

## **CAPÍTULO I**

### **DISEÑO TEÓRICO Y METODOLÓGICO**

#### **1.1. INTRODUCCIÓN**

Es difícil encontrar suelos adecuados, en un lugar en específico, para un fin determinado dentro de la ingeniería civil. Esta situación abre obviamente tres posibilidades de decisión: Eliminar el material que este por debajo de las especificaciones solicitadas; sustituirlo por otro de características adecuadas o modificar las propiedades del material existente, para hacerlo capaz de cumplir los requerimientos exigidos.

En proyectos viales, la solución más utilizada consiste en reemplazar este tipo de suelos, y en algunas ocasiones se intenta mejorar las propiedades de los suelos finos con productos existentes en el mercado.

El autor propone una alternativa de modificar las propiedades del material existente para la utilización en proyectos viales, mediante el uso de un producto químico llamado soda cáustica(OHNa) utilizado comúnmente como producto de limpieza

La estabilización de un suelo es un proceso orientado hacia el mejoramiento integral de sus propiedades físico-mecánicas: el incremento de la resistencia al esfuerzo cortante, disminución de su compresibilidad y su permeabilidad.

Es en este sentido es que el presente trabajo de investigación pretende realizar un análisis en las mejoras de las propiedades físico-mecánicas con la adición de soda caustica, ya que este material es de fácil acceso en nuestro medio, lo que se traduce en una aplicación rápida y una opción segura para el manejo y aplicación de este producto en la estabilización de suelos.

La aplicación práctica será analizar el comportamiento físico-mecánico de los suelos finos mediante la adición de soda cáustica y compararlo con los requerimientos admisibles utilizados en los proyectos viales.

El aporte académico en esta investigación es de dar a conocer las mejoras adquiridas por parte de los suelos finos mediante un método de estabilización químico no convencional como es el de estabilización de suelos finos con soda cáustica.

## **1.2. JUSTIFICACIÓN**

### Técnica

La importancia de realizar un minucioso análisis de las mejoras que produce la soda cáustica en los suelos finos es para obtener un método de estabilización no convencional, así mismo implementar este método en proyecto viales, ya conocimiento de los beneficios que genera esta misma.

### Académica

En la presente investigación se pretende dar a conocer un método no convencional de estabilización de los suelos finos y coadyuvar a la información que existe sobre métodos de estabilización en suelos finos.

### Económico

La finalidad de esta investigación es familiarizarse con un método de estabilización de suelos finos no convencional con el cual se obtiene buenos resultados y a su vez es económicamente viable.

## **1.3. SITUACIÓN PROBLÉMICA**

Es un espacio de interrogantes que posibilite, tanto la conceptualización como la simbolización y aplicación significativa de los conceptos para plantear y resolver problemas.

### **1.3.1. Conceptualización puntual del objeto de estudio**

La utilización de suelos arcillosos es de primordial importancia para la construcción de subrasante en nuestro medio, ya que es la base del paquete estructural, motivo por el cual se busca una forma no convencional de estabilizar los suelos finos con soda cáustica, y así observar las mejoras físico-mecánicas producidas por el mismo.

### **1.3.2. Descripción del fenómeno ocurrido**

En la actualidad, en la ciudad de Tarija no se cuenta con conocimientos sobre las mejoras físico-mecánicas de los suelos arcillosos de baja plasticidad a través de la adición de soda cáustica (OHNa), por lo cual al no tener un conocimiento sobre la estabilización de suelos con este producto químico, que es utilizado en otros países del mundo entero como una

alternativa más, no se puede establecer si el mismo es rentable para su aplicación en nuestro medio, desde los puntos de vista técnicos, económicos y ambientales. Es así que nace la necesidad de conocer cuáles son sus beneficios, sus potencialidades, sus ventajas y desventajas, cuáles son las mejoras y los cambios que sufren sus propiedades físico-mecánicas mediante la aplicación de la soda cáustica

### **1.3.3. Breve explicación de la perspectiva de solución**

Se plantea la realización de un análisis de la aplicación de soda cáustica en suelos arcillosos de baja plasticidad, para identificar las mejoras físico-mecánicas al emplear este químico en nuestro medio.

## **1.4. DETERMINACIÓN DEL PROBLEMA**

### **1.4.1. Problema de investigación**

¿De qué manera la adición de soda caustica a suelos arcillosos de baja plasticidad, determinará las mejoras en sus propiedades físico-mecánicas?

## **1.5. OBJETIVOS**

### **1.5.1. Objetivo general**

Analizar las mejoras en las propiedades físico-mecánicas de suelos arcillosos de baja plasticidad, al añadir diferentes porcentajes de soda caustica, con el fin de obtener una alternativa constructiva en subrasantes mejoradas.

### **1.5.2. Objetivos específicos**

- Recopilar toda la información existente sobre la utilización de soda cáustica en nuestro medio.
- Ubicar de la zona de estudio, extraer muestras y elaborar registros de observación científica.
- Realizar ensayos de laboratorio con diferentes porcentajes de soda cáustica.
- Examinar las mejoras físico-mecánicas en los suelos arcillosos de baja plasticidad con la utilización de soda cáustica.
- Evaluar los objetivos y la hipótesis realizada en la utilización de soda cáustica.

## 1.6. FORMULACIÓN DE LA HIPÓTESIS

### 1.6.1. Hipótesis

Al incluir la soda cáustica en los suelos arcillosos de subrasantes se logrará mejorar sus propiedades físico-mecánicas de C.B.R. y Expansión.

## 1.7. IDENTIFICACIÓN DE VARIABLES

Se presenta a continuación las variables adoptadas:

### 1.7.1. Variable independiente

x1 = Porcentajes de soda cáustica (OHNa)

### 1.7.2. Variable dependiente

y1 = C.B.R. (California Bearing Ratio)

y2 = Expansión

### 1.7.3. Conceptualización y operacionalización de las variables

Tabla 1.7.1 Conceptualización de la variable dependiente

Variable	Conceptualización	Dimensión	Indicador	Valor/acción
Dependiente				
C.B.R.	Es la relación de la carga unitaria necesaria para lograr una cierta profundidad de penetración del pistón con respecto a la carga unitaria patrón requerida para obtener la misma profundidad de penetración en una muestra estándar.	Resistencia mecánica	Porcentajes (%)	Norma AASHTO
Expansion	Es la capacidad que posee el suelo de encogerse e hincharse bajo cambios en las condiciones de humedad.	Estabilidad volumétrica	Porcentajes (%)	Ensayo de C.B.R.

Fuente: Elaboración propia

## **1.8. DISEÑO METODOLÓGICO DE LA INVESTIGACIÓN**

### **1.8.1. Identificación del tipo de diseño de investigación**

#### **INVESTIGACIÓN EXPLICATIVA**

La investigación de tipo explicativa ya no solo describe el problema o fenómeno observado, sino que se acerca y busca explicar las causas que originaron la situación analizada.

En otras palabras, es la interpretación de una realidad o la explicación del por qué y para qué del objeto de estudio, a fin de ampliar el “¿qué?” de la investigación exploratoria y el “¿cómo?” de la investigación descriptiva.

La investigación de tipo explicativa busca determinar las causas en distintos tipos de estudio, estableciendo conclusiones y explicaciones para enriquecer o esclarecer las teorías, confirmando o no la tesis inicial.

El presente trabajo de investigación se enmarca dentro de la investigación explicativa.

### **1.8.2. Población y muestra**

El presente trabajo se identifica una población finita, la cual son los suelos arcillosos, en especial el tipo de suelo que se caracteriza por ser una arcilla de baja plasticidad “CL”.

### **1.8.3. Tamaño de muestra**

Para este trabajo se adopta el muestreo probabilístico por ser el más adecuado según los objetivos planteados.

Tabla 1.8.1 Cálculo de muestra

Ensayos	Ni	$\partial^2$	Ni x $\partial^2$	Wi	ni
Caracterización					
Granulometría	4	0.15	0.60	0.05	3
Densidad relativa	4	0.15	0.60	0.05	3
Límites de Atterberg	4	0.15	0.60	0.05	3
C.B.R.	3	0.15	0.45	0.03	2
Expansión	3	0.15	0.45	0.03	2
Pruebas					
Límites de Atterberg	4	0.15	0.60	0.05	3
Densidad relativa	4	0.15	0.60	0.05	3
C.B.R.	30	0.15	4.50	0.35	22
Expansión	30	0.15	4.50	0.35	22
Total	86		12.90	1.00	63

Fuente: Elaboración propia

Muestreo estratificado

$$n = \frac{\sum(N_i * \partial^2)}{\left[ N * \left( \frac{e}{Z} \right)^2 \right] + \frac{\sum N_i * \partial^2}{N}} = \frac{12.90}{\left[ 86 * \left( \frac{0.05}{1.96} \right)^2 \right] + \frac{12.90}{86}} = 63 \text{ ensayos}$$

Donde:

n = Número de ensayos total

Ni = Número de ensayo característico

e = Error esperado 0.05 %

Z = Valor de nivel de confianza al 95 %

$\sigma^2 = \text{Varianza}$

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

En el área de estudio se lleva a cabo un análisis previo de las características topográficas, geométricas, esto con el fin de definir los parámetros necesarios a emplear.

Se inspecciona toda el área de estudio, se registra y cuantifica los posibles puntos de extracción de muestra y las muestras extraídas de suelos en diversos sectores de toda el área.

Se realiza los ensayos respectivos para la caracterización del material extraído como ser granulométrica, ensayo de Límites de Atterberg, relación densidad-humedad y C.B.R.

Una vez obtenidas las características del material extraído, se propone diversos porcentajes de adición de soda cáustica para una estabilización de este. Posteriormente, se ejecuta ensayos los cuales darán resultados de las propiedades modificadas del suelo.

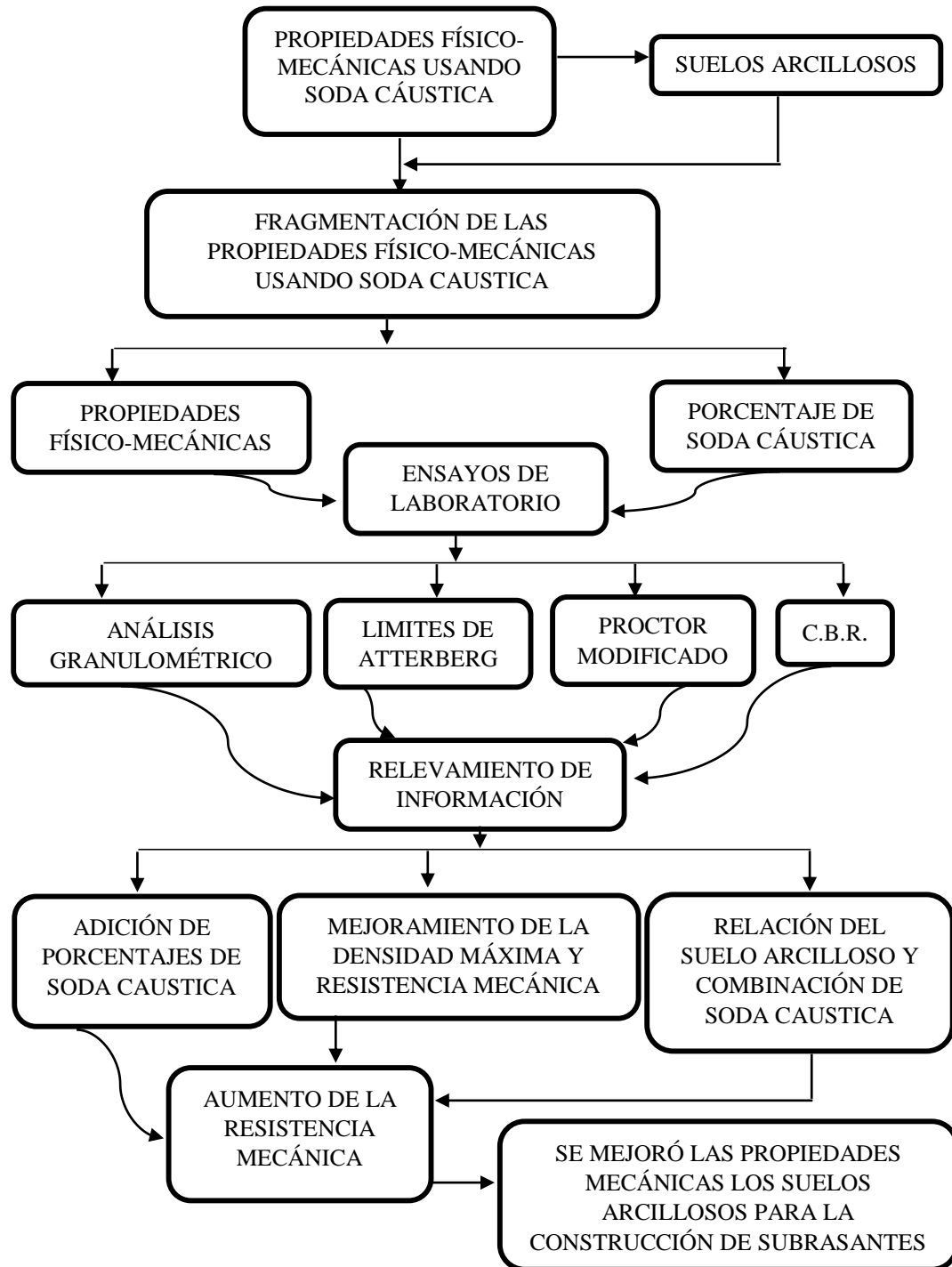
Finalmente, se realiza un análisis de las ventajas o desventajas obtenidas del suelo modificado en sus propiedades.

#### **1.8.5. Listado de actividades a realizar, junto a los insumos y medios utilizados**

- Instrumentos requeridos para la extracción de muestra previamente a ser analizadas las mejoras en las propiedades del suelo fino estabilizado para su uso en una futura conformación de subrasante en las carreteras.
- Pala, picota, vehículo para el transporte del material, metro, huincha, para medir longitudes y las áreas además de la ayuda tecnología del Google Earth Pro.
- Juego de tamices para ensayo de granulometría conforme a la norma AASHTO.
- Materiales y equipo para la realización de Límites de Atterberg.
- Materiales y equipo para la realización de Proctor Modificado(T-180).
- Materiales y equipo para la realización de C.B.R.
- Planillas de registro de todos los ensayos correspondientes a realizar y esquema de actividades en función a procedimiento definido por la perspectiva.

A continuación, se presenta una breve descripción en forma de esquema de todas las actividades a realizar de acuerdo con las normas consultadas y una pequeña descripción de los resultados esperados.

Figura 1.8.1 Esquema de planificación de actividades



Fuente: Elaboración propia



## **1.9. ALCANCE**

La siguiente investigación pretende explicar la existencia de mejoras en las propiedades físico-mecánicas de los suelos arcillosos de baja plasticidad, mediante un proceso de estabilización no convencional como es la estabilización química, utilizando como aditivo la soda cáustica (OHNa), con la finalidad de obtener mejoras en cuanto a la capacidad de deformación y resistencia que presenta el suelo analizado.

La base fundamental en la construcción de subrasantes son los suelos arcillosos de baja plasticidad, lo cual se definió una situación problemática enfocada a la estabilización de los mismos y además se propuso una hipótesis y objetivos orientados al tema de estabilización de suelos finos.

Se recabará la mayor información de las propiedades físico-mecánicas de los suelos finos y de la estabilización con el uso de la soda cáustica en nuestro medio.

En este proceso de estabilización se realizaron los ensayos permitidos a la caracterización del suelo y su presente modificación conforme a las normas de la Administradora Boliviana de Carreteras, además se sugirió porcentajes de dosificación de soda cáustica como ser 1 %, 5 %, 10 % y 20 %.

Los resultados obtenidos tendrán un proceso de análisis y evaluación, con el fin de proponer un porcentaje óptimo para su utilización en la construcción de subrasantes, el cual obtuvo resultados satisfactorios en cuanto a la resistencia y deformación que presenta el suelo en estudio.

## **CAPÍTULO II**

### **MARCO TEÓRICO DE LA INVESTIGACIÓN**

#### **2. EL SUELO**

Se refiere a los sedimentos no consolidados de partículas sólidas fruto de la alteración de las rocas, o los suelos transportados por agentes como el agua, el hielo o el viento, con la contribución de la gravedad como fuerza direccional selectiva y que puede tener, o no materia orgánica.

La mecánica de suelos estudia el comportamiento y las propiedades físicas del suelo cuando fuerzas y agentes externos actúan en la masa de suelo.

Por tanto, se pretende someter a un proceso de mejoramiento a los suelos arcillosos naturales con ciertos tratamientos para aprovechar sus mejores cualidades, 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. Se trata de obtener una capa de asiento del firme estable y durable, capaz de soportar los efectos del tránsito y las condiciones del clima más severas y por ende asegure geotécnicamente el comportamiento de la explanada.

#### **2.1. GENERALIDADES**

La mecánica de suelos es una rama de la ingeniería, que combina la física con las ciencias naturales para entender los diferentes tipos de suelos y cómo se comportarán principalmente al aplicar diferentes cargas sobre ellos; también se encarga de estudiar las propiedades físicas, químicas y mecánicas de cada suelo, para verificar que éste si es apto para la carga que se le desea imponer o si debe ser mejorado y de qué manera.

El suelo es el principal componente de la capa superficial de la corteza terrestre, este proviene de las rocas, que por el proceso de meteorización han sido desgastadas, fragmentadas, disueltas y han formado nuevos compuestos, durante muchos años. Según la composición mineralógica, la porosidad, el desgaste estructural, la resistencia al intemperismo de las rocas, las variaciones climáticas de una región a otra y la topografía, los procesos de desintegración de las rocas son distintos y, por tanto, llegan a formar suelos diferentes.

En la actualidad se tiene pleno conocimiento que la formación de suelos se da por desintegración mecánica, que comprende todo proceso de intemperización de las rocas por agentes físicos y la descomposición química que corresponde a los cambios en su constitución mineralógica. Por las condiciones mencionadas anteriormente se darán unas en mayor proporción que otras y darán origen a los suelos más superficiales. Estos últimos, serán denominados suelos residuales si se encuentran depositados en el mismo lugar de la roca de la que derivan, o se llaman suelos transportados, pues se deben a que han sido removidos por el agua o el viento, y se han depositado en otra zona diferente a la de su roca madre.

Dentro del estudio de los suelos para fines de ingeniería, se definen las características físicas, que son el color, olor, densidad, entre otras; y las características mecánicas, que son las que definen el comportamiento en términos de esfuerzos, fricción, cohesión, coeficiente de comparación, etc.

## **2.2. CLASIFICACIÓN DE SUELOS**

### **2.2.1. Clasificación de suelos AASHTO**

De acuerdo con este sistema y con base en su comportamiento, los suelos están clasificados en ocho grupos designados por los símbolos del A-1 al A-8.

En este sistema las clasificaciones de los suelos inorgánicos se clasifican en 7 grupos que van de A-1 al A-7, estos a su vez se dividen en un total de doce subgrupos. Los suelos con elevada proporción de materia orgánica se clasifican como A-8.

A continuación, se presenta una descripción de los grupos de clasificación:

**Suelos granulares:** Son aquellos que tienen 35 % o menos, del material fino que pasa el tamiz N° 200. Estos suelos forman los grupos A-1, A-2 y A-3.

**Grupo A-1:** El material de este grupo comprende las mezclas bien graduadas, compuestas de fragmentos de piedra, grava, arena y material ligante poco plástico.

**Subgrupo A-1a:** Comprende aquellos materiales formados predominantemente por piedra o grava, con o sin material ligante bien graduado.

Subgrupo A-1b: Incluye aquellos materiales formados predominantemente por arena gruesa bien gradada, con o sin litigante.

Grupo A-2: Comprende una gran variedad de material granular que contiene menos del 35 % de material fino.

Subgrupos A-4 y A-2-5: Pertenecen a estos subgrupos aquellos materiales cuyo contenido de material fino es igual o menor al 35 % y cuya fracción que pasa el tamiz N° 40, tiene las mismas características de los suelos A-4 y A-5, respectivamente.

Subgrupos A-2-6 y 1-2-7: Los materiales de estos subgrupos son semejantes a los anteriores, pero la fracción que pasa el tamiz N° 40 tiene las mismas características de los suelos A-6 y A-7, respectivamente.

Grupo A-3: En este grupo se encuentran incluidas las arenas finas, de playa aquella con poca cantidad de limo que no tengan plasticidad. Este grupo incluye, además, las arenas de río que contengan poca grava y arena gruesa.

Suelos finos limo arcillosos: Contienen más del 35 % del material fino que pasa el tamiz N° 200. Estos suelos constituyen los grupos A-4, A-5, A-6 y A-7.

Grupo A-4: Pertenecen a este grupo suelos limosos poco o nada plásticos, que tienen un 75 % o más del material fino que pasa el tamiz N° 200. Además, se incluyen en este grupo las mezclas de limo con grava y arena hasta en un 64 %.

Grupo A-5: Los suelos comprendidos en este grupo son semejantes a los del anterior, pero contienen material micáceo o diatomáceo. Son elásticos y tienen un límite líquido elevado.

Grupo A-6: El material típico de este grupo es la arcilla plástica. Por lo menos el 75 % de estos suelos debe pasar el tamiz N° 200. Pero se incluyen también las mezclas arcillo-arenosas cuyo porcentaje de arena y grava sea inferior al 64 %. Estos materiales presentan, generalmente, grandes cambios de volumen entre los estados seco y húmedo.

Grupo A-7: Los suelos de este grupo son semejantes a los suelos A-6 pero son elásticos. Sus límites líquidos son elevados.

Grupo A-7-5: Incluye aquellos materiales cuyos índices de plasticidad no son muy altos con respecto a sus límites líquidos.

Subgrupo A-7-6: Comprende aquellos suelos cuyos índices de plasticidad son muy elevados con respecto a sus límites líquidos y que, además, experimentan cambios de volumen extremadamente grandes.

Tabla 2.2.1 Clasificación según AASHTO

Sistema de clasificación AASHTO											
Clasificación General	Suelos granulares ( $\leq 35\%$ pasa tamiz N° 200)							Suelos finos ( $> 35\%$ pasa tamiz N° 200)			
Grupo	A-1	A-1b	A-2					A-4	A-5	A-6	A-7
Sub-Grupo	A-1a		A-3	A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7				A-7-5 A-7-6
Porcentaje que pasa tamiz:											
N° 10 (2 mm)	50 máx.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
N° 40 (0.425mm)	30 máx.	50 máx.	51 máx.	-	-	-	-	-	-	-	
N° 200 (0.075mm)	15 máx.	25 máx.	10 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.	36 min	36 min	36 min	
Características del material que pasa el tamiz N° 40											
Límite Líquido	-	-	40 máx.	41 min	40 máx.	41 min	41 min	40 máx.	41 min	40 máx.	41 min
Índice Plasticidad	6 máx.	No Plástico	10 máx.	10 máx.	11 min	11 min	11 min	10 máx.	10 máx.	11 min	$\geq 11$
Descripción	Gravas y arenas	Arena fina	Gravas y arenas limosas y arcillosas			Suelos limosos		Suelos arcillosos			
Terreno de fundación	Excelente a bueno Bueno a regular						Regular a malo				

Fuente: Ingeniería de Pavimentos Tomo I-Alfonso Montejó Fonseca

### 2.2.2. Clasificación Unificada de Suelos (S.U.C.S.)

Esta clasificación divide los suelos en:

- Suelos de grano grueso
- Suelos de grano fino

Los suelos se designan por símbolos de grupo. El símbolo de cada grupo consta de un prefijo y un sufijo. Los prefijos son las iniciales de los nombres ingleses de los seis

principales tipos de suelos (grava, arena, limo, arcilla, suelos orgánicos de grano fino y turba), mientras que los sufijos indican subdivisiones en dichos grupos.

### **Suelos gruesos**

Se dividen en gravas (G) y arenas (S) y se separan con el tamiz N° 4, de manera que un suelo pertenece al grupo G, si más del 50 % del peso de su fracción gruesa queda retenido en el tamiz N° 4 y pertenecerá al grupo S, en caso contrario.

Tanto las gravas como las arenas se dividen en cuatro grupos (GW, GP, GM, GC) y (SW, SP, SM, SC), respectivamente.

### **Gravas**

En el símbolo GW, el prefijo G (gravel) se refiere a las gravas y W (well graded) quiere decir bien graduado, de igual modo el símbolo GP indica gravas pobremente graduadas o mal graduadas (poorly graded gravel), en el símbolo GM indica gravas limosas, en la que el sufijo M proviene del suelo mo, y el símbolo GC indica gravas arcillosas.

### **Arenas**

Si el porcentaje de finos, contenido en la arena, es mayor del 12 %, la arena puede ser arcillosa (SC), si los finos son arcilla, o limosa (SM) si los son, y si el porcentaje de finos esta entre 5 % y 12 % se usa símbolo doble, por ejemplo, SP-SM.

### **Suelos finos**

El sistema unificado considera los suelos finos divididos en tres grupos: limos inorgánicos (M), arcillas inorgánicas (C) y limos y arcillas orgánicas (O). Cada uno de estos suelos se subdivide a su vez, según su límite líquido, en dos grupos cuya frontera es L.L. = 50 %. Si el límite líquido del suelo es menor de 50 % se añade la letra L (Low Compresibility), y si es mayor a 50 % se añade la letra H (High Compresibility), obteniéndose de este modo los siguientes tipos de suelos:

ML = Limos inorgánicos de baja compresibilidad.

OL = Limos y arcillas orgánicas de baja compresibilidad.

CL = Arcillas inorgánicas de baja compresibilidad.

CH = Arcillas inorgánicas de alta compresibilidad.

MH = Limos orgánicos de alta compresibilidad.

OH = Arcillas y limos orgánicos de alta compresibilidad.

La clasificación de los suelos finos se hace con la Carta de Plasticidad.

Tabla 2.2.2 Clasificación S.U.C.S.-grano grueso

Sistema unificado de clasificación de suelos (S.U.C.S.)							
Gruesos (< 50 % pasa 0.08 mm)							
Tipo de Suelo	Símbolo	% pasa 5 mm.***	% pasa 0.08 mm.***	CU	CC	** IP	
Gravas	GW	< 50	< 5	> 4	1 a 3		
	GP			≤ 6	<1 ó >3		
	GM		> 12				<0.73(wl-20) ó < 4
	GC						>0.73(wl-20) ó > 4
Arenas	SW	> 50	< 5	> 6	1 a 3		
	SP			≤ 6	<1 ó >3		
	SM		> 12				<0.73(wl-20) ó < 4
	SC						>0.73(wl-20) y > 4
*Entre 50 y 12% usar símbolo doble como GW-GC, GP-GM, SW-SM, SP-SC							
***respecto a la fracción retenida en el tamiz 0.080 mm.							
** Si IP ≈ 0.73 (LL-20) o si IP entre 4 y 7 e IP > 0.73 (LL-20), usar símbolo doble: GM-GC, SM-SC.							
En casos dudosos favorecer clasificación menos plástica Ej.: GW-GM en vez de GW-GC.							
Cu = (D60) / (D10)				Cc = (D30²) / (D60*D10)			

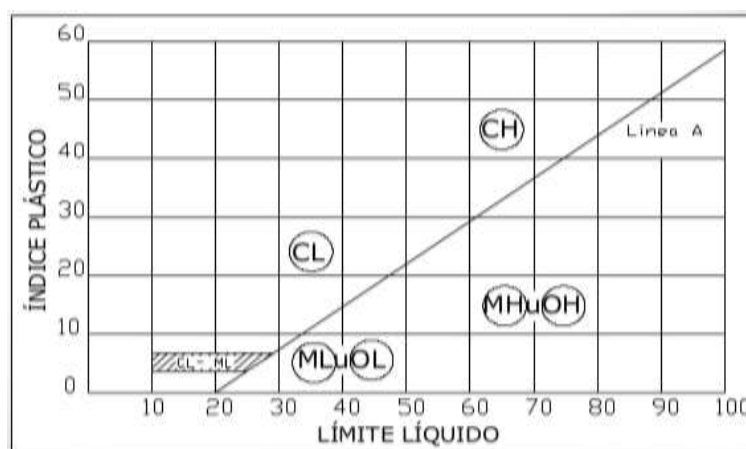
Fuente: Ingeniería de Pavimentos Tomo I-Alfonso Montejo Fonseca

Tabla 2.2.3 Clasificación S.U.C.S-grano fino

Sistema unificado de clasificación de suelos (S.U.C.S.)			
Finos ( $\geq 50$ % pasa 0.08 mm)			
Tipo de Suelo	Símbolo	Límite líquido LL	Índice de Plasticidad IP
Limos inorgánicos	ML	< 50	<0.73(WI-20) ó < 4
	MH	> 50	<0.73(WI-20)
Arcillas inorgánicas	CL	< 50	>0.73(WI-20) y >7
	CH	> 50	>0.73 (WI-20)
Limos y arcillas orgánicos	OL	< 50	**LL seco al horno $\leq 75\%$ de LL seco al aire
	OH	> 50	
Turba	Pt	Materia orgánica fibrosa se carboniza, se quema o se pone incandescente.	
Si $IP \approx 0.73 (LL - 20)$ o si IP entre 4 y 7 e $IP > 0.73 (LL - 20)$ , usar símbolo doble: CL-ML, CH-OH			
** Si tiene olor orgánico debe determinarse adicionalmente LL seco al horno.			
En casos dudosos favorecer clasificación más plástica Ej.: CH-MH en vez de CL-ML			
Si LL = 50; CL-CH o ML-MH			

Fuente: Ingeniería de Pavimentos Tomo I-Alfonso Montejó Fonseca

Tabla 2.2.4 Carta de Plasticidad



Fuente: Ingeniería de Pavimentos Tomo I-Alfonso Montejó Fonseca



### 2.3. PROPIEDADES FÍSICAS DEL SUELO

Como se ha explicado, el suelo es una mezcla de materiales sólidos, líquidos (agua) y gaseosos (aire). La proporción de los componentes determina una serie de propiedades que se conocen como propiedades físicas del suelo: textura, color, permeabilidad, porosidad, consistencia.

#### **Textura**

La textura de un suelo es la proporción de los tamaños de los grupos de partículas que lo constituyen y está relacionada con el tamaño de las partículas de los minerales que lo forman y se refiere a la proporción relativa de los tamaños de varios grupos de partículas de un suelo. Para el estudio de la textura del suelo se deben considerar que está formado por tres fases: sólida, líquida y gaseosa. La fase sólida constituye cerca del 50 % del volumen de la mayor parte de los suelos superficiales y consta de una mezcla de partículas inorgánicas y orgánicas cuyo tamaño y forma varían considerablemente. La distribución proporcional de los diferentes tamaños de partículas minerales determina la textura de un determinado suelo. La textura del suelo se considera una propiedad básica porque los tamaños de las partículas minerales y la proporción relativa de los grupos por tamaños varían considerablemente entre los suelos, pero no se alteran fácilmente en un determinado suelo.

De este modo la textura indica la proporción de las partículas fundamentales del suelo: arcilla, limo y arena, que se pueden agrupar en fina, media y gruesa. El diámetro de las partículas de arcilla es menor de 0.002 mm, las de limo están entre 0.002 y 0.05 mm y las de arena son entre 0.05 y 2.0 mm. La textura, además influye en la cantidad y disponibilidad de agua, así como en la aireación y drenaje.

**Suelos de textura gruesa.** Son los suelos con más de 50 % de arena, pero contienen menos del 20 % de arcilla. Cuentan con una baja capacidad para retener agua. La gran cantidad de poros grandes y bajo contenido de arcilla provoca que se pierda más fácilmente agua, especialmente nitrógeno.

**Suelos de textura media.** Son suelos con buena aireación y drenaje. Generalmente tienen menos de 35 a 40 % de arcilla y menos de 50 % de arena. Estos suelos pueden o no ser

fácilmente desmenuzables, pero a medida que la proporción de limo sea mayor, el potencial de compactación también se incrementará.

**Suelos de textura fina o pesada.** Son suelos con más de 40 % de arcilla, aunque también se pueden agrupar aquellos con más de 60 % de limo. Presentan alta capacidad de retención de agua.

Tabla 2.3.1 Tamaño de partículas del suelo

Nombre de la partícula límite del diámetro en milímetros	Tamaño
Arena	0.05 a 2.0
Muy gruesa	1.0 a 2.0
Gruesa	0.5 a 1.0
Mediana	0.25 a 0.5
Fina	0.10 a 0.25
Muy fina	0.05 a 0.10
Limo	0.002 a 0.05
Arcilla	menor de 0.002

Fuente: Mecánica de suelos, Prof. Alba Yajaira Sánchez Delgado

Figura 2.3.1 Textura de la muestra



Fuente: Elaboración propia

## **Color**

El color del suelo depende de sus componentes y puede usarse como una medida indirecta de ciertas propiedades. El color en sí mismo es de poca relevancia: su verdadera importancia radica en que el suelo tiene un conjunto de atributos que de alguna forma se relacionan con el color, siendo este diferente entre horizontes y entre distintas clases de suelos.

### **Factores que influyen en el color**

La calidad e intensidad de la luz afecta la cantidad y calidad de la luz reflejada de la muestra hacia el ojo. Se recomienda tomar el color a campo abierto, con incidencia directa de la luz natural sobre la hoja de la tabla Munsell, utilizando preferiblemente las horas del mediodía; cuando esto no es posible, se sugiere tomar muestras para determinar posteriormente el color.

La rugosidad de la superficie reflectora, que afecta la cantidad de luz reflejada hacia el ojo, en especial si la luz incidente cae en un ángulo agudo. Se recomienda usar, en lo posible, un ángulo recto para la luz incidente.

El color fluctúa dependiendo del contenido de humedad; por ello se acostumbra a tomar el color bajo dos condiciones: suelo seco (seco al aire) y suelo húmedo. La condición de suelo seco o suelo húmedo se establece sobre la base que, en ambos casos, el nivel óptimo se alcanza cuando al humedecer o secar la muestra no ocurren más cambios en el color.

### **Interpretación del color del suelo**

El color del suelo puede ser utilizado como una clave del contenido de ciertos minerales en el suelo, basado en que los minerales férricos proveen la mayoría y la mayor variedad de pigmentos al suelo

Tabla 2.3.2 Colores asociados con los componentes minerales del suelo

Componente	Formula	Color
Goetita	FeO OH	amarillo
Goetita	FeO OH	marrón fuerte
Hematita	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	rojo
Hematita	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	rojo
Lepidocrocita	FeO OH	amarillo rojizo
Lepidocrocita	FeO OH	rojo
Ferrihidrita	Fe (OH) <sub>3</sub>	rojo oscuro
Glauconita	K(Si <sub>x</sub> Al <sub>4-x</sub> ) (Al,Fe,Mg)O <sub>10</sub> (OH) <sub>2</sub>	gris oscuro
Maghernita	-Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	rojo
Sulfuro de hierro	FeS	negro
Pirita	FeS <sub>2</sub>	negro (metálico)
Jarositita	K Fe <sub>3</sub> (OH) <sub>6</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub>	amarillo pálido
Humus		negro
Calcita	CaCO <sub>3</sub>	blanco
Dolomita	CaMg (CO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	blanco
Yeso	CaSO <sub>4</sub> . 2H <sub>2</sub> O	marrón muy pálido
Cuarzo	SiO <sub>2</sub>	gris claro

Fuente: NRCS-USDA

Sobre la base del origen de los pigmentos del suelo y su relación con determinadas condiciones ambientales, la variedad de colores es la siguiente:

**Color negro:** Se asocia a la incorporación de materia orgánica que se descompone en humus que da la coloración negra al suelo. Este color ha sido asociado con niveles altos de materia orgánica en el suelo, condiciones de buena fertilidad, en especial presencia de cationes tales como el Ca<sup>2+</sup> y Mg<sup>2+</sup> y K<sup>+</sup>; colateralmente tiene asociado otras condiciones físicas relacionadas con la materia orgánica, tal como la presencia de una buena estructuración del suelo y rica actividad biológica; en otras oportunidades, cuando hay acumulación de Na<sup>+</sup>, por ser este un agente dispersante, el suelo, aún con muy bajos niveles de materia orgánica, adquiere la coloración negra, pero tiene como condición asociada una muy mala condición estructural. En resumen, este color por lo general está asociado a la presencia de:

Carbonatos de  $\text{Ca}^{2+}$  o  $\text{Mg}^{2+}$  más materia orgánica altamente descompuesta.

Otros cationes ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ) más materia orgánica altamente descompuesta.

**Color rojo:** Se asocia a procesos de alteración de los materiales parentales bajo condiciones de alta temperatura, baja actividad del agua, rápida incorporación de materia orgánica, alta liberación de Fe de las rocas; es indicativo de condiciones de alta meteorización; se asocia a niveles bajos de fertilidad del suelo, pH ácidos y ambientes donde predominan los procesos de oxidación. En términos generales se vincula con la presencia de:

Óxidos de  $\text{Fe}^{3+}$  (Tabla 2.3.2), como es el caso de la hematita cuyo nombre es de origen griego con el significado de "parecido a la sangre".

**Color amarillo a marrón amarillento claro:** Por lo general, es indicativo de meteorización bajo ambientes aeróbicos (oxidación), ocurre como en el caso de la goetita, donde cristales grandes de este mineral confieren una pigmentación amarilla al suelo, mientras que cristales pequeños de este mineral confieren tonalidades de color marrón; más frecuentemente, estos colores asociados a la goetita ocurren en climas templados. Se relaciona con condiciones de media a baja fertilidad del suelo. En general, se asocia con la presencia de:

Óxidos hidratados de  $\text{Fe}^{3+}$

**Color marrón:** este color está muy asociado a estados iniciales a intermedios de alteración del suelo; se relaciona con condiciones de niveles medios a bajos de materia orgánica y un rango muy variable de fertilidad. En general, se asocia con la ocurrencia de:

Materia orgánica ácida parcialmente descompuesta.

Combinaciones de óxidos de Fe más materiales orgánicos.

**Color blanco o ausencia de color:** Se debe fundamentalmente a la acumulación de ciertos minerales o elementos que tienen coloración blanca, como es el caso de calcita, dolomita y yeso, así como algunos silicatos y sales. En otras ocasiones, es consecuencia de la

remoción de componentes del suelo por diversos procesos, en cuyo caso el suelo adquiere el color de los elementos remanentes. En general, se asocia con la presencia de:

Óxidos de Al y silicatos (caolinita, gibsita, bauxita).

Sílice ( $\text{SiO}_2$ ).

Tierras alcalinas ( $\text{CaCO}_3$ ,  $\text{MgCO}_3$ )

Yeso ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ).

Sales altamente solubles (cloruros, nitratos de  $\text{Na}^+$  y  $\text{K}^+$ )

**Color gris:** Puede ser indicativo del ambiente anaeróbico. Este ambiente ocurre cuando el suelo se satura con agua, siendo desplazado o agotado el oxígeno del espacio poroso del suelo. Bajo estas condiciones las bacterias anaeróbicas utilizan el Fe férrico ( $\text{Fe}^{3+}$ ) presente en minerales como la goetita y la hematita como un aceptor de electrones en su metabolismo. En este proceso se genera la forma reducida del ion que es Fe ferroso ( $\text{Fe}^{2+}$ ) y es soluble en agua e incoloro. Otras bacterias anaeróbicas utilizan  $\text{Mn}^{4+}$  como aceptor de electrones, reduciéndose a su forma incolora soluble en agua  $\text{Mn}^{2+}$ . La pérdida de pigmentos deja un color gris en la superficie del mineral y si la saturación con agua se prolonga por largos períodos, la zona completa adquiere la coloración gris. Cuando cesa la saturación con agua la forma reducida del Fe se oxida nuevamente, generándose colores característicos, como es el moteado anaranjado de la lepidocrocita (tiene la misma fórmula de la goetita, pero difieren en la estructura del cristal) en las grietas del suelo. Si el suelo se airea rápidamente se genera el moteado rojo brillante propio de la ferrihidrita en los poros y grieta; este mineral no es estable y, en consecuencia, se transforma en lepidocrocita con el tiempo.

**Color verde:** En algunos suelos bajo condiciones de mal drenaje se genera este color, como es el caso de los suelos lacustrinos; estos suelos están constituidos por materiales altamente calcáreos que se ubican en el denominado pantano lacustrino, distribuido en forma concéntrica alrededor del lago. Estos materiales calcáreos, bajo un ambiente anaeróbico, generan el color verde que se transforma en blanco de forma irreversible una vez que se oxida. También se asocia con la ocurrencia de:

Óxidos  $\text{Fe}^{2+}$  (incompletamente oxidados)

**Color azulado:** En zonas costeras, deltaicas o pantanosas donde hay presencia del anión sulfato, y existen condiciones de reducción (saturación con agua y agotamiento del oxígeno), este anión es utilizado por las bacterias anaeróbicas como aceptor de electrones, liberándose  $S^{2-}$ , y se combina con  $Fe^{2+}$  para precipitarse como FeS que es de color negro, con el tiempo se transforma en pirita ( $FeS_2$ ) que da un color azulado metálico. Si estos suelos son drenados y aireados se forma la jarosita, que posee un pigmento amarillo pálido muy característico. Asociado a ello los suelos se hacen muy ácidos (pH 2.5 a 3.5), convirtiéndose en suelos sulfato-ácidos que son muy corrosivos y limitan considerablemente el crecimiento de la mayoría de las plantas. Adicionalmente, esta coloración se asocia con la presencia de:

Óxidos hidratados de Al (Aloisita)

Fosfatos ferrosos hidratados (Vivianita)

El color es la expresión de diversos procesos químicos que actúan en el suelo. Estos procesos incluyen la meteorización de los materiales geológicos, la acción química de la oxido-reducción sobre los minerales del suelo, especialmente aquellos que contienen Fe y Mn, y la bioquímica de la descomposición de la materia orgánica. Otros aspectos de la naturaleza, como el clima, el medio biofísico y la geología ejercen su influencia sobre la intensidad y condiciones bajo las cuales estas reacciones químicas ocurren.

La medición del color del suelo se realiza con un sistema estandarizado basado en la “Tabla de colores Munsell”. En esta tabla se miden los tres componentes del color:

Figura 2.3.2 Tabla de colores Munsell



Fuente: Mecánica de Suelos-Alba Sánchez Delgado

## **Permeabilidad**

Un material se dice que es permeable cuando permite el paso de los fluidos a través de sus poros. Tratándose de suelos, se dice que éstos son permeables cuando tienen la propiedad de permitir el paso del agua a través de sus vacíos.

No todos los suelos tienen la misma permeabilidad; de ahí que se los haya dividido en suelos permeables y suelos impermeables. Se llama impermeables a aquellos (generalmente arcillosos) en los cuales la cantidad de escurrimiento del agua es pequeña y lenta.

Dado que un suelo presenta una maraña de vacíos, de tamaño, forma y distribución compleja y variada, la medida del escurrimiento del agua a través de su masa es mucho más complicada que en un tubo u orificio de forma y dimensión conocidas.

En algunos casos, para facilitar el drenaje, es conveniente tener un suelo permeable, especialmente en la construcción de las bases y subbases de pavimento. En los suelos permeables, los asentamientos no son peligrosos, pues su consolidación es rápida a causa del escape fácil del agua a través de sus poros.

Los factores que afectan a la permeabilidad del suelo, en ocasiones, se trata de factores en extremo localizados como fisuras y cárcavas, y es difícil hallar valores representativos de la permeabilidad a partir de mediciones reales.

Un estudio serio de los perfiles de suelo proporciona una indispensable comprobación de dichas mediciones. Las observaciones sobre la textura del suelo, su estructura, consistencia, color y manchas de color, la disposición por capas, los poros visibles y la profundidad de las capas impermeables como la roca madre y la capa de arcilla, constituyen la base para decidir si es probable que las mediciones de la permeabilidad sean representativas.

El tamaño de los poros del suelo reviste gran importancia con respecto a la tasa de filtración (movimiento del agua hacia dentro del suelo) y a la tasa de percolación (movimiento del agua a través del suelo). El tamaño y el número de los poros guardan estrecha relación con la textura y la estructura del suelo y también influyen en su permeabilidad.



Tabla 2.3.3 Clasificación de permeabilidad (cm/h)

Velocidad	Tiempo
Muy lenta	Menos de 0.15
Lenta	0.15 a 0.50
Relativamente lenta	0.5 – 2.0
Moderada	2.0 – 6.5
Relativamente rápida	6.5 – 15.0
Rápida	15 a 25
Muy rápida	Mas de 25

Fuente: Mecánica de Suelos-Alba Sánchez Delgado

### Porosidad

La porosidad o fracción de huecos es una medida de espacios vacíos en un material, y es una fracción del volumen de huecos sobre el volumen total, entre 0 - 1, o como un porcentaje entre 0 - 100 %. Así los poros en el suelo se distinguen en: macroscópicos y microscópicos.

Los primeros son de notables dimensiones, y están generalmente llenos de aire, en efecto, el agua los atraviesa rápidamente, impulsada por la fuerza de la gravedad. Los segundos en cambio están ocupados en gran parte por agua retenida por las fuerzas capilares.

Los terrenos arenosos son ricos en macro poros, permitiendo un rápido pasaje del agua, pero tienen una muy baja capacidad de retener el agua, mientras que los suelos arcillosos son ricos en microporos, y pueden manifestar una escasa aeración, pero tienen una elevada capacidad de retención del agua.

La porosidad puede ser expresada con la relación:

$$V = \frac{V_e}{V}$$

Donde:

$V_e$  = Volumen de espacios vacíos, comprendiendo los que están ocupados por gases o líquidos

V = Volumen total de la muestra, comprendiendo sólidos, líquidos y gases

La porosidad puede ser determinada por la fórmula:

$$P = \frac{S - S_a}{S} * 100$$

Donde:

P = Porosidad en porcentaje del volumen total de la muestra

S = Densidad real del suelo

Sa = Densidad aparente del suelo

En líneas generales la porosidad varía dentro de los siguientes límites:

Suelos ligeros = 30 – 45 %

Suelos medios = 45 – 55 %

Suelos pesados = 50 – 65 %

Suelos turbosos = 75 – 90 %

### **Consistencia**

La consistencia es la característica física que gobierna las fuerzas de cohesión-adhesión, responsables de la resistencia del suelo a ser moldeado o roto. Dichas fuerzas dependen del contenido de humedad; por esta razón, la consistencia se debe expresar en términos de seco, húmedo y mojado. Se refiere a las fuerzas que permiten que las partículas se mantengan unidas; se puede definir como la resistencia que ofrece la masa de suelo a ser deformada o amasada.

Las fuerzas que causan la consistencia son: cohesión y adhesión.

**Cohesión:** La cohesión del suelo se refiere a la capacidad que tienen las partículas del suelo de permanecer unidas como conjunto, como resultado de la trabazón conjunta o las microestructuras existentes en el suelo.

Esta fuerza es debida a la atracción molecular, en razón a que las partículas de arcilla presentan carga superficial, por una parte, y la atracción de masas por las fuerzas. Otros factores tales como compuestos orgánicos, carbonatos de calcio y óxidos de hierro y aluminio son agentes que integran el mantenimiento conjunto de las partículas. La cohesión entonces es la atracción entre partículas de la misma naturaleza.

**Adhesión:** Se debe a la tensión superficial que se presenta entre las partículas de suelo y las moléculas de agua. Sin embargo, cuando el contenido de agua aumenta, excesivamente, la adhesión tiende a disminuir. El efecto de la adhesión es mantener unidas las partículas, por lo cual, depende de la proporción agua/aire. De acuerdo, con lo anteriormente expuesto se puede afirmar que la consistencia del suelo posee dos puntos máximos; uno cuando está en estado seco debido a cohesión y otro húmedo que depende de la adhesión.

#### **2.4. LA SUBRASANTE**

La subrasante es la superficie terminada de la carretera a nivel de movimiento de tierras (corte y relleno), sobre la cual se coloca la estructura del pavimento o afirmado.

La subrasante es el asiento directo de la estructura del pavimento y forma parte del prisma de la carretera que se construye entre el terreno natural allanado o explanada y la estructura del pavimento. La subrasante es la capa superior del terraplén o el fondo de las excavaciones en terreno natural, que soportará la estructura del pavimento, y está conformada por suelos seleccionados de características aceptables y compactados por capas para constituir un cuerpo estable en óptimo estado, de tal manera que no se vea afectada por la carga de diseño que proviene del tránsito. La subrasante puede estar constituida por suelos en su estado natural, o por éstos con algún proceso de mejoramiento tal como la estabilización mecánica, la estabilización física-química con aditivos como el cemento Portland, la cal, el asfalto, entre otras.

El factor más importante en la determinación de los espesores de diseño del pavimento es la respuesta del suelo de subrasante ante las cargas del tránsito. De la calidad que tenga esta capa dependerán, en gran parte, los espesores sean de un pavimento rígido o flexible. Del estudio geotécnico se determinan las características físico-mecánicas de la subrasante, y se determinan la capacidad de soporte o resistencia a la deformación por

esfuerzo cortante bajo las cargas del tránsito. La subrasante es la capa más importante para el diseño de una estructura de pavimentos, ya que es esta la que va a dar soporte a la estructura.

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

#### 2.4.1. Categorías de la subrasante

Se identifican seis categorías de subrasante:

Tabla 2.4.1 Categorías de subrasante

Categorías de subrasante	C.B.R.
S0 : Subrasante inadecuada	C.B.R. < 3 %
S1 : Subrasante pobre	De C.B.R. $\geq$ 3 % a C.B.R. < 6 %
S2 : Subrasante regular	De C.B.R. $\geq$ 6 % a C.B.R. < 10 %
S3 : Subrasante buena	De C.B.R. $\geq$ 10 % a C.B.R. < 20 %
S4 : Subrasante muy buena	De C.B.R. $\geq$ 20 % a C.B.R. < 30 %
S5 : Subrasante excelente	C.B.R. $\geq$ 30 %

Fuente: Diseño Estructural de Pavimentos para Caminos

Se considerarán como materiales aptos para la coronación de la subrasante suelos con C.B.R. igual o mayor de 3 %. En caso de ser menor, se procederá a eliminar material inadecuado o modificar el material estabilizándolo a fin de que cumpla con los requerimientos y características adecuadas.

Figura 2.4.1. Estructura típica de pavimentos



Fuente: Diseño Moderno de Pavimentos Asfálticos

#### 2.4.2. Propiedades de la subrasante

##### Propiedades físicas:

Son propiedades relacionadas con el tipo de material a utilizar y las características constructivas de los mismos.

**Granulometría.-** La granulometría sirve para determinar el porcentaje en peso de las partículas de diferentes tamaños, teniendo una visión de la distribución del tamaño de los granos presentes en un suelo.

Tabla 2.4.2 Escala granulométrica

Partícula	Tamaño
Arcillas	< 0.002 mm
Limos	0.002 – 0.06 mm
Arenas	0.06 – 2 mm
Gravas	2 – 60 mm
Cantos rodados	60 – 250 mm
Bloques	> 250 mm

Fuente: ABC, Manual Técnico Vol. 4

### Clasificación de los suelos:

**Límite Líquido.** - El Límite Líquido de un suelo se define como el contenido máximo de humedad a partir del cual dicho suelo deja de comportarse plásticamente y pasa a comportarse como un líquido.

**Límite Plástico.** - El Límite Plástico de un suelo es el contenido de humedad correspondiente a un límite convencional entre los estados de consistencia plástica y semisólida.

Figura 2.4.2 Límites de consistencia



Fuente: Elaboración propia

### Propiedades ingenieriles:

**Relación humedad-densidad.-** La compactación se define como el proceso mecánico mediante el cual se disminuye la cantidad de huecos en una masa de suelo, obligando a sus partículas a un contacto más íntimo entre sí, es decir, a un aumento de la densidad de un material determinado.

**Relación de Soporte California (C.B.R.).-** El ensayo C.B.R. (California Bearing Ratio: Ensayo de Relación de Soporte de California) mide la resistencia al esfuerzo cortante de un suelo y para poder evaluar la calidad del terreno para subrasante, subbase y base de pavimentos. Se efectúa bajo condiciones controladas de humedad y densidad.

**Expansión.-** La expansividad de suelos es una propiedad física de los suelos que puede evaluarse como el hinchamiento del suelo cuando aumenta su cantidad de agua y se retraen cuando la disminuye.

## **2.5. ESTABILIZACIÓN DE SUELOS**

La estabilización de suelos se define como el mejoramiento de las propiedades físicas de un suelo a través de procedimientos mecánicos e incorporación de productos químicos, naturales o sintéticos. Tales estabilizaciones, por lo general se realizan en los suelos de subrasante inadecuada o pobre, en este caso son conocidas como estabilización suelo cemento, suelo cal, suelo asfalto y otros productos diversos.

La estabilización de suelos consiste en dotar a los mismos, de resistencia mecánica y permanencia de tales propiedades en el tiempo. Las técnicas son variadas y van desde la adición de otro suelo, a la incorporación de uno o más agentes estabilizantes. Cualquiera sea el mecanismo de estabilización, es seguido de un proceso de compactación.

El proceso de mejoramiento del suelo tiene como fin hacerlo apto para su uso en bases, subbases, subrasante de pavimento. El proceso consiste en aumentar la densidad del suelo compactando mecánicamente. La estabilización del suelo consiste en dar estabilidad al sustrato fijándolo y garantizando la permanencia de su compactación. Se transforma el suelo del que se dispone en material de construcción de calidad. Así, al estabilizar el suelo es posible obtener el control sobre su expansión, reducir la plasticidad, incrementar la resistencia, disminuir la compresibilidad y permeabilidad.

### **2.5.1. Importancia de la estabilización de suelos**

Es importante la estabilización para mejorar varias propiedades esenciales de los suelos; pero también puede aparecer el caso de que algunas de estas propiedades lleguen a deteriorarse inmediatamente o con el paso del tiempo. Para evitar esta situación, es importante elegir o especificar un sistema de estabilización y ver que sea el más correcto posible.

Además, es necesario determinar el porcentaje óptimo de estabilizante, y tener la seguridad que sea el adecuado para cada caso particular. Por otro lado, es importante realizar la investigación del comportamiento de los materiales estabilizados, analizando a

corto y largo plazo las propiedades que se mejoran y se mantienen al paso del tiempo. Uno debe estar consiente del costo que implica la tarea y las múltiples propiedades del suelo, entre las más importantes que se buscan mejorar con las estabilizaciones son las siguientes:

### **Disminuir la Plasticidad**

La plasticidad del suelo está relacionada con el concepto de Límites de Atterberg, término conocido en la mecánica de suelos. Estos parámetros relacionan la capacidad que tienen los suelos cohesivos para absorber agua sobre la superficie de sus partículas, ya que cuanto mayor es la cantidad de agua que contiene un suelo, menor es la interacción entre sus partículas adyacentes y más se aproxima el suelo en su comportamiento al de un material líquido; por lo tanto, una alteración en los valores de estos límites indicará una modificación del agua absorbida por el suelo.

El término limoso se aplica cuando las fracciones de finos del suelo tienen un índice de plasticidad de 10 % o menor. El término arcilloso se aplica cuando las fracciones de finos tienen un índice de plasticidad de 11 % o mayor.

Diversos autores han demostrado que puede lograrse un cambio de los Límites de Atterberg modificando químicamente la capacidad del mineral de arcilla para captar las moléculas de agua; en ese sentido, la estabilización química se ha usado con gran eficacia para modificar esta propiedad.

### **Estabilidad Volumétrica**

Esta propiedad se refiere al apreciable cambio de volumen que sufren los suelos, debido al cambio de humedad y los esfuerzos internos afectados por el agua.

Cuando un suelo saturado se seca, cambia su volumen (retracción). Esta pérdida de volumen se debe a la desecación ocurrida en el suelo, que provoca una modificación en la tensión capilar del menisco formado en cada poro de la superficie. Luego se produce una tracción en el agua del suelo y la correspondiente compresión en la estructura de este, siendo ésta última bastante considerable e inclusive actúa como una carga en el mismo.

Se produce la expansión o hinchamiento cuando un suelo seco y cohesivo aumenta su humedad, este fenómeno se debe a diversos factores como la atracción del agua por los



minerales arcillosos, la repulsión eléctrica de las partículas de arcilla y de sus cationes absorbidos.

La estabilidad volumétrica está íntimamente relacionada con la composición mineralógica de los suelos y los cambios climatológicos de la región, esta propiedad es propia de los suelos que contienen un alto porcentaje de minerales arcillosos.

La estabilidad volumétrica se modifica cementando el material de modo que disminuya la capacidad del material de absorber agua, siendo más efectivos en las arcillas profundas.

### **Compresibilidad**

La compresibilidad es una propiedad que está relacionada íntimamente con el cambio volumétrico del suelo, el cual se manifiesta a través de un asentamiento. Este asentamiento es producido por el peso propio del material o por cargas externas superficiales que originan un cambio en la relación de vacíos, flexión y la distorsión o, cambio de formas de la fase sólida del suelo inmediatamente debajo de la carga. Asimismo, la estructura de los sólidos especialmente en los puntos de contacto de un factor irreversible con la compresibilidad de todos los suelos no cohesivos. Sin embargo, en las arcillas el factor más importante de la compresibilidad es la repulsión eléctrica entre sus partículas que tienen cargas iguales o, que están rodeadas de cationes con cargas semejantes que las mantienen apartadas.

La reducción de la compresibilidad del suelo puede lograrse llenando los poros de este, es decir, cementando los granos con un material rígido. Pero también, es posible reducir esta propiedad cambiando las fuerzas del agua absorbida por el mineral de arcilla.

En términos generales, todos los métodos de estabilización revisados en anteriores secciones se pueden incluir en esta propiedad, pero frecuentemente la compactación y la estabilización química son las que más se utilizan.

### **Resistencia o capacidad portante**

Esta propiedad se refiere a la capacidad que tiene el suelo de soportar cargas continuas de tráfico, para no sufrir fallas y deformaciones inadmisibles en su estructura.

En general, todas las formas de estabilización químicas pueden mejorar en mayor y menor grado de resistencia del suelo, pero mucho depende de la cantidad de materia orgánica que

contiene el mismo, ya que el efecto de la materia orgánica en el suelo estabilizado por medios químicos reduce la reacción con el aditivo empleado y disminuye considerablemente la resistencia normalmente adquirida.

## **2.6. TIPOS DE ESTABILIZACIÓN**

### **2.6.1. Estabilización física**

Este tipo de estabilización se utiliza para mejorar las características de un suelo produciendo cambios físicos en el mismo. Algunos de los tipos de estabilización física son mezclas de suelos, vibro flotación, geotextiles y consolidación previa. Se habla de una estabilización físico-mecánica cuando se hace un mejoramiento de un suelo mediante la adición de otro suelo proveniente de un sitio seleccionado.

Estabilizar un suelo con un geo sintético de refuerzo permite incrementar la capacidad portante del material que conforma la estructura de un pavimento, es decir habrá un mejoramiento de las propiedades mecánicas de dichos materiales y que generan un aumento de la vida útil del pavimento.

De igual manera, al mejorar las condiciones mecánicas de la estructura del pavimento se puede obtener un aumento del tránsito de diseño, el cual se evalúa con la cantidad de ejes equivalentes que van a pasar durante el período de operación de la vía.

Beneficios del uso de un geo sintético:

- Incremento de la capacidad portante.
- Mejoramiento de las propiedades mecánicas de los materiales que conforman la estructura del pavimento.
- Incremento de la vida útil de la vía.
- Aumento de los ejes equivalentes del diseño de la vía.

Figura 2.6.1 Estabilización con geotextiles



Fuente: GEOTEXAM-Estabilización para suelos y terraplenes

## **2.6.2. Estabilización mecánica**

### **Estabilización por compactación**

La estabilización mecánica por compactación tiene la finalidad de mejorar el suelo sobre el que se va a construir, sin cambiar su estructura ni su composición inicial. Para esto se utiliza el método de la compactación, técnica con la cual se reduce el volumen de vacíos presentes en el suelo logrando así una mayor densidad y una mejor distribución de las fuerzas que actúan sobre el suelo para así tener mayor estabilidad, evitando posibles asentamientos.

Este tipo de estabilización es el más usado, ya que se realiza siempre in situ, empleando maquinaria y equipos que transmiten al suelo esfuerzos a través de amasado, presión, impacto o vibraciones.

Figura 2.6.2 Estabilización por compactación mecánica



Fuente: Diseño Moderno de Pavimentos Asfálticos

### **Estabilización por cambio de granulometría**

La estabilización mecánica por cambio de granulometría consiste en mejorar el suelo sobre el que se va a construir mezclándolo con uno o más materiales que contengan propiedades complementarias a éste, con la finalidad de obtener un material de mejor calidad en cuanto a plasticidad y a granulometría, y que cumpla con las exigencias requeridas. Las propiedades que se pretenden mejorar con este tipo de estabilización son la plasticidad y la granulometría, pues la primera afecta a la susceptibilidad del material al agua y su capacidad drenante; y la segunda afecta su resistencia, trabajabilidad y compacidad. Una de las ventajas de la estabilización mecánica es que puede llevarse a cabo in situ, o en una central de tratamiento de suelos; y su procedimiento es el siguiente:

- Escarificación y pulverización del suelo solo si el procedimiento se realiza in situ; pulverización únicamente si se realiza en una central de tratamiento de suelos.
- Mezcla homogénea de los materiales. Se emplea una grada de discos si se realiza en obra, y se emplean tolvas dosificadoras si se realiza en una central de tratamiento de suelos.

Extensión y nivelación de la mezcla. Humectación y compactación de la misma hasta alcanzar la densidad mínima prescrita en la obra, la cual generalmente es el 95 o 100 % del Proctor Modificado.

### 2.6.3. Estabilización química

#### Estabilización con cemento

La finalidad de estabilizar un suelo con cemento y agua es el de convertir el suelo suelto inicial en otro más endurecido que sea mucho más resistente. Para esto se requiere una buena compactación y un adecuado curado. El contenido óptimo de agua se determina con el ensayo Proctor como en la compactación de suelos. Los suelos más adecuados para estabilizar con cemento son los suelos granulares tipos A 1, A - 2 y A - 3 del sistema de clasificación AASHTO.

Figura 2.6.3 Estabilización con cemento



Fuente: Estabilización de suelos-U. I. S.-Bucaramanga -Colombia

La resistencia del suelo cemento aumenta con el contenido de cemento y la edad de la mezcla. AL añadir cemento a un suelo y antes de iniciarse el fraguado, su IP disminuye, su LL varía ligeramente y su densidad máxima y humedad-óptima aumenta o disminuye ligeramente según el tipo de suelo.

### **Estabilización con cal**

Este tipo de estabilización se realiza mezclando el suelo con cal anhidra o cal viva, logrando efectos muy importantes como el de cambiar la plasticidad del suelo, por ejemplo, para suelos de I.P. < 15 aumenta tanto el L.L. como el L.P. y ligeramente su I.P., y para suelos con I.P. > 15 disminuye su I.P. Otro efecto es el de aumentar la humedad óptima de compactación del suelo, lo que permite la densificación de suelos de elevada humedad natural. Los suelos más apropiados para estabilizar con cal son los de granulometría fina, dado que se vuelven más desmenuzables y granulares, y al aumentar su límite plástico y humedad óptima de compactación permite que su puesta en obra se realice con mayor facilidad.

Al mezclar el suelo con la cal, se produce una reacción rápida de floculación e intercambio iónico, seguida de otra muy lenta de tipo puzolánico, con formación de nuevos productos químicos. La sílice y alúmina de partículas del suelo se combinan con la cal en presencia de agua para formar silicatos y aluminatos cálcicos insolubles. También aumenta la humedad óptima de compactación, lo que permite la densificación de suelos de elevada humedad natural.

Figura 2.6.4 Estabilización con cal



Fuente: Estabilización de suelos-U. I. S.-Bucaramanga -Colombia

## 2.7. HIDRÓXIDO DE SODIO

El hidróxido de sodio (NaOH), hidróxido sódico o hidrato de sodio, también conocido como soda cáustica (en casi toda Latinoamérica) o sosa cáustica (en México y España), es un hidróxido cáustico usado en la industria (principalmente como una base química) en la fabricación de papel, tejidos, y detergentes. Además, se utiliza en la industria petrolera en la elaboración de lodos de perforación base agua. A nivel doméstico, son reconocidas sus utilidades para desbloquear tuberías de desagües de cocinas y baños, fabricar jabón casero, entre otros.

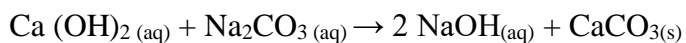
A temperatura ambiente, el hidróxido de sodio es un sólido blanco cristalino sin olor que absorbe la humedad del aire (higroscópico). Es una sustancia manufacturada. Cuando se disuelve en agua o se neutraliza con un ácido libera una gran cantidad de calor que puede ser suficiente como para encender materiales combustibles. El hidróxido de sodio es muy corrosivo. Generalmente se usa en forma sólida o como una solución de 50%.

El hidróxido de sodio se usa para fabricar jabones, crayón, papel, explosivos, pinturas y productos de petróleo. También se usa en el procesamiento de textiles de algodón, lavandería y blanqueado, revestimiento de óxidos, galvanoplastia y extracción electrolítica. Se encuentra comúnmente en limpiadores de desagües y hornos.

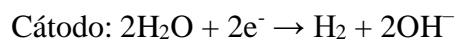
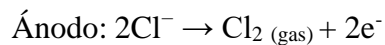
También se usa como eliminador de pintura y por los ebanistas para quitar pintura vieja de muebles de madera. Se emplea en la elaboración tradicional del cocido de la aceituna de mesa, sobre todo en variedades de aceituna como la manzanilla y la gordal. Así como también es importante su uso en la obtención de aluminio a partir de bauxita en el proceso Bayer.

El hidróxido de sodio, en su mayoría, se sintetiza por el método de caustificación, es decir, juntando otro hidróxido con unas oxosales de sodio.

El ejemplo de reacción muestra al hidróxido de calcio o cal apagada (proveniente del óxido de calcio o cal viva y el agua) juntándose con el carbonato de sodio (proveniente del ácido carbónico y el sodio) para formar el hidróxido de sodio y el carbonato de calcio.



Aunque modernamente es fabricado por electrólisis de una solución acuosa de cloruro sódico o salmuera, también es un subproducto que resulta del proceso que se utiliza para producir cloro.



Al ir progresando la electrólisis, se liberan los aniones cloruro, y son sustituidos por iones hidróxido que, combinados con los cationes sodio presentes en la disolución, forman el hidróxido sódico. Los cationes sodio no se reducen a sodio metálico, debido a su bajísimo potencial.

Se utiliza una solución de una pequeña porción de sosa diluida en agua en el método tradicional para producir margarina común, un pretzel y también para elaborar el lutefisk, comida tradicional de los países nórdicos a base de pescado.

Figura 2.7.1 Soda cáustica en granos y escamas



Fuente: Elaboración propia



Figura 2.7.2 Soda cáustica sólida



Fuente: Elaboración propia

La soda cáustica reacciona químicamente con una amplia variedad de químicos orgánicos e inorgánicos. En todas sus formas, incluyendo en solución, la soda cáustica es muy corrosiva y puede causar quemaduras serias a los ojos y la piel. El contacto con los ojos de sólo unos pocos segundos puede causar daño permanente, aún la ceguera. Incluso un contacto de corta duración con la piel puede causar intensa irritación o quemaduras de tipo químico.

Debido a los riesgos del manejo de la soda cáustica, es importante que todas las personas que la manejen, bien sea directa o indirectamente, conozcan y cumplan en forma estricta los procedimientos de seguridad.

### **2.7.1. Usos de la soda cáustica**

La soda cáustica es uno de los elementos constitutivos básicos de la química, y como tal, encuentra una diversidad de usos. Algunas categorías generales de uso son: fabricación de productos químicos, fabricación de pasta y papel, productos de limpieza, petróleo y gas natural, película de celulosa, la extracción de lignina durante las secuencias de blanqueado de la pasta, y la fabricación de hipoclorito de sodio sobre el terreno, proceso textil de algodón y tratamiento de aguas.

La soda cáustica se usa especialmente para el control del pH, la neutralización de ácidos residuales y usos similares, lavado cáustico de gases residuales, catálisis y extracción cáustica, compite con otros álcalis, especialmente con el carbonato de sodio (ceniza de sosa). Los factores comunes para seleccionar la soda cáustica son su fuerte alcalinidad y su facilidad de almacenamiento y manejo.

El procedimiento general para el blanqueado de la pasta incluye una secuencia de blanqueado durante la cual las impurezas y las materias de color presentes en la pasta se oxidan y/o se convierten en formatos solubles en álcalis, y una secuencia de extracción durante la cual se eliminan las impurezas. Las etapas de extracción casi siempre usan soda cáustica. Además, la soda cáustica se usa en el proceso de trituración de sulfito de sodio para ablandar e inflar la madera antes de hacer ciertos tipos de pastas mecánicas

La soda cáustica se usa hasta cierto punto en todos los procesos químicos de trituración: sulfato, sulfito y soda. En los procesos de sulfato y de soda, los licores de trituración son soluciones de sulfuro cáustico y de sodio y cáustico, respectivamente. En el proceso del sulfato, que es, sin lugar a duda, el proceso de trituración más importante, el máximo de reciclaje se logra concentrando los sólidos en el licor de trituración residual, quemando el licor concentrado y luego recaustificando el residuo disuelto de la combustión con un sistema de caustificación de cal.

La soda cáustica se usa para mercerizar y lavar las telas y fibras de algodón. Un 90 % de todo el algodón pasa por un tratamiento de lavado, que hace que la tela pueda absorber mejor los agentes de blanqueado. Aproximadamente el 35 % del algodón se merceriza para mejorar la fortaleza de la fibra y la afinidad a los tintes.

Otros dos usos de la soda cáustica son el tratamiento de aguas y la elaboración de alimentos. Las instalaciones de tratamiento de aguas municipales usan soda cáustica para regular el pH, para regenerar el intercambio iónico, y para la generación de hipoclorito de sodio sobre el terreno.

La soda cáustica se usa en varios tipos de elaboración de alimentos. Un ejemplo es en la remoción de la piel de las papas, los tomates y otras frutas. También se usa en la elaboración de grasa y aceites comestibles.

El mercado de productos de limpieza incluye una gran cantidad de usos de soda cáustica, ya sea como reactivo para producir los compuestos químicos que se emplean en estas aplicaciones, como las sales de sodio de ácidos sulfónicos.

El consumo de cáustico en agentes de limpieza incluye el uso de cáustico para hacer jabones, detergentes sintéticos y detergentes alcalinos para uso doméstico y no doméstico, y varios otros productos de limpieza. La mayoría de las lejas líquidas de uso doméstico se fabrican mediante la reacción de cloro y una solución de soda cáustica.

La industria del petróleo y gas natural usa la soda cáustica en varias aplicaciones para la producción (y la exploración) y en la elaboración de productos. Es un componente importante en la mayoría de los lodos de inyección y se puede usar en la inyección alcalina de los campos petrolíferos para aumentar la recuperación del petróleo.

### 2.7.2. Identificación

Nombre químico = Hidróxido de sodio

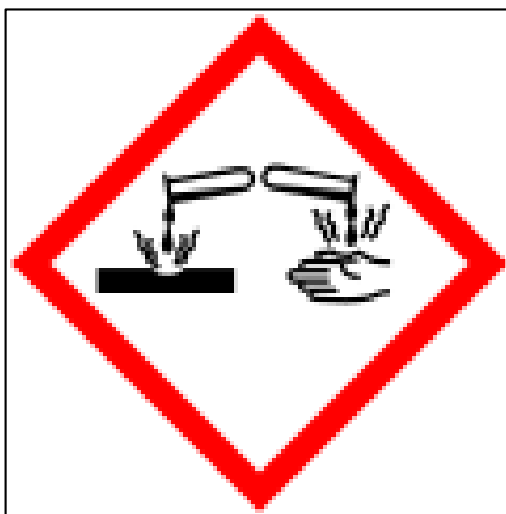
Sinónimos = Sosa cáustica, lejía de sosa

Fórmula química = NaOH

Peso molecular = 40.01

Número CAS = 1310-73-2

Figura 2.7.3 Identificación de hidróxido de sodio



Elaboración: GHS05 - Corrosión

### 2.7.3. Propiedades físicas y químicas

Aspecto = Material sólido, cristalino

Color = Translúcido

Olor = Inodoro

pH = 14 (solución al 5 %)

Punto de fusión = 318 °C

Punto de ebullición = 1390 °C

Presión de vapor = 1.5 mm Hg (0,2 kPa) A 20 °C

Densidad relativa = 2.13 A 15.5 °C

Viscosidad = 50 cps a 36 °C para una solución al 50 %.

Densidad aparente = 1000 kg/m<sup>3</sup>

Agua = Completamente soluble en agua acompañada de una liberación de calor  
significante.

### 2.7.4. Reactividad y estabilidad

Estabilidad: El producto absorbe agua y dióxido de carbono del aire. Se debe de mantener los recipientes cerrados y sellados, además de ser ligeramente reactivo.

Condiciones que deben evitarse: Puede reaccionar violentamente con agua, ácidos, compuestos orgánicos y álcali fuerte. Cuando se encuentra húmedo reacciona con algunos metales generando hidrógeno que es un gas inflamable, estos metales son el estaño, aluminio, zinc y bronce.

Al hacer contacto con agua, puede generar suficiente calor (con salpicaduras) para inflamar materiales combustibles.

Incompatibilidad con otras sustancias: Agua y ácidos.

Productos de descomposición peligrosa: Ninguno.

Polimerización peligrosa: No ocurrirá.

Materiales y sustancias que se deben evitar: Ácidos, líquidos inflamables, compuestos alógenos orgánicos, compuestos nitrosos, metales anfóteros, tales como aluminio, magnesio y zinc.

#### **2.7.5. Manejo y almacenamiento**

Manejo: Se debe de evitar el contacto con los ojos o la piel. No respire sus polvos. Al manipular este producto, no use lentes de contacto, aun con la protección ocular apropiada. Proporcione una ventilación adecuada y use un respirador de cara completa para exposiciones posibles al polvo en exceso.

Almacenamiento: Mantenga el producto en un recipiente cerrado y debidamente etiquetado, en un área seca y bien ventilada, lejos de ácidos, agua, materiales oxidantes y metales como el estaño, aluminio y zinc. Protéjalo contra daños físicos. No deje que el producto sea expuesto al aire, el producto recoge la humedad y reacciona con agua. No lo almacene en tanques subterráneos.

#### **2.7.6. Identificación de daños**

La vía de entrada al organismo es por inhalación, dérmica e ingestión.

Ojos: Puede causar irritación severa con daño a la córnea y párpados, y resultar en un deterioro permanente de la visión, causando hasta la ceguera.

Piel: Breves exposiciones pueden causar irritación intensa y quemaduras, enrojecimiento e hinchazón de la piel. Provoca ulceraciones profundas, lentas de curar.

Al contacto con el producto en solución, la piel se pone “jabonosa” al tacto. Los efectos de exposición pueden causar quemaduras que no son inmediatamente aparentes o visibles.

Ingestión: Puede causar irritación gastrointestinal o ulceraciones y quemaduras severas de la boca, garganta, esófago y del estómago. La ingestión de soluciones concentradas ha sido fatal en los animales y los seres humanos.

Inhalación: Inhalación de polvos, nieblas y vaporizaciones del producto pueden causar irritaciones severas en la parte superior del aparato respiratorio, quemaduras en los conductos nasales, irritación severa del tracto respiratorio y daños gastrointestinales. Puede causar edema pulmonar.

### **2.7.7. Dilución de la solución de soda cáustica**

Los pasos para una correcta dilución o preparación del producto son:

Agregue siempre la solución de soda cáustica al agua agitando en forma constante. Nunca agregue agua a la solución de soda cáustica.

El agua debe estar tibia entre 27 °C a 38 °C. Nunca inicie el proceso con agua fría o caliente.

Al agregar la soda cáustica al líquido se produce un aumento en la temperatura. Si la soda cáustica se concentra en un área o se agrega con demasiada rapidez, o se añade al líquido caliente o frío, el aumento rápido en la temperatura puede generar vapores peligrosos, hervores o salpicaduras, que pueden causar una erupción violenta inmediata.

### **2.7.8. Precauciones de seguridad y medidas preventivas**

La solución de soda cáustica es un químico industrial muy corrosivo. No parece ser peligroso, tiene la apariencia de agua, pero el contacto de tan sólo unos pocos segundos con los ojos puede causar daño permanente, incluso la ceguera.

Como la soda cáustica es inolora, no se advierte el peligro. Además, la soda cáustica no produce dolor inmediato cuando entra en contacto con la piel, pero sí causa daño inmediato.

Un contacto de corta duración con la piel puede causar irritación intensa o quemadura de tipo químico.

### **2.7.9. Primeros auxilios**

En caso de contacto con soda cáustica enjuáguese con agua solamente. No intente neutralizar la soda cáustica con productos químicos.

Continúe enjuagándose con agua durante media hora o siga las instrucciones del médico.

No vaya al hospital o a un centro médico puesto que éstos no podrán suministrar otro tratamiento distinto al enjuague con agua y la pérdida de tiempo durante el transporte de la víctima puede causar un daño irreparable.

Ojos: Enjuáguese inmediatamente con agua a baja presión en la fuente lavaojos. Una vez que se haya enjuagado las manos completamente, mantenga los párpados abiertos y continúe lavándose durante media hora.

Levante los párpados para asegurar el lavado completo de la superficie entera del ojo, así como el revés de los párpados. Obtenga asistencia médica de inmediato.

Cuerpo: Lávese inmediatamente con agua en la ducha de seguridad. Lave la zona afectada con agua durante media hora. Quítese la toda ropa incluso el calzado mientras se ducha.

Si los ojos no han estado expuestos, no se quite los anteojos de seguridad hasta que se haya enjuagado completamente la cabeza y el cabello, puesto que la soda cáustica podría entrar a los ojos.

Enjuáguese la cabeza completamente, quítese los anteojos y siga lavándose. Lave la piel afectada con agua hasta que elimine la sensación “jabonosa” al tacto.

Manos: Enjuáguese con agua hasta que la sensación resbaladiza desaparezca.

Ingestión (tragar): En todos los casos, obtenga asistencia médica de inmediato. Solicite transporte por ambulancia al hospital más cercano. No induzca el vómito.

Suministre inmediatamente grandes cantidades de leche (de preferencia) o agua y llame al médico si la persona está consciente. Nunca administre nada a una persona inconsciente por la boca. Quite de la boca del paciente cualquier evidencia o residuos de la sustancia.

Inhalación: Saque a la persona de la zona contaminada y transpórtela a un lugar fresco y bien aireado; en caso de ser necesario, administre oxígeno. Consulte con un médico de inmediato.

Ropas: Lave la ropa contaminada para eliminar la soda cáustica, antes de volver a ponérsela. Los zapatos contaminados y los artículos de cuero deben ser desechados.

#### **2.7.10. Medidas a tomar en caso de emisiones accidentales**

Evacue y ventile el área del derrame. Utilice equipo de protección personal completo durante la limpieza.

Mantenga el agua fuera del área del derrame. En caso de lluvia, proteja al producto con una cubierta de plástico para evitar que la solución escurra hacia el alcantarillado. Si no es peligroso hacerlo, sin exponer al personal, intente parar el derrame.

Se necesita apresurar la limpieza y la remoción. Use palas para recoger el material en un recipiente adecuado y seco. Solamente el personal entrenado y protegido adecuadamente puede involucrarse en las operaciones de limpieza de derrame.

Figura 2.7.4 Equipo necesario para el manejo de soda cáustica



Fuente: Seguridad en el uso de soda caustica- Ingeniero Néstor Adolfo Botta



## CAPÍTULO III

### INFORMACIÓN Y CARACTERIZACIÓN

#### 3.1. UBICACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

Se eligió como zona de estudio el barrio “Nueva Terminal” que se encuentra ubicada en la carretera al norte a 5.81 Km del punto cero de la ciudad (Obelisco) y contiene un área de 409.84 m<sup>2</sup>.

Figura 3.1.1 Barrio Nueva Terminal

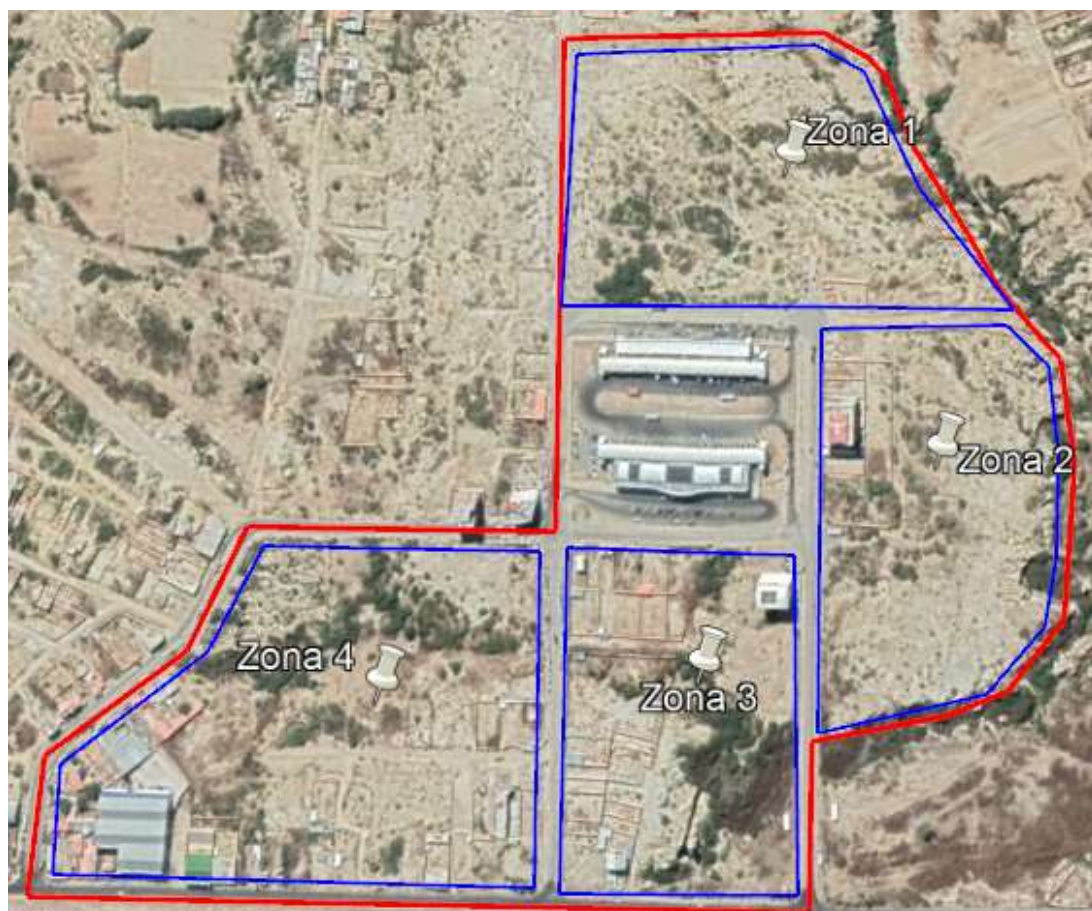


Fuente: Google Earth Pro

##### 3.1.1. Muestreo de materiales

Para el muestreo se observó que el área de estudio no era representativa, por lo que se subdividió en 4 puntos de muestreo de materiales para lograr realizar una mejor caracterización del material que predomina en la presente área, como se muestra en la siguiente imagen:

Figura 3.1.2 Determinación de subzonas de muestreo



Fuente: Google Earth Pro

### 3.1.2. Coordenadas

Tabla 3.1.1 Coordenadas Cartesianas

Muestra	Latitud	Longitud
Zona N° 1	21° 33' 31.85" S	64° 40' 19.36" O
Zona N° 2	21° 33' 41.50" S	64° 40' 21.33" O
Zona N° 3	21° 33' 42.41" S	64° 40' 31.23" O
Zona N° 4	21° 33' 37.47" S	64° 40' 39.44" O

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.1.2 Coordenadas UTM

Muestra	Este	Norte	Zona
Zona N° 1	326776.40	7615004.40	20
Zona N° 2	326809.90	7614775.30	20
Zona N° 3	326525.40	7614744.20	20
Zona N° 4	326287.60	7614893.60	20

Fuente: Elaboración propia

### 3.1.3. Caracterización del material extraído

La caracterización del material se realizó mediante una observación del terreno y de sus cualidades, por lo cual extrajo la muestra cumpliendo las especificaciones y siguiendo los pasos indicados en las guías de laboratorio para la extracción de muestra (ASTM D4220) del manual de carreteras V4C.

Para este muestreo se procedió primeramente a una excavación de 30 cm con el fin de evitar materia orgánica presente en el lugar y que la muestra de material sea limpia y representativa. Posteriormente se extrajo las muestras y fueron colocadas en bolsas indicando la zona de la cual fue extraída; este procedimiento se realizó en las 4 zonas respectivamente.

Figura 3.1.3 Extracción de material



Fuente: Elaboración propia

### 3.1.4. Análisis granulométrico por tamizado (ASTM D422; AASHTO T88)

El ensayo de granulometría sirve para determinar el porcentaje en peso de las partículas de diferentes tamaños, teniendo una visión de la distribución del tamaño de los granos presentes en un suelo. El ensayo de análisis granulométrico por tamizado se realizó mediante el método del Lavado Tamiz N° 200 en el cual se pesó 500 gr como peso total de material, luego utilizando los tamices N° 40, N° 200, tapa y base, se vertió el material en los tamices mencionados y se sacudió para dejar pasar el material por los tamices; posteriormente, se lavó el material retenido en la malla N° 200 de acuerdo a la norma AASHTO – T 88 hasta que el color de agua este clara. Después se pesó el material húmedo retenido en el tamiz N° 200 para luego introducir al horno durante 24 horas y secar la muestra. Finalmente, se determinó el peso de los materiales retenidos en los tamices N° 10, N° 40, N° 200 y la base con el fin de evitar pérdida de material y con estos datos generar una curva granulométrica y especificar el tipo de suelo objeto de estudio.

Figura 3.1.4 Análisis granulométrico (Lavado N° 200)



Fuente: Elaboración Propia

### 3.1.4.1. Resultados en análisis granulométrico

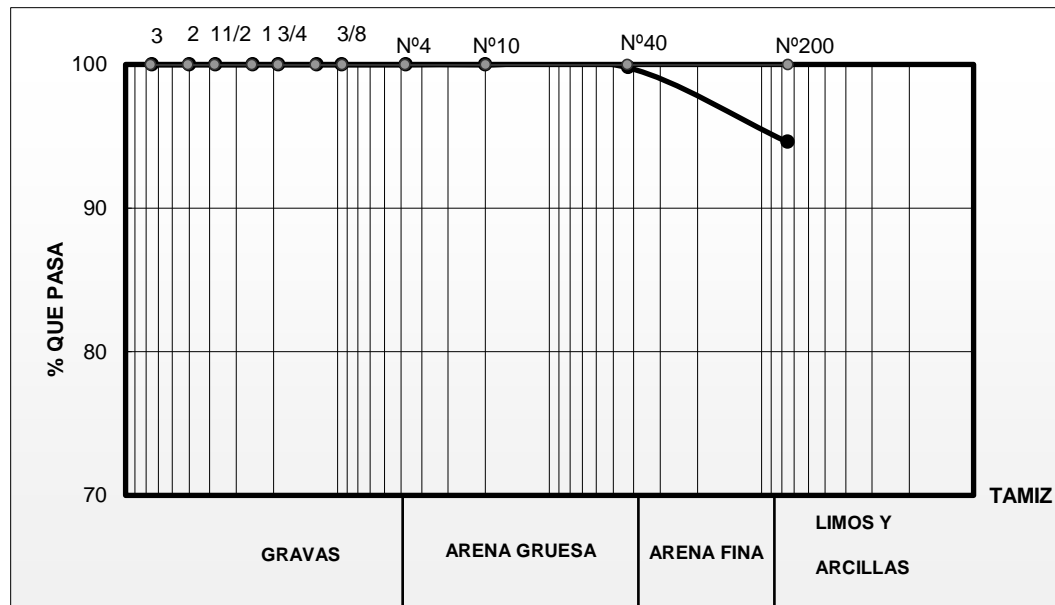
Tabla 3.1.3 Resultados de análisis granulométricos

Zona de Estudio	Zona N° 1	Zona N° 2	Zona N° 3	Zona N° 4
Tamiz	% que pasa del total	% que pasa del total	% que pasa del total	% que pasa del total
3"	100.00	100.00	100.00	100.00
2"	100.00	100.00	100.00	100.00
1 1/2"	100.00	100.00	100.00	100.00
1"	100.00	100.00	100.00	100.00
3/4"	100.00	100.00	100.00	100.00
1/2"	100.00	100.00	100.00	100.00
3/8"	100.00	100.00	100.00	100.00
N° 4	100.00	100.00	100.00	100.00
N° 10	100.00	100.00	100.00	100.00
N° 40	99.80	99.44	98.72	99.96
N° 200	94.60	98.24	92.14	95.60

Fuente: Elaboración propia

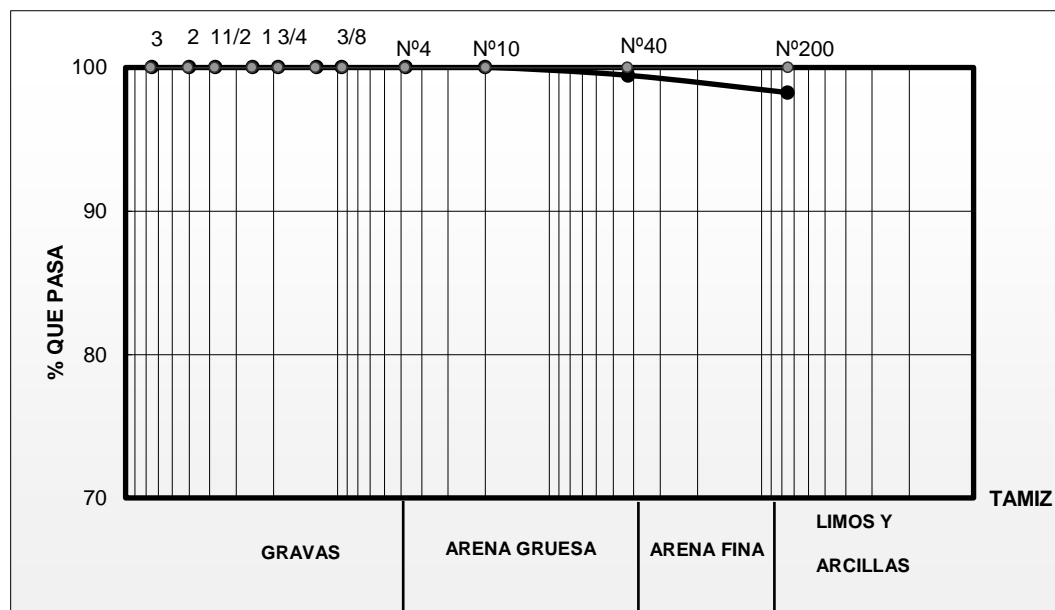
Para mayor detalle de la realización del ensayo de granulometría véase en Anexo A - 1 Granulometría.

Gráfico 3.1.1 Curva granulométrica zona N° 1



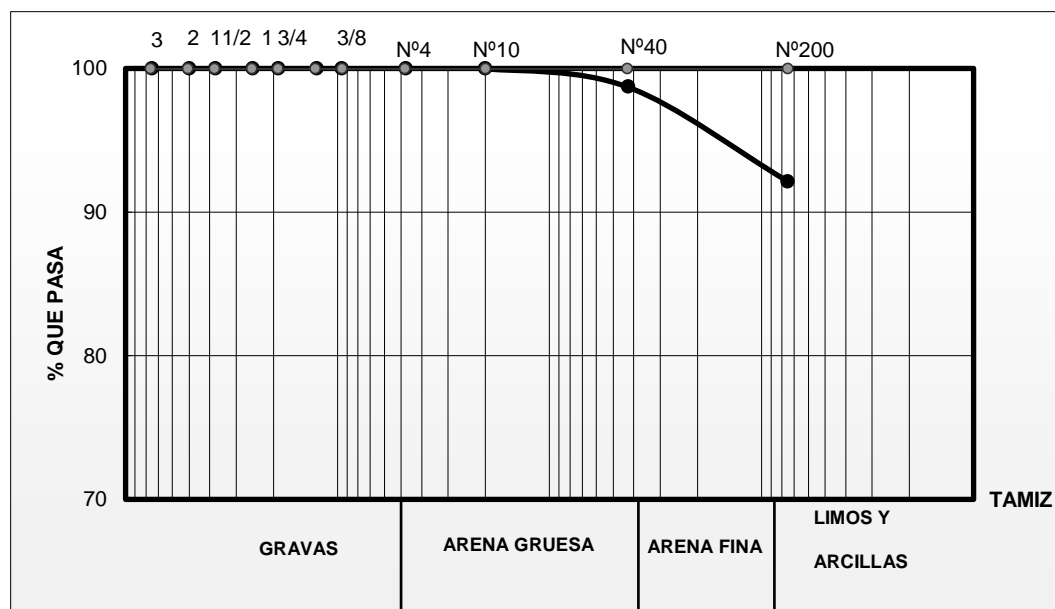
Fuente: Elaboración propia

Gráfico 3.1.2 Curva granulométrica zona N° 2



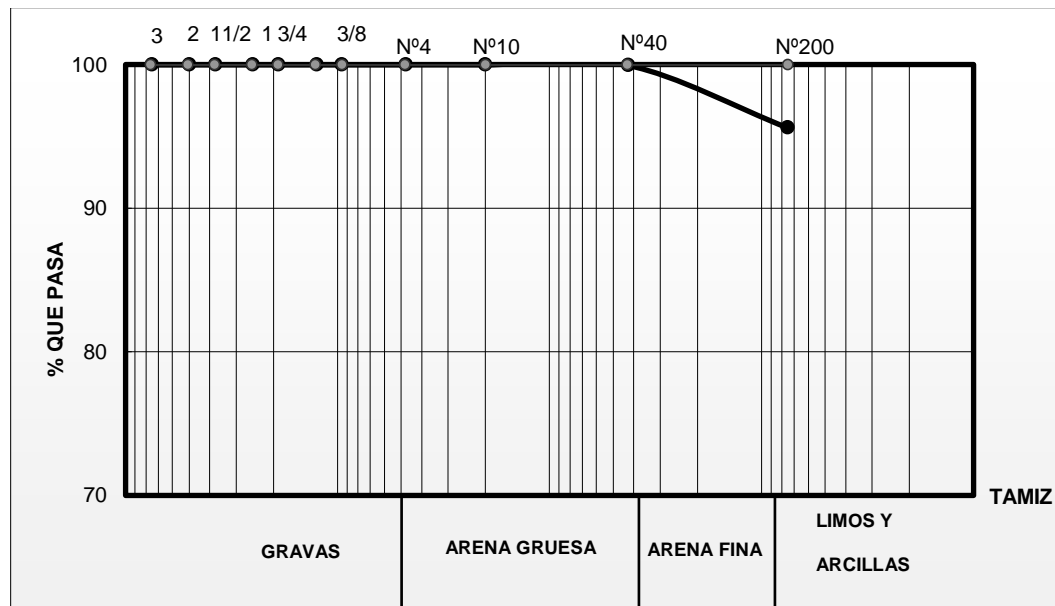
Fuente: Elaboración propia

Gráfico 3.1.3 Curva granulométrica zona N° 3



Fuente: Elaboración propia

Gráfico 3.1.4 Curva granulométrica zona N° 3



Fuente: Elaboración propia

Para mayor detalle de la realización del ensayo de granulometría véase en Anexo A - 1 Granulometría suelo natural.

### **3.1.5. Determinación de Límites de Atterberg (ASTM D 4318; AASHTO T89-T90)**

Los Límites de Atterberg, límites de plasticidad o límites de consistencia, se utilizan para caracterizar el comportamiento de los suelos finos, aunque su comportamiento varía a lo largo del tiempo.

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

Los contenidos de humedad en los puntos de transición de un estado al otro son los denominados Límites de Atterberg.

**Límite Líquido.** - El Límite Líquido de un suelo se define como el contenido máximo de humedad a partir del cual dicho suelo deja de comportarse plásticamente y pasa a comportarse como un líquido, lo que se determina mediante el ensayo en materiales empleados para la construcción de bases, subbases y terraplenes.

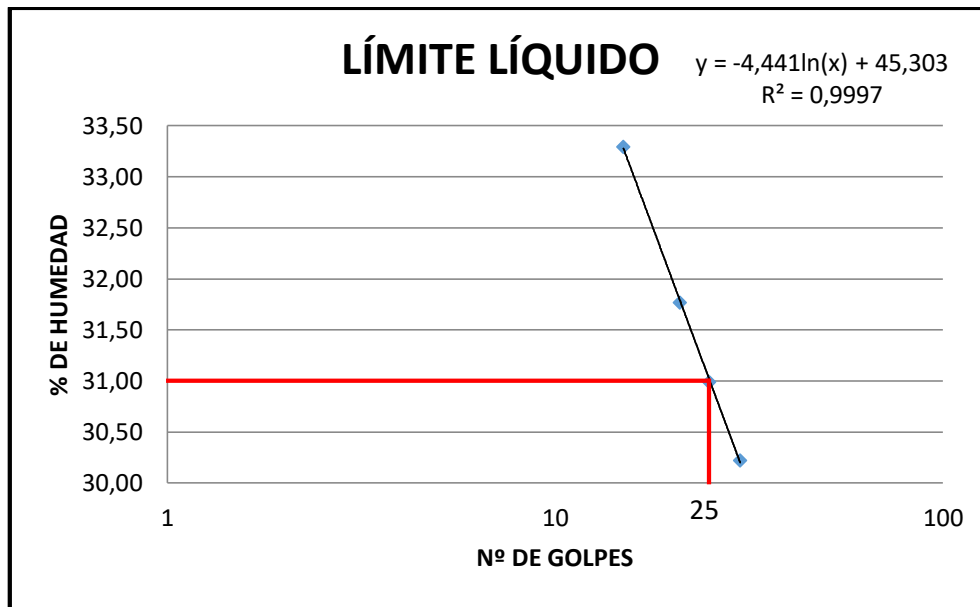
**Procedimiento:** El procedimiento de ejecución del ensayo, se basa en colocar en el plato de bronce una porción de la muestra preparada y, luego de alisar la superficie con la espátula procurando tener 1 cm, en el punto máximo de espesor, se abre una ranura moviendo el ranurador a lo largo del diámetro de la taza desde el eje del aparato hasta su borde libre formando un canal limpio y claro.

A una frecuencia de dos golpes por segundo, se deja caer el plato hasta que los labios de la ranura se unan 1cm, tratando de obtener ensayos en los cuales el número de golpes necesarios para cerrar la ranura esté en los rangos de 10 a 15, 15 a 20, 20 a 25 y 25 a 30.

Conociendo la hermenéutica de cálculo de porcentajes de humedad se diseña una gráfica según dichos porcentajes y el número de golpes respectivos; una vez definidos los puntos, se traza una recta que una la mayoría de éstos, siendo el Límite Líquido el porcentaje de humedad que corte horizontalmente la intersección de la recta graficada y la vertical de 25 golpes.

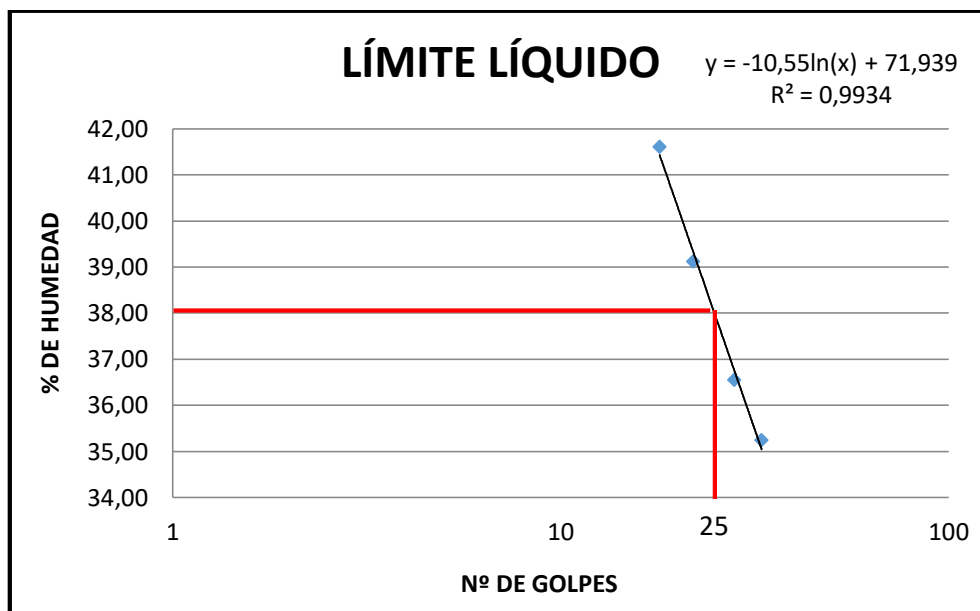


Gráfico 3.1.5 Límite Líquido zona N° 1



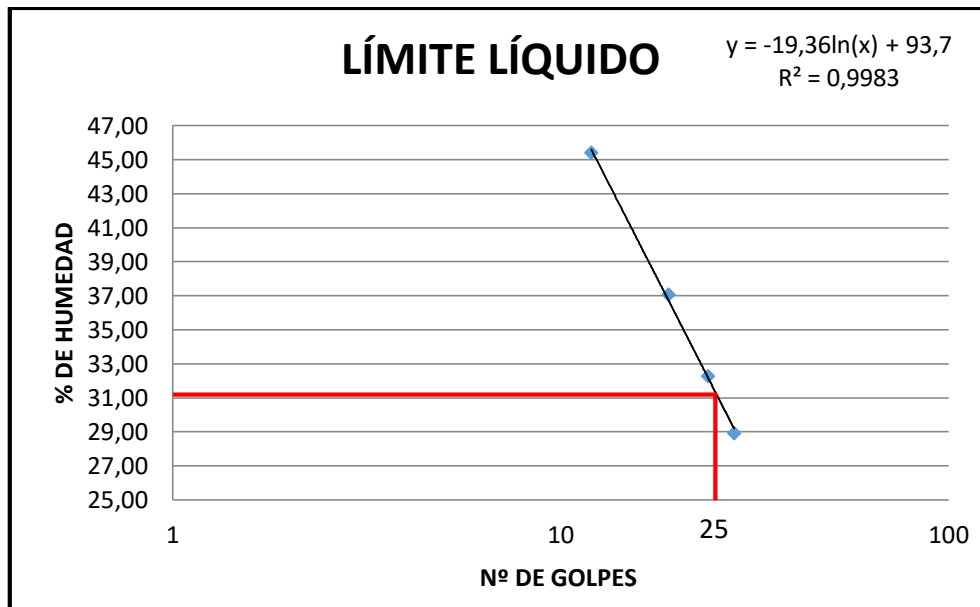
Fuente: Elaboración propia

Gráfico 3.1.6 Límite Líquido zona N° 2



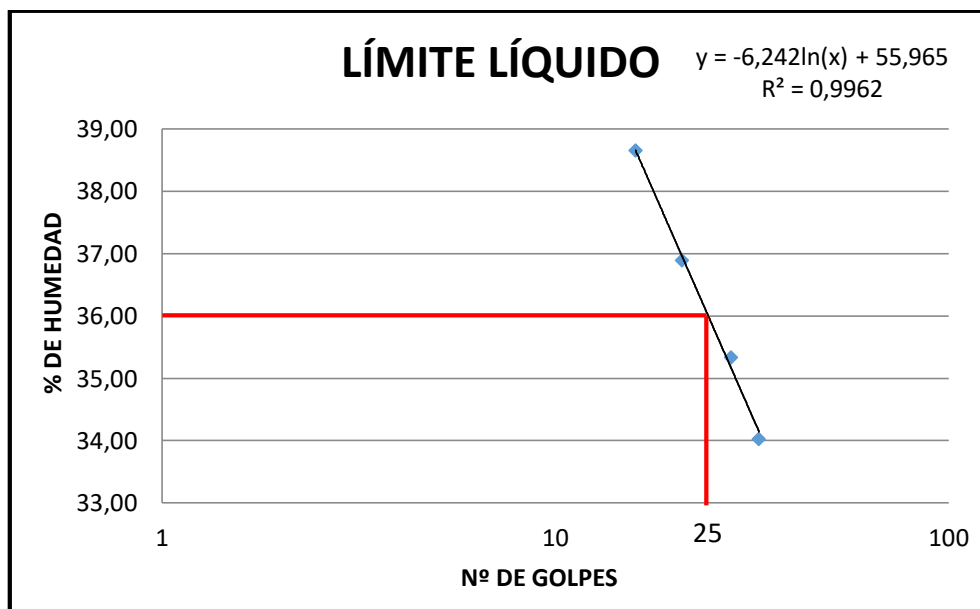
Fuente: Elaboración propia

Gráfico 3.1.7 Límite Líquido zona N° 3



Fuente: Elaboración propia

Gráfico 3.1.8 Límite Líquido zona N° 4



Fuente: Elaboración propia

Figura 3.1.5 Materiales y realización del Límite Líquido



Fuente: Elaboración propia

**Límite Plástico.** – El Límite Plástico de un suelo es el contenido de humedad correspondiente a un límite convencional entre los estados de consistencia plástica y semisólida.

**Procedimiento:** Se considera que un suelo está en su límite plástico, cuando al amasarlo sobre una superficie lisa, que no absorba humedad, hasta formar una hebra o rollito cilíndrico (“choricito”), se comienza a agrietar al llegar a un diámetro de 3 mm. Una vez llegado el límite se coloca las porciones en una cápsula y se calcula el porcentaje de humedad de la manera de tallada anteriormente.

El Límite Plástico reportado es el promedio de los porcentajes de humedad obtenidos, siempre que la diferencia entre estos sea menor al 2 % del mismo.

Figura 3.1.6 Materiales y realización del Límite Plástico



Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.1.4 Resultados de Límite Plástico

Límite Plástico	Zona N° 1	Zona N° 2	Zona N° 3	Zona N° 4
Contenido de humedad (%)	16.46	25.00	14.49	23.53
	16.67	25.00	14.71	23.33
	16.85	24.76	14.39	23.08
Promedio	17.00	25.00	15.00	23.00

Fuente: Elaboración Propia

Índice de Plasticidad. - Este método tiene por objeto definir el Índice de Plasticidad de los suelos, que no es otra cosa que el valor numérico de la diferencia entre el Límite Líquido (L.L.) y el Límite Plástico (L.P.).

$$IP = LL - LP$$

Excepto cuando no se puede determinar el Límite Líquido o el Límite Plástico o ambos, se reporta el Índice de Plasticidad como “NO PLÁSTICO” (NP).

Figura 3.1.7 Materiales utilizados para la realización de Límites de Atterberg



Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.1.5 Resultados de Límites de Atterberg

Zona de Estudio	Zona N° 1	Zona N° 2	Zona N° 3	Zona N° 4
Límite Líquido L.L. (%)	31	38	31	36
Límite Plástico L.P. (%)	17	25	15	23
Índice de Plasticidad I.P. (%)	14	13	17	13

Fuente: Elaboración propia

Para mayor detalle de la realización y resultados del ensayo de Límites de Atterberg véase en Anexo A-2 Límites de Atterberg de suelo natural.

Tabla 3.1.6 Clasificación de suelos según AASHTO Y S.U.C.S

Zona de muestreo	Clasificación del suelo		Descripción
Zona N° 1	S.U.C.S:	CL	Arcilla inorgánica de baja plasticidad
	AASHTO:	A - 6 (12)	
Zona N° 2	S.U.C.S:	CL	Arcilla inorgánica de baja plasticidad
	AASHTO:	A - 6 (14)	
Zona N° 3	S.U.C.S:	CL	Arcilla inorgánica de baja plasticidad
	AASHTO:	A - 6 (14)	
Zona N° 4	S.U.C.S:	CL	Arcilla inorgánica de baja plasticidad
	AASHTO:	A - 6 (13)	

Fuente: Elaboración propia

### 3.1.6. Determinación de la relación humedad - densidad del suelo, método compactación Proctor Modificado (ASTM D422; AASHTO T-180)

Este método tiene por objeto determinar la relación entre el contenido de humedad y la densidad de los suelos compactados en un molde de dimensiones dadas, empleando un

apisonador de 10 lb. (4.54 kg), que se deja caer libremente desde una altura de 18 pulgadas (45.7 cm), en cinco capas. Este método se utiliza para capas de base y base, como también para la última capa de la Subrasante.

Métodos: Se divide en cuatro procedimientos detallados a continuación:

Método A: Molde de 10.6 cm (4”) de diámetros. El suelo pasa el tamiz N° 4 – 25 golpes por capa – 5 capas.

Método B: Molde de 15.24 cm (6”) de diámetros. El suelo pasa el tamiz N° 4 – 56 golpes por capa – 5 capas.

Método C: Molde de 10.6 cm (4”) de diámetros. El suelo pasa el tamiz N° 3/4” – 25 golpes por capa – 5 capas.

Método D: Molde de 15.24 cm (6”) de diámetros. El suelo pasa el tamiz N° 3/4” – 56 golpes por capa – 5 capas.

El método que se emplea es el Método B.

PROCEDIMIENTO. El procedimiento a realizar se detalla a continuación:

- a) Se mezcla de manera uniforme toda la muestra con el agua especificada por cálculo.
- b) Se escoge un molde de peso (“peso del molde”) y volumen (“volumen de la muestra”) conocidos con su respectivo collarín, satisfaciendo el método decidido.
- c) Se procede a compactar el material por capas (“N° de capas”) con el apisonador o pisón, según los golpes que el método especifique.
- d) Una vez compactado, se quita el collarín, se enrasa con una regla de acero con un borde biselado el sobrante del molde y se pesa (“peso suelo húmedo + molde”)
- e) Se resta al “peso suelo húmedo + molde” el “peso del molde”, encontrando así el “peso suelo húmedo”.
- f) Al dividir el “peso suelo húmedo” entre volumen de la muestra, se obtiene la “densidad de suelo húmedo ( $\text{Kg}/\text{dm}^3$ ).
- g) Se saca todo el material del molde y se desmenuza, pesando una porción (“peso suelo húmedo + capsula”) en una capsula (“capsula N°”) de peso conocido (“peso de la capsula”).

- h) Se seca en horno hasta obtener el peso constante y se vuelve a pesar (“peso suelo seco + capsula”) para restar este resultado del anterior y saber así el “peso del agua”.
- i) Restando el “peso de la cápsula” al “peso del suelo seco + cápsula”, se obtiene el “peso suelo seco”.
- j) Multiplicando por 100 el “peso de agua”, y dividiendo este resultado entre el “peso suelo seco”, se encuentra el “contenido de humedad (% h)”.
- k) La “densidad de suelo seco ( $\text{Kg}/\text{dm}^3$ )” se encuentra de la división de “densidad de suelo húmedo x 100” entre el “contenido de humedad” (% h) + 100.

Figura 3.1.8 Proceso de adición de humedad y mezclado de muestra



Fuente: Elaboración propia

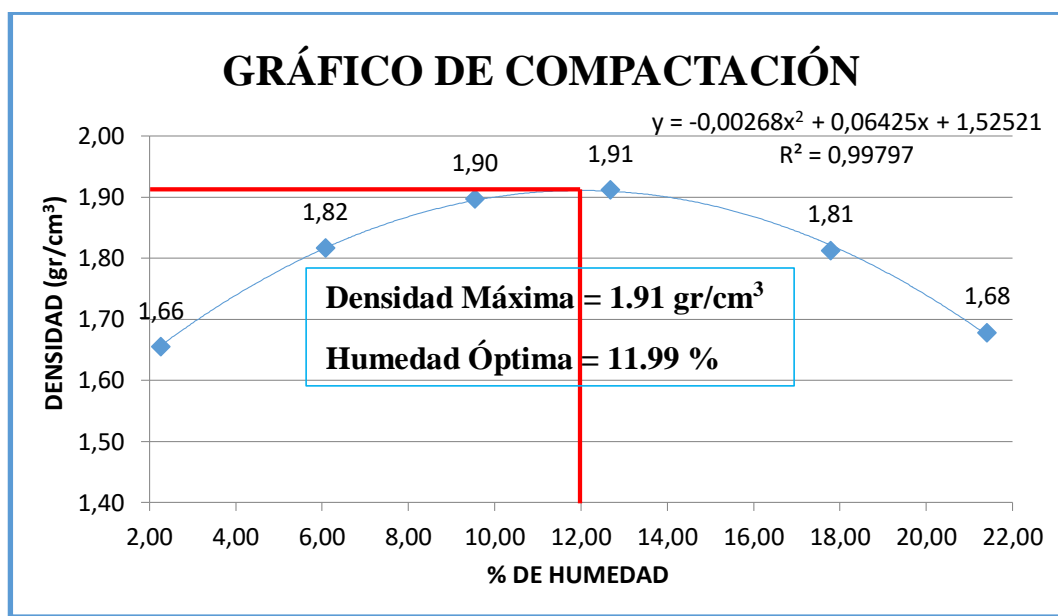
Figura 3.1.9 Proceso de compactación T - 180



Fuente: Elaboración propia

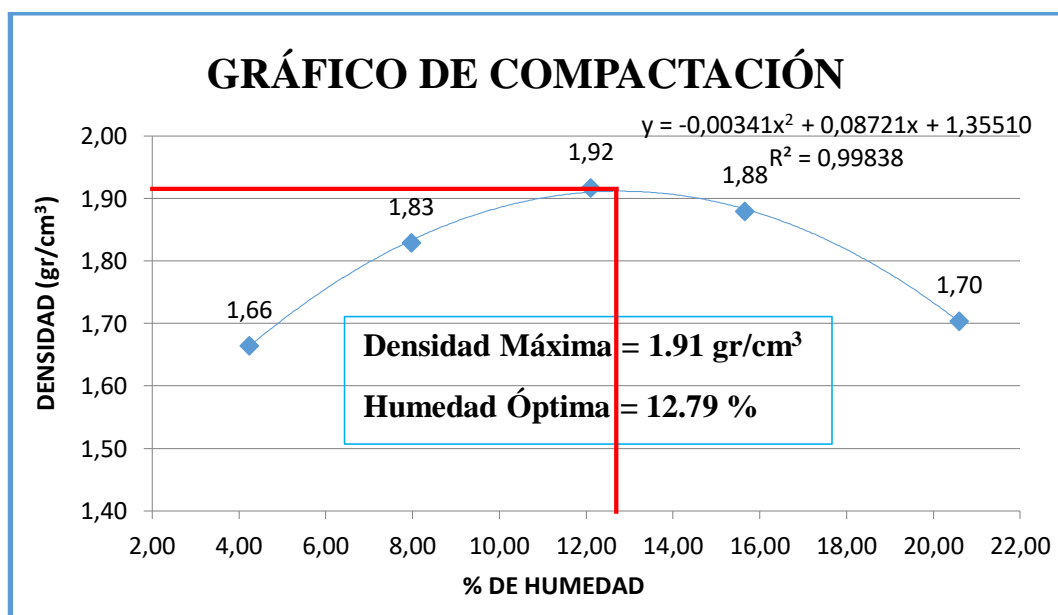
Al momento de obtener los resultados de las 4 zonas de estudio se pudo observar que dentro de los resultados existe una variación mínima, a continuación, se presenta las curvas generadas:

Gráfico 3.1.9 Curva de compactación zona N° 1



Fuente: Elaboración propia

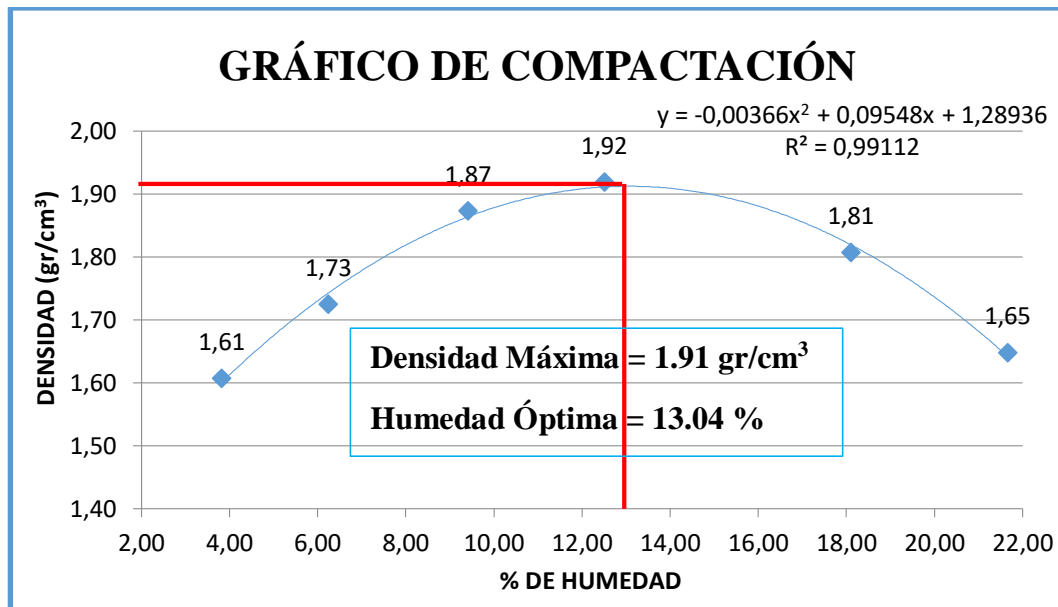
Gráfico 3.1.10 Curva de compactación zona N° 2



Fuente: Elaboración propia

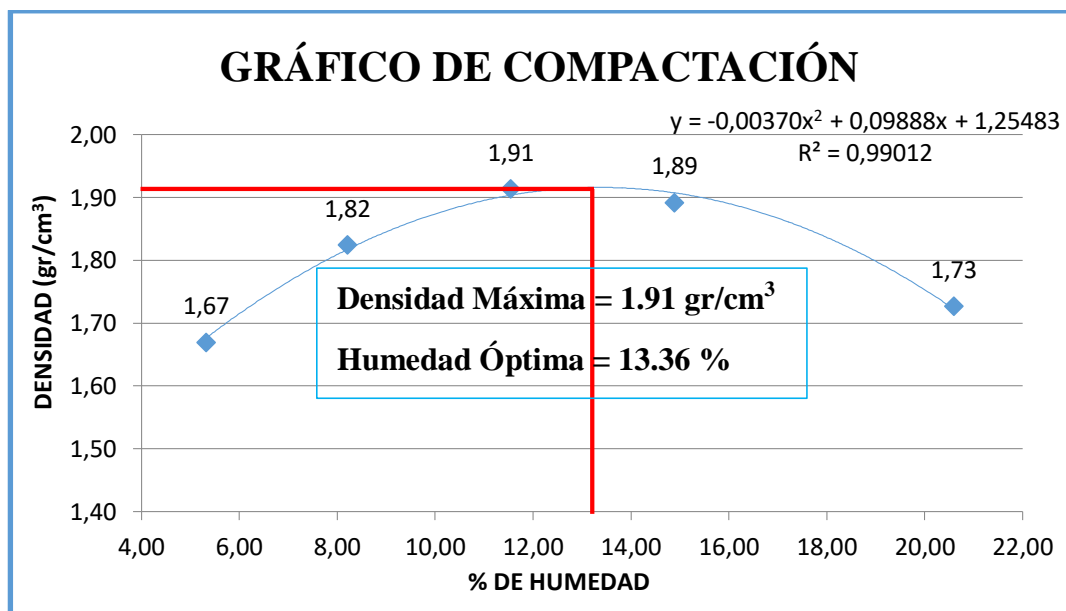


Gráfico 3.1.11 Curva de compactación zona N° 3



Fuente: Elaboración propia

Gráfico 3.1.12 Curva de compactación zona N° 4



Fuente: Elaboración propia

Para mayor detalle de la realización y resultados del ensayo de Proctor Modificado (compactación T-180) véase en Anexo A-3 Proctor Modificado de suelo natural.

Tabla 3.1.7 Resultados de los ensayos de compactación

Zona de estudio	Zona N° 1	Zona N° 2	Zona N° 3	Zona N° 4
Densidad suelo seco (gr/cm <sup>3</sup> )	1.91	1.91	1.91	1.91
Humedad óptima (%)	11.99	12.79	13.04	13.36

Fuente: Elaboración propia

### **3.1.7. Determinación del valor relativo de soporte e hinchamiento de los suelos C.B.R. (ASTM D1883; AASHTO T-193)**

Este método tiene por objeto establecer una relación entre la resistencia a la penetración de un suelo y su capacidad de soporte, este ensayo C.B.R. (California Bearing Ratio) se utiliza para evaluar la capacidad de soporte del suelo en subrasantes.

El C.B.R se obtiene como la relación de la carga unitaria (por pulgada cuadrada) necesaria para lograr una cierta profundidad de penetración dentro de la muestra de suelo compactada a un contenido de humedad y densidad dadas, con respecto a la carga unitaria patrón requerida para obtener la misma profundidad de penetración en una muestra estándar de material triturado.

Los ensayos de C.B.R se realizan usualmente sobre muestras compactadas al contenido de humedad óptimo para el suelo determinado utilizando el ensayo de Proctor Modificado.

Para la obtención de los diferentes C.B.R se efectuaron tres moldes con distinta energía de compactación; la primera con 12 golpes, la segunda con 25 golpes y la tercera con 56 golpes por cada ensayo de C.B.R para luego sumergirlos en una piscina y dejarlos saturar por 4 días (96 horas) y finalmente, colocar una sobrecarga de 4.5 kg similar a la del pavimento; es necesario durante este periodo tomar registros de expansión en horarios escogidos.

El Ensayo sobre la muestra saturada cumple dos propósitos:

- Dar información sobre la expansión esperada en el suelo bajo la estructura de pavimento cuando el suelo se satura.
- Dar indicación de la pérdida de resistencia debida a la saturación en el campo.

El valor del C.B.R se utiliza para establecer una relación entre el comportamiento de los suelos, principalmente con fines de utilización como base y subrasante bajo pavimentos de carreteras.

Se siguió el siguiente procedimiento para elaborar las muestras:

- a) Se preparó una muestra de 15 kg de suelo fino que pasó el tamiz N° 4 con un contenido de humedad óptima determinado en el ensayo de Proctor Modificado.
- b) Se pesó el molde con base y sin collarín.
- c) Para cada uno de los tres moldes se aseguró la base, insertando el disco espaciador en el molde y cubriéndolo con un papel filtro.
- d) Se fabricó 3 moldes de 5 capas, cada uno con diferentes energías de compactación (12 golpes, 25 golpes y 56 golpes).
- e) Se retiró el collarín y disco espaciador de cada molde, pesó el molde con el suelo compactado y colocó papel filtro en la superficie.
- f) Se colocó pesas sobre la muestra del suelo aproximadamente 4,5 kg para simular la presión de sobre carga requerida y fijar marcas para que el deformímetro esté en cero y luego se sumergió los moldes en una piscina hasta que el agua cubra el molde y tenga acceso tanto a la parte superior como la parte inferior de la muestra.
- g) Se tomó lecturas de expansión o deformaciones a 0, 24, 48 y 96 horas de tiempo transcurrido.
- h) Al final de las 96 horas de inmersión, se sacó la muestra y se la dejó drenar por un tiempo de 15 minutos para luego pesar la muestra con el molde.
- i) Se colocó la muestra en la máquina de compresión y se sentó el pistón sobre la superficie del suelo, se fijó en cero el deformímetro de penetración y se encendió la máquina.
- j) Se tomó lecturas de penetración.
- k) Se extrajo muestras para el contenido de humedad de los tres moldes, en la parte superior del suelo, en la parte inferior del suelo y en el centro del suelo.

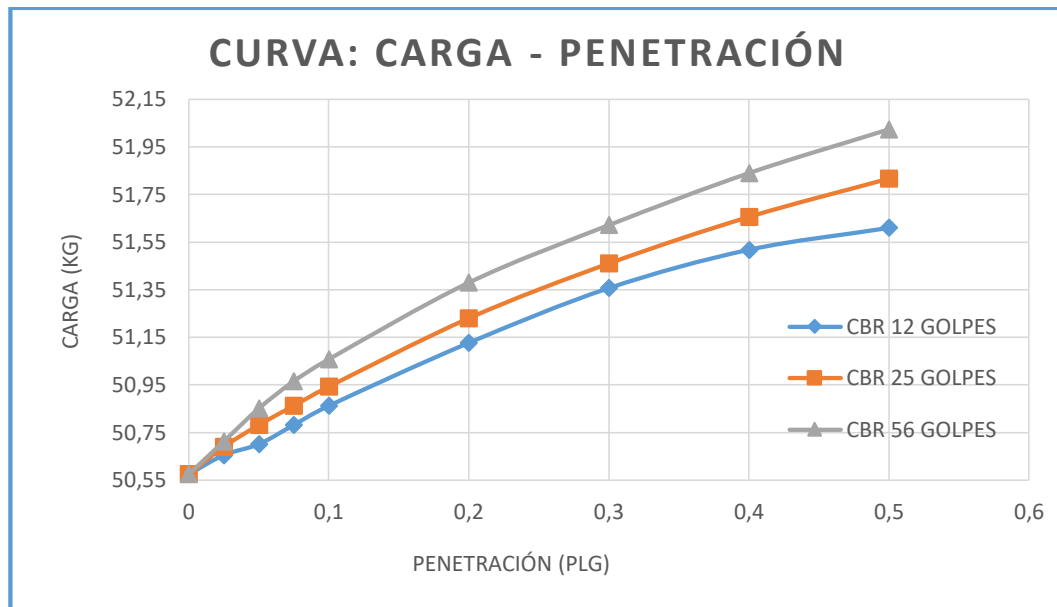
El ensayo de penetración se basa en la aplicación de una presión a una velocidad normalizada creciente efectuada mediante C.B.R. TESTER a la que va acopiada un pistón de sección anular sobre la muestra de suelo compactado con la humedad óptima.

Figura 3.1.10 Proceso de elaboración de Relación de Soporte California (C.B.R.)



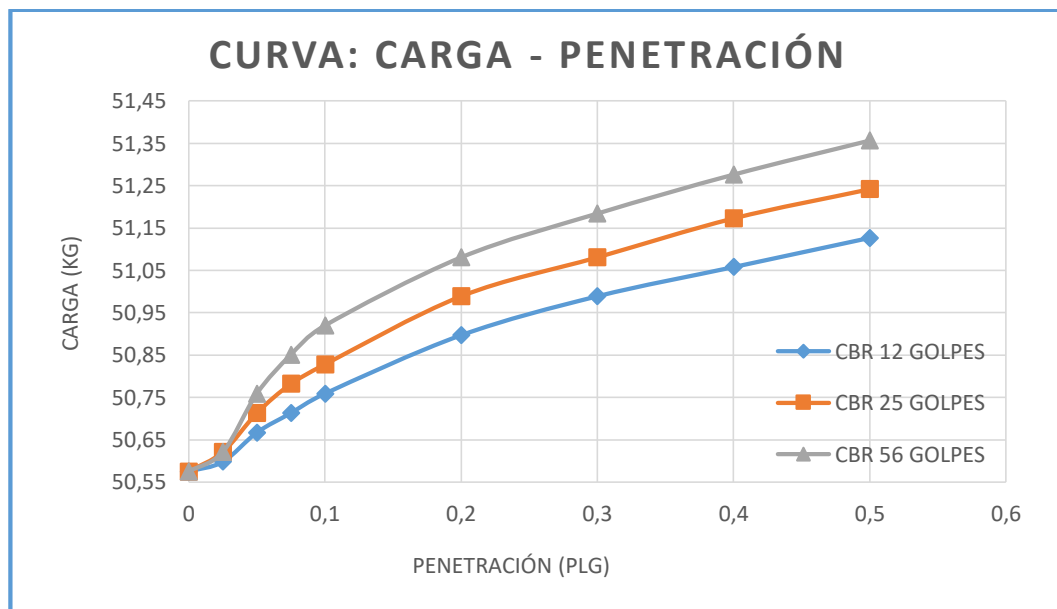
Fuente: Elaboración propia

Gráfico 3.1.13 Curva de carga vs Penetración suelo natural zona N° 1



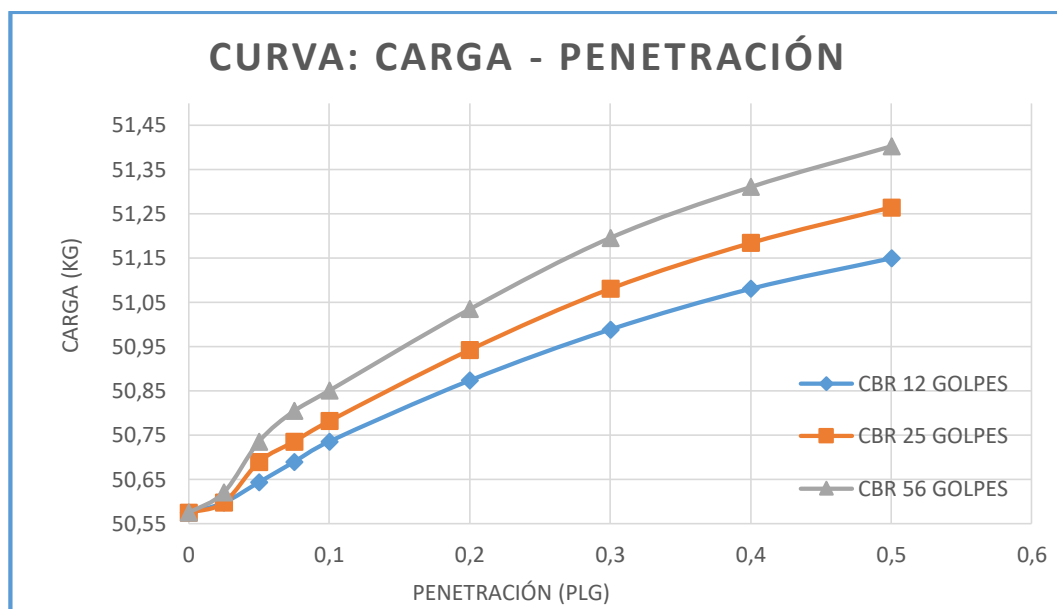
Fuente: Elaboración propia

Gráfico 3.1.14 Curva de carga vs Penetración suelo natural zona N° 2



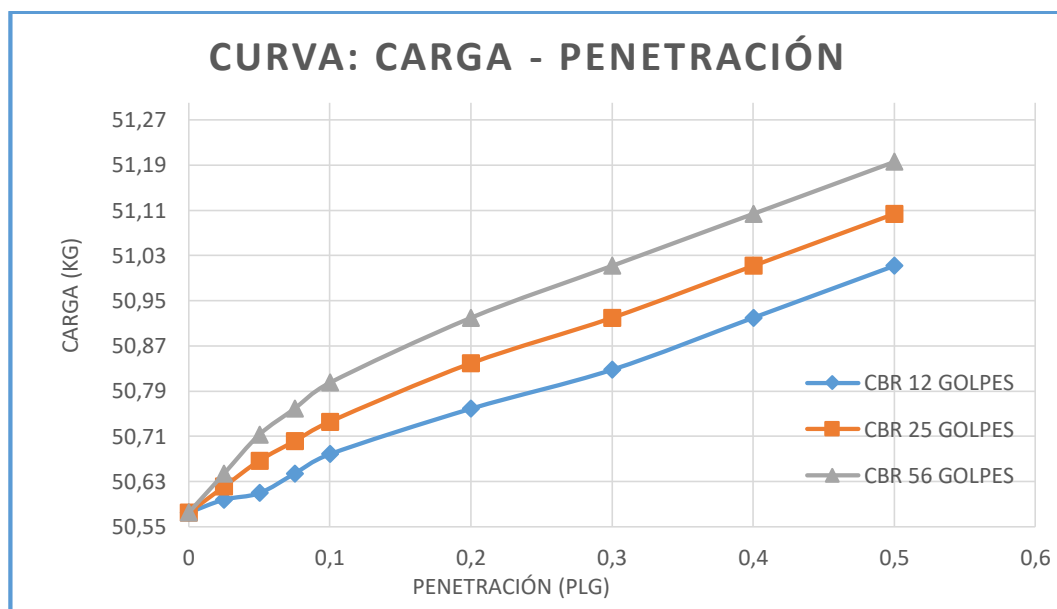
Fuente: Elaboración propia

Gráfico 3.1.15 Curva de carga vs Penetración suelo natural zona N° 3



Fuente: Elaboración propia

Gráfico 3.1.16 Curva de carga vs Penetración suelo natural zona N° 4



Fuente: Elaboración propia

Para mayor detalle de la realización y resultados del ensayo de C.B.R. véase en Anexo A - 4 C.B.R. suelo natural.

Tabla 3.1.8 Resultado de C.B.R en suelo natural

C.B.R.	Zona N° 1	Zona N° 2	Zona N° 3	Zona N° 4
C.B.R 95 % D. Max.	3.74 %	3.75 %	3.75 %	3.74 %
C.B.R 100 % D. Max	3.75 %	3.77 %	3.76 %	3.75 %
Expansión (%)	3.75 %	4.17 %	3.33 %	3.92 %

Fuente: Elaboración propia

El resultado indica que el suelo tiene baja resistencia a compresión y además posee porcentaje de expansión elevado, estos resultados revelan que el suelo podría ser categorizado como una subrasante pobre (S<sub>1</sub>) como indica la Tabla 2.4.1.

## CAPÍTULO IV

### CARACTERIZACIÓN, PROCESAMIENTO DE DATOS, DETERMINACIÓN DEL PORCENTAJE ÓPTIMO Y ANÁLISIS DE RESULTADOS UTILIZANDO SODA CÁUSTICA

#### 4.1. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DEL HIDRÓXIDO DE SODIO (OHNa)

El químico utilizado se obtuvo gracias a la Embotelladora Chaqueña S.A. la cual es importada de China, este producto es llamado Sosa Cáustica, sólida, fundida a 99 % empaquetada en tambores metálicos con un contenido neto de 250 Kg. y tiene un análisis químico técnico como se describe a continuación:

Tabla 4.1.1 Análisis químico del aditivo utilizado

Artículo	Medida	Estándar	Resultado
NaOH	%	99	99
NA <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	%	0.9 máx.	0.5
NACL	%	0.15 máx.	0.05
FE <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%	0.01 máx.	0.006
Superficie	--	superficie	solido blanco

Fuente: Elaboración propia

Tabla 4.1.2 Factura de Xingang, China

Cantidad	Descripción	Precio	Total	Total (Bs)
5000	Soda cáustica, sólida, fundida, min 99 %	747	3735	25723.13
1000	Flete marítimo	372.60	372.60	2566.11
1000	Seguro marítimo	12.40	12.40	85.40
Total		USD	4120	28374.65

Fuente: Elaboración propia

Para mayor detalle de las características de la soda caustica véase anexo A – 9 Especificaciones Técnicas de soda cáustica.



Figura 4.1.1 Obtención de soda cáustica



Fuente: Elaboración Propia

Figura 4.1.2 Proceso de triturado de la soda cáustica



Fuente: Elaboración propia

Figura 4.1.3 Proceso de dilución de la soda cáustica



Fuente: Elaboración propia

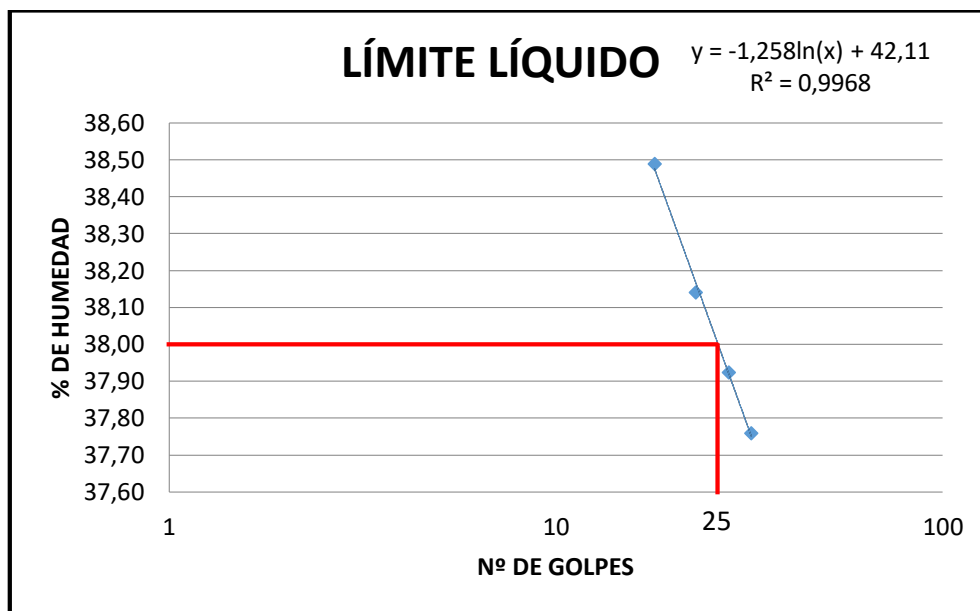
## 4.2. ENSAYOS REALIZADOS CON ADICIÓN DE SODA CÁUSTICA

Se realiza ensayos que nos revelan la variación en las propiedades físicas y mecánicas del suelo con la adición de diferentes porcentajes de soda cáustica.

#### 4.2.1. Determinación de los Límites de Atterberg con soda cáustica

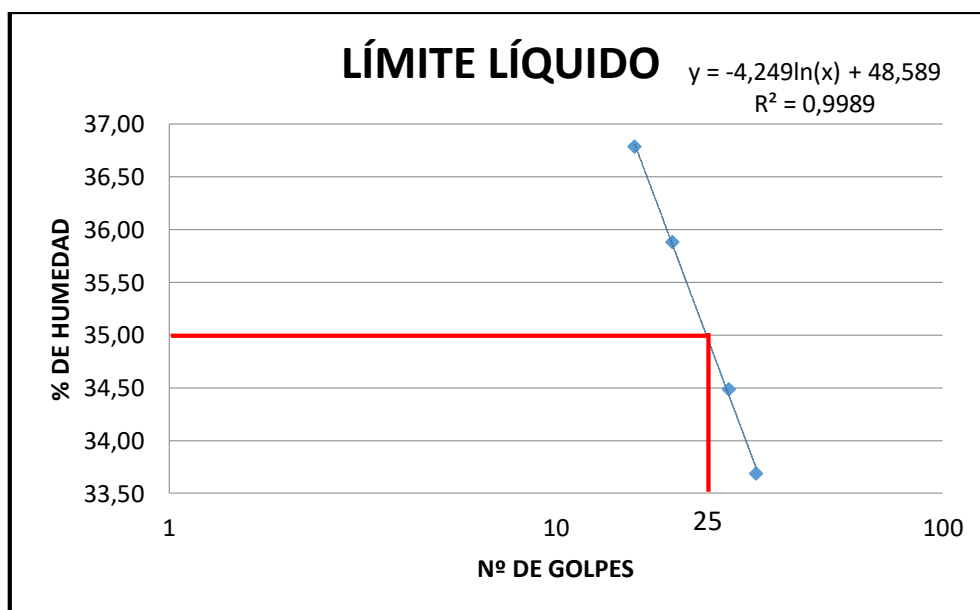
Denotando los porcentajes de soda cáustica a utilizar se presenta el procedimiento y los resultados obtenidos mediante el ensayo de Límites de Atterberg

Gráfico 4.2.1 Límite Líquido con 1 % de soda cáustica



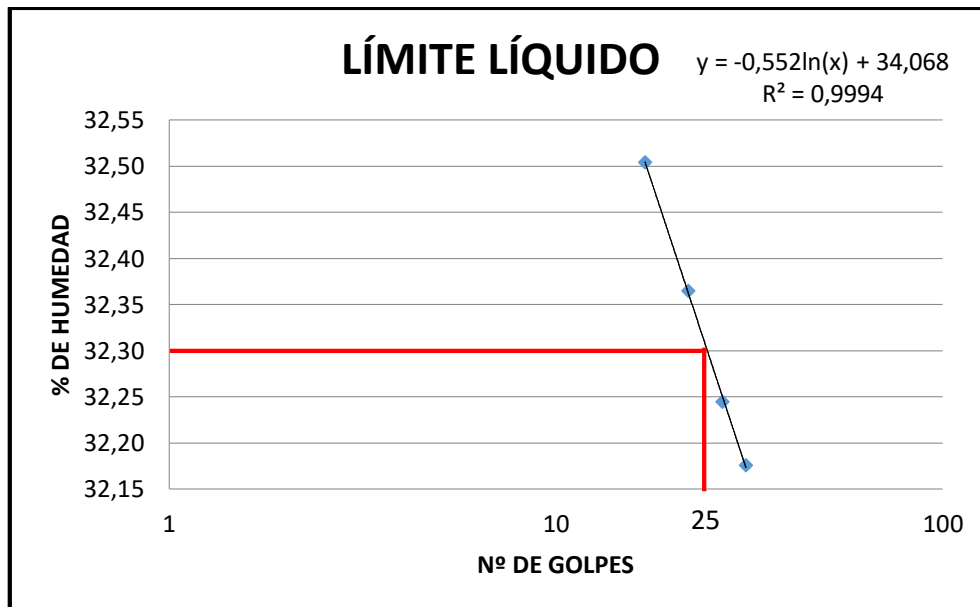
Fuente: Elaboración propia

Gráfico 4.2.2 Límite Líquido con 5 % de soda cáustica



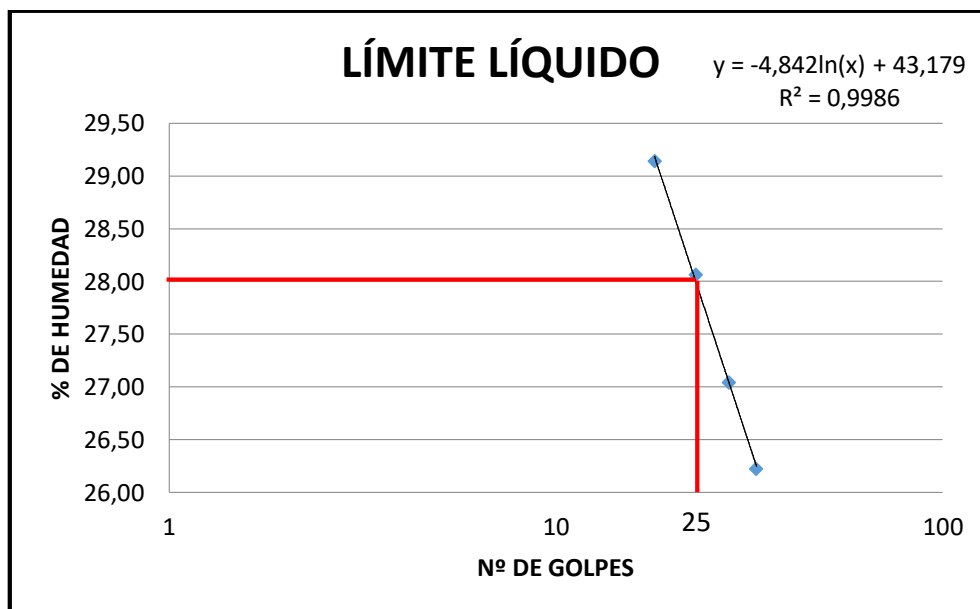
Fuente: Elaboración propia

Gráfico 4.2.3 Límite Líquido con 10 % de soda cáustica



Fuente: Elaboración propia

Gráfico 4.2.4 Límite Líquido con 20 % de soda cáustica



Fuente: Elaboración propia

Tabla 4.2.1 Límite Plástico con soda cáustica

Límite Plástico	1 % OHNa	5 % OHNa	10 % OHNa	20 % OHNa
Contenido de humedad (%)	23.23	30.40	28.17	26.03
	23.10	30.30	28.11	26.09
	22.98	30.85	28.08	26.13
Promedio	23.00	31.00	28.00	26.00

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 4.2.2 Resultados de Límites con soda cáustica

Porcentajes de soda cáustica	1 % OHNa	5 % OHNa	10 % OHNa	20 % OHNa
Límite Líquido L.L.(%)	38	35	32	28
Límite Plástico L.P.(%)	23	31	28	26
Índice de Plasticidad I.P.(%)	15	4	4	2

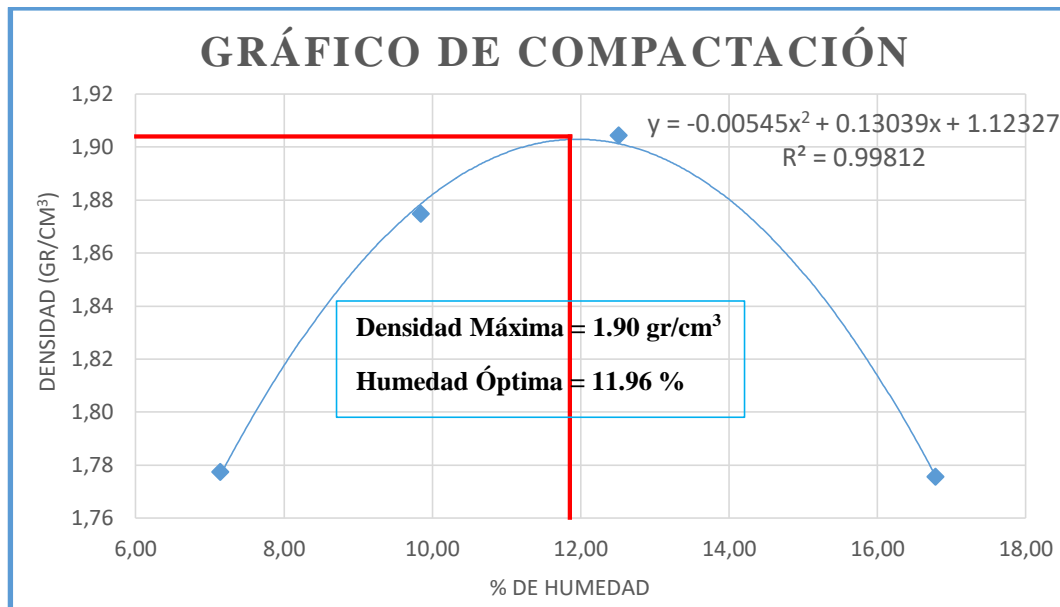
Fuente: Elaboración propia

Para mayor detalle de la realización del ensayo de Límites de Atterberg con soda cáustica véase en Anexo A - 5 Límites de Atterberg con soda cáustica

#### 4.2.2. Determinación de Proctor Modificado con soda cáustica

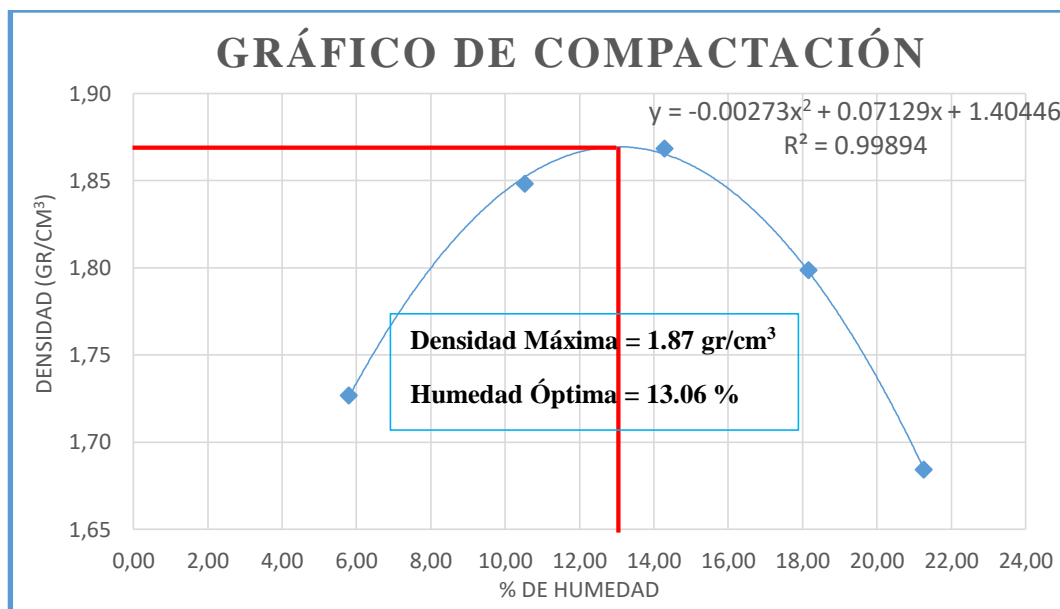
El ensayo de Proctor Modificado (compactación T - 180) se realizó diluyendo la soda cáustica en recipientes con agua en una hornilla hasta alcanzar la temperatura adecuada de disolución a fin de no provocar gases nocivos; luego esta disolución se vertió en la muestra de suelo con el motivo de mezclarla y homogeneizarla.

Gráfico 4.2.5 Compactación con 1 % de soda cáustica



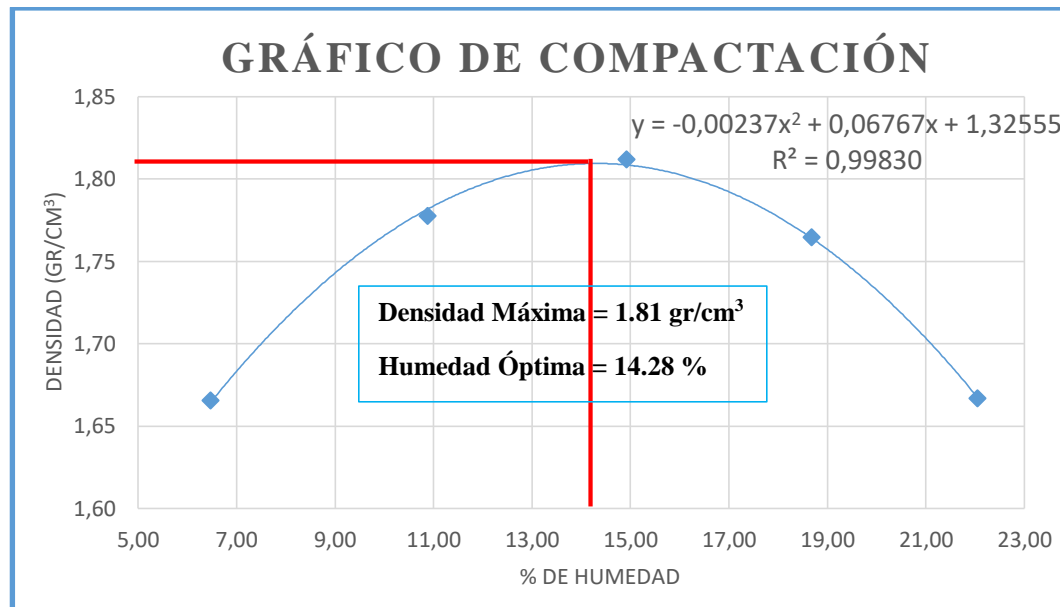
Fuente: Elaboración Propia

Gráfico 4.2.6 Compactación con 5 % de soda cáustica



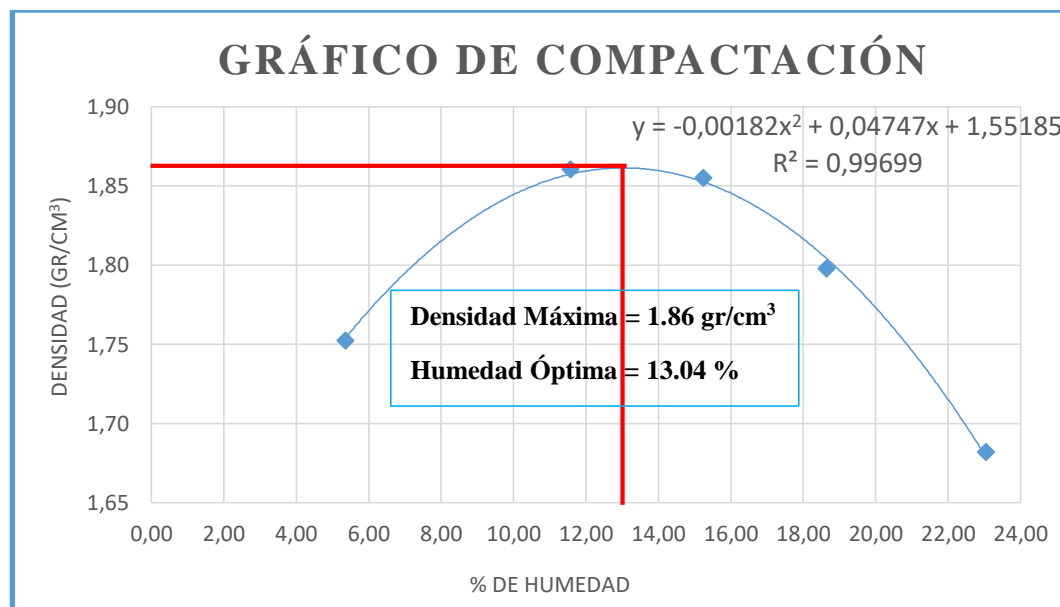
Fuente: Elaboración Propia

Gráfico 4.2.7 Compactación con 10 % de soda cáustica



Fuente: Elaboración propia

Gráfico 4.2.8 Compactación con 20 % de soda cáustica



Fuente: Elaboración propia

Tabla 4.2.3 Resultados de Proctor Modificado con soda cáustica

Porcentajes de soda cáustica	1 % OHNa	5 % OHNa	10 % OHNa	20 % OHNa
Densidad suelo seco (gr/cm <sup>3</sup> )	1.90	1.87	1.81	1.86
Humedad óptima (%)	11.96	13.06	14.28	13.04

Fuente: Elaboración propia

Para mayor detalle de la realización y de los resultados del ensayo de Proctor Modificado con adición de porcentajes de soda cáustica véase en Anexo A - 6 Proctor Modificado con soda cáustica.

#### 4.2.3. Determinación de C.B.R. y expansión del suelo con soda cáustica

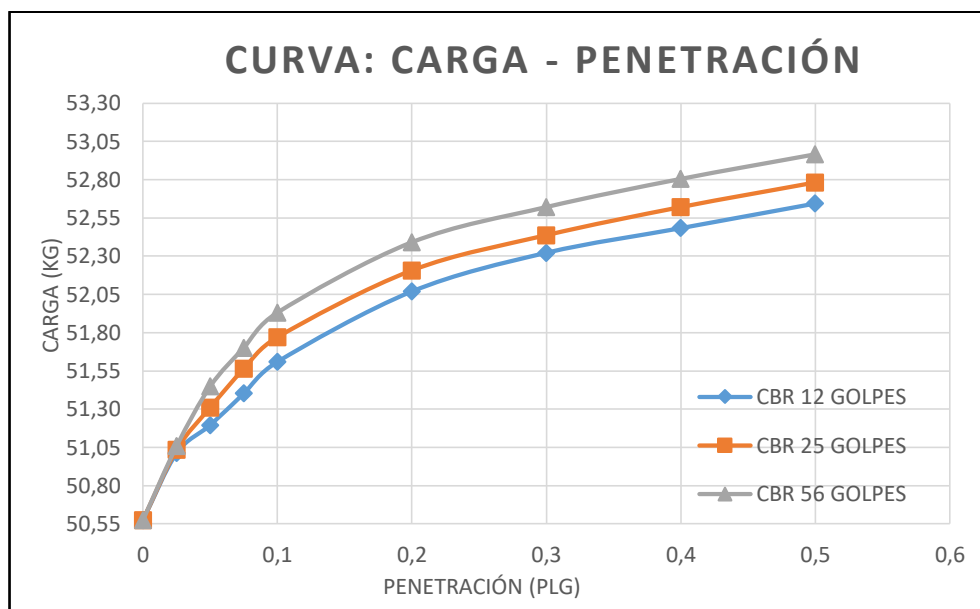
EL ensayo de C.B.R. con soda cáustica se realizó de la siguiente manera:

Primeramente, se pesó en gramos el porcentaje de adición de soda cáustica, luego se diluyo la soda cáustica en estado sólido en un recipiente con agua la cual estaba a 32 °C; posteriormente fue vertida en la muestra con el fin de mezclar y homogeneizar la muestra; finalmente, se procedió a compactar las 5 capas en los diferentes moldes con sus respectivos números de golpes (12 golpes, 25golpes y 56 golpes).

Inmediatamente se los sumergió a una piscina con pesas dentro de los moldes a fin de suponer una hipótesis critica de suelo en saturación de agua y de constante tráfico durante 96 horas para luego hacerlos correr en la máquina de C.B.R. TESTER (presa inconfineda) y obtener resultados de penetración vs carga de la muestra.

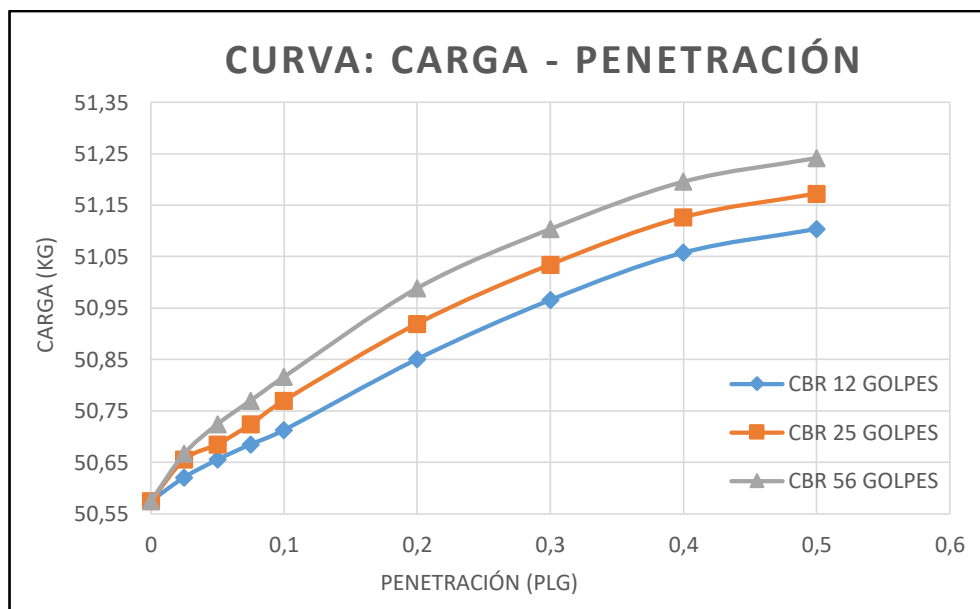


Gráfico 4.2.9 Curva de carga vs Penetración (1 % soda cáustica)



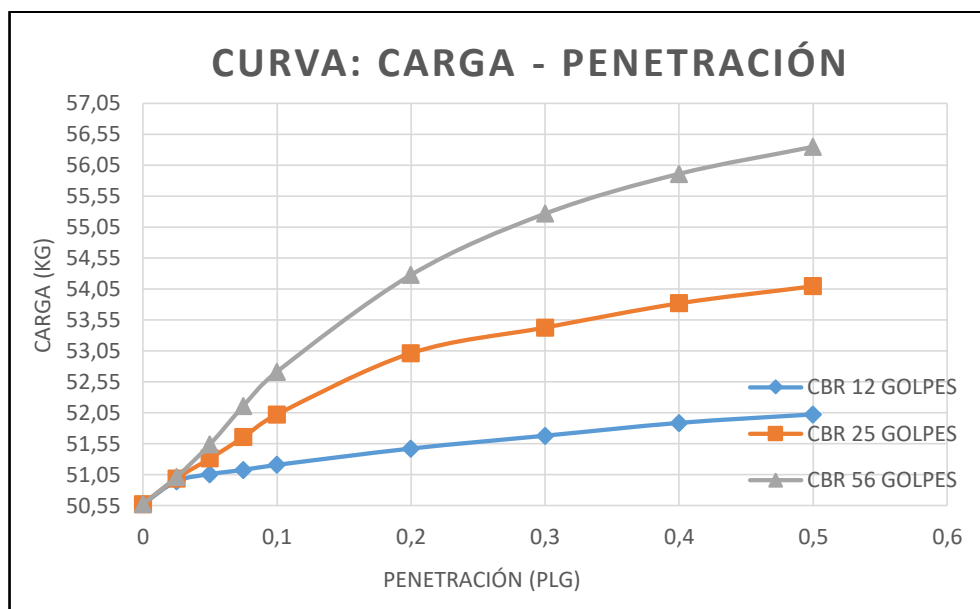
Fuente: Elaboración propia

Gráfico 4.2.10 Curva de carga vs Penetración (5 % soda cáustica)



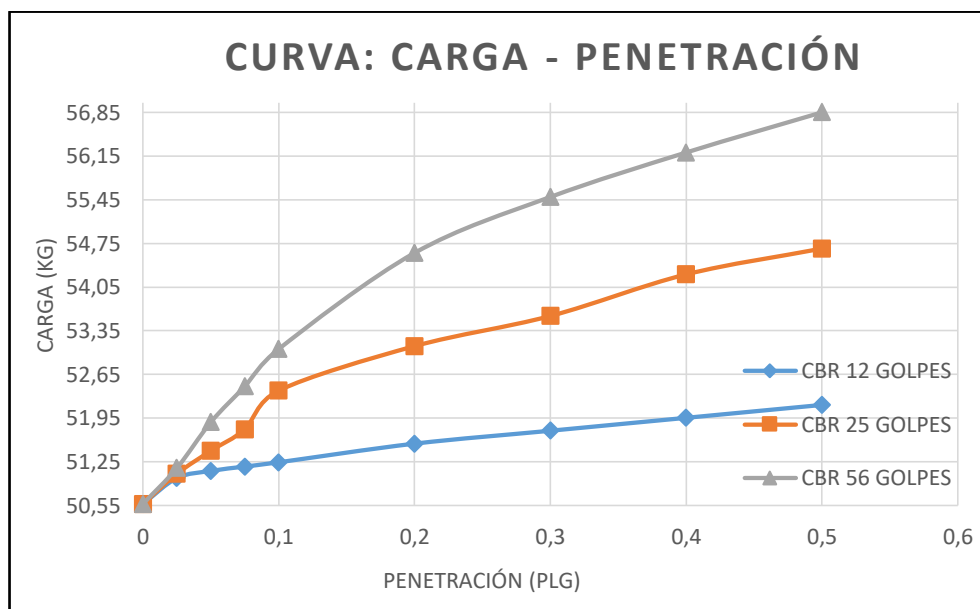
Fuente: Elaboración propia

Gráfico 4.2.11 Curva de carga vs Penetración (10 % soda cáustica)



Fuente: Elaboración propia

Gráfico 4.2.12 Curva de carga vs Penetración (20 % soda cáustica)



Fuente: Elaboración propia

Tabla 4.2.4 Resultado de C.B.R. con soda cáustica

Porcentajes de soda cáustica	1 % OHNa	5 % OHNa	10 % OHNa	20 % OHNa
C.B.R. 100 % D. Max. (%)	3.83	3.87	4.06	4.16
C.B.R. 95 % D. Max. (%)	3.82	3.84	4.02	4.11
Expansión (%)	0.67	1.75	7.33	9.16

Fuente: Elaboración propia

Para mayor detalle de la realización y de los resultados del ensayo de C.B.R. con adición de porcentajes de soda cáustica véase en Anexo A - 7 C.B.R con soda cáustica.

### 4.3. DETERMINACIÓN DE PORCENTAJE ÓPTIMO

Se determinó el porcentaje óptimo de soda cáustica partiendo de los requerimientos mínimos que debe cumplir una subrasante los cuales son:

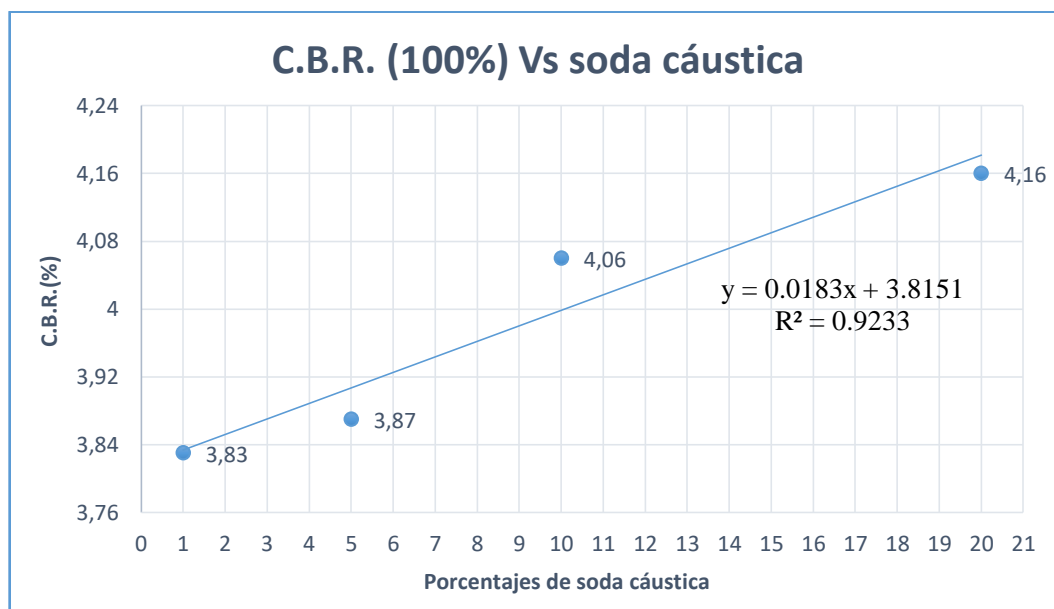
Tabla 4.3.1 Requisitos de calidad para capa subrasante

Características	Valores
C.B.R. mínimo (%)	3
Expansión máxima (%)	4

Fuente: Manual de Carreteras, Vol. VII, ABC

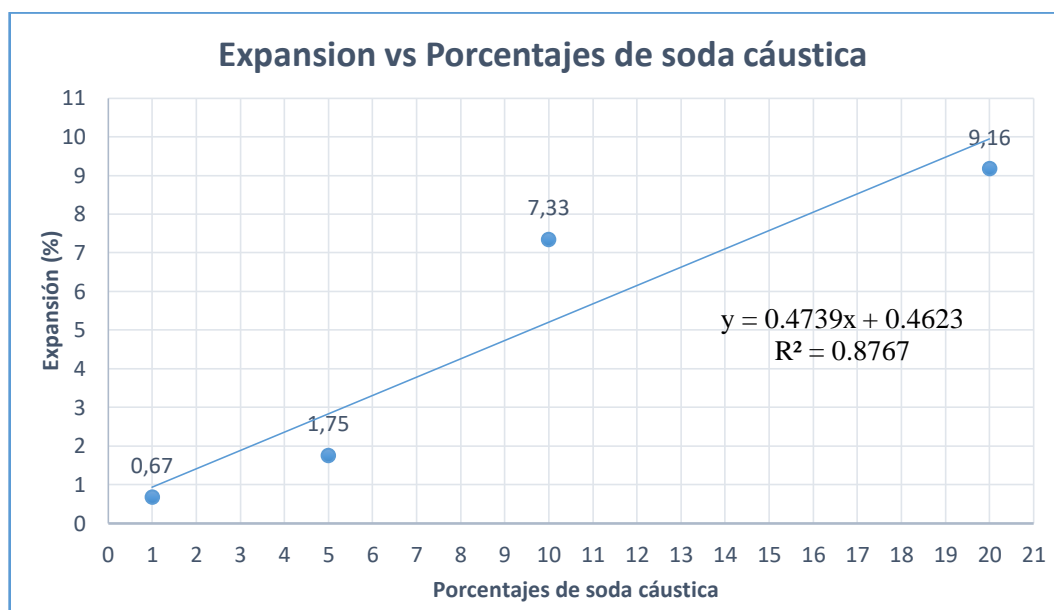
Motivo por el cual se generaron gráficas para demostrar mejor la obtención del porcentaje óptimo de soda cáustica en la muestra.

Gráfico 4.3.1 C.B.R. vs soda cáustica



Fuente: Elaboración propia

Gráfico 4.3.2 Expansión vs soda cáustica



Fuente: Elaboración propia

Cabe hacer notar que los requerimientos mínimos para una subrasante de suelo natural son C.B.R. y Expansión; y ya que nuestra muestra de suelo posee un C.B.R. mayor al mínimo requerido, por lo que se adopta el otro parámetro de expansión a controlar.

Se planea realizar un estudio químico basado en el pH contenido en la muestra y en la variación al añadir soda cáustica.

Gráfico 4.3.3 Contenido de pH en la muestra

Soda cáustica	Suelo natural	1 % OHNa	5 % OHNa	10 % OHNa
Variación pH	7.6	10.60	10.21	10.90
	7.9	10.67	10.23	10.97

Fuente: Elaboración propia

Se puede observar que la muestra contiene un pH moderado el cual la califica como arcilla A – 6, levemente básica y al agregar 1 % de OHNa se observa un incremento en su basicidad entre 2.7 y 3.07 unidades de pH, comportamiento el cual revela una conglomeración de partículas que ayuda a controlar el parámetro de expansión, luego al añadir 5 % y 10 % la variación de pH es leve motivo por el cual se adopta como porcentaje óptimo el 1 %.

Para mayor detalle de los resultados del ensayo de pH véase en Anexo A - 10 Informe y Análisis químico.

Figura 4.3.1 Elaboración de C.B.R. con porcentaje óptimo



Fuente: Elaboración propia

Tabla 4.3.2 Resultados de porcentaje óptimo

N°	C.B.R. 95 %	C.B.R. 100 %	Expansión
1	3.85	3.86	0.17
2	3.87	3.89	0.42
3	3.85	3.87	0.17
4	3.82	3.83	0.67
5	3.85	3.86	0.42
6	3.85	3.87	0.42
7	3.88	3.90	0.33
8	3.85	3.86	0.42
9	3.83	3.84	0.42
10	3.88	3.91	0.83
11	3.80	3.81	1.67
12	3.79	3.80	1.08
13	3.80	3.81	1.25
14	3.79	3.80	1.25
15	3.78	3.79	0.83

Fuente: Elaboración propia

Para mayor detalle de los resultados del ensayo de C.B.R. con porcentajes óptimo de soda cáustica véase en Anexo A - 7 C.B.R con soda cáustica

### Estadística inferencial

Rango o recorrido :

$$R = X_{\text{máx}} - X_{\text{mín}}$$

$$R = 3.88 - 3.78 = 0.1$$

Número de intervalos o clases (m) :

$$m = 1 + 3.3 * \log(n)$$

$$m = 1 + 3.3 * \log(15) = 4.88 \approx 5$$

Amplitud del intervalo o amplitud de la clase (a) :

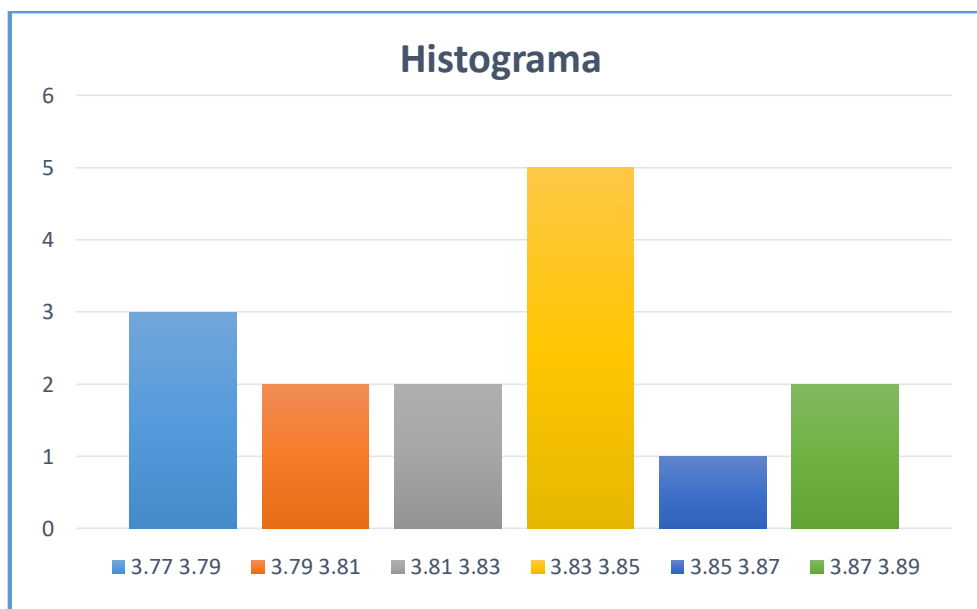
$$a = \frac{\text{Recorrido}}{\text{N}^\circ \text{ de clases}} = \frac{R}{m} = \frac{0.1}{5} = 0.02$$

Tabla 4.3.3 Tabulación de C.B.R. 95 %

Intervalos		Marca de clase (Xi)	Frecuencia absoluta(fi)	Frecuencia relativa(hi)	Frecuencia relativa acumulada(Hi)
Lím. inf.	Lím. sup.				
3.77	3.79	3.78	3	20 %	20.00 %
3.79	3.81	3.80	2	13 %	33.33 %
3.81	3.83	3.82	2	13 %	46.67 %
3.83	3.85	3.84	5	33 %	80.00 %
3.85	3.87	3.86	1	07 %	86.67 %
3.87	3.89	3.88	2	13 %	100.00 %
Total			15	100 %	

Fuente: Elaboración propia

Gráfico 4.3.4 Histograma C.B.R. 95 %



Fuente: Elaboración propia

Desviación estándar

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}} = \sqrt{\frac{0.02}{15 - 1}} = 0.034$$

Error medio de la media

$$\epsilon_{\bar{x}} = \frac{S}{\sqrt{n}} = \frac{0.034}{\sqrt{15}} = 0.009$$

Nivel de confianza

$$\text{NC} = 95 \% \longrightarrow Z = 1.96$$

Error probable

$$\epsilon_p = Z * \epsilon_{\bar{x}} = 1.96 * 0.009 = 0.017$$

$$\text{Valor adoptado} \longrightarrow Va = \bar{x} \pm \epsilon_p$$

$$Va = 3.83 + 0.017 = 3.85$$

$$Va = 3.83 - 0.017 = 3.82$$

$$\text{Intervalo de confianza} \longrightarrow [3.82 ; 3.85[$$

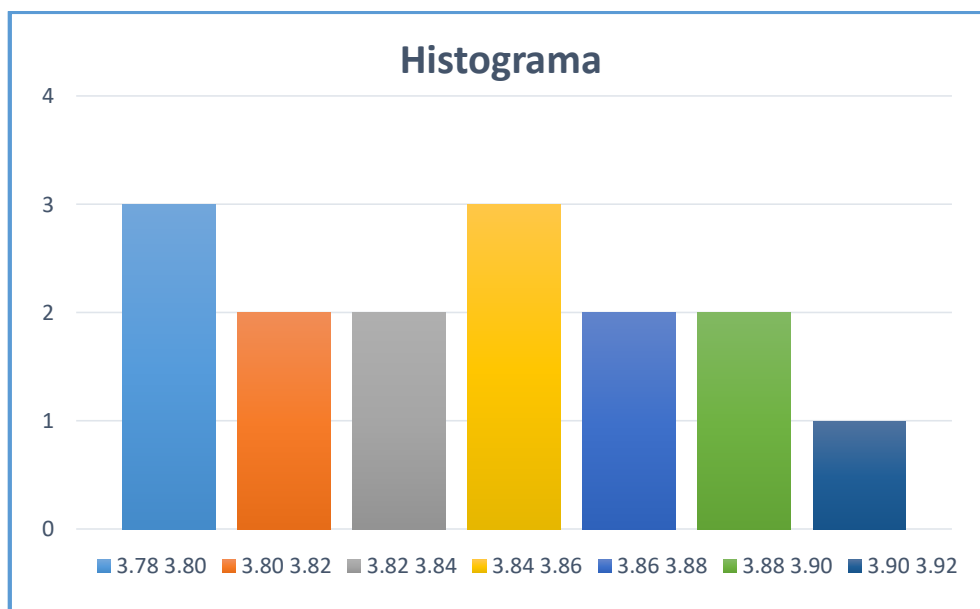
Tabla 4.3.4 Tabulación de C.B.R. 100 %

Intervalos		Marca de clase (Xi)	Frecuencia absoluta(fi)	Frecuencia relativa(hi)	Frecuencia relativa acumulada(Hi)
Lím. inf.	Lím. sup.				
3.78	3.80	3.79	3	20 %	20 %
3.80	3.82	3.81	2	13 %	33 %
3.82	3.84	3.83	2	13 %	47 %
3.84	3.86	3.85	3	20 %	67 %
3.86	3.88	3.87	2	13 %	80 %
3.88	3.90	3.89	2	13 %	93 %
3.90	3.92	3.91	1	07 %	100 %
Total			15	100 %	

Fuente: Elaboración propia



Gráfico 4.3.5 Histograma C.B.R. 100 %



Fuente: Elaboración propia

Desviación estándar

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}} = \sqrt{\frac{0.02}{15 - 1}} = 0.039$$

Error medio de la media

$$\epsilon_{\bar{x}} = \frac{S}{\sqrt{n}} = \frac{0.039}{\sqrt{15}} = 0.010$$

Nivel de confianza

$$\text{NC} = 95 \% \longrightarrow Z = 1.96$$

Error probable

$$\epsilon_p = Z * \epsilon_{\bar{x}} = 1.96 * 0.010 = 0.020$$

Valor adoptado

$$\longrightarrow \text{Va} = \bar{x} \pm \epsilon_p$$

$$\text{Va} = 3.85 + 0.0020 = 3.87$$

$$Va = 3.85 - 0.020 = 3.83$$

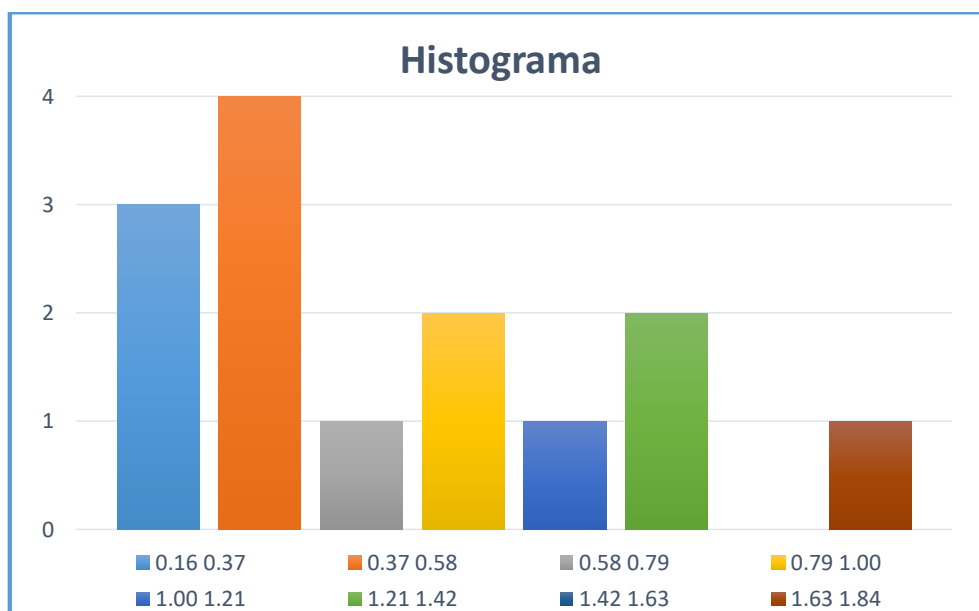
Intervalo de confianza  $\longrightarrow$  [3.83 ; 3.87[

Tabla 4.3.5 Tabulación de expansión

Intervalos		Marca de clase (Xi)	Frecuencia absoluta(fi)	Frecuencia relativa(hi)	Frecuencia relativa acumulada(Hi)
Lím. inf.	Lím. sup.				
0.16	0.37	0.27	3	20 %	20 %
0.37	0.58	0.48	5	33 %	53 %
0.58	0.79	0.69	1	07 %	60 %
0.79	1.00	0.90	2	13 %	73 %
1.00	1.21	1.11	1	07 %	80 %
1.21	1.42	1.32	2	13 %	93 %
1.42	1.63	1.53	0	00 %	93 %
1.63	1.84	1.74	1	07 %	100 %
Total			15	1.00 %	

Fuente: Elaboración propia

Gráfico 4.3.6 Histograma de expansión



Fuente: Elaboración propia

Desviación estándar

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}} = \sqrt{\frac{2.81}{15 - 1}} = 0.448$$

Error medio de la media

$$\epsilon_{\bar{x}} = \frac{S}{\sqrt{n}} = \frac{0.448}{\sqrt{15}} = 0.116$$

Nivel de confianza

$$\text{NC} = 95 \% \longrightarrow Z = 1.96$$

Error probable

$$\epsilon_p = Z * \epsilon_{\bar{x}} = 1.96 * 0.116 = 0.227$$

$$\text{Valor adoptado} \longrightarrow \text{Va} = \bar{x} \pm \epsilon_p$$

$$\text{Va} = 0.69 + 0.227 = 0.92$$

$$\text{Va} = 0.69 - 0.227 = 0.46$$

$$\text{Intervalo de confianza} \longrightarrow ]0.46 ; 0.92]$$

Se realiza un estudio estadístico el cual revelara los siguientes resultados:

Prueba de Hipótesis para el C.B.R. 95 %

Datos:

N = 15 C.B.R

$\bar{x} = 3.83$

S = 0.034

$\mu = 3$

### Generando Hipótesis

Analizando las propiedades físico-mecánicas de los suelos finos; se podrá establecer la existencia de una mejora en cuanto al C.B.R.

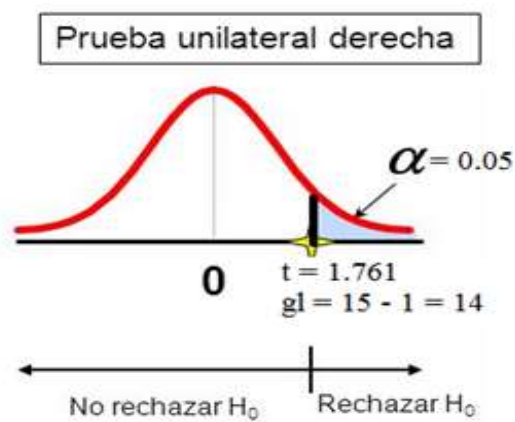
$$H_i \quad \bar{x} > \mu \quad 3 > 3.83$$

$$H_o \quad \bar{x} \leq \mu \quad 3 \leq 3.83$$

Determinar el nivel de significancia

NC = 95 %

$\alpha = 0.05$



$$t = \frac{\bar{x} - \mu}{\frac{s}{\sqrt{n}}} = \frac{3 - 3.83}{\frac{0.034}{\sqrt{15}}} = 95.12$$

La hipótesis alternativa se verifica y se observa un aumento en el C.B.R.

Prueba de Hipótesis para la expansión

Datos:

$N = 15$  C.B.R

$\bar{x} = 0.69$

$S = 0.45$

$$\mu = 4$$

Generando Hipótesis

Analizando las propiedades físico-mecánicas de los suelos finos; se podrá establecer la existencia de un descenso en cuanto a la expansión

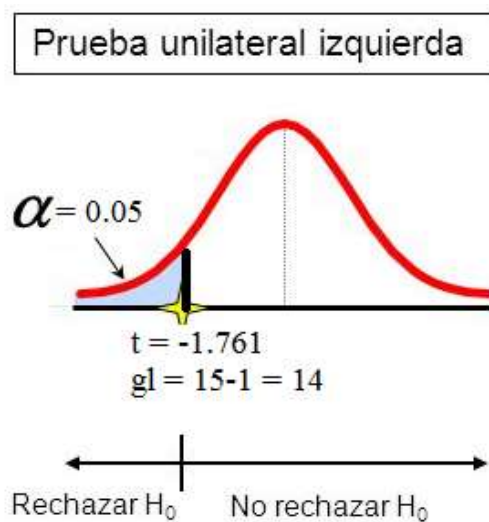
$$H_i \quad \bar{x} > \mu \quad 0.69 > 4$$

$$H_o \quad \bar{x} \leq \mu \quad 0.69 \leq 4$$

Determinar el nivel de significancia

$$NC = 95 \%$$

$$\alpha = 0.05$$



$$t = \frac{\bar{x} - \mu}{\frac{s}{\sqrt{n}}} = \frac{0.69 - 4}{\frac{0.45}{\sqrt{15}}} = -19.95$$

La hipótesis alternativa se verifica y se observa una reducción de la expansión.

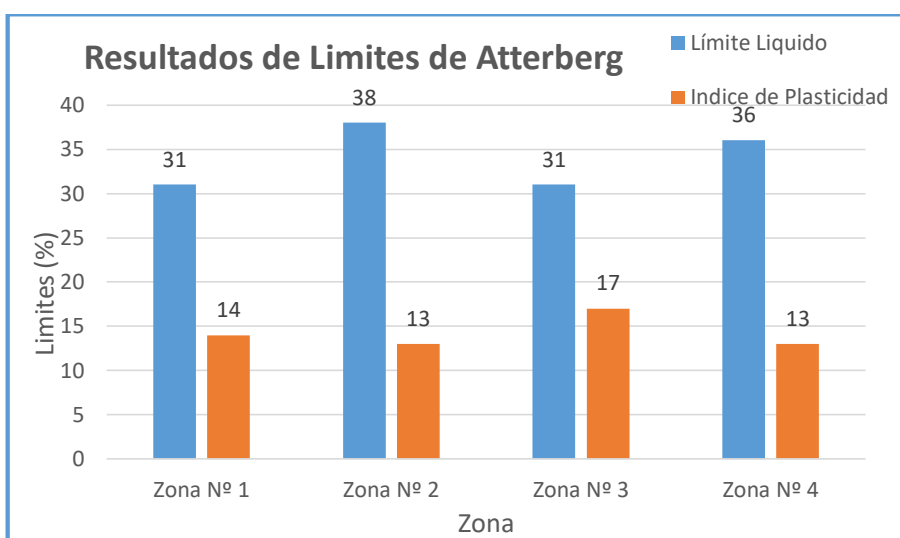
#### 4.4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

A continuación, se presenta los análisis de los resultados en los ensayos realizados a la muestra de suelo en estado natural y al suelo con la adición de soda cáustica.

#### 4.4.1. Análisis de resultados de los ensayos realizados a suelo en su estado natural

Los ensayos realizados al suelo en su estado natural revelan una textura fina, usualmente llamada arcilla, la cual pasa más del 85 % el tamiz N° 200, una consistencia baja con un límite líquido menor al 50 % y el índice de plasticidad mayor a 10 % usando los métodos de clasificación de suelos, revelan un suelo tipo A - 6 según AASHTO y según S.U.C.S una arcilla de baja plasticidad (“CL”) como se expone en la Tabla 3.1.6.

Gráfico 4.4.1 Resultados de Límites de Atterberg



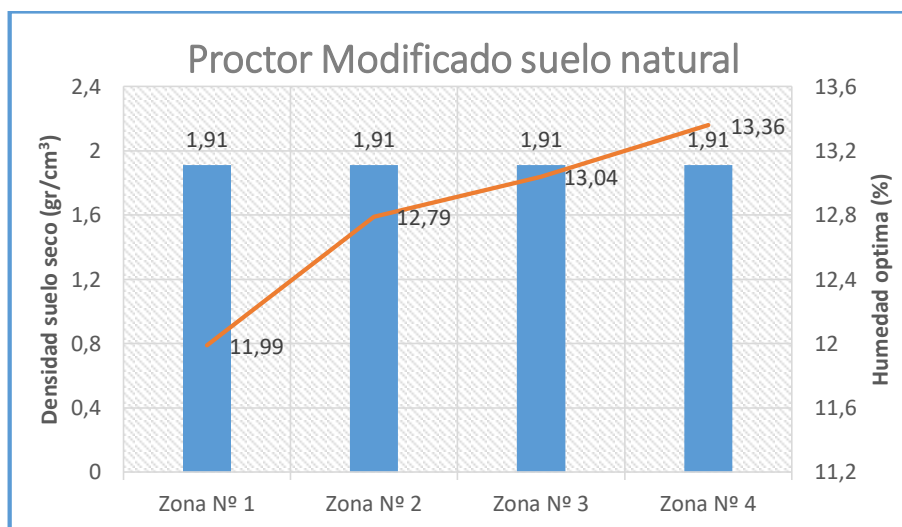
Fuente: Elaboración propia

Posteriormente, se realizó el ensayo Proctor Modificado (compactación T-180) cuyos resultados son representados en las Gráficas 3.1.9, Gráfica 3.1.10, Gráfica 3.1.11 y Gráfica 3.1.12, estas gráficas describen el comportamiento de las densidades del suelo a diferentes porcentajes de humedad; utilizando curvas mejor adecuadas al comportamiento del suelo se obtuvo el punto máximo de cada gráfica mejor llamado como densidad máxima y a la cual corresponde una humedad llamada humedad óptima como se presenta en la Tabla 3.1.7.

Se obtuvo en las cuatro zonas de estudio resultados de densidad y humedad con las cuales se utilizó para realizar el ensayo de relación de soporte california (C.B.R.); procediendo con el ensayo se obtuvo resultados presentados en la Tabla 3.1.8 la que indica valores de C.B.R. a 95 % y 100 % además de la expansión del suelo generada por la saturación de agua y finalmente las Gráficas 3.1.13, Gráficas 3.1.14, Gráficas 3.1.15 y Gráficas 3.1.16

demuestran el comportamiento del suelo al ser sometido a una prensa inconfinada, este ensayo se realizó con el fin de conocer la resistencia y la estabilidad volumétrica que posee el suelo.

Gráfico 4.4.2 Resultados de Proctor Modificado



Fuente: Elaboración propia

#### 4.4.2. Análisis de los resultados obtenidos del suelo tratado con soda cáustica

A continuación, se analiza la variación de las propiedades del suelo mezclado con diferentes porcentajes de soda cáustica.

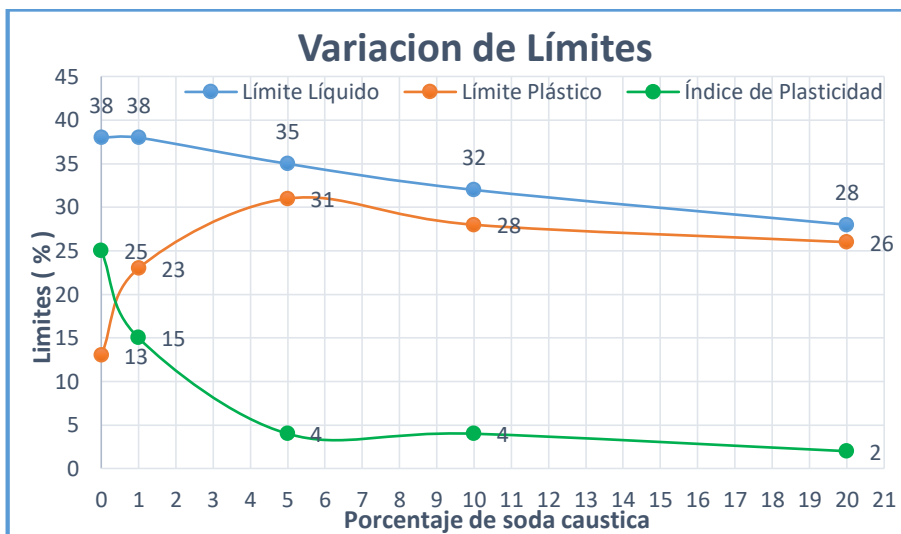
##### 4.4.2.1. Resultados de Límites de Atterberg con soda cáustica

En el ensayo de Límites de Atterberg se pudo apreciar que con el aumento en porcentajes de soda cáustica esta propiedad mejoró; es decir que su Límite Líquido bajó y aumentó Límite Plástico, este resultado indica que el Índice de Plasticidad descendiera significativamente es decir que las propiedades del suelo están mejorando. A continuación, se muestra un gráfico que representa la variación de índices de plasticidad con el aumento en porcentajes de soda cáustica.

El Gráfico 4.4.3 revela el comportamiento de los límites conforme se añade soda cáustica a la muestra; así como el Límite Líquido tiende a decrecer desde 38 % a 1 % de soda cáustica hasta llegar a 28 % para 20 % de soda cáustica, mientras que el Límite Plástico empieza a crecer conforme se adiciona soda cáustica hasta mantenerse parcialmente

constante, lo que describe que los Índices de Plasticidad tienden a bajar desde 13 % con 1 % de soda cáustica hasta 2 % para 20 % de soda cáustica.

Gráfico 4.4.3 Variación de límites con adición de soda cáustica

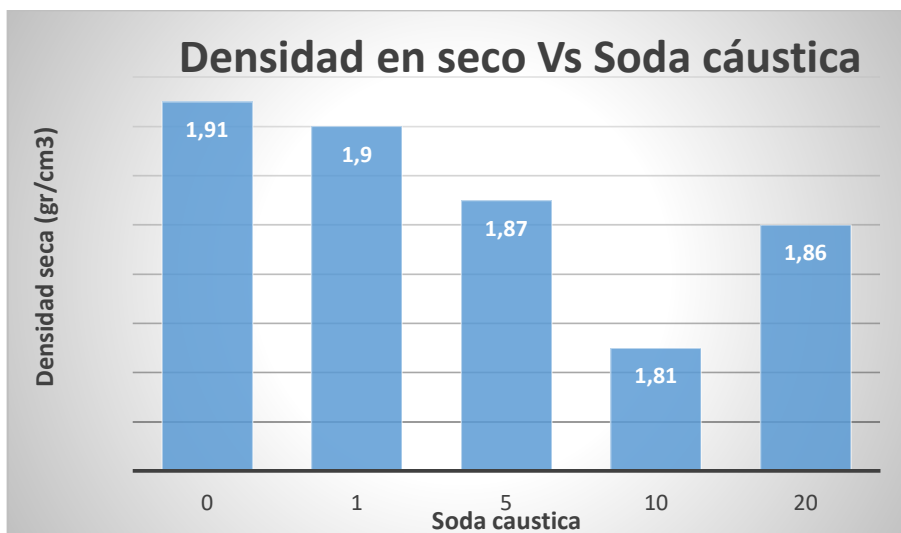


Fuente: Elaboración propia

#### 4.4.2.2. Resultados de densidad con el aumento de soda cáustica

En este punto se observará el comportamiento de la densidad con el aumento de soda cáustica.

Gráfico 4.4.4 Relación densidad máxima vs soda cáustica



Fuente: Elaboración propia

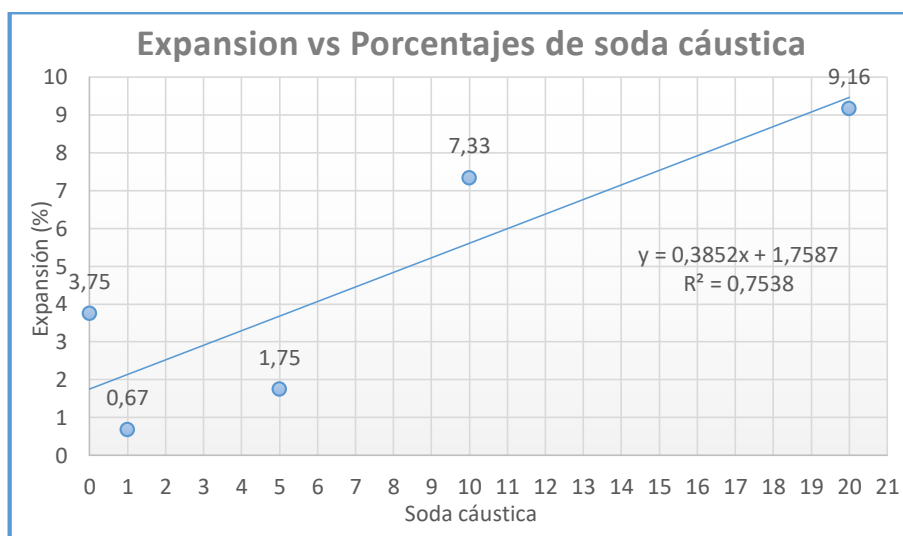


Describiendo el comportamiento del suelo mezclado con soda cáustica mostrado en el Gráfico 4.4.4, se observa que el suelo en estado natural tiene una densidad de  $1.91 \text{ gr/cm}^3$  y con el aumento de soda cáustica comienza a decrecer a un valor de  $1.90 \text{ gr/cm}^3$  para un 1 % de soda cáustica y continua decreciendo hasta  $1.81 \text{ gr/cm}^3$  para un 10 % de soda cáustica para luego crecer a un valor de  $1.86 \text{ gr/cm}^3$  para un 20 % de soda cáustica, estos resultados revelan un descenso de la densidad de este tipo de suelo al añadir soda cáustica hasta un 10 % del mismo, para luego aumentar su densidad con 20 % del mismo.

#### 4.4.2.3. Resultados de Expansión y C.B.R.

A continuación se aprecia el comportamiento de la muestra conforme se vaya aumentando porcentajes de soda cáustica, en el Gráfico 4.4.5 se observa que el suelo natural presenta una expansión de 3.75 % y al añadir 1 % de soda cáustica desciende hasta un 0.67 % de expansión para luego aumentar a 1.75 % con un 5 % de soda cáustica y conforme se adiciona soda cáustica aumenta la expansión, así como para un 10 % de soda cáustica se tiene una expansión del 7.33 % e ir aumentando hasta 9.16 % de expansión el cual le corresponde un 20 % de soda cáustica, lo cual informa que los valores recomendados de expansión según norma están contenidos entre 0 % y 4 %.

Gráfico 4.4.5 Expansión vs soda cáustica

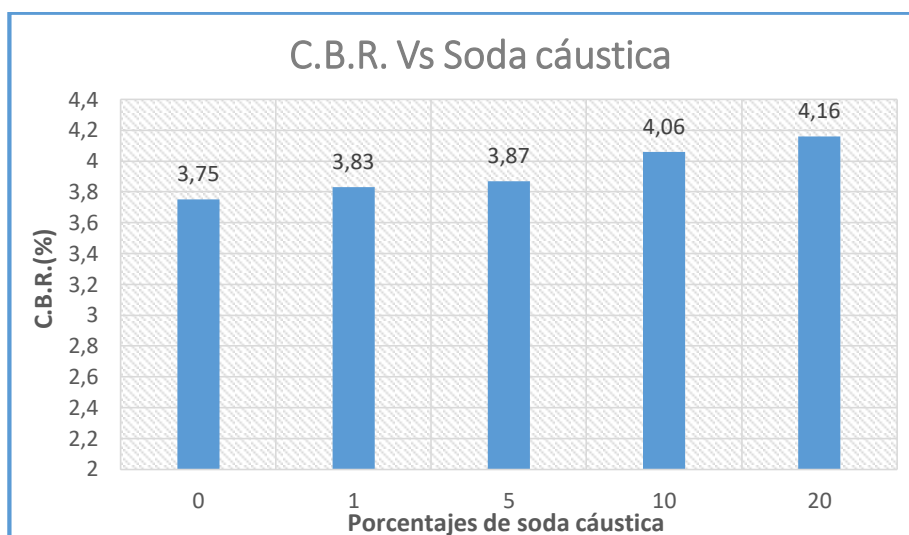


Fuente: Elaboración propia

Posteriormente se observa del Gráfico 4.4.6 los resultados de C.B.R que fueron aumentando al añadir soda cáustica como describe la gráfica, el suelo natural obtuvo un

valor de 3.75 % de C.B.R. para luego ir aumentando levemente a 3.83 % C.B.R con un 1 % de soda cáustica hasta llegar a 4.16 % C.B.R. que le corresponde un 20 % de soda cáustica, lo que revela que mientras se añade soda cáustica este tipo de suelo adquiere mejor resistencia.

Gráfico 4.4.6 C.B.R. vs soda cáustica



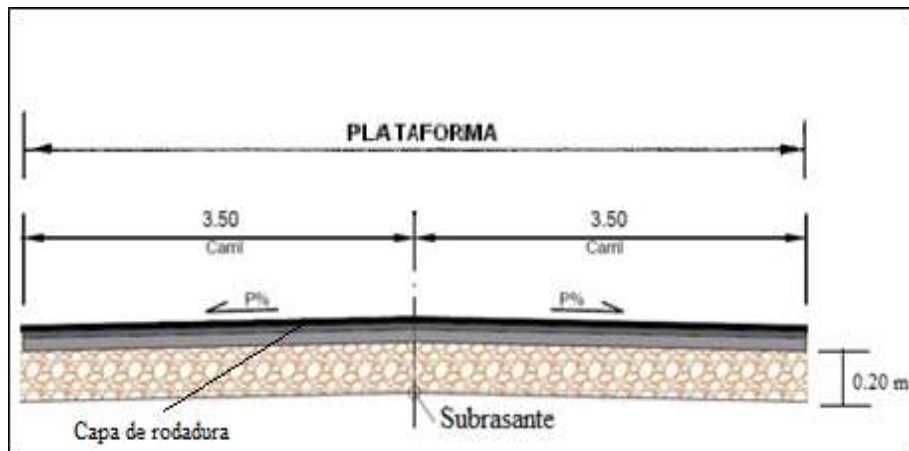
Fuente: Elaboración propia

#### 4.4.3. Análisis de precios unitarios para la construcción de una subrasante de suelo natural y suelo soda caustica

El producto utilizado fue soda cáustica(OHNa), proviene de tambores de metal con un contenido neto de 250 kilogramos cada uno, cada tambor tiene un precio de 747 USD, 5220 bolivianos.

Se realizó un análisis de precios unitarios para la conformación de una subrasante por metro cúbico, y se obtuvo un costo de 954.67 bolivianos para un suelo natural y para el suelo mejorado con el 1 % de soda cáustica tiene un costo de 954.91 bolivianos; posteriormente se aplicó mencionado análisis en un tramo vial de 1 km y se adoptó las siguientes características:

Figura 4.4.1 Dimensiones de subrasante adoptadas



Fuente: Elaboración propia

Tabla 4.4.1 Costos de subrasante

Subrasante	Cantidad	Unidad	P.U. (Bs)	P. Total
Natural	1400	m <sup>3</sup>	954.67	1336538
Mejorada	1400	m <sup>3</sup>	954.91	1336874

Fuente: Elaboración propia

Para mayor detalle de precios en la conformación de una subrasante natural y subrasante con soda cáustica véase anexo A-8 Análisis de precios.

## CAPITULO V

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 5.1. CONCLUSIONES

En función de lo expuesto en los anteriores capítulos del presente proyecto de investigación y de análisis de resultados, pueden enunciarse las siguientes conclusiones:

1. Como resultado del análisis de las propiedades físicas como ser granulometría, límites de consistencia, densidad y de las propiedades mecánicas de resistencia y estabilidad volumétrica en los suelos finos de baja plasticidad se verifica la existencia de mejoras producidas en el suelo en estudio y su uso como subrasantes mejoradas.
2. En el análisis realizado a los límites de consistencia, refleja una disminución del límite líquido del suelo en estado natural al suelo con adición de soda cáustica caso que no ocurre con el límite plástico el cual aumenta sus valores al añadir soda cáustica por lo que resulta que los índices de plasticidad bajan paulatinamente conforme se añade soda cáustica.
3. En cuanto a los valores de densidad del suelo revela un descenso gradual de densidades máximas alcanzadas y un aumento en las humedades óptimas lo que muestra una necesidad mayor de humedad para alcanzar dichas densidades mientras se añade la soda cáustica.
4. Los valores obtenidos del ensayo de C.B.R del suelo en estado natural dieron resultados menores a los mínimos requeridos, pero conforme se añadió la soda cáustica los valores de este ensayo fueron aumentando sucesivamente por que se concluye que la soda cáustica mejora la resistencia del suelo.
5. Por otro lado, los valores de expansión del suelo en estado natural son elevados y al añadir soda cáustica estos valores redujeron significativamente es decir que la soda cáustica ayuda a controlar la expansión.
6. Los valores de pH del suelo estudiado es de 7.6 caracterizado como un suelo básico, y al agregar soda cáustica los valores de pH aumentaron lo que significa que su basicidad aumento es decir que la cohesión de partículas aumento y los vacíos fueron disminuyendo.

7. En nuestro medio se no cuenta con la información requerida de la soda cáustica y sus usos en proyectos viales, ya que este producto se lo utiliza mayormente en productos limpieza y además en tratamiento de aguas motivo por el cual fue de interés recabar la mayor información sobre el mismo y así elaborar el presente análisis.
8. En la elección del material de estudio, se recabo información sobre el tipo de suelo que predomina en la ciudad de Tarija Capital, para luego proseguir a la extracción de muestras según los manuales de la Administradora Boliviana de Carreteras (ABC), con el fin de realizar ensayos, elaborar planillas de registro y observación de datos.
9. Se llevo a cabo la elaboración de ensayos de laboratorio basados en el Manual Técnico de Carreteras Vol. 4C en el tipo de suelo estudiado y así también al suelo añadiendo soda cáustica, presentando resultados favorables a la estabilización.

## 5.2.RECOMENDACIONES

1. Se recomienda utilizar todo el equipo necesario para el manejo de la soda cáustica como ser gafas protectoras, guantes de goma, overol, etc., con el motivo de precautelar la integridad física de la persona encargada de la manipulación de este químico altamente corrosivo.
2. En la disolución de la soda cáustica se recomienda realizarla en lugares bien aireados y a temperaturas controladas donde se evite correr riesgos de accidentes.
3. La soda cáustica tiene la propiedad química de ser higroscópica por lo que se recomienda almacenarla en lugares secos y altos además de que tengan la mayor señalización para prevención de algún accidente.
4. La aplicación de soda cáustica a las muestras de suelo son de gran importancia, ya que se evidencio resultados favorables mejorando las propiedades físico-mecánicas motivo por el cual se recomienda utilizar este producto como un estabilizante químico más.
5. Mediante el ensayo de pH se observa valores en los ensayos de C.B.R y expansión variable motivo por el cual se recomienda utilizar porcentajes de soda cáustica menores al 1 % con el fin de verificar los resultados obtenidos.
6. En nuestro medio no existe algún precedente a esta investigación, por lo cual el presente trabajo abre una puerta a adquirir mayor información del mismo ya que se tiene buenos resultados con este producto químico, así se recomienda realizar un análisis del mismo ya que es un potencial estabilizador para suelos arcillosos con baja plasticidad.