zeolita, la densidad seca máxima presenta una ligera disminución, efecto atribuible a la mayor retención de agua dentro de la matriz del material estabilizado.

Además, el contenido de humedad óptima aumenta progresivamente con mayores porcentajes de zeolita natural. Esto se debe a que el estabilizante requiere un mayor volumen de agua para su distribución uniforme en la matriz del suelo y para garantizar una adecuada compactación. Las propiedades higroscópicas de la zeolita natural contribuyen a mejorar la cohesión interna del suelo, lo que se traduce en un incremento de su resistencia mecánica y su estabilidad estructural, características fundamentales en el

diseño y construcción de subrasantes.

Aunque la densidad seca máxima no aumenta en todos los casos con el incremento de la zeolita, los beneficios asociados a la mejora de las propiedades mecánicas del suelo, como la mayor resistencia a las cargas y la reducción de su deformabilidad, justifican plenamente su aplicación. Este análisis reafirma que la estabilización con zeolita natural es una solución técnica viable y eficiente para mejorar el desempeño estructural de las subrasantes en proyectos de infraestructura vial.

La **densidad del suelo natural**, aunque sea adecuada en términos de compactación, no es el único parámetro que determina su idoneidad como material de subrasante. En ingeniería civil, además de la densidad, se evalúan otras propiedades fundamentales que afectan el comportamiento del suelo bajo cargas vehiculares dinámicas y estáticas, como:

Capacidad portante (CBR):

El valor de CBR obtenido en el suelo natural no cumple con las especificaciones mínimas requeridas para subrasantes en infraestructura vial, lo que indica que el suelo no puede soportar adecuadamente las cargas a largo plazo. La estabilización con zeolita natural mejora significativamente la capacidad portante, permitiendo que el suelo cumpla con los estándares requeridos para resistir el tráfico previsto.

Expansión y comportamiento frente al agua:

Los suelos naturales estudiados presentan características expansivas y alta retención de agua, lo que genera deformaciones volumétricas en condiciones de saturación. Este comportamiento es inadecuado para un sustrato estable y duradero. La incorporación de zeolita natural reduce significativamente la expansión del suelo, mejorando su estabilidad dimensional.

Cohesión y resistencia mecánica:

Aunque la densidad del suelo natural puede ser aceptable, la cohesión y resistencia mecánica no son suficientes para garantizar un desempeño estructural adecuado. La zeolita natural mejora estas propiedades al aumentar la fricción interna y la cohesión entre las partículas del suelo.

Durabilidad y mantenimiento:

La estabilización con zeolita natural no solo mejora las propiedades mecánicas del suelo,

sino que también prolonga la vida útil de la subrasante, reduciendo los costos de mantenimiento y reparación. Esto es esencial para garantizar una infraestructura vial más eficiente y sostenible.

La estabilización con zeolita natural no se realiza únicamente por la densidad del suelo, sino porque otros parámetros esenciales para el diseño de sustratos (como el CBR, la expansión y la resistencia mecánica) no cumplen con los estándares requeridos en su estado natural. La zeolita natural permite optimizar estas propiedades, asegurando que la subrasante sea capaz de soportar las cargas vehiculares y proporcionar estabilidad a largo plazo, tal como lo exigen las normativas de infraestructura vial.

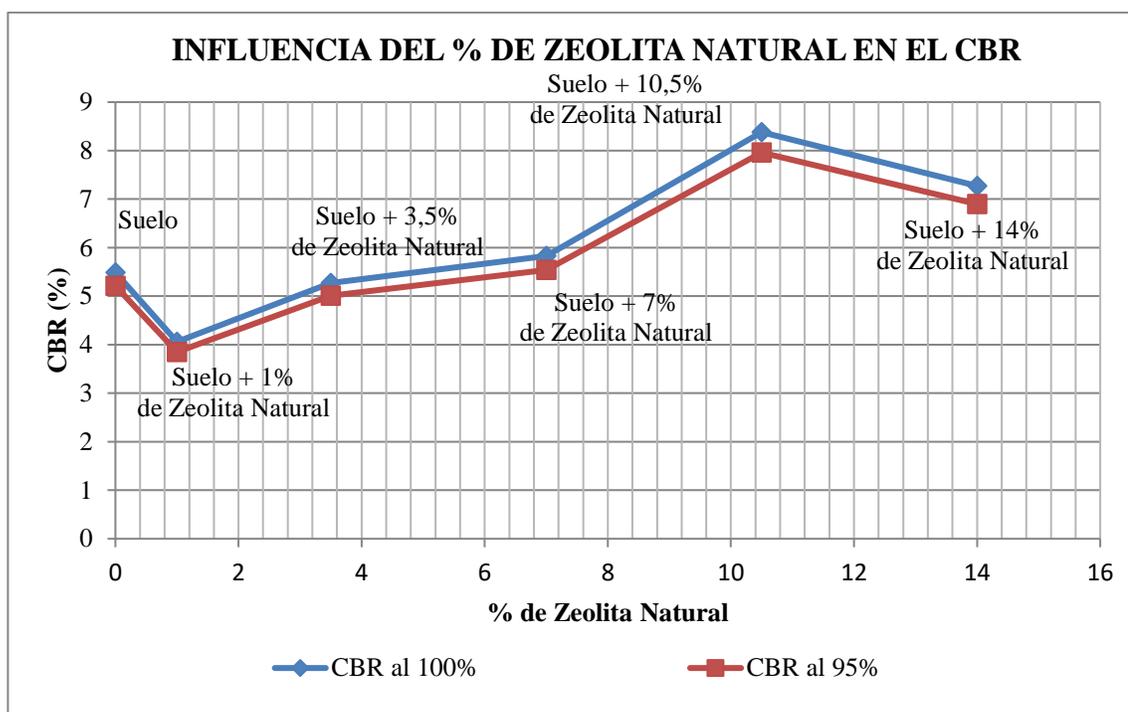
#### 4.1.2 Determinación del C.B.R. y expansión del suelo estabilizado a diferentes porcentajes de zeolita natural como estabilizante

##### Muestra de suelo de 4 de marzo

**Tabla 4.3:** CBR al 100% y CBR al 95% de la mezcla suelo 1 - Zeolita natural

Muestra	Suelo Natural	1% Zeolita N.	3,5% Zeolita N.	7% Zeolita N.	10,5% Zeolita N.	14% Zeolita N.
CBR al 100%	5,49	4,06	5,27	5,83	8,38	7,27
CBR al 95%	5,21	3,85	5,01	5,54	7,96	6,90

Fuente: Elaboración propia

**Gráfica 4.3:** Influencia del % de Zeolita natural en el CBR con relación al suelo natural.

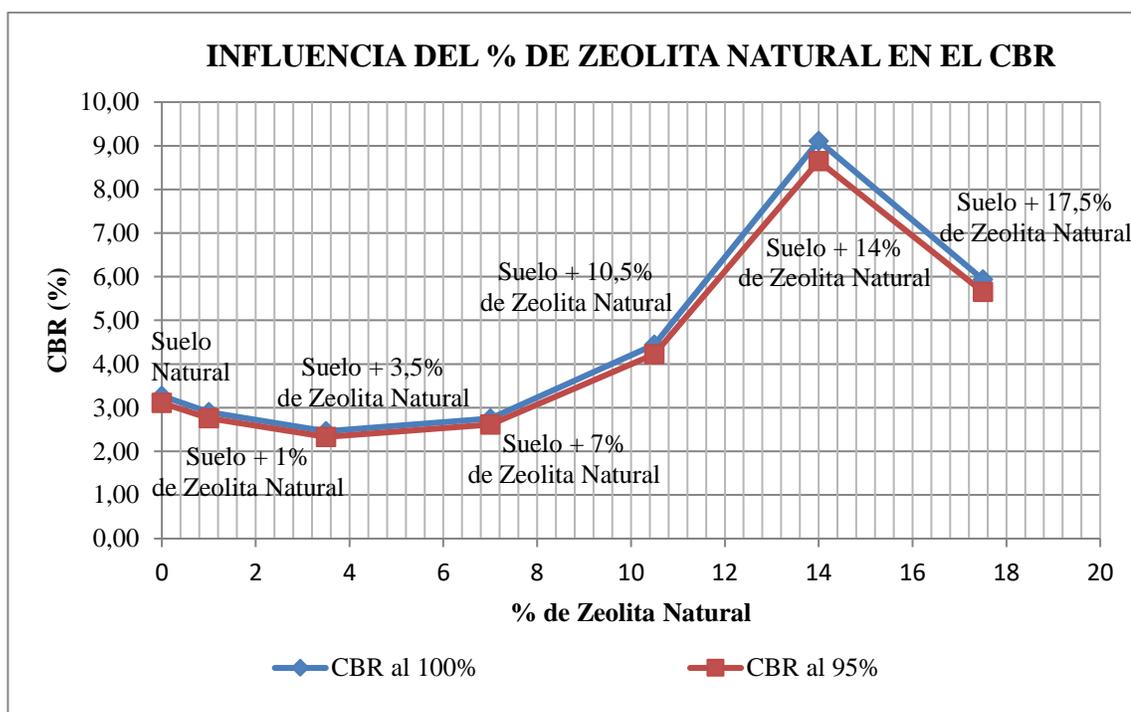
### Muestra de suelo de Tarijeños en progreso

**Tabla 4.4:** CBR al 100% y CBR al 95% de la mezcla suelo 2 – Zeolita natural

Muestra	Suelo Natural	1% Zeolita N.	3,5% Zeolita N.	7% Zeolita N.	10,5% Zeolita N.	14% Zeolita N.	17,5% Zeolita N.
CBR al 100%	3,27	2,90	2,46	2,75	4,44	9,11	5,94
CBR al 95%	3,11	2,76	2,33	2,61	4,22	8,65	5,65

Fuente: Elaboración propia

**Gráfica 4.4:** Influencia del % de Zeolita natural en el CBR con relación al suelo natural.



### Análisis Técnico.

El análisis de los valores de CBR obtenidos para las muestras estabilizadas con zeolita natural revela un comportamiento particular en la evolución de la capacidad portante de los suelos. En los primeros porcentajes de adición de zeolita (1%, 3,5%, y 7%), no se registra un incremento significativo en los valores de CBR, manteniéndose estos por debajo del valor correspondiente al suelo natural. Este comportamiento inicial puede atribuirse a las características inherentes del suelo, como su estructura y cohesión natural, que requieren un porcentaje más alto de estabilizante para lograr una mejora efectiva en sus propiedades mecánicas. Aunque la mezcla se realizó de manera controlada y estandarizada, es en porcentajes superiores donde la interacción química y física entre la zeolita natural y las partículas del suelo comienza a generar un efecto positivo en la capacidad portante del material.

Sin embargo, a partir del 10,5% de zeolita natural, ambos suelos comienzan a mostrar mejoras significativas en sus propiedades mecánicas. Para la muestra del Barrio 4 de marzo, el 10,5% se identifica como el porcentaje óptimo, ya que en este punto el valor del

CBR alcanza los niveles mínimos aceptables requeridos para subrasantes, según lo establecido en la Figura 2.7 del Capítulo II. Por otro lado, en la muestra del Barrio Tarijeños en Progreso, se requiere un contenido mayor de estabilizante, alcanzándose el porcentaje óptimo en el 14%, donde el CBR cumple con las especificaciones mínimas para su uso en infraestructuras viales.

Desde el punto de vista de la ingeniería civil, estos hallazgos confirman que la incorporación de zeolita natural permite mejorar significativamente las propiedades mecánicas de los suelos una vez alcanzado el porcentaje óptimo. Este proceso garantiza que las subrasantes estabilizadas cumplan con los requisitos de estabilidad, capacidad portante y durabilidad necesarios para soportar las cargas dinámicas y estáticas de las infraestructuras viales. Además, refuerza la viabilidad técnica de la zeolita natural como una alternativa eficaz y sostenible para mejorar suelos limo arcillosos y arcillosos en proyectos de infraestructura.

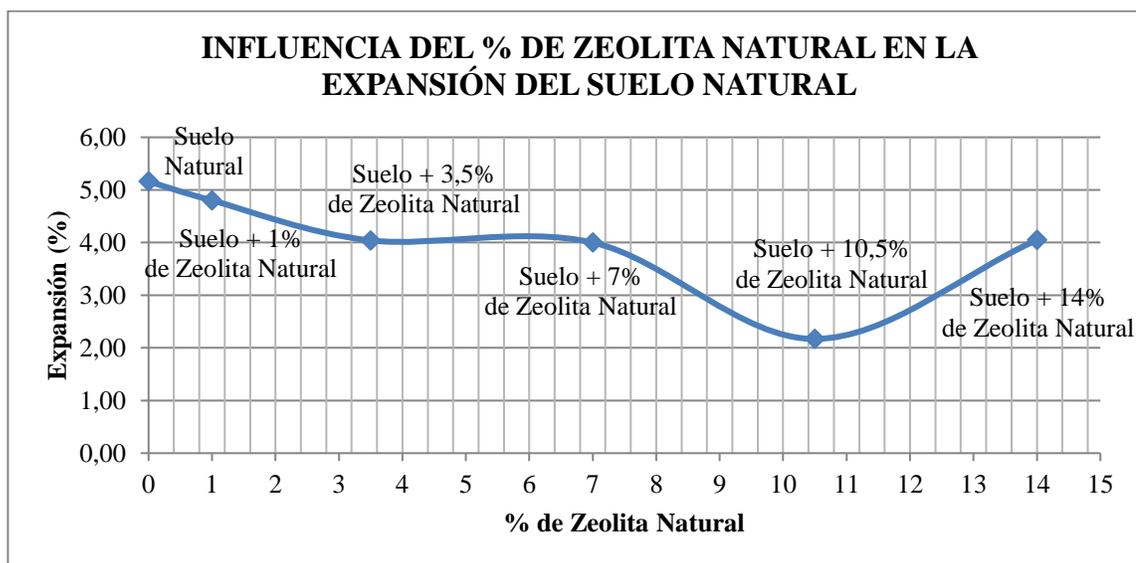
#### Muestra de suelo de 4 de marzo

**Tabla 4.5:** Expansión de la mezcla del suelo 1 – Zeolita natural

Muestra	Suelo Natural	1% Zeolita N.	3,5% Zeolita N.	7% Zeolita N.	10,5% Zeolita N.	14% Zeolita N.
Expansión	5,16	4,80	4,04	4,00	2,17	4,05

Fuente: Elaboración propia

**Gráfica 4.5:** Influencia del % de Zeolita natural en la expansión con relación al suelo natural.



Fuente: Elaboración propia

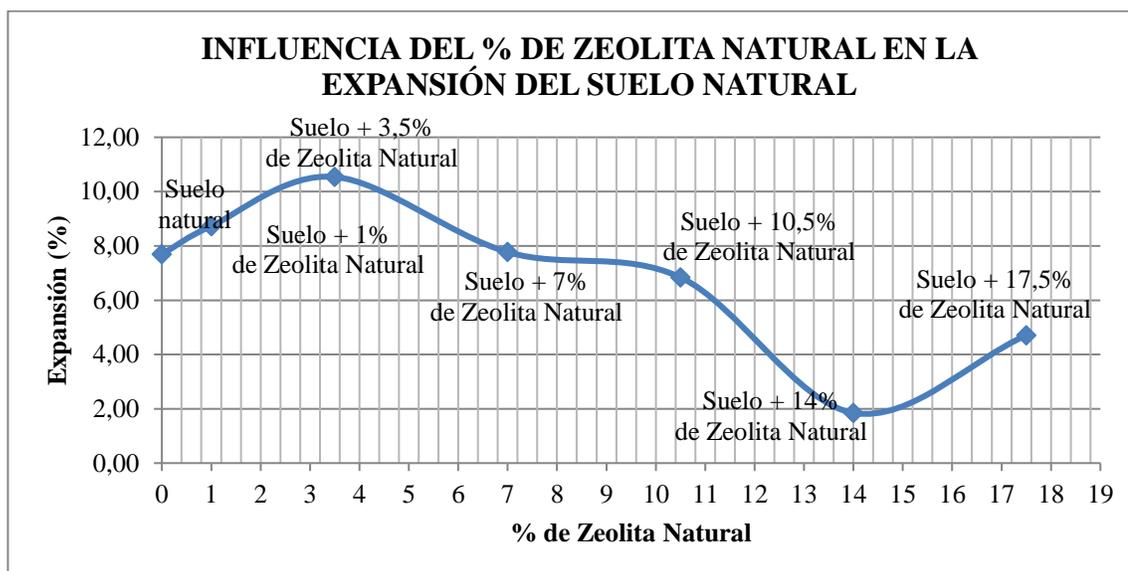
### Muestra de suelo de Tarijeños en progreso

**Tabla 4.6:** Expansión de la mezcla del suelo 2 –Tarijeños en progreso

Muestra	Suelo Natural	1% Zeolita N.	3,5% Zeolita N.	7% Zeolita N.	10,5% Zeolita N.	14% Zeolita N.	17,5% Zeolita N.
Expansión	7,69	8,73	10,54	7,77	6,84	1,85	4,71

Fuente: Elaboración propia

**Gráfica 4.6:** Influencia del % de Zeolita natural en la expansión con relación al suelo natural.



Fuente: Elaboración propia

### Análisis Técnico.

Los valores de expansión obtenidos para las muestras de suelo natural y estabilizado con zeolita natural evidencian una mejora significativa en el comportamiento mecánico de las subrasantes, lo cual es esencial en proyectos de infraestructura vial. En el estado natural, ambas muestras no cumplen con las especificaciones técnicas de expansión requeridas para subrasantes, cuyo valor debe ser inferior al 3%, según lo establecido en la Figura 2.7 del Capítulo II. Este incumplimiento subraya la necesidad de implementar técnicas de estabilización que reduzcan la expansión del suelo y mejoren su capacidad estructural.

Tras la incorporación de zeolita natural, los valores de expansión disminuyen considerablemente, llegando incluso a ser casi negativos, lo que indica una contracción mínima durante los días 3 y 4 de saturación en la prueba de CBR. Este fenómeno puede atribuirse al proceso de endurecimiento de la zeolita natural que, al adherirse a las partículas del suelo, aumenta su cohesión interna y reduce la expansividad. Esta reducción en la expansión es clave para evitar problemas como la deformación volumétrica o el colapso de la estructura vial bajo condiciones de humedad variable.

El análisis también destaca que los valores de expansión son aún más bajos en el suelo 2 (A-6, Barrio Tarijeños en Progreso) en comparación con el suelo del Barrio 4 de marzo.

Esto se debe a que la zeolita natural muestra una mayor efectividad en suelos con una mayor proporción de partículas finas, como las arcillas. Su estructura microporosa y su capacidad de absorción permiten una distribución uniforme del estabilizante, mejorando la cohesión y reduciendo la susceptibilidad a la expansión.

Desde el punto de vista de la ingeniería civil, estos resultados confirman que la estabilización con zeolita natural es una técnica eficiente para controlar la expansión de suelos limo arcillosos y arcillosos, garantizando la estabilidad estructural de las subrasantes. La reducción de la expansión asegura que los suelos tratados cumplan con los estándares necesarios para soportar las cargas dinámicas y estáticas de las vías, minimizando riesgos asociados con deformaciones y fallas estructurales. Además, este comportamiento refuerza la viabilidad técnica de la zeolita natural como una solución sostenible y efectiva en proyectos de infraestructura vial.

## 4.2 Resultados obtenidos

### 4.2.1 Resultados alcanzados para las 2 muestras de suelo

**Tabla 4.7:** Resumen de propiedades del suelo 1 estabilizado.

Propiedad	Ensayo	Resultados suelo 4 de marzo					
		Suelo Natural	1% Zeolita N.	3,5% Zeolita N.	7% Zeolita N.	10,5% Zeolita N.	14% Zeolita N.
Compactación	Humedad optima (%)	10,70	12,16	11,52	11,64	12,85	13,61
	Densidad seca máxima (g/cm <sup>3</sup> )	1,97	1,91	1,92	1,90	1,84	1,81
Cambio volumétrico	Expansión (%)	5,16	4,80	4,04	4,00	2,17	4,05
Capacidad de soporte	CBR al 100%	5,49	4,06	5,27	5,83	8,38	7,27
	CBR al 95%	5,21	3,85	5,01	5,54	7,96	6,90

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 4.8:** Resumen de propiedades del suelo 2 estabilizado.

Propiedad	Ensayo	Resultados suelo Tarijeños en progreso						
		suelo natural	1% Zeolita N.	3,5% Zeolita N.	7% Zeolita N.	10,5% Zeolita N.	14% Zeolita N.	17,5% Zeolita N.
Compactación	Humedad óptima (%)	12,81	13,23	13,46	14,25	14,11	14,66	14,70
	Densidad seca máxima (g/cm <sup>3</sup> )	1,86	1,82	1,81	1,77	1,74	1,71	1,71
Cambio volumétrico	Expansión (%)	7,69	8,73	10,54	7,77	6,84	1,85	4,71
Capacidad de soporte	CBR al 100%	3,27	2,90	2,46	2,75	4,44	9,11	5,94
	CBR al 95%	3,11	2,76	2,33	2,61	4,22	8,65	5,65

Fuente: Elaboración propia

#### 4.2.2 Evaluación técnica de resultados

Evaluación de la densidad seca máxima y la humedad óptima

Al analizar el ensayo de compactación, se determinó que la mezcla con zeolita natural al 10,5% en el suelo 1 (4 de marzo) y al 14% en el suelo 2 (Tarijeños en progreso) alcanza una densidad seca menor, debido a las propiedades de la zeolita natural. A medida que se incrementa el porcentaje de aditivo, la densidad seca tiende a disminuir, lo que es característico del comportamiento de la zeolita natural. Ambos suelos muestran una elevación en el contenido de humedad óptima en comparación con los valores iniciales, como se señala en las tablas 3.15 y 3.16 del Capítulo III.

Evaluación de la expansión y la capacidad de soporte alcanzada en el ensayo CBR.

Se observa que, con la adición del 10,5% de estabilizante en el suelo 1 (4 de marzo) y del 14% en el suelo 2 (Tarijeños en progreso), se produce una disminución significativa en los valores de expansión respecto a los valores iniciales del suelo natural, tal como se indica en las tablas 3.23 y 3.24 del Capítulo III. Este cambio influye directamente en la variación volumétrica que sufrirá la subrasante al estar expuesta a la saturación de agua y a la presión del tráfico vehicular.

Sin embargo, al aumentar el porcentaje de zeolita natural, se detecta un incremento en

el porcentaje de expansión, lo que sugiere que existe un punto óptimo donde la expansión es mínima o nula. Si los valores de expansión resultan excesivamente negativos, podrían generarse problemas de asentamientos en el suelo, lo que requeriría rellenos futuros para mantener el nivel adecuado del terreno.

Además, se destaca que la primera muestra alcanza un aumento moderado en el valor del CBR con el 10,5% de estabilizante, mientras que la segunda muestra lo consigue con el 14%, superando los valores del suelo natural mencionados en las tablas 3.23 y 3.24 del Capítulo III, tanto al 100% como al 95% de compactación. Estos resultados indican que ambas subrasantes, tras ser estabilizadas con zeolita natural, presentan una mejor calidad para soportar la carga vehicular.

### **4.3 Análisis de precios unitarios referenciales**

El análisis de costos se basa en la elaboración de precios referenciales adaptados a esta alternativa innovadora de estabilización, resultado de una investigación exhaustiva y ajustados a métodos de construcción optimizados. Estos métodos han sido diseñados para ser compatibles con la maquinaria específica necesaria para implementar esta técnica de estabilización de subrasantes, incluyendo equipos convencionales y maquinaria especializada, como el rodillo vibratorio liso, que aún no se encuentra ampliamente disponible en el mercado local.

Para determinar los costos de esta estabilización, se realizó un análisis detallado de precios unitarios, considerando los costos horarios y el rendimiento operativo de cada tipo de maquinaria empleada. En este estudio se incluyeron, además, los costos de insumos, materiales, mano de obra y otros gastos inherentes al proyecto. Este análisis proporciona una visión integral de los recursos económicos y técnicos necesarios para la ejecución efectiva de la obra.

#### **4.3.1 Costos directos**

##### **Materiales de construcción**

Para la estabilización de las subrasantes, se evaluó el rendimiento de los materiales extraídos de las dos zonas mencionadas al inicio de este capítulo, así como el de la zeolita natural adquirida en la Distribuidora del Sur en Cochabamba. La zeolita fue cotizada en

esta distribuidora debido a su alta demanda y excelente desempeño en aplicaciones de estabilización de suelos. Se adquirió en presentaciones de 25, lo cual permitió optimizar los costos de su aplicación en el proyecto.

### **Mano de obra**

La estimación de costos de mano de obra incluye el salario básico del trabajador, los beneficios sociales, los impuestos, y el costo horario de cada actividad. Los salarios fueron considerados conforme a las tarifas establecidas por la Cámara Departamental de la Construcción (CADECO), aunque están sujetos a variaciones por la libre oferta y demanda. En el análisis de precios unitarios, los costos de operación de la maquinaria no incluyen al operador ni a un ayudante, quienes se contabilizan por separado dentro de los gastos de mano de obra.

### **Maquinaria y equipo**

Los costos de maquinaria consideran la productividad, costos de propiedad, vida útil, amortización e intereses, costos de operación, reparaciones y repuestos. Estos factores se sintetizan en los costos horarios de operación de cada equipo, los cuales, al ser afectados por el rendimiento específico de la maquinaria, permiten obtener el costo unitario asociado al equipo utilizado en la estabilización.

#### **4.3.2 Costos Indirectos**

Por una parte, están los gastos generales, que pueden estimarse en función de los costos unitarios y como el 15% de costo directo.

Ahora como en toda obra se debe obtener utilidades las cuales también se pueden estimar a partir de los costos directos y no pueden ser Mayores al 10% de éstos, y en muchas veces es menor que el 10%.

#### **4.3.3 Precio unitario de la estabilización**

Con base en los conceptos desarrollados en las secciones anteriores, se elaboró una planilla de precios unitarios referencial, fundamentada en investigaciones previas y en proyectos citados en la bibliografía, debido a que en el contexto local no se cuenta con equipos específicos ni con datos de costos de operación para esta nueva alternativa de estabilización con zeolita natural.

Los detalles de esta planilla se encuentran en el Anexo II del proyecto.

**Tabla 4.9:** Resultado de cálculo de precio unitario de estabilización por m<sup>3</sup>

<b>Ítem. o Actividad</b>	<b>Costo total \$u\$/m<sup>3</sup></b>	<b>Costo total Bs/m<sup>3</sup></b>
Estabilización suelo B/ 4 de marzo (limo arcilloso) – 10,5 % Zeolita Natural	186,679	1301,154
Estabilización suelo B/ Tarijeños en progreso (arcilloso) – 14 % Zeolita Natural	234,922	1637,406

Fuente: Elaboración propia

#### **4.4 Análisis comparativo de costo de la estabilización con zeolita natural con la estabilización con métodos tradicionales**

El siguiente análisis, como parte de esta tesis, tiene como objetivo comparar la estabilización de suelos limo arcillosos con zeolita natural, una técnica innovadora en Tarija, con los métodos tradicionales de estabilización utilizados en el departamento. Esta comparación se centra en evaluar las diferencias en costos entre estas alternativas, con el propósito de determinar la viabilidad económica de la zeolita natural para mejorar la calidad de subrasantes en proyectos de infraestructura vial.

Los datos utilizados para estimar los porcentajes de estabilizante requeridos en la estabilización de un metro cúbico provienen del análisis de cuatro investigaciones locales. Estas fuentes proporcionan un marco de referencia valioso para realizar una comparación precisa y contextualizada en términos de costos y viabilidad técnica.

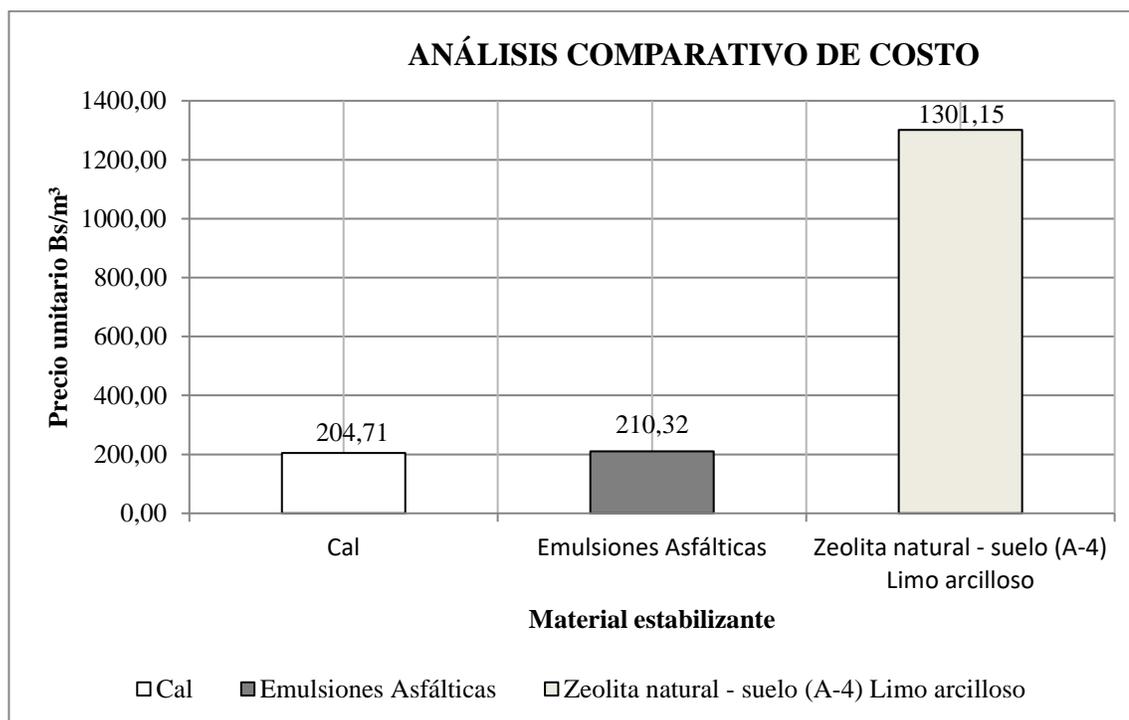
- 1. Análisis del polipropileno expandido como material estabilizante de subrasante de suelo fino / Ayala, Sugamy**
- 2. Estabilización de capas subrasantes finas con emulsiones asfálticas / Chavez Gareca, Jaime Wilmar Documentos digitales asociados**
- 3. Análisis de suelos arcillosos de la Comunidad de Cañon Oculto estabilizados con hidróxido de calcio y cemento / Flores Chávez, David Dario**
- 4. Comparación de estabilización de suelos arcillosos inorgánicos aplicando ceniza de madera de fondo y/o cemento portland / Castro Laruta, Paolo Horacio**

**Tabla 4.10:** Cantidad y precio de material para estabilizar un m<sup>3</sup>

Estabilización de un m <sup>3</sup>			
Tipo de suelo	Suelo A-4	Suelo A-4	Suelo A-4 limo arcilloso
Aditivo	Cal	Emulsiones asfálticas	Zeolita natural
Porcentaje (%)	7	10,89	10,5
Precio unitario (Bs)	204,71	210,32	1301,154
Capacidad de soporte	CBR al 100%	14,29	12,85
	CBR al 95%	11,77	12,33

Fuente: Elaboración propia

En la siguiente figura se realiza una comparación entre alternativas de vs precios unitarios para estabilizar un m<sup>3</sup>.

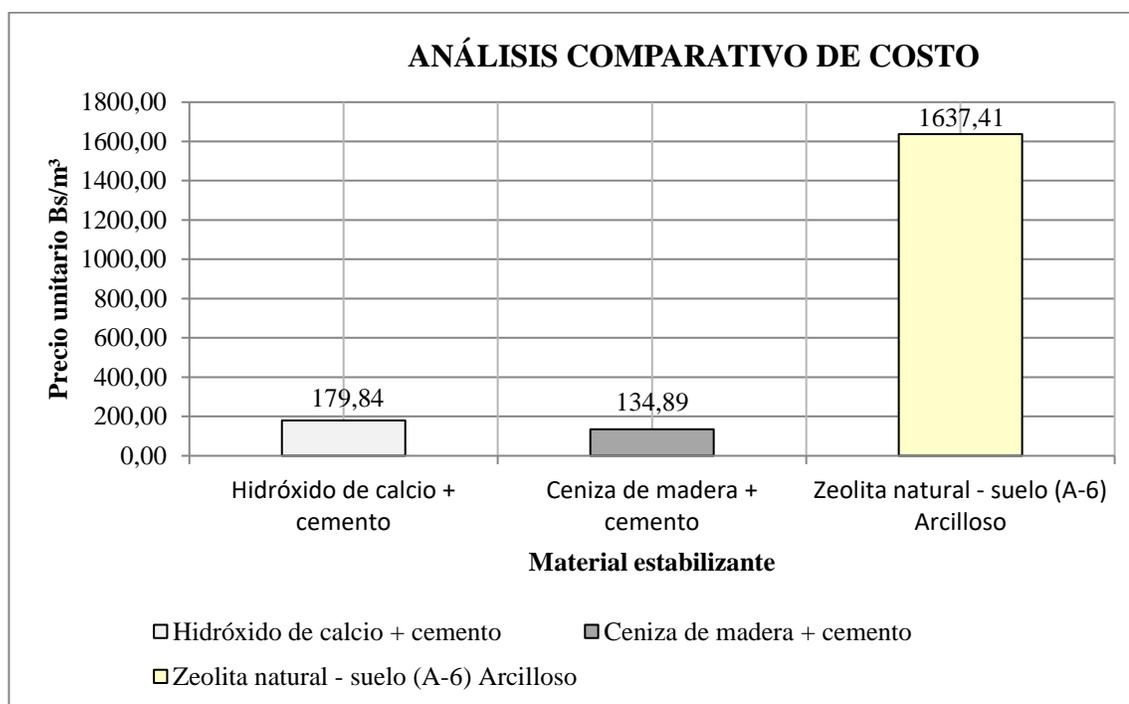
**Gráfica 4.7:** Análisis comparativo de costos de alternativas de estabilizaciones.

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 4.11:** Cantidad y precio de material para estabilizar un m<sup>3</sup>

Estabilización de un m <sup>3</sup>			
Tipo de suelo	Suelo A-6	Suelo A-6	Suelo A-6 arcilloso
Aditivo	Hidróxido de calcio + cemento	Ceniza de madera + cemento	Zeolita natural
Porcentaje (%)	2 ; 3	5 ; 5	14
Precio unitario (Bs)	179,84	134,89	1637,406
Capacidad de soporte	CBR al 100%	15,79	35,87
	CBR al 95%	15	34,08

Fuente: Elaboración propia

**Gráfica 4.8:** Análisis comparativo de costos de alternativas de estabilizaciones.

Fuente: Elaboración propia

#### 4.5 Actividades de mayor impacto ambiental durante la estabilización

El análisis del impacto ambiental durante el proceso de estabilización con zeolita natural clinoptilolita se enfoca en identificar y detallar las actividades principales que podrían

generar efectos adversos sobre el medio ambiente.:

**Tabla 4.12:** Actividades que generan impacto ambiental al estabilizar.

<b>Impacto ambiental causado por la estabilización con zeolita natural</b>		
<b>Actividad</b>	<b>Tipo de Impacto Ambiental</b>	<b>Descripción del Impacto</b>
Extracción de zeolita natural	Degradación del paisaje, contaminación del aire	La extracción altera el paisaje natural y genera polvo, afectando la calidad del aire y la biodiversidad local.
Transporte de zeolita	Emisiones de gases, ruido	El transporte con maquinaria pesada emite gases de combustión (CO <sub>2</sub> , NO <sub>x</sub> ) y genera ruido, afectando la fauna y la calidad del aire.
Manipulación y mezcla del suelo	Emisión de partículas en suspensión	La manipulación del suelo durante la mezcla con zeolita libera partículas de polvo, afectando la calidad del aire y la salud de los trabajadores.
Uso de maquinaria pesada	Emisiones y contaminación por fluidos	La maquinaria utilizada emite gases contaminantes y existe riesgo de derrames de aceite y combustibles, afectando suelo y agua.
Disposición de residuos	Contaminación del suelo y agua	La disposición inadecuada de residuos sólidos, como exceso de zeolita o materiales contaminantes, puede contaminar los suelos y cuerpos de agua cercanos.

Fuente: Elaboración propia

#### 4.5.1 Análisis ambiental

Al realizar un análisis del impacto ambiental del proceso de estabilización con zeolita natural, se puede concluir que la afectación al medio ambiente es relativamente baja. Las actividades involucradas, aunque implican ciertos impactos, no suponen una explotación considerable de recursos naturales. El impacto más relevante está relacionado con las emisiones de polvo y gases durante la extracción y transporte de la zeolita, así como el uso de maquinaria pesada. Sin embargo, estos efectos son mitigables mediante la implementación de medidas adecuadas de control.

Los impactos más favorables de la utilización de la estabilización con zeolita natural son los siguientes:

Reducción de la explotación de nuevos bancos de materiales: Se disminuye la necesidad de extraer otros materiales estabilizadores, preservando así recursos naturales.

Reducción de los costos y volumen de transporte: La zeolita natural, al estar disponible en regiones cercanas, reduce significativamente los costos y el impacto ambiental asociado con el transporte, minimizando las emisiones de gases contaminantes.

Menor uso de materiales de préstamo: Se maximiza el uso del suelo existente en el sitio, evitando la necesidad de importar grandes cantidades de material nuevo desde las canteras.

Menor flujo de transporte: La disminución en el volumen de materiales que necesitan ser transportados reduce el número de vehículos en las vías, contribuyendo a un menor desgaste de la infraestructura vial y a la reducción de la huella de carbono asociada.

## **4.6 Análisis social**

El análisis del impacto social del proceso de estabilización con zeolita natural permite identificar tanto los efectos positivos como los potenciales desafíos que pueden presentarse durante la ejecución del proyecto. Este análisis se detalla a continuación:

### **4.6.1 Efectos directos**

La implementación de la estabilización con zeolita natural tiene el potencial de generar empleo directo e indirecto, lo cual contribuye al desarrollo económico de las comunidades aledañas. Se requieren trabajadores para la extracción de zeolita, el transporte, la preparación del suelo, y la supervisión de las obras, desde personal obrero hasta técnicos especializados. Se da preferencia a la mano de obra local, lo cual fomenta la participación de las comunidades y promueve la economía regional.

Además, la capacitación de los trabajadores es una actividad relevante en el proceso, ya que se brinda instrucción técnica a los empleados locales, lo que no solo contribuye a la ejecución del proyecto sino también al desarrollo de habilidades que les pueden proporcionar nuevas oportunidades laborales en el futuro.

Otro beneficio directo es la construcción de carreteras más duraderas y de mejor calidad, lo cual reduce la frecuencia de mantenimientos que implican cierres viales y restricciones

en el tránsito. Esto contribuye al mejoramiento del libre tránsito, beneficiando así a la población local y a los usuarios de las vías.

#### **4.6.2 Efectos indirectos**

**Efectos sobre la calidad de vida:** La mejora en la infraestructura vial gracias a la estabilización con zeolita natural tiene un impacto positivo en la calidad de vida de la población. Carreteras en buen estado permiten tiempos de viaje más cortos, menores costos de transporte y acceso más eficiente a servicios esenciales, lo cual aumenta el grado de satisfacción de los usuarios.

**Influencia en la distribución de la renta:** La mejora en la infraestructura de transporte facilita el acceso a nuevas oportunidades económicas para la población de diferentes regiones. Esto contribuye a la reducción de desigualdades, ya que un mayor número de personas puede beneficiar el crecimiento de la actividad económica.

**Influencia en los servicios de salud y educación:** Carreteras en buen estado también mejoran el acceso a servicios básicos, como hospitales y escuelas, lo que tiene un impacto significativo en la salud y la educación de la población, especialmente en áreas rurales.

**Influencia en la vulnerabilidad frente a los desastres:** Una infraestructura vial sólida y duradera es esencial para responder a emergencias de manera eficaz. La estabilización adecuada de las subrasantes con zeolita natural contribuye a la resiliencia de las carreteras, lo cual es fundamental en situaciones de desastres naturales o emergencias.

**Influencia en el alivio de la pobreza:** Las mejoras en la infraestructura de transporte, mediante la estabilización de suelos con zeolita natural, juegan un papel importante en el alivio de la pobreza. No solo mejoran la movilidad y el acceso a servicios básicos, sino que también generan empleo y permiten el crecimiento económico local, ofreciendo a la población más desfavorecida nuevas oportunidades de desarrollo y un incremento en el nivel de renta.

#### **4.5. Proceso Constructivo para la Estabilización de Subrasante con Zeolita Natural**

El procedimiento constructivo para estabilizar una subrasante con zeolita natural, basado en las especificaciones del Manual de Carreteras de la Administradora Boliviana de Carreteras (ABC), está diseñado para garantizar la estabilidad, capacidad portante y durabilidad de esta capa esencial en la infraestructura vial. A continuación, se describen las etapas principales del proceso, adaptadas a los porcentajes óptimos de estabilización definidos en este estudio:

##### **1. Limpieza y preparación del terreno:**

Remoción de vegetación, escombros y materiales inadecuados que puedan afectar la calidad y uniformidad de la subrasante.

Nivelación del terreno mediante cortes y rellenos, asegurando que la superficie cumpla con las cotas definidas en el diseño del proyecto.

Compactación inicial del suelo natural para proporcionar una base uniforme antes de la aplicación del estabilizante.

##### **2. Evaluación del suelo existente:**

Realización de pruebas de caracterización del suelo (granulometría, límites de Atterberg e índice de grupo) para determinar sus propiedades iniciales y aptitud como subrasante.

Evaluación de la capacidad portante mediante ensayos de CBR y determinación de la humedad óptima y densidad máxima seca mediante el Proctor Modificado.

##### **3. Preparación de la mezcla estabilizada:**

Para el suelo del Barrio 4 de marzo (limo arcilloso), se añade un 10,5% de zeolita natural al suelo seco, basado en el peso seco del material.

Para el suelo del Barrio Tarijeños en Progreso (arcilloso), se incorpora un 14% de zeolita natural, conforme al porcentaje óptimo determinado en los ensayos.

Mezcla homogénea de la zeolita natural con el suelo utilizando herramientas manuales o maquinaria adecuada, garantizando una distribución uniforme del estabilizante.

##### **4. Colocación del material estabilizado:**

Extendido del suelo estabilizado en capas controladas de entre 20 cm y 30 cm de espesor, según lo especificado en el diseño del proyecto.

Nivelación de cada capa con motoniveladoras para asegurar una superficie uniforme y dentro de las tolerancias definidas.

**5. Compactación de la subrasante estabilizada:**

Compactación de cada capa mediante rodillos vibratorios o neumáticos, ajustando la humedad del material al rango óptimo obtenido en el ensayo Proctor Modificado.

Verificación de la densidad mediante ensayos in situ, asegurando que cada capa alcance al menos el 100% de la densidad máxima seca.

**6. Verificación y pruebas de calidad:**

Inspección de la superficie terminada para garantizar que cumple con las especificaciones de nivelación y pendiente.

Realización de pruebas finales de CBR en el suelo estabilizado para confirmar que se alcanzan los valores mínimos requeridos para subrasantes, conforme a la tabla 2.4 del Capítulo II.

**7. Protección de la subrasante estabilizada:**

Evite la exposición prolongada a condiciones climáticas adversas, como lluvias intensas, que puedan comprometer la estabilidad del material estabilizado.

Aplicación de riego de protección, si es necesario, para evitar la erosión de la subrasante antes de la colocación de las capas superiores.

Consideraciones técnicas

Este método incorpora los porcentajes óptimos de 10,5% y 14% de zeolita natural, los cuales fueron determinados como ideales para mejorar las propiedades mecánicas de los suelos estudiados, asegurando que las subrasantes cumplan con los requisitos de estabilidad y capacidad portante exigidos por las normativas de vial de infraestructura.

La estabilización química con zeolita natural no solo mejora la capacidad portante de los suelos, sino que también minimiza los impactos ambientales al reducir la necesidad de materiales de préstamo y transporte adicional.

**CAPÍTULO V**  
**CONCLUSIONES Y**  
**RECOMENDACIONES**

## CAPÍTULO V

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 5.1 Conclusiones

- En el estudio se caracterizaron dos tipos de suelo con diferentes propiedades: Uno limo arcilloso y arcilloso. Esta distinción permitió comprender de manera más detallada el comportamiento de cada tipo de suelo bajo la influencia de la zeolita, logrando así una visión clara de su aplicación en distintas condiciones de subrasante.
- Se determinó un porcentaje óptimo de zeolita para cada tipo de suelo: 10,5% para el suelo limo arcilloso (Barrio 4 de marzo) y 14% para el suelo arcilloso (Barrio Tarijeños en Progreso). De la evaluación con diferentes porcentajes de zeolita, se generaron gráficos que muestran cómo se comporta cada tipo de suelo en términos de resistencia y estabilidad, facilitando su uso en diseños de pavimentos específicos.
- La aplicación de zeolita natural en la estabilización de suelos, considerando su contenido óptimo de humedad, evidencia una mejora significativa en sus propiedades mecánicas. Estos resultados respaldan la efectividad de la subrasante estabilizada con zeolita, asegurando un adecuado desempeño estructural y una mayor capacidad de soporte frente a las cargas transmitidas por las capas superiores del pavimento.
- Ambos tipos de suelo tratados con zeolita cumplieron con las especificaciones mínimas establecidas con un CBR mayor al 7%, demostrando que esta técnica es una alternativa viable para mejorar las propiedades de subrasantes en proyectos de infraestructura, incrementando la durabilidad y capacidad de soporte.

- En términos de costo, el valor estimado para estabilizar un metro cúbico de subrasante con el porcentaje óptimo de zeolita es de 186,679 \$US\$ para el suelo limo arcilloso y 234,922 \$US\$ para el suelo arcilloso. Estos costos fueron calculados considerando el espesor requerido para alcanzar la capacidad estructural especificada para las subrasantes en este tipo de aplicaciones.
- Para el suelo A-4, el costo de estabilización con zeolita natural es de 1301,154 Bs/m<sup>3</sup>, mientras que las alternativas tradicionales presentan costos significativamente menores: 204,71 Bs/m<sup>3</sup> para cal y 210,00 Bs/m<sup>3</sup> para emulsiones asfálticas. En el caso del suelo A-6, el costo con zeolita natural asciende a 1637,406 Bs/m<sup>3</sup>, frente a 179,84 Bs/m<sup>3</sup> para la estabilización con hidróxido de calcio + cemento y 134,89 Bs/m<sup>3</sup> para la combinación de ceniza de madera + cemento. Si bien la zeolita mejora la capacidad de soporte del suelo, su alto costo en comparación con métodos convencionales hace que su aplicación no sea económicamente viable en la mayoría de los proyectos viales. Aunque cumple con los requisitos mínimos de estabilización, la diferencia en desempeño frente a estabilizantes tradicionales no justifica la inversión adicional. Por lo tanto, su uso debe evaluarse con criterio técnico y financiero, priorizando alternativas más accesibles y con mejor relación costo-beneficio en la práctica de la ingeniería civil.
- Los costos referenciales fueron obtenidos a partir de investigaciones previas y fuentes especializadas, dado que la estabilización con zeolita natural aún no se encuentra ampliamente implementada a nivel local. Esta estimación preliminar permite contar con una base para evaluar su viabilidad económica en futuras aplicaciones, considerando tanto su desempeño técnico como su impacto en la planificación y ejecución de proyectos viales en la región.
- Aunque la zeolita natural no presenta ventajas económicas respecto a otros métodos de estabilización, sí ofrece beneficios en términos de sostenibilidad ambiental. Su uso reduce la necesidad de explotación de materiales de préstamo y el consumo de recursos naturales adicionales, lo que minimiza la degradación del

paisaje. Sin embargo, no se realizó una medición específica del impacto ambiental en la etapa constructiva, por lo que esta afirmación se basa en principios generales de sostenibilidad y estudios previos sobre estabilización de suelos.

## 5.2 Recomendaciones

Las siguientes recomendaciones se orientan a la optimización de la estabilización de suelos y la toma de decisiones en proyectos de infraestructura vial:

- La de un método de estabilización debe considerar no solo la mejora en la selección de capacidad de soporte del suelo, sino también su viabilidad económica y la disponibilidad de los materiales en el mercado. Si bien la zeolita cumple con los requisitos mínimos para la estabilización de subrasantes, su costo elevado hace que su implementación deba evaluarse con cautela en función del presupuesto disponible y las condiciones específicas del proyecto.
  - Se recomienda realizar un análisis detallado de costos antes de optar por la estabilización con zeolita natural, comparando su rendimiento con alternativas como la cal, el cemento u otros aditivos más accesibles y de mayor eficiencia estructural.
- a) Recomendación Técnica.** - Para la ejecución de ensayos de CBR en suelos estabilizados con zeolita, es fundamental respetar los tiempos de saturación sin exceder el límite de cuatro días. Un periodo prolongado de saturación puede generar desplazamientos del material en la parte inferior de los moldes, afectando la precisión de los resultados de resistencia.
- b) Recomendación Económica.** – Dado el alto costo de la zeolita natural en comparación con otros estabilizantes, se recomienda su uso solo en casos donde sus beneficios específicos, como la reducción del impacto ambiental, justifiquen la inversión.
- c) Recomendación Ambiental.** – La estabilización con zeolita contribuye a la reducción del uso de materiales de préstamo y a la disminución de impactos ambientales asociados con la extracción y el transporte de suelos. No obstante, es necesario complementar futuros estudios con mediciones directas del impacto ambiental en la etapa constructiva.
- d) Recomendación Social.** – En comunidades con acceso limitado a materiales tradicionales como la cal o el cemento, la zeolita puede representar una alternativa viable si se logra reducir su costo. Se recomienda fomentar investigaciones sobre métodos para optimizar su eficiencia y disminuir su precio de implementación.

**Recomendación final:** Se sugiere utilizar un 10,5% de zeolita para suelos limo arcillosos y un 14% para suelos arcillosos, ya que estos porcentajes han demostrado cumplir con los requisitos mínimos para la conformación de subrasantes en vías urbanas. Sin embargo, su aplicación debe ser evaluada caso por caso, considerando tanto su efectividad técnica como su factibilidad económica.