

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1 INTRODUCCIÓN

La estabilización de suelos cohesivos con cal aplicada al mejoramiento vial, es una técnica que constituye una de las mejores alternativas desde el punto de vista funcional, ambiental y económico, favoreciendo la utilización del suelo de la zona como parte de la estructura del pavimento, la aplicación de cal a un suelo cohesivo origina una modificación en las propiedades físicas características de su comportamiento inicial del suelo, que se resume en dos manifestaciones típicas: Una modificación de la textura del suelo y un incremento de su resistencia.

La evolución de propiedades de un suelo cal se refiere a los cambios que origina la cal en el suelo; este trabajo estudia las características del suelo y el suelo modificado con cal a una dosificación del 4% cercana a la óptima, también se determina y compara valores que alcanza el suelo cal a diferentes tiempos de curado (edad) comprendidas entre 0 y 50 días, y la influencia de la edad en la evolución de las propiedades mecánicas como: la resistencia a compresión, la deformación, la densidad y la humedad óptima, y a la vez realizar un análisis de la resistencia a compresión antes y después de la falla de muestras falladas a compresión simple, haciendo referencia a la restitución del esfuerzo.

Un fenómeno que ocurre en los suelos estabilizados con cal, es la restitución del esfuerzo, que se refiere a capacidad que tiene un suelo cal de volver a resistir un determinado esfuerzo después de fallar a compresión y si a este suelo se le sigue aplicando carga llegará hasta una nueva falla final. En cuanto a estudios de la restitución del esfuerzo, se encuentra poca referencia, lo que hace interesante la verificación en laboratorio, para sacar conclusiones concretas.

Un análisis importante aparte del esfuerzo y deformación a realizarse, es el de la densidad seca y la humedad óptima del suelo-cal a diferentes tiempos de curado entre

0 a 50 días, estableciendo así una relación entre estas propiedades y el tiempo de curado.

Con esta investigación basada en la teoría de la resistencia a compresión, compactación de suelos y en normas, se pretende determinar y cuantificar en laboratorio la evolución que tiene el suelo con la adición de la cal, estableciendo así una relación entre las propiedades mecánicas mencionadas y el tiempo de curado, con una dosificación específica del 4%; para ello, se realizan muestras o probetas compactadas estandarizadas en el molde T-99 modificado (Método "A"), que son sometidas a la prueba de compresión simple inconfiada en diferentes estados, es decir suelo solo, suelo-cal y suelo-cal remoldeado a una edad entre 0 y 50 días, también a la misma edad realizar una prueba de compactación para determinar la densidad seca y su humedad óptima respectiva.

Un suelo-cal destinado a las vías, debido a los esfuerzos del tráfico u otros factores puede sufrir deterioros y en casos extremos puede llegar hasta la falla, lo que hace necesario conocer que valores se desean alcanzar y en función a la edad a qué tiempo puede aperturarse esa carretera al tráfico vehicular, garantizando que no sufrirá deterioros debido a la circulación de los vehículos a una edad temprana de curado, también es necesario conocer cuál es el comportamiento del suelo-cal antes y después de una falla para tomar precauciones en posteriores diseños.

También un suelo cal en campo puede estar en contacto con el agua debido a lluvias o malos drenajes y con la calor esta agua evaporarse y secar al suelo, para estudiar qué pasa si se presentara esto en una subrasante se hará un estudio mediante ciclos de humedecimiento y secado en laboratorio para conocer concretamente la absorción de agua y el desgaste del suelo.

Es importante recalcar que este trabajo no consiste en realizar una dosificación para luego elegir una óptima, sino determinar la influencia del tiempo de curado en las propiedades mecánicas de un suelo y establecer una relación entre las mismas, además hacer un análisis de la restitución del esfuerzo que sobreviene de después de la falla a compresión, por lo que se trabaja con una dosificación cercana a la óptima

recomendada por otros trabajos y estudios, la dosificación será de 4% de cal referido al peso del suelo seco.

1.2 DISEÑO TEÓRICO.

1.2.1 Planteamiento del Problema.

1.2.1.1 Situación problemática.

Al momento de realizar la construcción de una carretera o de un camino, muchas veces sucede que no se encuentran suelos lo suficientemente aptos para la conformación de rasantes o subrasantes, suelos como lo son las arcillas, que presentan características de inestabilidad; debido a esto es que estos suelos necesitan ser mejorados o estabilizados.

A lo largo del tiempo se fueron realizando varios estudios, experimentos, pruebas de laboratorio y llevando hasta la puesta en obra la mejor manera de estabilizar suelos. Se analizaron diferentes métodos y materiales para mejorar las propiedades de los suelos, haciendo que se cumplan los requisitos de sus características para una subrasante; uno de estos métodos es el de la estabilización de suelos finos con cal, que dio muy buenos resultados en los suelos cohesivos, haciendo que mejore sus propiedades de trabajabilidad, aumento de los esfuerzos, aumento de la capacidad de soporte, resistencia al corte y a la penetración, disminución del grado de saturación, entre otras propiedades.

Si bien se realiza el mejoramiento de suelos finos con cal, aumentando distintas propiedades (especialmente las mecánicas), es necesario conocer qué pasa con sus propiedades, en especial las propiedades mecánicas después de la estabilización: también cómo se comporta ante el tiempo de curado o edad, si éste influye o no en el comportamiento de las propiedades mecánicas del suelo cal.

Debido a que la cal es un aglomerante con características parecidas al cemento pero en bajas proporciones, y la tendencia de la resistencia a compresión de un suelo-cal con el pasar del tiempo y en ciertas condiciones la resistencia aumenta considerablemente, de manera similar a lo que sucede con el hormigón.

Un fenómeno interesante que ocurre en el suelo-cal luego de la falla a compresión es la restitución del esfuerzo, en los suelos estabilizados con cal; cuando llega hasta la falla o ruptura se dice que el agente ligante o cementante deja de actuar, lo que se entiende que el suelo ya deja de estar estabilizado. Es importante verificar en laboratorio si ésto ocurre y determinar un valor de restitución del esfuerzo a compresión simple, realizando a este tipo de suelo variaciones de humedad en condiciones extremas; es decir, a doce ciclos de saturación y secado en laboratorio para simular el comportamiento climático en la naturaleza cuando hay presencia de lluvias, con la finalidad de conocer la absorción de agua y el desgaste del suelo después de cada ciclo.

1.2.1.2 Problema.

El problema que se pretende investigar, se plantea en las siguientes preguntas:

¿De qué manera evolucionan las propiedades mecánicas de un suelo fino estabilizado con cal, y las mismas cambiarán a diferente edad o tiempo de curado?

¿Un suelo fino estabilizado con cal será capaz de restituir el esfuerzo a compresión y de resistir a ciclos de humedecimiento y secado en laboratorio, simulando las condiciones adversas que podrían presentarse en campo?

1.2.2 Objetivos de la Investigación.

1.2.2.1 Objetivo general.

Determinar en laboratorio el comportamiento y la incidencia del tiempo de curado en las propiedades mecánicas, como los esfuerzos últimos, la deformación, la densidad y la humedad óptima de un suelo fino cohesivo estabilizado con cal, para establecer la relación que tienen estas propiedades con el tiempo de curado. Además, realizar un análisis antes y después de la falla a compresión para determinar la restitución del esfuerzo del suelo cal y hacer un estudio superficial del suelo cal ante ciclos de humedecimiento y secado en laboratorio simulando el comportamiento que podría tener en campo.

1.2.2.2 Objetivos específicos.

- ✓ Hacer un relevamiento de información de la mecánica de suelos, teoría del comportamiento de suelos finos cohesivos, y suelos finos estabilizados con cal.
- ✓ Analizar el comportamiento de las características de los suelos estabilizados con cal, y si éstos modifican sus propiedades a determinados tiempos de curado.
- ✓ Comparar las propiedades de esfuerzo-deformación y densidad de un suelo puro, con las propiedades de un suelo cal variando el tiempo de curado de 0 a 50 días.
- ✓ Determinar un valor de restitución del esfuerzo después de la falla a compresión simple inconfiada.
- ✓ Estudiar el comportamiento del suelo-cal ante ciclos de humedecimiento y secado en laboratorio simulando condiciones extremas adversas que pudieran presentarse en el sitio.

1.2.3 Hipótesis.

Realizando pruebas en laboratorio en especímenes de suelo fino cohesivo y el mismo suelo dosificado con cal, entonces se podrá observar y conocer, la evolución de las propiedades mecánicas del suelo como son: el esfuerzo, la deformación la densidad y la humedad óptima a diferentes tiempos de curado del suelo cal tomando tiempos entre 0 a 50 días en intervalos de 15 a 20 días de curado y encontrar una relación entre estas propiedades y el tiempo de curado para realizar una estimación de estas propiedades a cualquier tiempo deseado, además se podrá determinar la restitución del esfuerzo de la prueba de compresión simple inconfiada y la reacción que pudiera tener el suelo-cal, humedeciéndolo mediante saturación y secado a horno en laboratorio, simulando variaciones climatológicas desfavorables.

1.3 DISEÑO METODOLÓGICO.

1.3.1 Definición de Variables Independientes y Dependientes.

1.3.1.1 Variables independientes.

- **V1.-** Comportamiento de las propiedades mecánicas del suelo después de estabilizarlo con cal.
- **V2.-** Tiempos de curado del suelo cal (Edad).

1.3.1.2 Variables dependientes.

- **V3.-** Tiempo de deformación

1.3.1.3 Operacionalización de las variables.

Cuadro 1.1 Operacionalización de la variable V1

VARIABLE NOMINAL	CONCEPTUALIZACIÓN	DIMENSIÓN	INDICADOR	VALOR ACCIÓN
V1 Comportamiento de las propiedades mecánicas del suelo después de estabilizarlo con cal.	Es el cambio que se presenta en las propiedades del suelo después de ser estabilizado con cal que se determina sometándolo a ciertas pruebas.	Compactación	Densidad	Compresibilidad
			Humedad óptima	Contenido de humedad
			Compactación	Densidad seca en laboratorio
		Deformación	Elasticidad	Deformación unitaria
				Módulo de Elasticidad
		Esfuerzos	Resistencia	C.B.R.
				Compresión
			Esfuerzos verticales	Carga aplicada
				Área de la sección
				Compresión simple

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 1.2 Operacionalización de la variable V2

VARIABLE NOMINAL	CONCEPTUALIZACIÓN	DIMENSIÓN	INDICADOR	VALOR ACCIÓN
V2 Tiempos de curado del suelo cal (Edad).	Es el tiempo en días que pasa luego de la mezcla del suelo con la cal y agua, a su humedad óptima.	Resistencia	Compresión simple inconfiada	Esfuerzo
				Deformación
		Secado	Compactación	Densidad máxima seca.
				Humedad Óptima.

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 1.3 Operacionalización de la variable V3

VARIABLE NOMINAL	CONCEPTUALIZACIÓN	DIMENSIÓN	INDICADOR	VALOR ACCIÓN
V3 Tiempo de deformación	Es el tiempo medido en la prueba de compresión simple inconfiada,	Suelo solo	Resistencia a compresión	Esfuerzo
				Deformación
		Suelo cal	Resistencia a compresión	Esfuerzo
				Deformación
		Equipo	Compresión simple inconfiada	Velocidad

Fuente: Elaboración propia

1.3.2 Tipo de Investigación.

Debido a que el fenómeno estudiado que es determinar la evolución o variación que se da en las propiedades de un suelo con la cal, la misma se cuenta con poca referencia en cuanto a la información se define a esta investigación como una investigación exploratoria.

1.3.3 Unidad de Estudio.

La unidad de estudio de la presente investigación es: *estabilización de suelos finos cohesivos con cal*.

Se denomina estabilización de suelos al proceso de someter los suelos naturales a ciertos tratamientos para aprovechar sus mejores cualidades, de manera que puedan soportar especificaciones requeridas y condiciones adversas de clima, rindiendo en todo tiempo el servicio adecuado que de ellos se espera. .

1.3.4 Población.

Propiedades de los suelos finos: Plasticidad, granulometría, resistencia, densidad, capacidad soporte, esfuerzo-deformación, densidad seca, humedad óptima, etc.

1.3.5 Muestra.

Esfuerzo, deformación, densidad seca máxima, Humedad óptima.

1.3.6 Alcance de la Investigación.

El alcance de la presente investigación es determinar la variación o evolución que se dan en las propiedades mecánicas en estudio como el esfuerzo a compresión, la deformación, la densidad seca máxima y la humedad óptima de un suelo fino cohesivo estabilizado con cal, con una dosificación de 4% estudiando la importancia de la edad o tiempo de curado, y establecer una relación entre las propiedades mecánicas estudiadas y la edad, además realizar un análisis del esfuerzo y deformación de la prueba de compresión simple para determinar la restitución del esfuerzo después de la falla a compresión.

También observar el comportamiento del suelo-cal ante ciclos de humedeciendo y secado en laboratorio, analizando la absorción de agua y la pérdida de material en cada ciclo.

De esta manera fijar una base para posteriores estudios y análisis en otros tipos de suelos y aplicaciones que se vayan a hacer en estabilización de suelos con cal.

CAPÍTULO II

FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

2.1 DEFINICIONES IMPORTANTES

➤ **Suelo Solo.**

Cuando se haga referencia al término suelo solo, nos estaremos refiriendo al suelo con el que se está trabajando, es decir al suelo sin cal.

➤ **Suelo-cal.**

El suelo-cal hace referencia al suelo sólo esta vez dosificado al 4% con cal, referido al peso del suelo seco.

➤ **Suelo-cal Remoldeado.**

El suelo-cal remoldeado nos referimos al suelo-cal reutilizado sin añadirle nada de cal después de terminar el ensayo de compresión inconfiada del suelo-cal.

➤ **Tiempo de curado (Edad)**

El tiempo de curado o la edad se refieren al proceso después de elaboradas las muestras las mismas deberán reposar en una cámara de humedad a temperatura aproximada de 23 °C el tiempo recomendado según las normativas es de 7 días como mínimo.

2.2 FUNDAMENTO TEÓRICO.

2.2.1 Análisis Granulométrico por Mallas.

Un análisis granulométrico por mallas se efectúa tomando una cantidad medida de suelo seco, bien pulverizado y pasándolo a través de una serie de mallas cada vez más pequeñas y con una charola en el fondo. La cantidad de suelo retenido en cada malla se mide y el por ciento acumulado de suelo que pasa a través de cada malla es determinado. Este porcentaje es generalmente denominado el “porcentaje que pasa”.

El porcentaje que pasa por cada malla, determinado por un análisis granulométrico por mallas, se grafica sobre papel logarítmico, el diámetro del grano D se grafica sobre la escala logarítmica y el porcentaje que pasase grafica sobre la escala aritmética.

2.2.2 Análisis Granulométrico con el Hidrómetro.

El análisis granulométrico con el hidrómetro se basa en el principio de la sedimentación de las partículas en el agua. Para esta prueba se utilizan 50 gramos de suelo seco pulverizado. Un agente defloculante se agrega siempre al suelo. El agente defloculante más usado en para el análisis granulométrico con hidrómetro es 125 cc de solución de 4% de exafosfato de sodio. Se deja que el suelo se sature por lo menos 16 horas en el defloculante. Después de este periodo se agrega agua destilada y la mezcla suelo-agente defloculante es agitada vigorosamente. La muestra se transfiere a una probeta de 1000 ml y luego la mezcla es agitada vigorosamente.

Un hidrómetro se coloca dentro de la probeta para medir la densidad de sólidos de la suspensión suelo-agua en la vecindad de su bulbo.

Los hidrómetros están calibrados para mostrar la cantidad de suelo que aún está en suspensión en cualquier tiempo dado, t , el diámetro máximo de las partículas de suelo aun en suspensión en el tiempo t se determina mediante la ley de Stokes.

$$D = \sqrt{\frac{18\eta}{(G_s - 1)\gamma_w}} \sqrt{\frac{L}{t}}$$

Dónde:

D = diámetro de las partícula del suelo

G_s = peso específico de los sólidos del suelo

η = viscosidad del agua

γ_w = peso específico del agua

L = longitud efectiva (es decir, longitud medida de la superficie del agua en la probeta al centro de gravedad del hidrómetro), t = tiempo.

Las partículas de suelo con diámetros mayores que los calculados con la anterior ecuación se habrán asentado más allá de la zona de medición. Así, con las lecturas tomadas en tiempos diferentes en el hidrómetro, el porcentaje de suelo más fino que un diámetro dado D puede calcularse y prepararse una gráfica de la distribución granulométrica. Los procedimientos del cribado e hidrómetro pueden combinarse para un suelo que tenga granos finos y gruesos.

2.2.3 Límites del Tamaño para Suelos.

Varias organizaciones han intentado desarrollar los límites de tamaño para gravas, arenas, limos, y arcillas en base a tamaños de las partículas de los suelos. La siguiente tabla presenta los límites de tamaño recomendados en el sistema de la American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) y en el sistema Unified Soil Classification (Corps of engineers, Department of the Army y Bureau of Reclamation). En la siguiente tabla, se muestra que las partículas de suelo más pequeñas que 0.002 mm son clasificadas como arcilla.

Cuadro 2.1 Límites del Tamaño para Suelos

Sistema de clasificación	Tamaño del grano (mm)
Unificado	Grava: 75 mm a 4.75 mm Arena: 4.75mm a 0.075 mm Limo y arcilla (finos). <0.075 mm
AASHTO	Grava: 75 mm a 2 mm Arena: 2 mm a 0.05 mm Limo: 0.05 mm a 0.002 mm Arcilla <0.002 mm

Fuente: “Principios de Ingeniería de Cimentaciones”, Braja. M Das. Quinta Edición

Sin embargo, las arcillas por naturaleza son cohesivas y pueden convertirse en un filamento cuando están húmedas. Esta propiedad es causada por la presencia de minerales de arcilla tales como caolinita, la ilita y la montmorilonita. En contraste, algunos minerales como el cuarzo y el feldespato pueden estar presentes en un suelo con partículas de tamaño tan pequeño como los minerales de arcilla. Pero no tienen

la propiedad de cohesión de los minerales arcillosos. Por tanto, se denominan partículas de tamaño arcilla y no partículas arcillosas.

2.2.3.1 Límites de Atterberg.

Cuando un suelo arcilloso se mezcla con una cantidad excesiva de agua, éste puede fluir como un semilíquido. Si el suelo es secado gradualmente, se comportara como un material plástico, semisólido o sólido, dependiendo de su contenido de agua. Este, en por ciento, con el que el suelo cambia de un estado líquido a un estado plástico se define como límite líquido (LL). Igualmente, los contenidos de agua, en por ciento con el que el suelo cambia de un estado plástico a un semisólido y de un semisólido a un sólido se definen como el límite plástico (PL) y el límite de contracción (SL), respectivamente. Esos se denominan límites de Atterberg.

- El límite líquido de un suelo es determinado por medio de la copa de Casagrande de (Designación de prueba D-4318 de la ASTM) y se define como el contenido de agua con el cual se cierra una ranura de ½ in (12.7 mm) mediante 25 golpes.
- El límite plástico se define como el contenido de agua con el cual el suelo se agrieta al formarse un rollito de 1/8 pulg (3.18mm) de diámetro (designación de prueba D-4318 de la ASTM)

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

$$IP = LL - PL$$

2.2.4 Sistemas de Clasificación de Suelos.

Los sistemas de clasificación de suelos dividen a estos en grupos y subgrupos en base a propiedades ingenieriles comunes tales como la distribución granulométrica, el límite líquido y el límite plástico. Los dos sistemas principales de clasificación actualmente son (1) el sistema Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) y (2) el Unified Soil Classification System (SUCS), el sistema

de clasificación AASHTO se usa principalmente para clasificación de las capas de carreteras. No se usa en la construcción de cimentaciones.

- **Sistema AASHTO**
- **Sistema Unificado De Clasificación de Suelos**

2.2.4.1 Sistema AASHTO.

El Sistema de Clasificación de Suelos AASHTO originalmente desarrollado en los años '20. Está basado en características de estabilidad de los suelos empleados en la construcción de caminos. Se fundamenta en distribución granulométrica, límite líquido y límite plástico. Los tamices estándar #10, #40 y #200

Para la evaluación cualitativa de la conveniencia de un suelo como material de subrasante de un camino, se desarrolló también un número denominado índice de grupo. Entre mayor es el valor del índice de grupo para un suelo, será menor el uso del suelo como subrasante. Un índice de grupo de 20 o más indica un material muy pobre para ser usado al respecto. La fórmula para el índice de grupo es:

$$IG = 0.2a + 0.005ac + 0.01bd$$

Dónde: IG= índice de grupo.

a= %pasa N°200 – 35% (Si %N°200>75, se anota 75, si es<35, se anota 0)

b= %pasa N°200 – 15% (Si %N°200>55, se anota 55, si es<15, se anota 0)

c= Límite líquido – 40% (Si LL>60, se anota 60, si es<40, se anota 0)

d= Índice de Plasticidad – 10% (Si IP>30, se anota 30, si es<10, se anota 0)

Condicionando que cualquier factor que pudiese salir negativo; éste se asume con el valor de cero.

Para una adecuada comprensión se presenta la siguiente tabla para la clasificación AASHTO.

Cuadro 2.2 Clasificación de suelos sistema AASHTO.

Clasificación	Materiales Granulares (35% o menos del total pasa tamiz N° 200)							Materiales Limo Arcillosos (más del 35% del total pasa el tamiz N° 200)			
Clasificación de grupo	A-1		A-3	A-2				A-4	A-5	A-6	A-7
	A-1-a	A-1-b		A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7				A-7-5 A-7-6
Porcentaje de material que pasa tamiz											
N°10 N°40 N°200	50máx 30máx 15máx	50máx 25máx	51min 10máx	35máx	35máx	35máx	35máx	36min	36min	36min	36min
Características de la fracción que pasa el tamiz N° 40											
LL: IP:	6max		NP	40máx 10máx	41min 10máx	40máx 1min	40min 11min	40máx 10máx	41min 10máx	40máx 11min	41min 11min
Índice de Grupo	0		0	0		4máx		18máx	12máx	16máx	20máx

Fuente: "Principios de Ingeniería de Cimentaciones", Braja. M Das. Quinta Edición

2.2.4.2 Sistema unificado de clasificación de suelos (SUCS).

Fue inicialmente propuesto por Arthur Casagrande en 1932, adoptado por el Departamento de ingeniería de los EEUU en 1948. Está basado en el análisis granulométrico y en los límites de Atterberg (límites líquido y plástico).

En el Sistema Unificado, los siguientes símbolos se usan como identificación.

Cuadro 2.3 Clasificación de suelos sistema unificado.

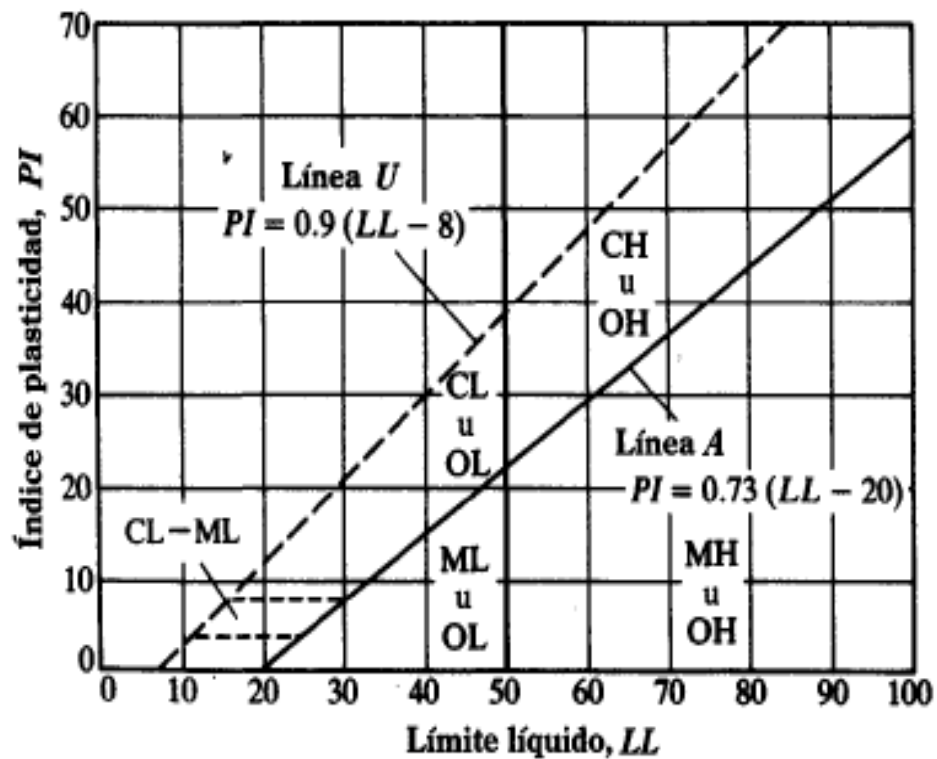
Símbolo	G	S	M	C	O	Pt	H	L	W	P
Descripción	Grava	Arena	Limo	Arcilla	Limos Orgánicos y arcilla	Turba y Suelos Altamente orgánicos	Alta plasticidad	Baja plasticidad	Bien graduados	Mal graduados

Fuente: "Principios de Ingeniería de Cimentaciones", Braja. M Das. Quinta Edición

La carta de plasticidad y la siguiente tabla muestran el procedimiento para determinar los símbolos de grupo para varios tipos de suelos. Al clasificar un suelo se debe proporcionar el nombre del grupo que describe generalmente al suelo, junto con el símbolo respectivo.

Carta de plasticidad

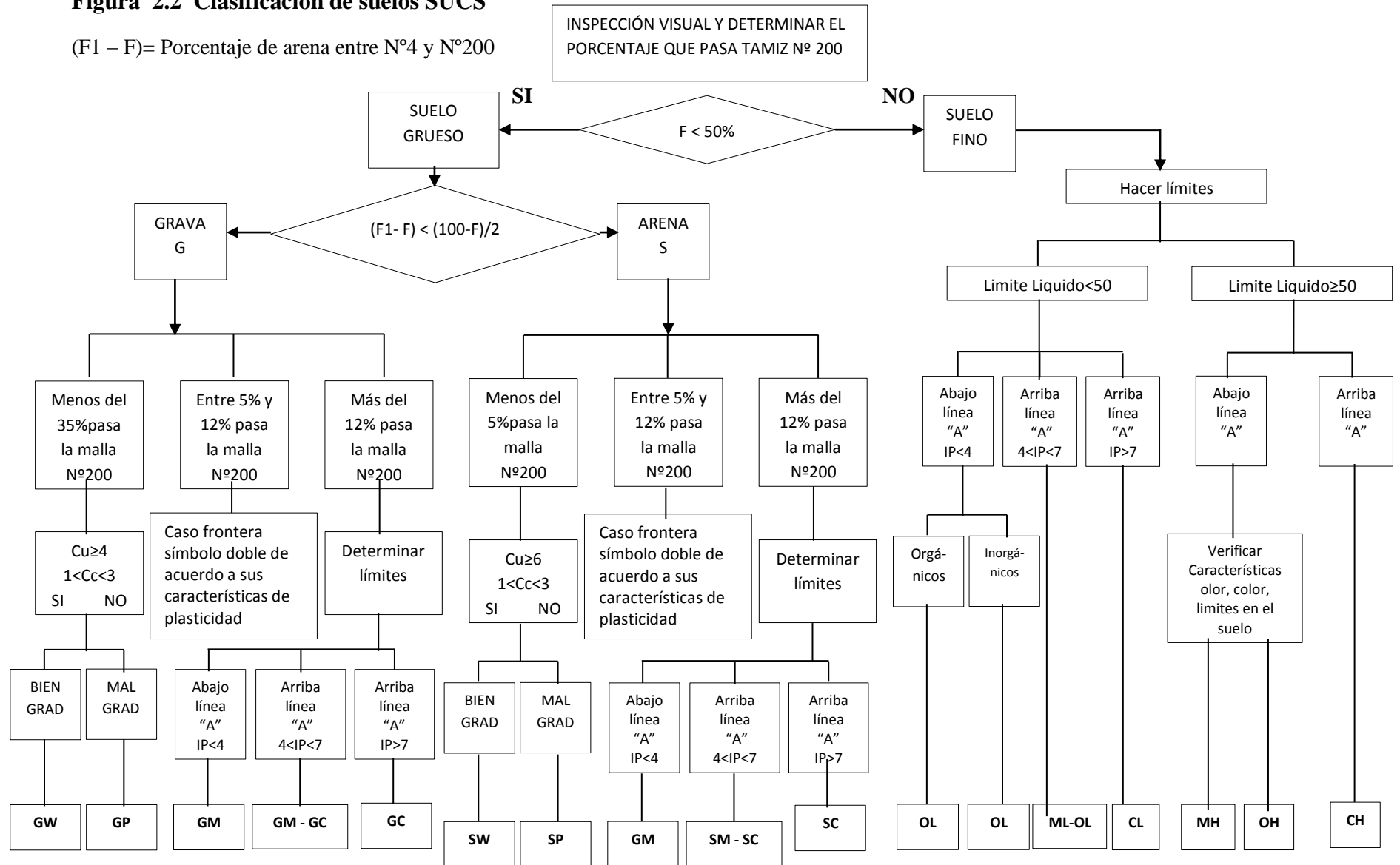
Figura 2.1 Carta de plasticidad.



Fuente: "Principios de Ingeniería de Cimentaciones", Braja. M Das. Quinta Edición

Figura 2.2 Clasificación de suelos SUCS

(F1 – F)= Porcentaje de arena entre N°4 y N°200



2.2.4.3 Clasificación de suelos según su PH.

El PH es una medida de la concentración de hidrógeno expresado en términos logarítmicos. Los valores del pH se reducen a medida que la concentración de los iones de hidrógeno incrementan, variando entre un rango de 0 a 14. Los valores por debajo de 7.0 son ácidos, los valores superiores a 7.0 son alcalinos y/o básicos, mientras que los que rondan 7.0 son denominados neutrales. Por cada unidad de cambio en pH hay un cambio 10 veces en magnitud en la acidez o alcalinidad (por ejemplo: un pH 6.0 es diez veces más ácido que uno de pH 7.0, mientras que un pH 5.0 es 100 veces más ácido que el de 7.0).

Cuadro 2.4 Clasificación de suelos según su PH.

Nivel de pH	Clasificación de suelo
0 < 5.5	Muy ácido
5.5 < 6.5	Ácido
6.5 < 7.5	Neutro
7.6 < 8.5	Básico o ligeramente alcalino
8.6 y mayores	Muy alcalino

Fuente: Quintana Crespo, Enrique. Ingeniero Geólogo. Relación entre las propiedades geotécnicas y los componentes puzolánicos de los sedimentos pampeanos. Tesis doctoral. 2005.

2.2.5 Densidad.

Las partículas de un suelo varían en su composición y en su densidad. La densidad de la fase sólida del suelo está definida como la masa total de los sólidos dividida por el volumen total de ellos.

La densidad húmeda y la densidad seca de los suelos son valores importantes para los ingenieros al momento de determinar los esfuerzos ante sobrecarga, los índices de poros, la compactación máxima y la compactación porcentual de los suelos. El valor de la densidad también puede ayudar a evaluar la resistencia y sensibilidad del suelo.

2.2.6 Compactación de Suelos.

En general, la compactación es la densificación del suelo por remoción de aire, lo que requiere energía mecánica. Si se agrega una pequeña cantidad de agua a un suelo y

luego éste se compacta, el suelo tendrá un cierto peso específico. Si el contenido de agua del mismo suelo es incrementado gradualmente y la energía de compactación es la misma, el peso específico del suelo se incrementará gradualmente. La razón es que el agua actúa como lubricante entre las partículas del suelo y, bajo la compactación ésta ayuda a reacomodar las partículas sólidas a un estado más denso. El incremento en peso específico seco con el incremento del contenido de agua en un suelo alcanzara un valor límite más allá del cual cantidades adicionales de agua conducirán a una reducción del peso específico seco. El contenido de agua para el cual se obtiene el peso específico seco máximo se llama contenido de agua óptimo.

Las pruebas de laboratorio usadas para evaluar las densidades secas máximas y los contenidos de agua para varios suelos son:

- a) Prueba de Proctor estándar (ASTM D698)
- b) Prueba de Proctor modificada (ASTM D 1557)

2.2.6.1 Prueba Proctor estándar.

En la prueba Proctor, el suelo es compactado en un molde que tiene un volumen de $943,3 \text{ cm}^3$. El diámetro del molde es de 101,6 mm. Durante la prueba de laboratorio, el molde se une a una placa de base en el fondo y a una extensión en la parte superior.

El suelo se mezcla con cantidades variables de agua y luego se compacta en tres capas iguales por medio de un pisón que transmite 25 golpes a cada capa. El pisón pesa 24,4 N que equivale a 5,5 lb o (2,5 kg) y tiene una altura de caída de 304,8 mm. Para cada prueba, el peso específico húmedo de compactación γ se calcula como:

$$\gamma = \frac{W}{V_m}$$

Dónde:

W= peso específico húmedo.

V_m = Volumen del molde

Para cada prueba, el contenido de agua del suelo compactado se determina en el laboratorio. Con un contenido de agua conocido, el peso específico seco γ_d se calcula con la siguiente ecuación:

$$\gamma_d = \frac{\gamma}{1 + \frac{w(\%)}{100}} \quad \text{Dónde:}$$

w(%)= porcentaje de contenido de agua.

Los valores de γ_d determinados con la anterior ecuación se grafican contra los correspondientes contenidos de agua para obtener el peso específico seco máximo y el contenido de agua óptimo para el suelo.

2.2.6.2 Prueba Proctor modificada.

Con el desarrollo de los rodillos compactadores de campo se notó un incremento de energía, la prueba de Proctor Estándar fue modificada para representar mejor las condiciones de campo. A ésta se la llama prueba Proctor modificada (Prueba D-1557 de la ASTM y prueba T-180 de la AASTHO). Para llevar a cabo la prueba de Proctor modificada se usa el mismo molde, con un volumen de 943,3 cm³ como en el caso de la prueba de Proctor Estándar. Sin embargo, el suelo es compactado en cinco capas por un pisón que pesa 44,5 N equivalente a 10 lb o 4,54 kg. La caída del martillo por capa es de 457,2 mm. El número de golpes de martillo es de 25 como en la prueba de Proctor estándar.

Las pruebas de Proctor adoptadas por la ASTM y la AASTHO respecto al volumen del molde (943,3 cm³) y número de golpes (25 golpes/capa), son generalmente las adoptadas para los suelos de grano fino que pasan la malla No 4, sin embargo para suelos de grano más grueso el molde mantiene su altura e incrementa su diámetro a 152,4 mm con el martillo de pesa 44,5 N equivalente a 10 lb o 4,54 kg compactando a cinco capas con un número de golpes de 56. Sin embargo, bajo cada designación de prueba, tres métodos sugeridos diferentes reflejan el tamaño del molde, el número de golpes por capa y el tamaño máximo de la partícula de un suelo usado para la prueba.

Cuadro 2.5 Cuadro 2.5 Especificaciones para prueba de Proctor estándar (ASTM D698-91)

Concepto	Método A	Método B	Método C
Diámetro del molde	4 pulg (101,6 mm)	4 pulg (101,6 mm)	6 pulg (152,4 mm)
Volumen del molde	0,0333 pie ³ (944 cm ³)	0,0333 pie ³ (944 cm ³)	0,075 pie ³ (2124 cm ³)
Peso del pizón	5,5 lb (2,5 kg)	5,5 lb (2,5 kg)	5,5 lb (2,5 kg)
Altura de caída del pizón	12 pulg (304,8 mm)	12 pulg (304,8 mm)	12 pulg (304,8 mm)
Numero de golpes del pizón por capa de suelo	25	25	56
Numero de capas de compactación	3	3	3
Energía de compactación	12400 pie.lb/pie ³ (600 N/m ³)	12400 pie.lb/pie ³ (600 N/m ³)	12400 pie.lb/pie ³ (600 N/m ³)
Suelo por usarse	Porción que pasa la malla No 4 (4,57 mm). Puede usarse el 20% o menos por peso de material que es retenido en la malla No. 4.	Porción que pasa la malla de 3/8 pulg (9,5 mm). Puede usarse si el suelo retenido sobre la malla No. 4 es más del 20% y 20% o menos por peso retenido en la malla de 3/8 pulg (9,5 mm).	Porción que pasa la malla ¾ pulg (19,0 mm) Puede usarse si más de 20% es retenido en la malla de 3/8 pulg (9,5 mm) y menos de 30 % por peso es retenido en la malla ¾ pulg (19,0 mm).

Fuente: “Principios de Ingeniería de Cimentaciones”, Braja. M Das. Quinta Edición

Cuadro 2.6 Especificaciones para prueba de Proctor modificada (ASTM D 1557-91)

Concepto	Método A	Método B	Método C
Diámetro del molde	4 pulg (101,6 mm)	4 pulg (101,6 mm)	6 pulg (152,4 mm)
Volumen del molde	0,0333 pie ³ (944 cm ³)	0,0333 pie ³ (944 cm ³)	0,075 pie ³ (2124 cm ³)
Peso del pizón	10 lb (4,54 kg)	10 lb (4,54 kg)	10 lb (4,54 kg)
Altura de caída del pizón	18 pulg (457,2 mm)	18 pulg (457,2 mm)	18 pulg (457,2 mm)
Numero de golpes del pizón por capa de suelo	25	25	56
Numero de capas de compactación	5	5	3
Energía de compactación	56000 pie.lb/pie ³ (270 N/m ³)	56000 pie.lb/pie ³ (270 N/m ³)	56000 pie.lb/pie ³ (270 N/m ³)
Suelo por usarse	Porción que pasa la malla No 4 (4,57 mm). Puede usarse el 20% o menos por peso de material que es retenido en la malla No. 4.	Porción que pasa la malla de 3/8 pulg (9,5 mm). Puede usarse si el suelo retenido sobre la malla No. 4 es más del 20% y 20% o menos por peso retenido en la malla de 3/8 pulg (9,5 mm).	Porción que pasa la malla ¾ pulg (19,0 mm) Puede usarse si más de 20% es retenido en la malla de 3/8 pulg (9,5 mm) y menos de 30 % por peso es retenido en la malla ¾ pulg (19,0 mm).

Fuente: “Principios de Ingeniería de Cimentaciones”, Braja. M Das. Quinta Edición

2.2.7 Definición de Cal

El término cal es usado generalmente para referirse a las formas manufacturadas del carbonato de calcio o piedra caliza (CaCO_3), materia base para la fabricación de la misma. Estas formas manufacturadas son conocidas como el óxido de calcio o cal viva (CaO), producida de la calcinación de la piedra caliza; y el hidróxido de calcio o cal hidratada ($\text{Ca}[\text{OH}]_2$) que es un polvo seco fabricado tratando la cal viva con suficiente agua para satisfacer su afinidad química, convirtiendo los óxidos a hidróxidos.

2.2.8 Cal Viva y Cal Hidratada

La cal viva:

Tiene mayor contenido de cal útil por unidad de masa que la cal hidratada. Para las cales altas en calcio, usadas en la estabilización de suelos según Norma UNE 80502/97, un 3% de cal viva equivale a un 4% de cal hidratada.

- Reduce el contenido de humedad de los suelos húmedos.
- Produce menos polvo que la cal hidratada.
- Es más densa que la cal hidratada.
- Lo anterior reduce los costes de almacenamiento y transporte.
- En contra, la cal viva exige mayores medidas de seguridad.

La cal hidratada:

Tiene un tamaño medio de partícula mucho más pequeño que el de la cal viva, molida y se dispersa rápidamente en el suelo durante el mezclado

En condiciones de terreno seco, puede ser ventajoso añadir la cal hidratada o la lechada de cal si el resto del riego es suficientemente alto.

2.2.9 Tipos de Estabilización.

➤ **Estabilización mecánica.**

Se realiza por medio del proceso de compactación. La compactación mejora las propiedades del suelo y en particular la densificación del suelo, el aumento de

resistencia y la capacidad de carga, asimismo ayuda a reducir su compresibilidad y aptitud para absorber agua.

➤ **Estabilización física.**

Busca aumentar la fricción, la cohesión y la impermeabilidad. Cuando un material se ajusta granulométricamente por medio de adición de material o ajustes a su banda granulométrica, genera en el material resultante mayor fricción entre las partículas y cohesión de la masa del suelo.

➤ **Estabilización físico-química.**

Se realiza en suelos con gran cantidad de finos plásticos, como limos y arcillas especialmente. Si el suelo es tratado con hidróxido de calcio produce en la masa de suelo resultante un intercambio iónico y cementación.

Generalmente, con este tipo de estabilización se busca reducir la plasticidad del suelo, aumentar su resistencia, trabajabilidad y estabilidad volumétrica.

➤ **Estabilización química.**

Se realiza en suelos finos tipo arenas, mediante la adición de un agente hidráulico, como es el caso del cemento Portland, que al mezclarse íntimamente con el suelo y al desarrollar su propiedad hidráulica, produce una reacción química, intercambio iónico y cementación. La resistencia del suelo y su estabilidad aumentan significativamente.

2.2.10 Estabilización con Cal.

La cal puede ser utilizada en el tratamiento de suelos con el fin de mejorar sus características. Para ello se puede utilizar cal viva, cal hidratada o lechada de cal, dependiendo de las necesidades particulares de cada proyecto.

Uno de los efectos más importantes de la cal en el suelo, es el de cambiar apreciablemente su plasticidad. Por ejemplo suelos de plasticidad $IP < 15$, aumentan tanto el LL como el LP, y también muy ligeramente su IP; en cambio, en los suelos de plasticidad con $IP > 15$) disminuye el IP.

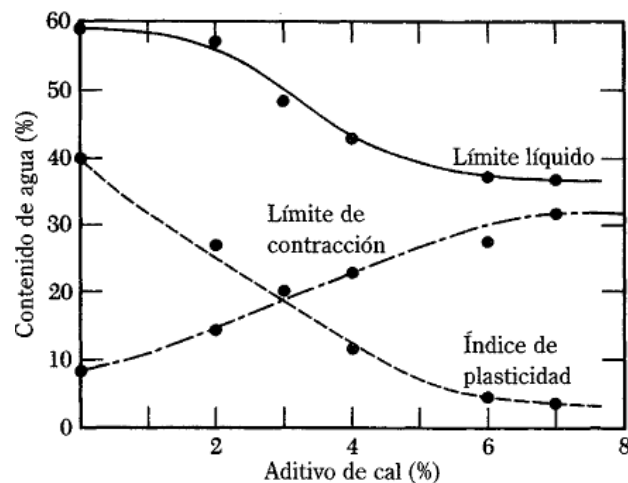
También aumenta la humedad óptima de compactación, lo que permite la densificación de suelos de elevada humedad natural, que de otro modo no permitirían la construcción de la capa de rodadura sobre ellos. La cantidad usada para la estabilización de la mayoría de los suelos varía usualmente entre 2% y 10.

Los iones de calcio reemplazan los iones de potasio y sodio de una arcilla. La floculación y aglomeración produce un intercambio en la textura de los suelos arcillosos. Las partículas de arcilla tienden a juntarse y formar partículas mayores. Esas reacciones tienden a:

- a) disminuir el límite líquido
- b) incrementar el límite plástico
- c) disminuir el índice de plasticidad
- d) incrementar el límite de contracción
- e) incrementar la manejabilidad
- f) mejorara las propiedades de resistencia y deformación del suelo.

La reacción puzolana entre el suelo y la cal implica una reacción entre la cal y la sílice y aluminio del suelo que forma un material cementante.

Figura 2.3 Variación del límite líquido, índice de plasticidad y contracción de una arcilla con aditivo cal

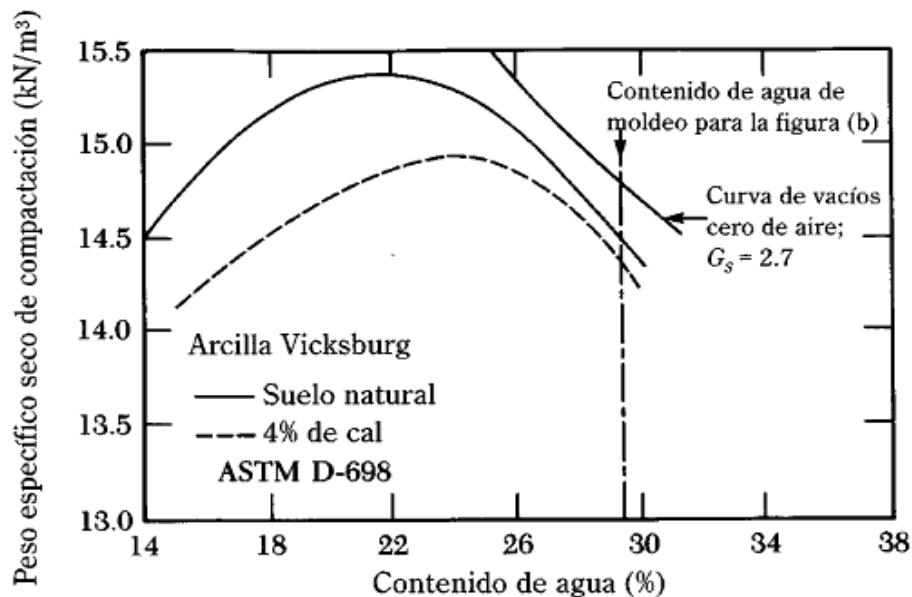


Fuente: "Principios de Ingeniería de Cimentaciones", Braja. M Das. Quinta Edición

La anterior figura muestra la variación del límite líquido, del índice de plasticidad y del límite de contracción de una arcilla con el porcentaje de cal agregada. Los primeros 2%-3% de cal (con base en el peso seco) influyen considerablemente en la manejabilidad y propiedades (como la plasticidad) del suelo. La adición de cal a los suelos arcillosos afecta sus características de compactación.

La siguiente figura muestra los resultados de pruebas Proctor estándar en arcilla Vicksburg sin aditivos y también con un aditivo de 4% de cal hidratada de alto calcio (sin curar). Note que la adición de cal ayuda a reducir el peso específico seco máximo compactado y a incrementar el contenido de agua óptimo.

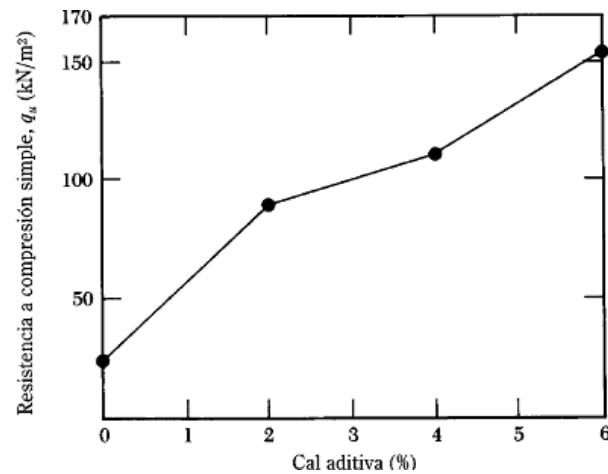
Figura 2.4 Variación del peso específico de compactación con la adición de la cal.



Fuente: "Principios de Ingeniería de Cimentaciones", Braja. M Das. Quinta Edición

La siguiente figura muestra también el cambio de la resistencia a compresión no confinada, q_u , de arcilla Vicksburg no curada con el porcentaje de cal hidratada de alto calcio. El valor de q_u con 6% de cal es aproximadamente seis veces el obtenido sin aditivo. Nótese que los especímenes preparados para la determinación de q_u tenían un contenido de agua entre 29% y 29,5% como el contenido de agua de moldeado.

Figura 2.5 Cambio de la resistencia a compresión no confinada según porcentajes de cal.



Fuente: "Principios de Ingeniería de Cimentaciones", Braja. M Das. Quinta Edición

Estabilización con cal de una arcilla (% menor que el tamaño $2\mu= 46$; límite líquido =59; índice de plasticidad = 30; A- 6, ph = 6)

Como la adición de cal hidratada a suelos arcillosos blandos incrementa inmediatamente el límite plástico, cambiando el suelo de plástico a sólido y haciéndolo aparecer "resecado", cantidades limitadas pueden arrojar sobre sitios de construcción lodosos y problemáticos, mejorando la transitabilidad, además ahorra dinero y tiempo. La cal viva también se usa con éxito en agujeros perforados con diámetros de 4 pulg a 5 pulg (100 mm a 150 mm) para la estabilización de sub rasantes y taludes. Para este tipo de trabajo los agujeros se perforan según un patrón reticular y luego se rellenan con cal viva.

2.2.11 Selección del Porcentaje Óptimo de Hidróxido de Calcio (Cal).

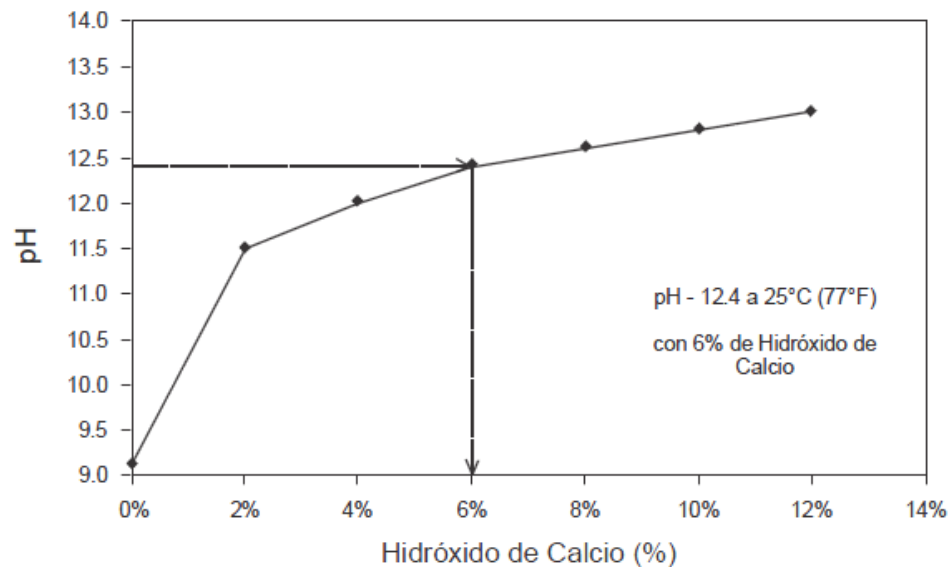
Una vez considerado que el suelo es apto para el tratamiento con hidróxido de calcio, se pasa a determinar la fórmula de trabajo para la mezcla que permita conseguir los objetivos propuestos. La dosificación óptima de hidróxido de calcio será aquella que logre reducir incluso anular, la plasticidad del suelo, el hinchamiento potencial y aumentar hasta un valor aceptable la capacidad portante del mismo (CBR).

El porcentaje óptimo de hidróxido de calcio se puede determinar mediante dos métodos:

Uno, el método del pH, un método muy útil por su facilidad y fiabilidad, hecho por Eades y Grim (1966), indicado en la Norma ASTM C 977-00 (apéndice X1);

Este procedimiento se basa en el hecho de que la adición de hidróxido de calcio necesaria para estabilizar un suelo es aquella que garantiza el mantenimiento de un elevado pH, que permita el desarrollo de las reacciones puzolánicas; para ello se determina el pH con distintos porcentajes de hidróxido de calcio, se gráfica y el porcentaje óptimo es aquel que permite alcanzar un valor de 12.4, como se aprecia en la siguiente figura.

Figura 2.6 Método Eades y Grim para la selección del porcentaje óptimo de cal.

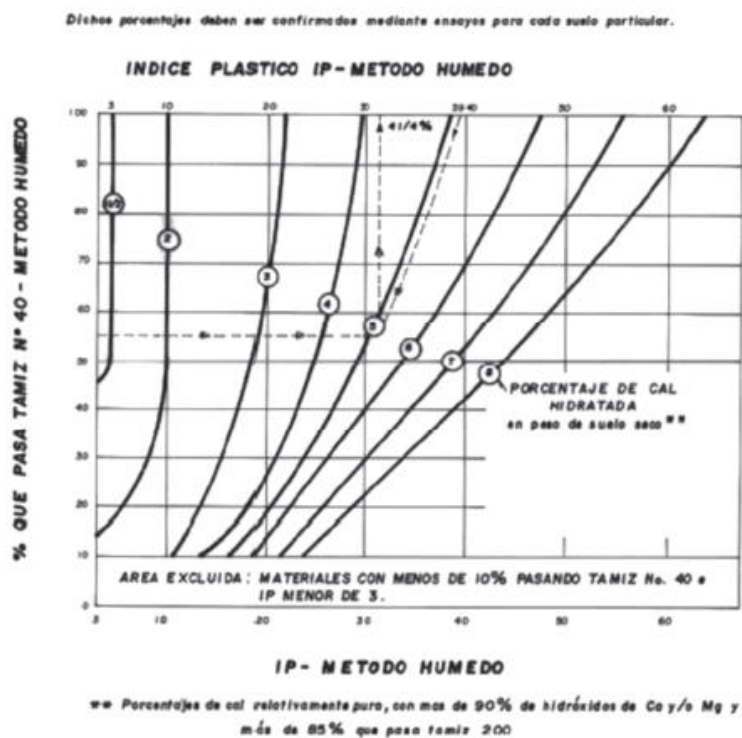


Fuente: Rodríguez, Ángel Sampedro. Tratamiento de Suelos con Ccal.

Dos, el ábaco propuesto por C. McDowell, que muestra distintas curvas con un número dentro de círculos que representa porcentajes de cal en peso de suelo seco, en función del índice plástico y del porcentaje pasa tamiz N.º 40 por vía húmeda del suelo sin estabilizar, excluyendo aquellos materiales con $IP < 3\%$ y pasa tamiz 40 $< 10\%$.

Para determinar el porcentaje óptimo se entra con el índice de plasticidad del suelo en las abscisas superiores, luego se baja en forma paralela y proporcionada a la curva más cercana (la de menos porcentaje) hasta cortar con la horizontal que proviene del porcentaje pasa N.º 40 del suelo, y en el punto de intersección se levanta una vertical donde se lee el porcentaje de cal requerido para la estabilización.

Figura 2.7 Método C. McDowell para la selección del porcentaje óptimo de cal.



Fuente: DOREAM. Boris Estabilización de suelos. Universidad del Cauca. Popayán. 1988

Existen también otros métodos de selección del porcentaje óptimo de cal, estos métodos se basan en principio del pH de laboratorio igual a 12.4, estos métodos son:

- **Metodología de diseño: Cuerpo de Ingenieros de la Armada Norteamericana (CI)** (Department of The Army, The Navy, and The Air Force, 1994)
- **Metodología de diseño: National Lime Association (NLA).** (National Lime Association, 2004)

2.2.12 Esfuerzo.

Las fuerzas internas de un elemento están ubicadas dentro del material por lo que se distribuyen en toda el área; justamente se denomina esfuerzo a la fuerza por unidad de área, la cual se denota con la letra griega sigma (σ) y es un parámetro que permite comparar la resistencia de dos materiales, ya que establece una base común de referencia.

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad \text{Dónde:}$$

P \equiv Fuerza axial;

A \equiv Área de la sección transversal

2.2.13 Deformación.

La resistencia del material no es el único parámetro que debe utilizarse al diseñar o analizar una estructura; controlar las deformaciones para que la estructura cumpla con el propósito para el cual se diseñó tiene la misma o mayor importancia.

El análisis de las deformaciones se relaciona con los cambios en la forma de la estructura que generan las cargas aplicadas.

Una barra sometida a una fuerza axial de tracción aumentará su longitud inicial; se puede observar que bajo la misma carga pero con una longitud mayor este aumento o alargamiento se incrementará también. Por ello definir la deformación (ϵ) como el cociente entre el alargamiento ΔL y la longitud inicial L .

Matemáticamente la deformación sería:
$$\epsilon = \frac{\Delta L}{L}$$

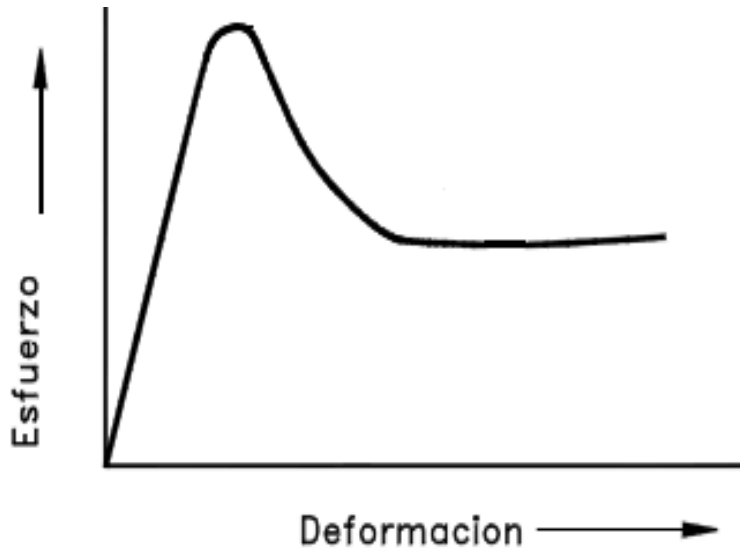
2.2.14 Límite de Elasticidad o Límite Elástico.

Es la tensión más allá del cual el material no recupera totalmente su forma original al ser descargado, sino que queda con una deformación residual, llamada deformación permanente.

2.2.15 Elasticidad y Módulo de Elasticidad.

En 1678 Robert Hooke publicó su ley, basado en un estudio de deformación en resortes, así se estableció la relación lineal entre la componente del esfuerzo y la componente de la deformación sin diferenciar claramente “fuerza” de “esfuerzo”.

Figura 2.8 Diagrama esfuerzo deformación.



Fuente: Elaboración propia.

Thomas Yuong definió su módulo (E), la “constante de proporcionalidad” entre tensiones y deformaciones.

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon}$$

Siendo:

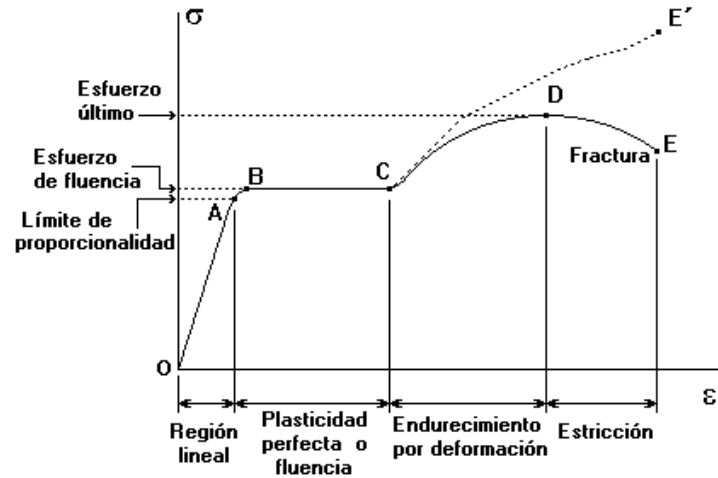
“ σ ” el esfuerzo aplicado

“ ε ” la elongación o deformación

“E” el coeficiente de proporcionalidad denominado “Módulo de Young”.

La ley se aplica a materiales elásticos hasta un límite, el denominado límite elástico. Más allá de la tensión a la cual corresponde dicho límite deja de cumplirse el criterio de proporcionalidad lineal entre la presión ejercida y la consecuente deformación.

Figura 2.9 Modelo elástico lineal unidimensional.



Fuente: Elaboración propia.

2.2.16 Prueba de Compresión Simple.

El método de ensayar muestras de suelo cohesivo en compresión simple, ha sido aceptado ampliamente, como un medio para determinar rápidamente la cohesión de un suelo.

En este ensayo, las muestras se prueban hasta que la carga en dicha muestra comience a decrecer o hasta que por lo menos se haya desarrollado una deformación unitaria del 20%.

Básicamente, el ensayo consiste en colocar una muestra de longitud adecuada, entre dos placas (aparatos para transferir la carga al suelo), se aplica una carga axial y a medida que la muestra se deforma crecientemente, se obtienen cargas correspondientes. Se registran las cargas de "falla" y deformación. Estos datos se utilizan para calcular las áreas corregidas y la resistencia a la compresión inconfiada.

2.2.17 Diagrama Esfuerzo – Deformación.

El diseño de elementos estructurales implica determinar la resistencia y rigidez del material estructural, estas propiedades se pueden relacionar si se evalúa una barra sometida a una fuerza axial para la cual se registra simultáneamente la fuerza aplicada

y el alargamiento producido. Estos valores permiten determinar el esfuerzo y la deformación que al graficar originan el denominado *diagrama de esfuerzo y deformación*.

Los diagramas son similares si se trata del mismo material y de manera general permite agrupar los materiales dentro de dos categorías con propiedades afines que se denominan materiales *dúctiles* y materiales *frágiles*. Los diagramas de materiales dúctiles se caracterizan por ser capaces de resistir grandes deformaciones antes de la rotura, mientras que los frágiles presentan un alargamiento bajo cuando llegan al punto de rotura.

2.2.17.1 Elementos de diagrama esfuerzo – deformación.

En un diagrama se observa un tramo recta inicial hasta un punto denominado límite de proporcionalidad. Este límite tiene gran importancia para la teoría de los sólidos elásticos, ya que esta se basa en el citado límite. Este límite es el superior para un esfuerzo admisible.

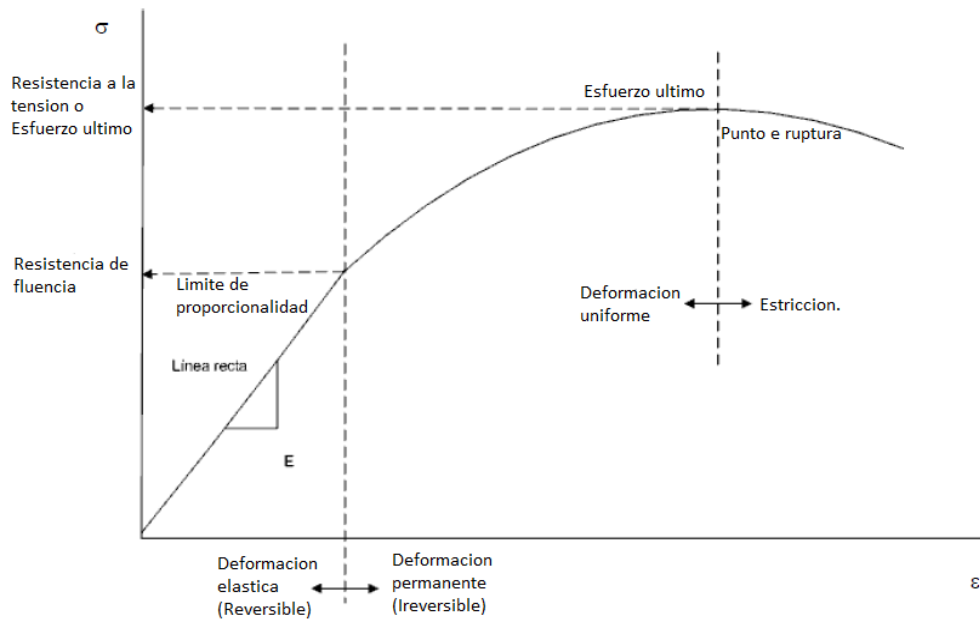
Los puntos importantes del diagrama de esfuerzo deformación son:

- Límite de proporcionalidad: hasta este punto la relación entre el esfuerzo y la deformación es lineal.
- Límite de elasticidad: más allá de este límite el material no recupera su forma original al ser descargado, quedando con una deformación permanente.
- Punto de cedencia: aparece en el diagrama un considerable alargamiento o cedencia sin el correspondiente aumento de carga. Este fenómeno no se observa en los materiales frágiles.
- Esfuerzo último: máxima ordenada del diagrama esfuerzo – deformación;
- Punto de ruptura: cuanto el material falla.

Dado que el límite de proporcionalidad, elasticidad y punto de cedencia están tan cerca se considera para la mayoría de los casos como el mismo punto. De manera que el material al llegar a la cedencia deja de tener un comportamiento elástico y la

relación lineal entre el esfuerzo y la deformación deja de existir (Beer y Johnston, 1993; Popov, 1996; Singer y Pytel, 1982).

Figura 2.10 Elementos del diagrama esfuerzo deformación.



Fuente: Elaboración propia.

2.2.18 Generalidades de Modelos Elastoplástico.

El uso de un modelo elastoplástico en mecánica de suelos ha sido apropiado para reproducir el comportamiento del suelo en procesos independientes del tiempo. En un modelo elástico, la respuesta es reversible y no depende de la trayectoria seguida. Por otro lado, las deformaciones en un modelo plástico son irreversibles y depende de la trayectoria. Para describir el comportamiento de los materiales en los que se observan deformaciones irrecuperables, fenómenos de fluencia y dilatación inducida por tensiones de corte, es necesario aplicar la teoría de la plasticidad.

El estudio de la teoría de la plasticidad comenzó en los trabajos de Coulomb (1776) y Rankine (1857) para analizar las presiones de tierra. Una perspectiva general de la evolución de los métodos elastoplásticos puede encontrarse en Gens y Potts (1987) mencionado por Yuk (1994).

Un modelo elastoplástico queda definido con la formulación de un criterio límite de discontinuidad, la aplicación del principio de actividad de deformaciones elásticas y plásticas, la definición de una regla de flujo generalizada y el planteamiento de las reglas de rigidización.

2.2.19 Características de un Suelo Arcilloso.

Resulta difícil representar de modo simplificado la arcilla en un solo modelo. Sin embargo a los efectos conceptuales, se puede considerar que está formada por partículas de arcilla agrupadas en “paquetes”. Los granos de arena, limo y los “paquetes” de arcilla, se encuentran unidos entre sí y rodeados de agua en sus puntos de contacto. Las partículas de la fracción arcillosa tienen forma de láminas, con elevadas superficie específica y actividad superficial unitaria.

El comportamiento volumétrico, depende de los movimientos relativos de las partículas gruesas y de las características de expansividad y retracción de los paquetes de arcilla.

2.2.19.1 Suelos finos cohesivos.

La cohesión es una medida de la cementación o adherencia entre las partículas de suelo. La cohesión en mecánica de suelos es utilizada para representar la resistencia al cortante producida por la cementación.

La tendencia de los materiales arcillosos a hincharse, si son de naturaleza expansiva, originan un aumento de volumen del conjunto de las partículas. En consecuencia, se puede alcanzar la saturación con una disminución apreciable de la densidad seca. Si el material es sometido a un proceso de secado, no se verifica una recuperación de la densidad seca inicial. Sobreviene un mecanismo de fisuración por retracción del suelo.

En servicio, el resultado final de una serie de ciclos de humedecimiento y secado, lleva al suelo a fluctuar en un entorno de densidad seca y humedad acotados. A ambos entornos se lo suele asociar con la humedad y densidad de equilibrio. Los mismos dependerán de factores tales como la carga exterior a que está sometido, las

características expansivas de los materiales arcillosos interpuestos entre los granos, la permeabilidad del material. Además, depende del tiempo en que actúan y que tardan en ponerse en acción cada uno de los efectos mencionados. Un exceso de densificación en un suelo arcilloso, hará evolucionar la humedad y densidad hasta que se alcance dicho ámbito de equilibrio.

En el caso inverso, una insuficiencia de densificación, provocará la consolidación del material con incremento de la densidad seca. En un terraplén, las condiciones de ingreso y egreso de agua, no son uniformes. Por lo tanto esta situación puede derivar en expansiones y contracciones irregulares. Esta situación puede manifestarse como deformaciones permanentes en la superficie del pavimento. Sobre la base de este escenario es que importa poder predecir tal ámbito antes de la construcción, lo que redundará en ventajas técnicas y económicas.

2.2.20 Importancia del Tiempo de Curado

Como es conocido en los hormigones el proceso de curado es uno de los más importantes por su influencia decisiva en la resistencia y demás cualidades del hormigón, lo mismo sucede con la cal al tratarse de un conglomerante con las mismas características del cemento pero en menor proporción, al preparar la mezcla suelo cal a la humedad óptima y después de compactar el suelo es necesario un tiempo de curado, que se realiza recubriendo herméticamente el suelo cal compactado para evitar que pierda humedad por evaporación, ya que la cal tiene internamente una reacción química que evapora el agua para ir carbonatándose y ganando resistencia, el recubrimiento hermético puede ser realizado con nylon y una cámara de humedad.

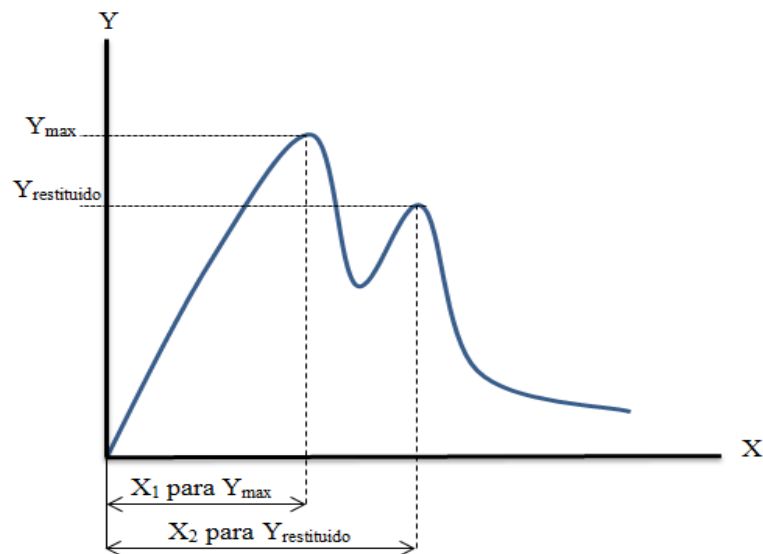
2.2.21 Coeficiente de Restitución

De forma general, podemos decir que la restitución es restablecer o poner algo en el estado que antes tenía, ahora bien en el proceso de restablecer puede ocurrir muchos fenómenos que pueden hacer que la restitución sea completa o parcial, estos fenómenos si se los cuantifica y expresamos el máximo y el mínimo en porcentajes, tomando en cuenta que si es una restitución completa es el 100% y si la restitución es

incompleta o no existe, la restitución es del 0%, si a estos valores están expresados en numeral entre 0 y 1 el mínimo y el máximo respectivamente tenemos el coeficiente de restitución.

En los suelos cohesivos estabilizados con cal, después de la falla a compresión al seguir aplicando la carga se presenta un fenómeno muy particular en el comportamiento del esfuerzo, ya que tiene la tendencia a recuperar el esfuerzo, es decir la caída del esfuerzo en un momento se frena y sobreviene la restitución del esfuerzo, la tendencia a seguir soportando carga de una manera parcial el suelo, no se da así para el suelo sin cal debido a que al llegar a la falla se rompe la interacción molecular del suelo-cal y con ello se rompe la estabilización, lo que hace que las partículas del suelo al estar separadas de la cal tengan la tendencia de recuperarse.

Figura 2.11 Elementos del diagrama esfuerzo deformación.



Fuente: Elaboración propia.

En el anterior gráfico se nota un valor máximo de una altura cualquiera (Y_{max}) y un valor de una altura restituida ($Y_{restituido}$), realizando una relación entre estas alturas con referencia a uno de ellos, obtenemos un valor que viene a ser la restitución de la

altura a la que fácilmente podemos aplicar al esfuerzo de compresión, esta relación está dada de la siguiente manera:

$$CR = \frac{Y_{\text{restituido}}}{Y_{\text{max}}}$$

Con la anterior relación obtenemos el coeficiente de restitución del esfuerzo de compresión, notemos que si el esfuerzo restituido tiene el mismo valor que el esfuerzo máximo este tendrá el valor de 1 que vendría a ser el 100% referido al máximo.

2.2.21.1 Expresiones analíticas.

El coeficiente de restitución puede determinarse experimentalmente, en algunos pocos casos bajo ciertas hipótesis analíticas también puede calcularse teóricamente. Los cálculos teóricos prueban que el coeficiente depende de hecho de la velocidad de deformación (aunque frecuentemente este efecto se ignore), además del material del que estén hecho los cuerpos. La hipótesis más común consiste en suponer un material viscoelástico lineal.

Una forma de medir la restitución de forma experimental es midiendo los rebotes sucesivos de una pelota, tomando en cuenta que después de cada rebote esta tendera a perder altura, lo que el coeficiente de restitución viene a ser una medida del grado de conservación de la energía cinética en un choque entre partículas clásicas.

En una colisión frontal alineada de dos esferas sólidas (como las que experimentan las bolas de billar) las velocidades después del choque están relacionadas con las velocidades antes del choque, por la expresión:

$$C_R = -\frac{V_{2f} - V_{1f}}{V_{2i} - V_{1i}} \quad \text{Dónde:}$$

CR es precisamente el coeficiente de restitución, que toma valores entre 0 y 1. El valor 1 se da en un choque perfectamente elástico, donde se conserva tanto el

momento lineal como la energía cinética del sistema. El valor $0 < Cr < 1$ se da en un choque inelástico (o plástico central) donde sólo se conserva el momento lineal, una porción de la energía cinética inicial de las partículas se "consume" durante el choque, convirtiéndose en energía de deformación plástica, energía sonora, calor, etc.

El coeficiente de restitución es la velocidad relativa de alejamiento, dividido entre la velocidad relativa de acercamiento de las partículas.

Ahora bien este experimento no puede ser aplicado a los suelos debido a que los estudios para éstos son completamente diferentes, pero tomamos el concepto como partida para realizar un análisis de los valores máximos y los valores restituidos y encontrar entre estos una relación teniendo así una estimación de la restitución de estas propiedades del suelo.

2.2.22 Ciclos de Humedecimiento y Secado (Durabilidad).

Las partículas de los agregados deben ser resistentes a cambios mineralógicos y desintegración física a causa de los ciclos de humedecimiento y secado impuestos durante la construcción y el periodo de diseño del pavimento.

Los ciclos de humedecimiento y secado es el procedimiento a seguir para determinar la pérdida de peso, la variación de humedad y la variación de volumen que experimentan las mezclas compactadas (probetas) de suelo-cal cuando se la someta a ciclos de humedecimiento y secado.

Se realizan doce ciclos de durabilidad, consistente cada uno de ellos en:

1. Inmersión en agua 5 horas.
2. Secado en horno a 72° C por 42 horas.
3. Reposo 1 hora y cepillado general.

Se secan las probetas, se pesan y se calculan las pérdidas de peso de cada una.

2.2.23 Justificación.

En la construcción de carreteras es común encontrarse con suelos cohesivos, es decir suelos con elevados porcentajes de arcilla a los cuales por diferentes razones se decide estabilizarlos con cal para mejorar sus propiedades de requerimiento, en especial las propiedades mecánicas, para posteriormente sobre este suelo cal construir un paquete estructural para un pavimento para la circulación de los vehículos; sucede que al estabilizar los suelos con cal éstos para alcanzar los valores máximos de sus propiedades en especial las mecánicas, éstas están relacionadas con el tiempo de curado que mientras mayor sea éste se alcanzaran mayores valores máximos de éstas propiedades, siendo notoria la evolución de las propiedades de un suelo-cal. Con éste estudio se pretende determinar de qué manera se da la evolución de estas propiedades como el esfuerzo a compresión, la deformación, la densidad seca máxima y la humedad óptima, obteniendo una relación directa con el tiempo de curado.

También sucede que el suelo cal puede fallar a compresión siendo una de las causas, el demasiado esfuerzo debido a una carga mayor de la que es capaz de soportar, por esta variación es necesario estudiar cual es el comportamiento de este suelo cal después de la falla, basándose en la teoría de que si el suelo ya falló entonces deja de trabajar las propiedades ligantes de la cal; después de esta falla la tendencia de esfuerzo a compresión del suelo es de nuevamente volver a resistir un determinado esfuerzo para posteriormente llegar a la falla por completo. Con esto se verifica que el esfuerzo a compresión del suelo cal es capaz de restituirse con una tendencia a la que el suelo tenía antes de ser estabilizado con la cal, en laboratorio se determina el valor de restitución para este suelo estabilizado con cal.

Otro estudio importante a desarrollar es, experimentar de qué manera se comporta las muestras de suelo cal ante ciclos de humedecimiento y secado en horno en laboratorio simulando condiciones extremas que podría presentarse en campo.

2.2.24 Normativa.

La normativa usada para la realizar el presente trabajo está basado en el Manual de Ensayos de Suelos y Materiales “Suelos” de la Administradora Boliviana de Carreteras que a su vez es una recopilación de las siguientes normativas.

- Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO)
- Association Society for Testing Materials. (ASTM).
- Manual de Estabilización de Suelo Tratado con Cal “ESTABILIZACIÓN Y MODIFICACIÓN CON CAL” Publicación de la Nacional Lime Association.
- Manual de Estabilización de Suelos con Cal o Cemento, Asociación nacional de Fabricantes de Cales y derivados de España.
- Normas de Ensayos de la Dirección Nacional de Vialidad (1° Distrito Buenos Aires)

CAPÍTULO III

RELEVAMIENTO DE LA INFORMACIÓN

3.1 ANTECEDENTES GENERALES.

La evolución de las propiedades mecánicas de un suelo después de ser estabilizado con cal están relacionadas a diferentes factores los más importantes, el tipo de suelo, porcentaje de arcillas, dosificación, tiempo de curado o edad. En este trabajo se pretende demostrar como varían las propiedades estudiadas a diferentes tiempo de curado o edad con una misma dosificación, tomando especial interés en el estudio de la resistencia a compresión, obteniendo así una curva que relacione los valores máximos alcanzados de las propiedades estudiadas con el tiempo de curado o edad.

Si hablamos de restitución un concepto general que encontramos es el siguiente: Restablecer o poner algo en el estado que antes tenía.

En cuanto a los antecedentes referidos a cómo van evolucionando con la edad las propiedades mecánicas de un suelo después de ser estabilizado con cal no se cuenta con mucha referencia, a diferencia de muchos estudios disponibles de suelo-cemento.

También en cuanto se refiere al tema de restitución del esfuerzo de un suelo después de ser estabilizado con cal, y el estudio del comportamiento ante ciclos de humedecimiento y secado en laboratorio no se tiene mucha información. Existen algunos estudios pero de maneras superficiales en algunas tesis de grado pero no profundizadas, lo cual hace que se desarrolle este trabajo de investigación con mucha responsabilidad para que los resultados obtenidos puedan ser validados y sirva como base para posteriores estudios de otros tipos de suelos. En cuanto a la estabilización de suelos cohesivos con cal si se cuenta con la información necesaria en diferentes formatos como ser normas, manuales, investigaciones, libros y páginas de internet.

3.2 RECONOCIMIENTO DEL SITIO DE APLICACIÓN.

En cuanto al sitio de aplicación podemos establecer que se desarrollará en dos etapas, la primera etapa de campo y la segunda etapa de laboratorio y gabinete.

En cuanto a la primera etapa consiste en reconocer en campo el lugar preciso de donde se extraerá la muestra en la cantidad suficiente para realizar tanto la caracterización como el estudio para ello se debe tener en cuenta la accesibilidad a la zona de donde se extraerá la muestra las condiciones del terreno tanto superficial como a una adecuada profundidad. En este caso, el lugar de donde se extrajo la muestra es de la comunidad de Rancho Sud en la provincia Méndez del departamento de Tarija, comunidad que se encuentra carretera a San Lorenzo a la altura de una estación de servicio de carga de gasolina y diesel.

Se optó por realizar la extracción de la muestra de este lugar debido a que por una inspección visual se nota que existe mucho material fino, y en el mismo se están comenzando a realizar aperturas de calles para futuras urbanizaciones.

La segunda etapa es realizada en Laboratorio de Suelos y Hormigones de la Carrera de Ingeniería Civil de la Universidad Autónoma “Juan Misael Saracho” donde se realizaran todas las pruebas necesarias con los materiales y equipos adecuados, para un posterior procesamiento de datos.

3.3 CRITERIOS A ESTABLECER.

3.3.1 De Muestreo.

Dos tipos de muestras de suelo se obtienen durante una exploración del subsuelo alterada e inalterada. Las muestras alteradas pero representativas, son generalmente usadas para los siguientes tipos de pruebas de laboratorio:

1. Análisis granulométrico
2. Determinación de los límites líquido y plástico
3. Peso específico de los sólidos del suelo
4. Determinación del contenido orgánico
5. Clasificación del suelo

Sin embargo, las muestras alteradas no deben usarse para pruebas de consolidación, permeabilidad o de resistencia cortante, ya que estas deben hacerse con muestras inalteradas.

El muestreo e identificación de materiales del subsuelo, implica técnicas acompañadas de procedimientos e interpretaciones diferentes, las cuales están influenciadas por condiciones geológicas y geográficas, por el propósito de la investigación y por los conocimientos, experiencia y entrenamiento del Ingeniero. Un procedimiento adecuado de muestreo, facilitarán la correlación de los respectivos datos con propiedades ingenieriles.

3.3.2 De Caracterización.

La caracterización consiste en la elaboración de una serie de ensayos de laboratorio que determinaran sus características físico-mecánicas y químicas, tanto como para el suelo solo, la cal y el suelo cal.

3.3.3 De ensayos a Realizar.

Los ensayos son las pruebas de laboratorio que se realizan al suelo solo, la cal y al suelo cal ya sea para realizar la caracterización, como para las pruebas específicas necesarias para llegar al objetivo planteado, estas ensayos o pruebas deben estar basadas en normas y ser realizados de acuerdo a lo que las mismas indican, para que los resultados obtenidos sean confiables.

3.4 SELECCIÓN DEL PORCENTAJE DE CAL.

La selección del porcentaje de cal se realizó basándose de forma general en otros estudios aplicados para suelos cohesivos y los porcentajes de cal recomendados por los mismos, tomando como parámetro la clasificación del suelo, debido a que el presente estudio no trata de comparar ninguna propiedad a diferentes dosificaciones sino un fenómeno que se da en los suelos estabilizados con cal, porque no se realiza la dosificación según lo indicado por la teoría.

Cuadro 3.1 Selección del tipo de estabilización según el tipo de suelo.

<i>Suelo</i>		<i>Arcillas finas</i>	<i>Arcillas gruesas</i>	<i>Limos finos</i>	<i>Limos gruesos</i>	<i>Arenas finas</i>	<i>Arenas gruesas</i>
Tamaño de las partículas (mm)		<0.0006	0.0006–0.002	0.002–0.01	0.01–0.06	0.06–0.4	0.4–2.0
Estabilidad volumétrica		Muy pobre	Regular	Regular	Buena	Muy Buena	Muy Buena
Tipo de Estabilización	Cal						
	Cemento						
	Asfalto						
	Mecánica						
Rango de máxima eficiencia							
Efectiva, pero el control de calidad puede ser difícil							

Fuente: IDU. Guía Para el Diseño de Capas Estructurales de Pavimentos Estabilizados Mediante Procesos Químicos. Bogotá D.C. 2005.

Cuadro 3.2 Comparación de técnicas de estabilización

<i>Material</i>	<i>Estabilización</i>			
	<i>Mecánica</i>	<i>Cemento</i>	<i>Cal</i>	<i>Emulsión</i>
<i>Grava natural</i>	Puede ser necesaria la adición de finos para prevenir desprendimientos	Probablemente este no es necesario, salvo si hay finos plásticos. Cantidad de 2% - 4%	No es necesaria salvo que los finos sean plásticos. Cantidad de 2% - 4%.	Apropiada si hay deficiencias de finos, aproximadamente el 3% de asfalto residual
<i>Arena limpia</i>	Adición de gruesos para dar estabilidad y de finos para prevenir desprendimientos	Inadecuada: produce material quebradizo	Inadecuada: No hay reacción	Muy adecuada. De 3% a 5% de asfalto residual
<i>Arena arcillosa</i>	Adición de gruesos para mejorar resistencia	4% - 8%	Es factible dependiendo del contenido de arcilla	Se puede emplear. De 3% a 4% de asfalto residual
<i>Arcilla arenosa</i>	Usualmente no es aconsejable	4% - 12%	4% a 8% dependiendo del contenido de arcilla	Se puede emplear pero no es muy aconsejable
<i>Arcilla pesada</i>	Inadecuada	No es muy aconsejable. La mezcla puede favorecer con un pretratamiento con 2% de cal y luego entre el 8% y 15% de cemento	Muy adecuada, entre el 4% y 8% dependiendo del contenido de arcilla	Inadecuada

Fuente: IDU. Guía Para el Diseño de Capas Estructurales de Pavimentos Estabilizados Mediante Procesos Químicos. Bogotá D.C. 2005.

Para realizar este estudio se optó por una dosificación de 4% de cal referido al suelo seco, según una recomendación general de estudios que recomiendan usarla para suelos cohesivos dosificaciones entre 2% hasta 7% según el tipo de suelo, como el

Proyecto de grado “Estabilización de Suelos con Cohesivos con Cal ”, egr. Agustín Fernández Chura. En la cual define una dosificación de 4% de cal hidratada por fracción de suelo clasificado según la norma USCS= CL, Clasificación según AASHTO= A-6.

3.5 CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES.

Para realizar la caracterización de los materiales son necesarios los siguientes tipos de caracterización: una caracterización física, una caracterización mecánica y una caracterización química ambos tipos de caracterización comprende ensayos específicos que se detalla a continuación.

Para la caracterización son necesarios los ensayos de: Contenido de humedad, Análisis granulométrico por tamizado, Análisis granulométrico por hidrómetro, Determinación del límite líquido, Determinación del límite plástico e índice de plasticidad y compactación.

Luego del muestreo se realiza en laboratorio la fabricación de probetas con el Proctor modificado método “A” para suelo puro y para el suelo cal a la humedad y densidad según la prueba de Proctor modificada, dejando un tiempo de curado entre 0 y 50 días las probetas con suelo cal, para luego realizar la prueba de compresión confinada a las probetas con suelo puro y un cierto número de probetas con suelo cal a la edad de 0, 7, 15, 30 y 50 días de curado, tomando un mayor interés en el estudio en las muestras de suelo-cal a la edad de 7 días; además de lo anteriormente mencionado, después de realizar la prueba de compresión simple del suelo-cal a las edades mencionadas al suelo fallado a compresión se vuelve a realizar la prueba de Proctor modificado método “A” y analizar qué es lo que pasa con la densidad y la humedad óptima del suelo-cal, al suelo-cal de las muestras falladas en la prueba de compresión simple a la edad de 7 días de curado se remolden nuevas probetas con el suelo-cal fallado y nuevamente se realizara la prueba de compresión simple, también se realiza una prueba de C.B.R. al suelo puro y suelo cal a los 7 días de curado.

3.5.1 Caracterización del Suelo Solo.

Se refiere a los ensayos físico-mecánicos y químicos para la caracterización del suelo sin tratar es decir el suelo sin agente estabilizador sin cal.

3.5.1.1 Caracterización física.

Cuadro 3.3 Caracterización física del suelo solo

CARACTERIZACIÓN	ENSAYO	NORMATIVA
Física	Contenido de humedad (3 estudios)	ASTM D2216
	Análisis granulométrico por tamizado (3 estudios)	ASTM D422 AASHTO T88
	Análisis granulométrico por hidrómetro (3 estudios)	ASTM D422
	Determinación del límite líquido (5 estudios)	ASTM D4318 AASHTO T89
	Determinación del límite plástico e índice de plasticidad (3 estudios)	ASTM D4318 AASHTO T90
	Determinación del peso específico de los suelos (3 estudios)	(ASTM D854 AASHTO T100)

Fuente: Elaboración propia.



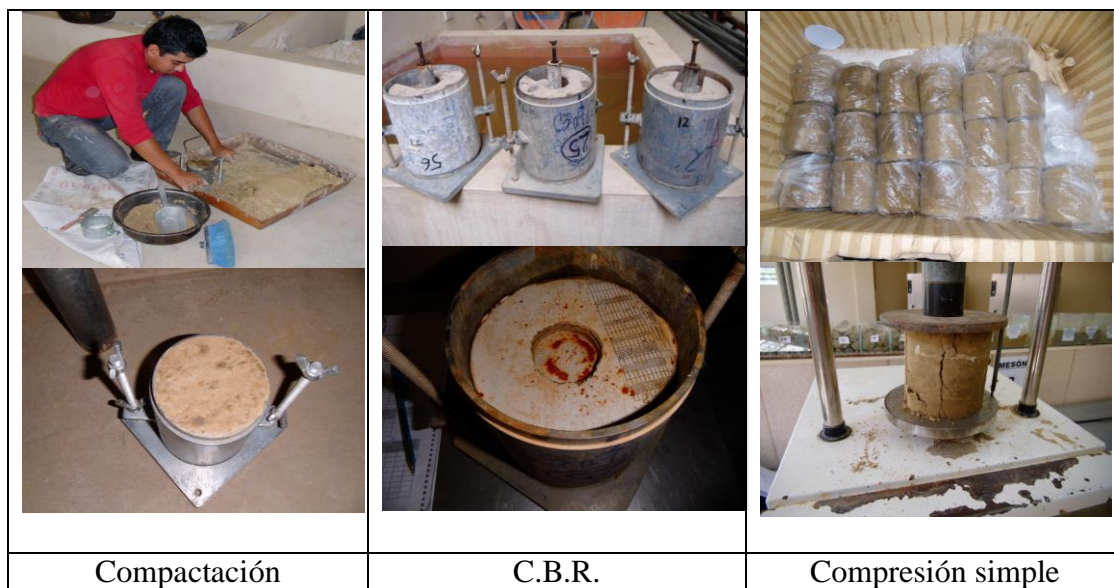
Fuente: Elaboración propia

3.5.1.2 Caracterización mecánica.

Cuadro 3.4 Caracterización mecánica del suelo solo

CARACTERIZACIÓN	ENSAYO	NORMATIVA
Mecánica	Ensayo de compactación considerando familias de curva método de un punto (Proctor modificado) (3 estudios)	AASHTO T272
	Determinación de la relación de soporte del suelo en laboratorio (CBR de laboratorio) (3 estudios)	ASTM D1883 AASHTO T193
	Compresión inconfiada en muestras de suelos (20 muestras)	ASTM D2126 AASHTO T208

Fuente: Elaboración propia.



Fuente: Elaboración propia

3.5.1.3 Caracterización química.

Cuadro 3.5 Caracterización química del suelo solo

CARACTERIZACIÓN	ENSAYO	NORMATIVA
Químico	Determinación del PH de los suelos	ASTM G51

Fuente: Elaboración propia

3.5.2 Caracterización del Suelo Cal.





Los ensayos de caracterización del suelo con el porcentaje determinado de cal en este caso al 4% de cal referido al suelo seco, son prácticamente los mismos a los que se realiza al suelo solo o suelo sin cal, con la única diferencia que se le añade la cal a la dosificación especificada.

3.5.2.1 Caracterización física.

Cuadro 3.6 Caracterización física del suelo-cal

CARACTERIZACIÓN	ENSAYO	NORMATIVA
Física	Contenido de humedad (3 estudios)	ASTM D2216
	Análisis granulométrico por tamizado (3 estudios)	ASTM D422 AASHTO T88
	Análisis granulométrico por hidrómetro (3 estudios)	ASTM D422
	Determinación del límite líquido (3 estudios)	ASTM D4318 AASHTO T89
	Determinación del límite plástico e índice de plasticidad (3 estudios)	ASTM D4318 AASHTO T90
	Determinación del peso específico de los suelos (3 estudios)	(ASTM D854 AASHTO T100)

Fuente: Elaboración propia

 <p>Cont. De Humedad</p>			
Peso Específico	Granulometría		Límites de Atterberg

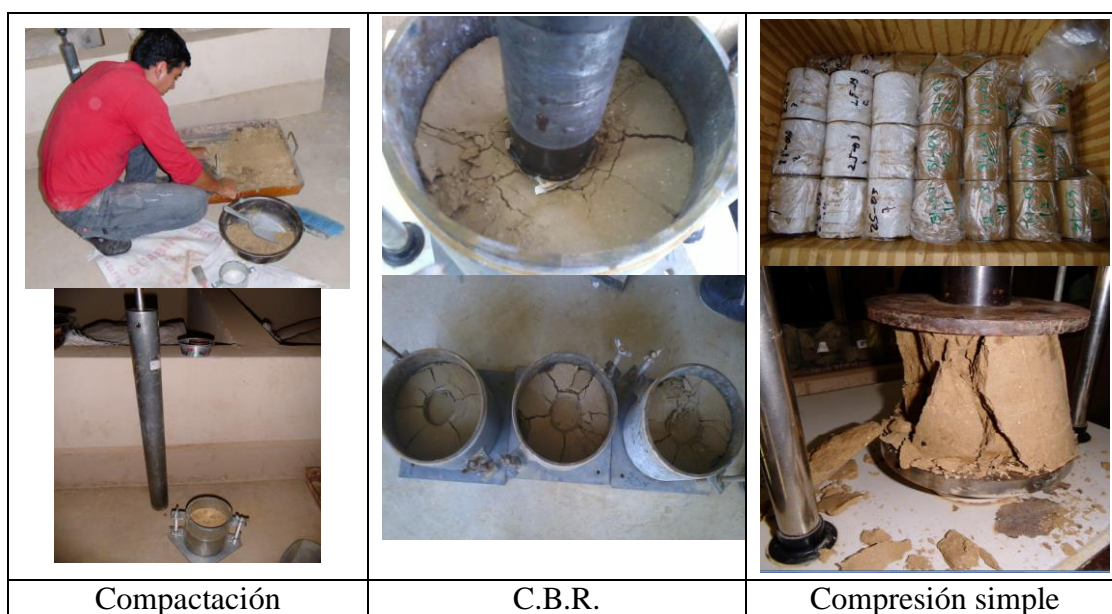
Fuente: Elaboración propia

3.5.2.2 Caracterización mecánica.

Cuadro 3.7 Caracterización mecánica del suelo-cal

CARACTERIZACIÓN	ENSAYO	NORMATIVA	
Mecánica	Ensayo de compactación considerando familias de curva método de un punto (Procctor modificado) (3 estudios)	AASHTO T272	
	Determinación de la relación de soporte del suelo en laboratorio (CBR de laboratorio) (2 estudios)	ASTM D1883 AASHTO T193	
	Compresión inconfínada en muestras de suelos (80 muestras) edades entre 0 y 50 días.	ASTM D2126 AASHTO T208	
	<i>N° de muestra</i>		<i>Edad</i>
	10 muestras		0 días
	40 muestras		7 días
	10 muestras		15 días
10 muestras	30 días		
10 muestras	50 días		
	15 muestras de suelo-cal Remoldeado de 7 días de curado.		
Ciclos de humedecimiento y secado en laboratorio	Ensayo de durabilidad por humedecimiento y secado de mezclas de suelo-cal (70 muestras)	VN - E21 - 66	

Fuente: Elaboración propia



Fuente: Elaboración propia

3.5.2.3 Caracterización química

Cuadro 3.8 Caracterización química del suelo-cal

CARACTERIZACIÓN	ENSAYO	NORMATIVA
Químico	Determinación del PH de los suelos	ASTM G51

Fuente: Elaboración propia

3.5.3 Caracterización de la Cal.

La cal que se emplee como agente estabilizante puede ser cal viva (óxido de calcio (CaO), o cal hidratada (hidróxido de calcio Ca(OH)₂) conocida comúnmente como cal apagada pero en este caso se prefirió utilizar la cal hidratada evitando el proceso de apagado de la cal.

3.5.3.1 Caracterización química.

Cuadro 3.9 Caracterización química de la cal

CARACTERIZACIÓN	ENSAYO	NORMATIVA
Químico	PH	ASTM G51
	Pureza de la cal	-

Fuente: Elaboración propia

3.5.4 Agua a Utilizar.

El agua requerida para todos los ensayos tanto como el suelo solo y de la mezcla suelo-cal debe ser limpia, libre de impurezas, de sales aceites o cualquier residuo químico.

3.6 PREPARACIÓN DEL SUELO SOLO

La preparación del suelo en nuestro caso como se trata de un suelo fino cohesivo, de la zona de donde se extrajo la muestra se la obtuvo en forma de terrones y un poco de suelto pero en forma de grumos pequeños, lo que se hace necesario para realizar todos los ensayos que el suelo se encuentre desintegrado o suelto que pase por los tamices especificados para cada ensayo, para desintegrar los terrones, en una bandeja grande metálica se coloca en cantidades óptimas (según el tamaño de la bandeja) y con un martillo de goma o un rodillo se procede a reducir los tamaños de los terrones

hasta tener un suelo completamente suelto, teniendo en cuenta de no golpear el suelo debido a que este puede sufrir alteraciones en sus partículas.

3.7 PREPARACIÓN DE LA MEZCLA SUELO-CAL.

La única dosificación utilizada para este trabajo es de 4% de cal referido siempre al peso del suelo seco, tanto para la caracterización del suelo-cal como para los ensayos de estudio.

Para la preparación de las mezcla suelo-cal, es necesario que el suelo se encuentre



suelto y pase por los tamices especificados para cada ensayo, es importante conocer el contenido de humedad a la que se encuentra el suelo antes de la adición de la cal, ésto puede conocerse por diferentes métodos conocidos, otra opción es que el suelo se lo deje secar al

horno, pero no es muy recomendable dejarlo más de 24 horas, esto porque el suelo puede sufrir algunas alteraciones al entrar en calor, por lo que en este trabajo se trabajó a partir del contenido humedad a la que encontraba el suelo para el cual se lo determinó dejando secar 24 horas muestras en taras pequeñas en el horno.

Conociendo la humedad óptima con un sencilla operación matemática, regla de tres, se procede a determinar el peso del suelo seco, la operación consiste en obtener el contenido de humedad en porcentaje a la que se encuentra el suelo, a partir de esto tomando una muestra, el cual será el 100% en relación al peso que se encuentra a una cierta humedad (contenido de humedad). Luego, conocido el contenido de humedad en porcentaje se procede a determinar a cuánto equivale este porcentaje en los 5 kg del suelo, para luego restar este peso que sería el del agua presente en el suelo para así obtener el peso del suelo seco.

Contenido de humedad

$$w(\%) = \frac{Pa}{P_{ss}} * 100 \quad \text{Dónde:}$$

w(%)= contenido de humedad en porcentaje.

Pa= peso del agua presente en el suelo.

Pss= peso del suelo después de secar al horno.

Peso del agua presente en la muestra de suelo.

$$W(g) = \frac{w(\%)*P_m}{100\%} \quad \text{Dónde:}$$

W(g)= peso del agua presente en el suelo para una muestra de peso Pm.

Pm= Peso de la muestra de suelo en gramos.

w(%)=contenido de humedad en porcentaje.

Peso del suelo seco de la muestra.

$$P_{ssm} = P_m - W(g) \quad \text{Dónde:}$$

Pssm= peso suelo seco de la muestra.

Pm= peso de la muestra (g)

W(g)= peso del agua presente en la muestra de suelo

Cantidad de cal referida al peso de suelo seco de la muestra de suelo.

Para realizar el cálculo de la cantidad de cal a añadir la cual estará referida siempre al peso del suelo seco, se parte sabiendo al porcentaje que se desea dosificar, en este caso será una dosificación de al 4% de cal.

$$Cc(g) = \frac{d(\%)*P_{ssm}}{100\%} \quad \text{Dónde:}$$

Cc(g)= Cantidad de cal a añadir en gramos.

d(%)= dosificación de la cal en porcentaje.

Pssm= peso suelo seco de la muestra (g)

Con las cantidades necesaria de suelo y cal respectivamente proceder a realizar la mezcla, siempre con el cuidado y protección necesaria porque la cal puede ocasionar daños a la piel.



3.8 DETALLE DEL EQUIPO E INSTRUMENTOS A UTILIZAR SEGÚN NORMATIVA.

El equipo necesario para realizar cada ensayo será el especificado en las normas los cuales deben estar en óptimas condiciones para poder obtener datos lo más confiable y más precisos posibles, cada uno de estos equipos se detalla en cada ensayo a ser realizado.

3.8.1 Equipo Normalizado.

Equipo normalizado se refiere a cada uno de los equipos que especifica y detalla en la norma los cuales son necesarios e imprescindibles para realizar el ensayo, en este caso cada uno de estos equipos normalizados son proporcionados por el laboratorio.

3.8.2 Equipo no Normalizado.

Un equipo no normalizado es aquel que no especifica en ninguna norma y son necesarios o prescindibles para realizar algún ensayo o para obtener algún dato o valor estos equipos son empíricos o semiempíricos fabricados o diseñados por el investigador, y los valores o datos que estos proporcione pueden ser o no validados por el fabricante o investigador.

Para este trabajo no se necesitan ni es imprescindible del uso de algún equipo que no esté normalizado.

3.9 MÉTODOS Y TÉCNICAS EMPLEADAS.

Los métodos y técnicas que emplearon para realizar los ensayos de caracterización y estudio para cumplir con los objetivos planteados son los que están descritos en los procedimientos para la realización de cada uno de los ensayos, es necesario cumplir

con cada uno de los procedimientos para que los datos obtenidos de cada uno de los ensayos sean confiables.

Una técnica realizada a destacar en este trabajo que es necesaria mencionarla es la preparación de las muestras de suelo cal para cada uno de los ensayos que luego de la dosificación se dejó un periodo de maduración de 24 horas antes de realizar los ensayos y así también para la fabricación de las probetas, esto según recomendación de la bibliografía y otros estudios, esto para dejar que inicie la reacción química, para este periodo de maduración las muestras de suelo cal luego ser dosificadas y mezcladas puede realizarse conservándola en un recipiente cerrado y apretando bien la misma o, como en este caso que se dejó en una bolsa de plástico apretando y quitando todo el aire del interior para evitar la carbonatación de la cal y al final de este periodo nuevamente debe realizarse el mezclado de todos los componentes para recién realizar el ensayo necesario y la incorporación del agua.

3.10 ANÁLISIS DE LOS PROCESOS DE RELEVAMIENTO.

Para poder realizar un relevamiento de información adecuado, se partió con la búsqueda de la bibliografía relacionada con el tema estudiado y con todos los campos que abarca como es suelos, geotecnia, cal, suelos estabilizados con cal.

3.11 PROCESOS PARA MUESTRO (ENSAYOS).

Las técnicas a usar será un muestreo probabilístico, siguiendo a detalle lo especificado en las normas Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) y (2) la Association Society for Testing Materials. (ASTM), con la humedad óptima y densidad máxima determinada con la prueba de compactación se realizarán probetas de suelo puro y suelo cal dosificado al 4%, se realizara un ensayo de C.B.R. para el suelo puro y para el suelo cal, las probetas de suelo cal antes de realizar la compactación se dejan madurar un lapso de 24 horas de manera que las partículas de suelo y cal interactúen y tenga tiempo para su reacción química de mejor manera, luego de las 24 horas se procede con la compactación de la probetas de suelo cal, dejando las mismas en un lugar fresco cubiertas herméticamente con bolsa

de nylon durante 0, 7, 15, 30 y 50 días, posteriormente a ello se realizan los ensayos de compresión simple inconfiada para obtener la relación esfuerzo deformación.

Para cada probeta ensayada en la prueba de compresión inconfiada se tiene una lectura de deformación para cada esfuerzo, además de ello se mide el tiempo y se observara que es lo que va pasando y encontrar un comportamiento en el tiempo para adicionar al reporte final teniendo así una relación de esfuerzo-deformación y tiempo.

Con estos resultados, se hace un ajuste estadístico se establece si existen relaciones entre el esfuerzo máximo, deformación, con el tiempo de curado; haciendo además la respectiva comparación entre las propiedades del suelo sin cal y el suelo-cal, de la prueba de compresión simple inconfiada determinar, si un suelo cohesivo estabilizado con cal después de sufrir la falla restituye el esfuerzo y deformación los mismos que antes de ser estabilizado, si lo hace establecer un valor de restitución para este tipo de suelo.

Con el suelo cal que falló en la prueba de compresión simple a cada edad ensayada se lo dejara secar de forma natural, para luego realizar nuevamente el ensayo de compactación para determinar a cada edad la densidad y la humedad óptima respectivamente y relacionarlo cada uno con el tiempo de curado y hacer un análisis si existe alguna variación.

Para los ciclos de humedecimiento y secado del suelo cal que se realiza en laboratorio saturando las muestras y secándolas en horno como se describe en la descripción del ensayo, se realiza en dos etapas, la primera en muestras de suelo cal con una edad de 7 días de curado según indica la norma, pero según alguna referencias este ensayo no se llega a completar debido a que las muestras al saturarse llegan a deshacerse, de suceder esto se realiza el mismo ensayo con una mayor edad de curado aproximado de 30 días y se analizara si se llega a completar el ensayo.

3.12 CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES.

Es importante hacer notar que para la caracterización tanto del suelo solo, como la del suelo cal son los mismos ensayos, con los procedimientos establecidos en la norma

para suelos, con la única diferencia que para el suelo cal se realizó una dosificación y un periodo de maduración para llevar a cabo cada uno de los ensayos.

3.12.1 Contenido de Humedad (ASTM D2216).

Es importante este ensayo, ya que determina en laboratorio el contenido de agua (humedad) de suelo por peso.

El contenido de agua del material se define como la relación, expresada en porcentaje, entre la masa de agua que llena los poros o "agua libre", en una masa de material, y la masa de las partículas sólidas de material, necesario para obtener la humedad en los ensayos de límites.

Consiste en obtener una muestra húmeda representativa del material utilizado, colocarlo en un recipiente al horno (mejor si tiene tapa), pesar el recipiente vacío y luego el recipiente más la muestra húmeda obteniendo así un peso del material más el recipiente, luego llevarla al horno a temperatura $110 \pm 5^\circ\text{C}$ ($230 \pm 9^\circ\text{F}$) en la mayoría de los casos, el secado de una muestra durante la noche (16 horas), es suficiente, sacar del horno y pesar nuevamente el material, obteniendo un peso seco del material más el recipiente.

Calculando el contenido de agua de la muestra así:

$$w(\%) = \frac{Pa}{Pss} * 100 \quad \text{Dónde:}$$

$w(\%)$ = contenido de humedad en porcentaje.

Pa = peso del agua presente en el suelo.

Pss = peso del suelo después de secar al horno.

3.12.2 Análisis Granulométrico por Tamizado Método de Lavado (ASTM D422 AASHTO T88).

Para este ensayo serán necesarios los tamices: N° 4 con abertura de 4,75 mm, N° 10 con abertura de 2,0 mm, N° 40 con abertura de 0,425 mm y N° 200 con abertura de 0,075mm.

Tomar una muestra representativa de suelo aproximadamente unos 500 a 1.000 g, registrar la cantidad exacta, hacer pasar el material por los tamices, cuidadosamente lavar con agua potable el material sobre tamiz 0,075 mm (N° 200); vacíe a un bol el material retenido en tamiz 0,075 mm (N° 200) y dejar que seque hasta masa constante a $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$.

Se debe registrar los pesos del material retenido en cada tamiz y lo del tamiz N° 200 su peso seco, luego calcular el porcentaje retenido en cada tamiz.

Expresar la granulometría como porcentaje acumulado que pasa por cada tamiz, indicando como primer resultado el del menor tamiz en que pasa el 100% y expresando el resultado para los siguientes tamices como la diferencia entre el porcentaje que pasa en el tamiz inmediatamente anterior al de cálculo y el retenido en el tamiz de cálculo. Aproximar los porcentajes que pasan al entero más cercano.

Los resultados de la granulometría pueden expresarse en forma gráfica en un sistema de coordenadas ortogonales; en las abscisas, a escala logarítmica, se indican las aberturas de los tamices y en las ordenadas, a escala lineal, los valores de los porcentajes que pasan en cada tamiz, obtenidos de acuerdo a lo calculado en porcentaje del retenido en cada tamiz.

3.12.3 Análisis Granulométrico por Hidrómetro (ASTM D422).

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

Se asume que la ley de Stokes puede ser aplicada a una masa de suelo dispersado, con partículas de varias formas y tamaños. El hidrómetro se usa para determinar el porcentaje de partículas de suelos dispersados, que permanecen en suspensión en un determinado tiempo. Para ensayos de rutina con fines de clasificación, el análisis con hidrómetro se aplica a partículas de suelos que pasan el tamiz de 2.00 mm (No.10). Cuando se quiere más precisión, el análisis con hidrómetro se debe realizar a la fracción de suelo que pase el tamiz de $75 \mu\text{m}$ (No.200).

Es necesario saber que para este ensayo el agua a utilizarse debe ser agua destilada o desmineralizada. El agua para el ensayo con hidrómetro deberá llevarse hasta la temperatura que prevalecerá durante el ensayo; así, si el cilindro de sedimentación se va a colocar en baño de agua, la temperatura del agua destilada o desmineralizada que va a utilizarse se llevará a la temperatura de dicho baño. Si el cilindro de sedimentación se coloca a la temperatura ambiente del laboratorio, el agua deberá tener dicha temperatura. La temperatura normal de ensayo es la de 20 °C (68 °F). Sin embargo, variaciones de temperatura pequeñas, no implicarán el uso de las correcciones previstas.

El hidrómetro debe ser calibrado para determinar su profundidad efectiva en términos de lecturas de hidrómetro.

El tamaño aproximado de la muestra que se debe usar para el análisis por el hidrómetro varía con el tipo de suelo que va a ser ensayado. La cantidad requerida para suelos arenosos es de 75 a 100 g y para limos y arcillas de 50 a 60 g (Peso seco). El peso exacto de la muestra en suspensión puede ser determinado antes o después del ensayo. Las muestras de estos suelos deben ser conservadas con su contenido de humedad natural, y ensayadas sin ser secadas al horno.

Determinar la corrección por defloculante y punto cero, Cd. y la corrección por menisco, cm. determinar el peso específico de los sólidos, Gs.

Se debe dejar la muestra en remojo por una noche hasta que los terrones de suelo se hayan desintegrado.

Transferir la muestra con agua, de la cápsula a un vaso de, lavando cualquier residuo que quede en la cápsula con agua destilada o desmineralizada. Agitar el vaso de dispersión durante el tiempo de un minuto.

Se transfiere la suspensión a un cilindro de sedimentación de 1000 ml. La suspensión debe ser llevada a la temperatura que se espera prevalecerá en el laboratorio durante el ensayo.

Un minuto antes de comenzar el ensayo, hay que tomar el cilindro de sedimentación y tapándolo con la mano, agítase la suspensión vigorosamente durante varios segundos, con el objeto de remover los sedimentos del fondo y lograr una suspensión uniforme. Continúese agitando hasta completar un minuto volteando el cilindro hacia arriba y hacia abajo alternativamente. Terminada la agitación colocar sobre una mesa y poner en marcha el cronómetro, si hay espuma sacar con un papel absorbente e introducir el hidrómetro, lentamente teniendo cuidado al introducir y al sacar el hidrómetro de no perturbar la sedimentación, Observar y anotar las dos primeras lecturas de hidrómetro, al minuto, y a los dos minutos después de haber colocado el cilindro sobre la mesa. Estas lecturas deben realizarse en el tope del menisco. Inmediatamente después de realizar la lectura de los 2 minutos, extraer cuidadosamente el hidrómetro de la suspensión y colocar en un cilindro graduado con agua limpia. Si el hidrómetro se deja mucho tiempo en la suspensión, parte del material que se está asentando se puede adherir al bulbo, causando errores en las lecturas. Luego, introducir nuevamente el hidrómetro y realizar lecturas a los: 5, 15, 30, 60, 120, 250 y 1.440 minutos. Todas estas lecturas deben realizarse en el tope del menisco formado alrededor del vástago. Inmediatamente después de cada una de estas lecturas, extraer el hidrómetro cuidadosamente de la suspensión y colocar en el cilindro graduado con agua limpia. Después de realizar la lectura de hidrómetro de los 2 minutos y después de cada lectura siguiente, colocar un termómetro en la suspensión, medir la temperatura y anotar en la planilla con una aproximación de 0.5 °C (0.9 °F).

Si el peso de la muestra se va a determinar al final del ensayo, lávese cuidadosamente toda la suspensión transfiriéndola a una cápsula de evaporación. Secar el material al horno, déjese enfriar y determínese el peso de la muestra. El peso seco de la muestra de suelo empleada se obtendrá restándole a este valor el peso seco del agente defloculante empleado.

Antes de proceder con los cálculos, las lecturas de hidrómetro deberán ser corregidas por menisco, por temperatura, por defloculante y punto cero.

Luego realizar los siguientes cálculos: lectura del hidrómetro corregida, cálculo del diámetro de las partículas (D), cálculo del porcentaje más fino.

3.12.4 Determinación del Límite Líquido (ASTM D4318 AASHTO T89).

Se debe extraer una muestra de suelo aproximadamente unos 500 gramos que pasa el tamiz 0,425 mm (N° 40). Colocar la muestra en el plato; agregar agua y mezclar completamente mediante la espátula.

Colocar el aparato de límite líquido sobre una base firme, en la taza del equipo colocar una porción de la muestra acondicionada utilizando una espátula; la masa de suelo deberá colocarse centrándola en el punto de apoyo de la taza con la base. Moldear la masa de suelo con la espátula hasta obtener la forma indicada en la figura, evitando incorporar burbujas de aire en la mezcla.

Enrasar y nivelar a 10mm en el punto de máximo espesor. Reincorporar el material excedente al plato de evaporación. Dividir la pasta de suelo, pasando el acanalador cuidadosamente a lo largo del diámetro que pasa por el eje de simetría de la taza, de modo que se forme una ranura clara y bien delineada de las dimensiones especificadas. Pasar el acanalador, manteniéndolo perpendicular a la superficie interior de la taza.

Girar la manivela levantando y dejando caer la taza con una frecuencia de dos golpes por segundo, hasta que las paredes de la ranura entren en contacto en el fondo del surco a lo largo de un tramo de 10 mm., registrar el número de golpes obtenido, retirar aproximadamente 10 g del material que se junta en el fondo del surco; colocarle en una cápsula de secado y determinar su humedad. Se debe realizar al menos 5 veces los mismos pasos a diferentes humedades se recomienda que debe estar entre los 15 a 40 golpes, para luego construir una gráfico semilogarítmico, con la humedad (w) como ordenada en escala aritmética y el número de golpes (N) como abscisa en escala logarítmica.

El Límite Líquido (LL) del suelo será la humedad correspondiente a la intersección de la curva de fluidez con la abscisa de 25 golpes, aproximando a un decimal.

3.12.5 Determinación del Límite Plástico e Índice de Plasticidad ASTM D4318 AASHTO T90).

Par determinar el límite plástico se debe extraer una muestra representativa de un tamaño que asegure una masa mínima de ensaye de 500g de material bajo tamiz 0,425mm (Nº 40).

Agregar agua a la muestra en un plato y mezclar uniformemente hasta obtener una masa pastosa, la cual se pueda amasar hasta que no se pegue en la mano, con la mano encima de un vidrio proceder a realizar rollitos de aproximadamente 3 mm diámetro, al llegar a este diámetro aproximado el rollito debe empezar a fisurarse, entonces se debe cortar en la parte fisurada en trozos del orden de 0,5 a 1 cm de largo y no pueda ser re amasado ni reconstituido. Realizar entre 3 a 5 pruebas, extrayendo de cada prueba unas 3 muestras de rollitos para pesarlos y llevarlos al horno para el secado correspondiente y determinar la humedad y con ello el porcentaje de humedad el promedio de los porcentajes de humedad si no se descarta ninguno será el Límite Plástico.

El índice de plasticidad es la diferencia del porcentaje de humedad del Límite Líquido y el Límite Plástico del mismo material analizado.

3.12.6 Determinación del Peso Específico de los Suelos (ASTM D854 AASHTO T100)

Este ensayo se realiza en dos etapas la primera etapa consiste en la calibración del frasco y la segunda el ensayo con la muestra de suelo.

- Calibración del frasco

Primero se debe lavar el frasco con agua jabonosa y luego enjuagar con agua hasta eliminar el jabón, para luego enjuagar con jabón para eliminar los restos de agua.

Posteriormente limpiar y secar el frasco y determinar su peso luego, llenar el frasco con agua hasta la mitad de su volumen, para posteriormente introducir el frasco en un baño maría y someterlo al incremento del calor. El baño maría se aplica hasta que la temperatura dentro del frasco esté alrededor de los 60 °C, sacar el frasco del baño

maría y complementar el agua a temperatura ambiente hasta 5 mm de la marca de enrase.

En este punto leer la temperatura tratando de que el termómetro se introduzca al centro del frasco, luego llenar agua con una pipeta hasta la parte inferior del menisco que coincida con la marca de enrase.

Pesar el frasco con el agua hasta el enrase y anotar este dato, para bajar la temperatura del agua, se debe hacer enfriar el frasco en baño maria frio. Posteriormente realizar cinco pesadas del frasco con agua a cinco diferentes temperaturas entre los rangos de 15 a 30°C manteniendo siempre la parte inferior del menisco en la marca de enrase y el termómetro en el centro del frasco.

Peso específico de la muestra de suelo

El peso específico relativo se determina mediante la siguiente formula:

$$\gamma = \frac{W_s}{W_{fw} + W_s - W_{fsw}} \quad \text{Dónde:}$$

γ = peso específico relativo del suelo

W_s = peso del suelo seco

W_{fw} = peso del frasco lleno de agua

W_{fsw} = el peso del frasco con suelo y agua

El peso del frasco lleno de agua hasta el enrase es función de la temperatura de prueba, este valor generalmente se extrae de la curva de calibración. Luego de calculados los pesos específicos se debe ajustar estos datos a una temperatura patrón de 20 °C, cuya densidad de agua es: 0,99791

Para realizar el ensayo se debe limpiar y secar el frasco calibrado, pesar 80 gramos de muestra de suelo con una humedad natural, luego colocar el suelo en un plato, añadir agua y mezclar hasta formar una pasta suave.

Colocar dentro del frasco la pasta y batir hasta que se forme una suspensión uniforme, se debe extraer todo el aire atrapado dentro de los suelos,. Para ello se debe mover el

frasco con mucho cuidado, someter el frasco con agua y suelo a variación de temperatura dentro de un baño maría, hasta que alcance una temperatura de 60 °C, llenar el frasco con agua a temperatura ambiente hasta que la parte inferior del menisco coincida con la marca de enrase del frasco. Pesar el frasco y medir la temperatura en el centro del frasco, someter a un enfriamiento el frasco para repetir unas tres veces a diferentes temperaturas en los rangos de 15° a 30°. Posteriormente realizar los cálculos con los datos obtenidos.

3.12.7 Ensayo de Compactación (Proctor modificado método “A”) (AASHTO T272)

Se utilizara los materiales para Proctor estándar del método “A”

Se debe preparar el suelo aproximadamente 15 kg, desintegrando los terrones y grumos hasta que pase el tamiz N° 4, y desechar lo retenido en este tamiz, una vez preparado la muestra se debe calcular su contenido de humedad, antes de compactarlo.

Dividir el materiales en cinco partes iguales de 3000 gramos cada uno, depositar en fuentes y lavadores ya que en cada uno se incrementará agua en diferentes porciones; para suelos cohesivos se recomienda comenzar con un porcentaje de humedad variando entre porcentajes 6% a 17%, para ésto se debe aplicar el incremento de la humedad de acuerdo al siguiente ejemplo:

Siendo el contenido de humedad calculado de 2%, para llegar a 4% nos faltaría otro 2%, entonces, pesamos el material para el primer molde por con 3000 gramos. Y asumiendo que en este peso se encontraría al 100% de agua, por lo que se trataría de 3000 cm³ (ya que la densidad del agua se asume 1gr/cm³), por simple regla de tres solo resta realizar la siguiente operación:

$$Ca = \frac{2\% * 3000g}{100\%} = 60cm^3 \quad \text{Dónde:}$$

Ca= Cantidad de agua (cm³)

Se pesa el molde con la base y sin collarín y se determina su volumen, una vez calculado los porcentajes requeridos de humedad se procede a incrementar tales cantidades de agua al suelo mezclando y homogeneizando la muestra, para luego introducir al molde compuesto con su extensión o collarín, en cinco capas iguales compactando cada capa a 25 golpes. Una vez completada la compactación se retira el collarín y se enraza con la regla metálica hasta dejar una superficie lisa hasta la altura del molde, luego se pesa el molde con su base con el suelo compactado y enrazado, registrando en la planilla de cálculos. Seguidamente se retira el molde de su base y se extrae tres muestras del corazón del suelo compactado, para determinar el contenido de humedad real del suelo compactado. Luego de esto, realizar los cálculos y graficar la curva de densidades en el eje de las ordenadas y porcentaje de humedad en el eje de las abscisas, para obtener una ecuación y obtener la humedad óptima que será donde se dé la máxima densidad de compactación.

3.12.8 Determinación de la Relación de Soporte del Suelo en Laboratorio (CBR de laboratorio) (ASTM D1883 AASHTO T193).

Este método establece el procedimiento para determinar un índice de resistencia de los suelos, conocido como Razón de Soporte de California (CBR). El ensayo se realiza normalmente a suelos compactados en laboratorio, con la humedad óptima y niveles de energía variables.

Este método se utiliza para evaluar la capacidad de soporte de suelos de sub-rasante, como también de materiales empleados en la construcción de terraplenes, subbases, bases y capas de rodadura granulares.

Con el contenido óptimo de humedad y la densidad máxima compactada seca de acuerdo con los Métodos Proctor, compactar al menos 3 probetas en un rango de 90% a 100% de la densidad máxima compactada seca determinada anteriormente. Para cada molde colocar el disco espaciador sobre la placa base. Fijar el molde con su collar de extensión sobre dicha placa y colocar un disco de papel filtro grueso sobre el espaciador.

Compactar cada una de las porciones de suelo húmedo en el molde, en un número de capas igual al de las probetas usadas en el ensaye de humedad - densidad. Cada probeta se debe compactar con distinta energía de tal manera que la densidad en la cual se desee determinar la razón de soporte quede entre las densidades de dos probetas.

Si las muestras van a ser sometidas a inmersión, determinar el contenido de humedad al comienzo y al final del procedimiento de compactación (2 muestras). Cada una de ellas debe pesar como mínimo 500g. Si las muestras no se van a someter a inmersión, obtener la muestra para la determinación de humedad después de efectuar la penetración, luego retira el collar, sacar la placa perforada y el disco espaciador y pesar el molde con el suelo compactado.

Colocar un disco de papel filtro grueso sobre la placa base perforada, invertir el molde y fijarlo a dicha placa, con el suelo compactado en contacto con el papel filtro.

Colocar el vástago ajustable y la placa perforada sobre la probeta de suelo compactado y aplicar las cargas hasta producir una sobrecarga igual a la ejercida por la estructura del pavimento sobre el material en estudio, redondeando a múltiplos de 2,27Kg. (5 lb). En ningún caso debe ser menor que 4,54Kg. (10 lb)

Aplicar la carga en el pistón de penetración de manera que la velocidad sea de 1,27 mm/min. Anotar las lecturas de carga en los siguientes niveles de penetración: 0,64; 1,27; 1,91; 2,54; 3,18; 3,81; 4,45; 5,08; 7,62; 10,16 y 12,7mm. Anotar la carga máxima alcanzada, registrando la penetración a la que se produce, si esto ocurre para una penetración menor que 12,7mm. El ensaye debe realizarse hasta alcanzar una penetración mínima de 7,62mm (0,300pulgadas). Luego sacar el suelo del molde y determinar su humedad considerando la totalidad de la muestra.

Luego con los datos procesados y los resultados de éstos, se graficará la curva tensión penetración el cálculo de la razón de soporte.

3.12.9 Determinación del PH del Suelo, Cal Suelo - Cal.

Debido a que este ensayo es netamente químico pero importante para la caracterización las muestras fueron enviadas para para dicho análisis a un laboratorio químico.

3.12.10 Compresión inconfiada en muestras de suelos (ASTM D2126 AASHTO T208).

Resistencia a la compresión inconfiada, es la carga por unidad de área a la cual una probeta de suelo, cilíndrica o prismática, falla en el ensayo de compresión simple.

Se comienza midiendo la altura y el diámetro o lado de la probeta, con una precisión de 0,1 mm mediante un calibrador con nonio o un objeto análogo.

Se pesa la muestra. Se coloca la probeta en la prensa de modo que quede perfectamente centrada. Se acciona el dispositivo de avance lo estrictamente necesario para que la probeta toque a la placa superior de la prensa. Se pone en cero el indicador de deformaciones.

El ensayo podrá hacerse controlando la deformación o controlando la carga.

Para el caso de la deformación controlada, se acciona la prensa de modo que la velocidad de deformación unitaria de la probeta esté comprendida entre $\frac{1}{2}$ % y 2% por minuto. Se toman medidas de las deformaciones y de las cargas cada 30 segundos hasta que las cargas comiencen a disminuir o hasta llegar a una deformación axial del 20% (lo que antes suceda). Se escogerá una velocidad en que la rotura ocurra en un lapso entre 1 y 10 minutos.

Cuando se empleen esfuerzos controlados, se aplicará la carga para que produzca una deformación axial a una tasa de $\frac{1}{2}$ % a 2% por minuto y se registran los esfuerzos y las deformaciones cada 30 segundos.

El equipo cuenta con un anillo que a medida que se aplica la carga, este se deforma y del cual se obtiene una lectura de deformación del anillo, el mismo que cuenta con una ecuación calibrada, que con la deformación del anillo medida y la ecuación se

obtiene la carga aplicada, existen diferentes tipos de anillos que se denomina según la capacidad máxima, en el caso de suelos finos se usa generalmente el anillo de 2000 libras y para suelos más granulares anillos de mayor capacidad como puede ser el anillo de 5000 libras

La tasa de deformación se regula en tal forma que la falla de probetas sin refrenar nunca sobrepase de 10 minutos. La carga debe proseguirse hasta que decrezcan los valores de la carga con el aumento de sección que se produce en la probeta durante la rotura, lo cual se traduce en una disminución del esfuerzo aplicado.

Hacer un esquema de la forma de rotura. Si la rotura se produce a través de un plano inclinado, es conveniente medir el ángulo de inclinación de dicho plano.

Los cálculos a realizar son: la deformación unitaria, la sección transversal promedio de la muestra, el esfuerzo, luego realizar un gráfico que muestre la relación entre el esfuerzo (ordenada) y la deformación unitaria (en las abscisas). Tomar el valor mayor de la carga unitaria o el que corresponda al 20% de deformación, el que ocurra primero entre las dos, e informar como resistencia a la compresión confinada.

3.12.11 Ciclos de Humedecimiento y Secado del Suelo-Cal (VN - E21 – 66).

Las partículas de los agregados deben ser resistentes a cambios mineralógicos y desintegración física a causa de ciclos de humedecimiento y secado impuestos durante la construcción y periodo de diseño del pavimento.

La durabilidad debe ser considerada en el momento de escoger los agregados pétreos. Materiales susceptibles a degradación por agentes climáticos durante la vida útil del pavimento.

En relación con el ensayo de durabilidad, éste es un ensayo para muestras de suelo cemento la cual se adapta para las muestras de suelo-cal puesto que ambos materiales estabilizantes tienen el mismo principio de acción en el suelo, se realizan 12 ciclos de saturación y secado; para un ensayo se requiere dos probetas, un ciclo consiste:

- Retiradas las probetas de la cámara húmeda, al cabo de los 7 días, se las pesa y toman las dimensiones (diámetro y altura) de la N° 1. Es importante que las

mediciones sean tomadas, todas las veces, en lo mismo puntos de cada probeta.

- Se colocan ambas probetas durante 5 horas en el baño de inmersión a la temperatura ambiente, debiendo quedar totalmente sumergidas.
- Se retiran las probetas del baño y se dejan escurrir durante 2 ó 3 minutos. Se pesan y se toman las dimensiones de la N° 1.
- Se colocan ambas probetas durante 42 horas en la estufa a $71 \pm 1^\circ\text{C}$. Al cabo de este período se retiran, se pesan y se toman las dimensiones de la N° 1
- La probeta N° 2 se cepilla, con el cepillo raspador, recubriendo dos veces toda su superficie incluyendo las bases. Se pasará el cepillo en forma tal que su eje longitudinal sea, respectivamente, paralelo al eje longitudinal de la probeta (superficie lateral) y a la superficie de las bases, con una presión de aproximadamente 1,5 Kg.
- Con el pincel se quita el polvo que queda adherido y se pesa la probeta.

Con todo esto queda terminado un ciclo de humedecimiento y secado, finalizado el último ciclo, se colocan las probetas en estufa a $105 - 110^\circ\text{C}$, adonde permanecen hasta obtener peso constante, anotándose los pesos en estado seco.

Para el tema en estudio se preparan varias muestras para que de cada ciclo nos quede una muestra para realizar la prueba de compresión y ver de esta manera el comportamiento de cada ciclo.

CAPÍTULO IV

EVALUACIÓN Y ANÁLISIS

4.1 ESTRATEGIA METODOLÓGICA.

Para realización del estudio del presente tema con las bases marcadas en los capítulos anteriores, se siguió las etapas que a continuación se menciona.

- a) **Obtención de las muestras.-** Como se menciona en el punto 3.2 del capítulo III, las muestras fueron tomadas de la comunidad de Rancho Sud, las características principales de este lugar que a simple vista es una zona semi-árido con predominancia de arcillas amarillas, un suelo relativamente erosionado y escasa vegetación. Las muestras fueron tomadas al pie de un pequeño talud donde al parecer maquinaria pesada realizó una nivelación del terreno con anterioridad, las muestras se extrajeron con pala y pico en bolsas de yute en un aproximado de 200 kg.
- b) **Caracterización de los materiales.-** Todos los ensayos de caracterización de los materiales fueron realizados en laboratorio, siguiendo todo lo establecido en las normas AASHTO y ASTM.
- c) **Ensayos de estudio.-** En cuanto a los ensayos de estudio se realizaron ensayos de compresión inconfiada basada en la normas: AASHTO y ASTM en especímenes o probetas compactadas con suelo sólo en una cantidad de 20 especímenes, y el mismo suelo compactado con cal a una dosificación del 4% en una cantidad de 90 especímenes.
- d) **Análisis y procesamiento de los datos.-** Para el procesamiento de los datos y los respectivos cálculos, todos fueron realizados en gabinete una vez completados los ensayos requeridos, todos los cálculos son operaciones matemáticas establecidas en la norma, hay que remarcar que, para el tema en específico se realizó relaciones matemáticas a partir de los gráficos de los ensayos de compresión inconfiada de los especímenes de suelo-cal.

- e) **Resultados.-** Concluido con el procesamiento de los datos y toda la información recabada del laboratorio se obtienen los resultados de los diferentes ensayos de caracterización y estudio que, se presentan más adelante.

4.2 ANÁLISIS Y DEPURACIÓN DE DATOS.

Los datos obtenidos fueron de dos maneras: Datos en valores para los cálculos matemáticos y los datos de observación para un análisis y comparaciones del comportamiento del suelo, Todos los datos deben ser los necesarios y los que nos indica la norma, en caso de no tener uno o más datos lo más recomendable es repetir el ensayo, también en el caso donde se realiza más de tres ensayos y al no existir relación entre uno de ellos si la variación es considerable lo mejor es depurar el dato y trabajar con los restantes que se relacionan.

4.3 PROCESAMIENTO DE DATOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS OBTENIDOS EN LOS ENSAYOS DE LABORATORIO.

Una vez concluido con el análisis y la depuración de datos se realizó las operaciones matemáticas para obtener los resultados que a continuación se menciona.

4.3.1 Procesamiento de Datos y Análisis de Caracterización.

A continuación se presentan los resultados obtenidos de la caracterización de suelo solo, es decir el suelo sin cal.

4.3.1.1 Suelo solo

a) Contenido de humedad (ASTM D2216).

Se presenta el resultado del contenido de humedad natural del suelo

Cuadro 4.1 Resultados del contenido de humedad del suelo solo

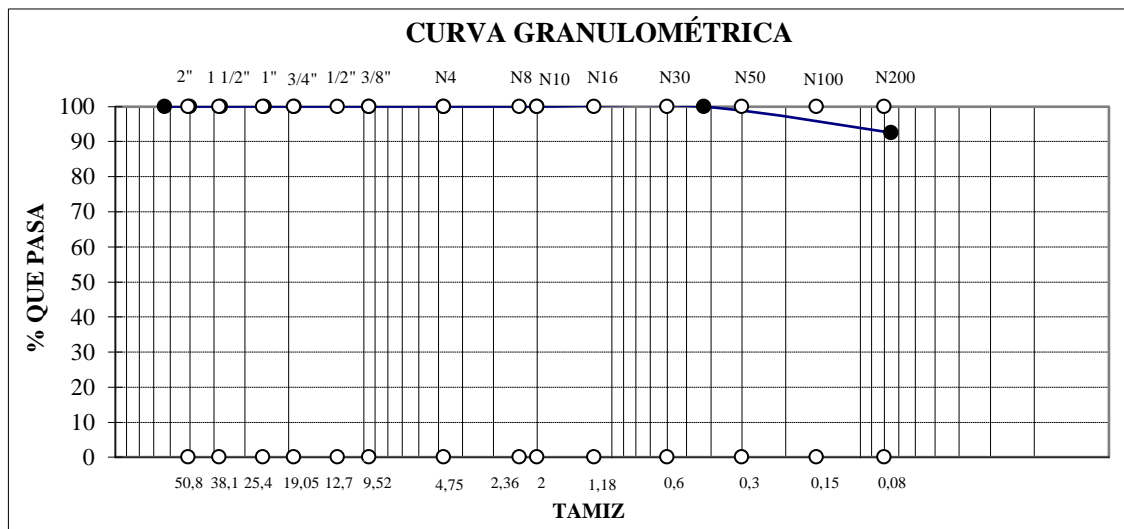
Cápsula No		T1	T2	T3	T4	T5
Porcentaje de humedad	%	3,52	3,56	3,80	3,54	3,61
Prom. Porcentaje de humedad	%	3,61				

Fuente: Elaboración propia

b) Análisis granulométrico por tamizado método de lavado (ASTM D422 AASHTO T88).

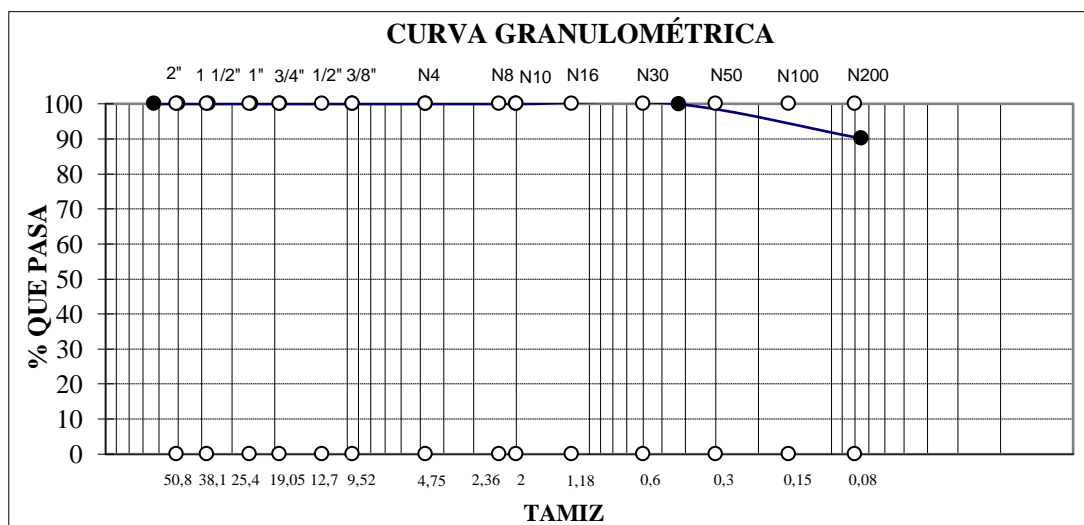
Para determinar la granulometría del suelo por el método del lavado se realizaron tres pruebas, las cuales se presentan a continuación con curvas granulométricas para cada prueba respectivamente.

Figura 4.1 Curva granulométrica suelo solo Método del Lavado Prueba N°1



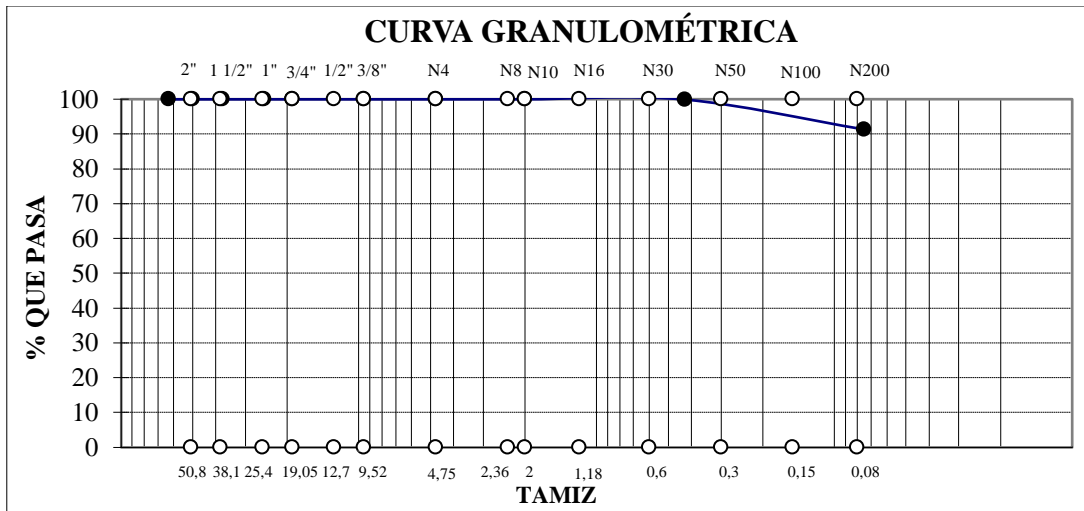
Fuente: Elaboración propia.

Figura 4.2 Curva granulométrica suelo solo Método del Lavado Prueba N°2



Fuente: Elaboración propia.

Figura 4.3 Curva granulométrica suelo solo Método del Lavado Prueba N°3



Fuente: Elaboración propia.

En los diferentes gráficos se observa que un suelo fino donde pasa aproximadamente más del 90% por el Tamiz N° 200 porque se trata de un suelo muy fino con contenido de arcilla lo que requiere un análisis granulométrico por Hidrómetro.

c) Análisis granulométrico por hidrómetro (ASTM D422).

Para la prueba del hidrómetro al igual que el método del lavado se realizaron tres pruebas siendo sus curvas y porcentajes de materiales las siguientes:

Figura 4.4 Curva granulométrica suelo solo por Hidrómetro Prueba N° 1

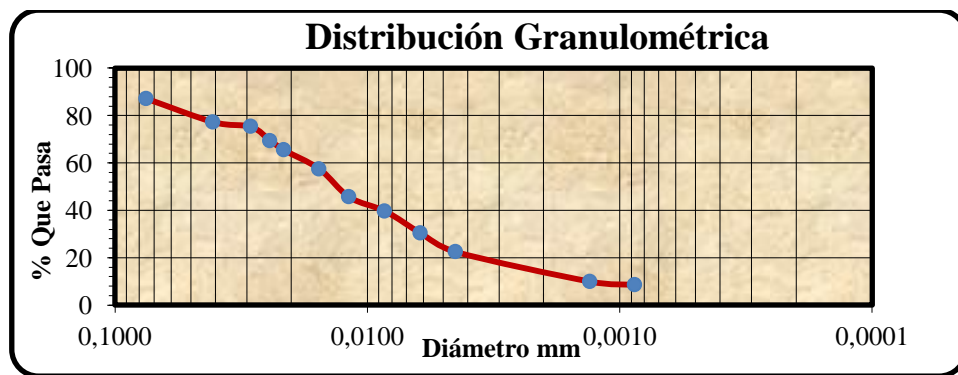
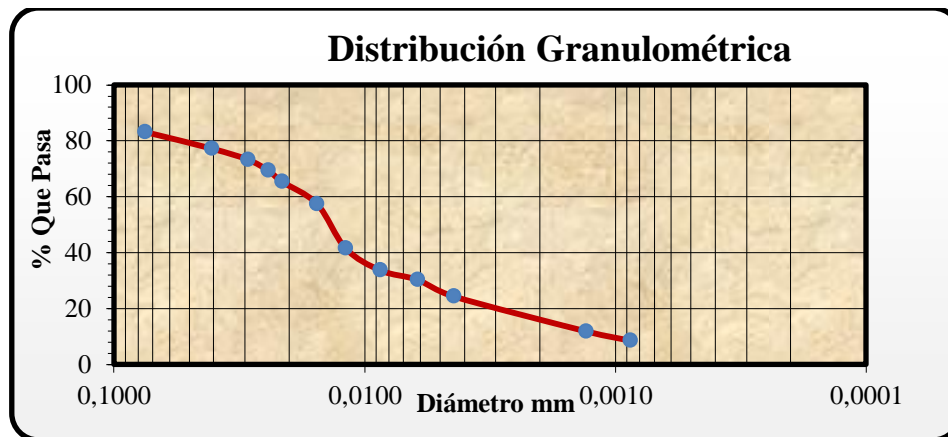


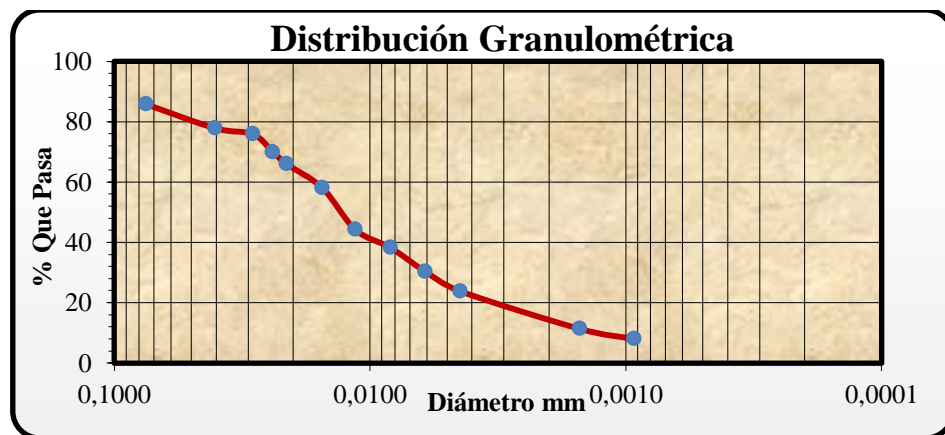
Figura 4.5 Curva granulométrica suelo solo por Hidrómetro Prueba N° 2



% Pasa 200	=	100,00
% Limo Parcial	=	84,63
% Arcilla Parcial	=	15,37

Fuente: Elaboración propia.

Figura 4.6 Curva granulométrica suelo solo por Hidrómetro Prueba N° 3



% Pasa 200	=	100,00
% Limo Parcial	=	86,78
% Arcilla Parcial	=	13,22

Fuente: Elaboración propia.

En los anteriores gráficos y sus respectivos cuadros podemos observar la granulometría del suelo solo, lo que nos indica un suelo con baja presencia de arcilla, lo que hace que su cohesividad sea baja, predominando los limos.

d) Determinación del límite de Atterberg e índice de plasticidad ASTM D4318 AASHTO T90).

Cuadro 4.2 Resultados de los límites de Atterberg del suelo solo

Prueba N°	LÍMITES		
	Límite Líquido (%)	Límite Plástico (%)	Índice de Plasticidad (%)
1	37,27	23,68	13,60
2	35,98	22,59	13,39
3	36,70	23,58	13,12

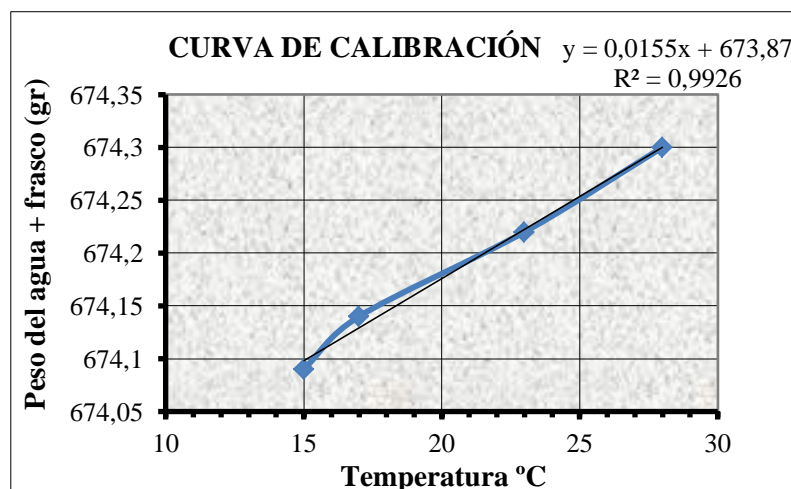
Fuente: Elaboración propia

En este cuadro se observan los resultados de los límites de Atterberg donde se nota que el suelo es un suelo de mediana plasticidad lo que tiene relación con la granulometría, donde el contenido de arcilla es poco por lo que la cohesividad es baja.

e) Determinación del peso específico de los suelos (ASTM D854 AASHTO T100)

Para la determinación del peso específico se realizaron dos pruebas en el mismo frasco.

Figura 4.7 Calibración del frasco peso específico suelo solo



Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 4.3 Resultados del peso específico del suelo solo

PESO ESPECÍFICO	
Prueba N°	Peso específico (g/cm³)
1	2,71
2	2,72
3	2,71

Fuente: Elaboración propia

En cuanto al peso específico está dentro de los valores que nos indica la teoría para las arcillas.

f) Ensayo de compactación (Proctor modificado método “A”) (AASHTO T272)

Para esta prueba realizada con el Proctor T-99 modificado método A, los resultados de la misma son los siguientes:

Cuadro 4.4 Resultados del ensayo de compactación del suelo solo

Prueba N°	PROCTOR T-99 MODIF. MET. A	
	Densidad máxima del suelo seco (gr/cm³)	Humedad Óptima. (%)
1	1,875	13,20
2	1,880	13,00
3	1,892	12,70

Fuente: Elaboración propia

g) Determinación de la relación de soporte del suelo en laboratorio (CBR de laboratorio).

Cuadro 4.5 Resultados de (CBR de laboratorio) del suelo solo

Muestra N°	Humedad Óptima	Peso Unitario	C.B.R.
	(%)	(gr/cm³)	(%)
1	13,00	1,88	4,82
2	13,00	1,88	4,79
3	13,00	1,88	5,12

Fuente: Elaboración propia

h) Determinación del PH del suelo

El Ph del suelo fue determinado en un laboratorio químico dando como resultado un valor de Ph igual de 10,25 siendo un suelo muy alcalino según la clasificación de suelos por su PH esto por los componentes minerales que contiene el suelo, mientras mayor es su alcalinidad requiere mayores porcentajes de cal.

i) Clasificación del suelo solo

Según la clasificación Unificada (SUCS) es un suelo CL, en la AASTHO corresponde a un suelo A-6(15). Arcillas inorgánicas de baja compresibilidad.



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA JUAN MISAEL SARACHO
FACULTAD DE CIENCIAS Y TECNOLOGÍA
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL
LABORATORIO DE SUELOS Y TECNOLOGÍA DEL HORMIGÓN

RESUMEN DE LA CARACTERIZACIÓN DEL SUELO SOLO

4.3.1.2 Resumen de ensayos de caracterización del suelo solo

Cuadro 4.6 Resumen de la caracterización del suelo solo

MUESTRA	CONT. HUM.	GRANULOMETRÍA				LÍMITES			CLASIFICACIÓN		
		%Pasa No 4	% Pasa No 10	% Pasa No 40	% Pasa No 200	LL	LP	IP	SUCS	AASTHO	IG
1	3,54	100,00	100,00	99,93	92,53	37,27	23,68	13,60	CL	A-6	15,00
2	3,56	100,00	100,00	99,92	90,15	35,98	22,59	13,39	CL	A-6	15,00
3	3,52	100,00	100,00	99,92	91,34	36,70	23,58	13,12	CL	A-6	15,00

MUESTRA	PESO ESP.	HIDROM.	PROCTOR T-99 MODIF. MET. A		C.B.R.
No	(g/cm ³)	Arcilla parcial (%)	Dens. Max. (gr/cm ³)	H. OP. (%)	(%)
1	2,71	11,34	1,875	13,20	4,82
2	2,72	15,37	1,880	13,00	4,79
3	2,71	13,22	1,892	12,70	5,12

Fuente: Elaboración propia

4.3.1.3 Suelo-cal

a) Contenido de humedad (ASTM D2216) suelo-cal.

Resultados del contenido de humedad de la mezcla suelo-cal.

Cuadro 4.7 Resultados del contenido de humedad del suelo-cal

Cápsula No		A1	A2	A3
Porcentaje de humedad	%	3,04	3,55	3,02

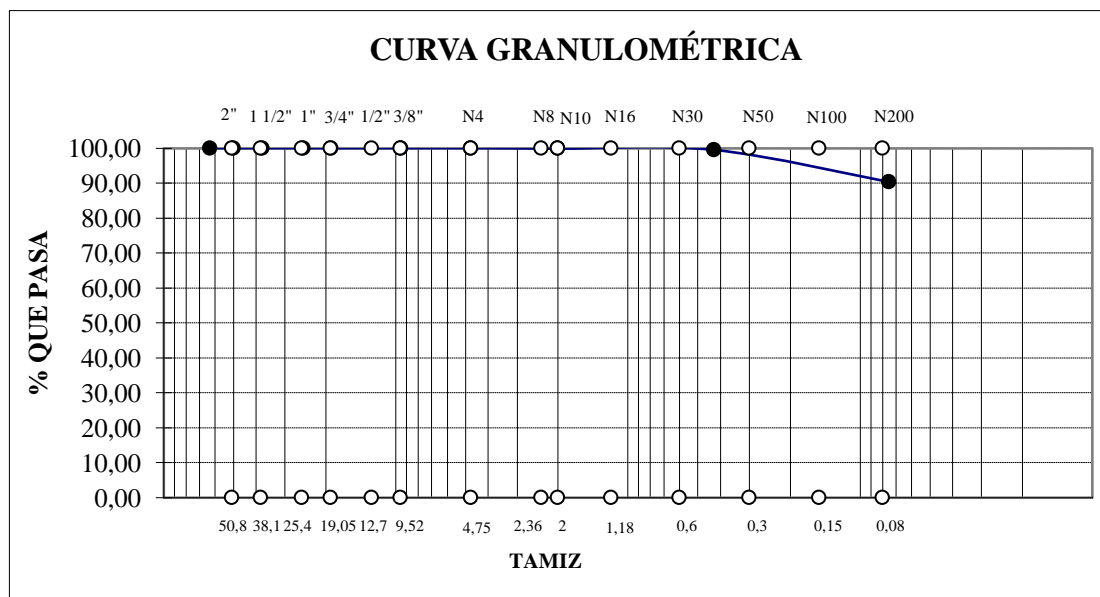
Fuente: Elaboración propia

El contenido de humedad es aparentemente bajo esto es debido a que al momento de extracción de las muestras el suelo tenía una apariencia seca y no se lo protegió para que no perdiera humedad debido a que no necesitamos la humedad natural insitu.

b) Análisis granulométrico por tamizado Método de Lavado (ASTM D422 AASHTO T88).

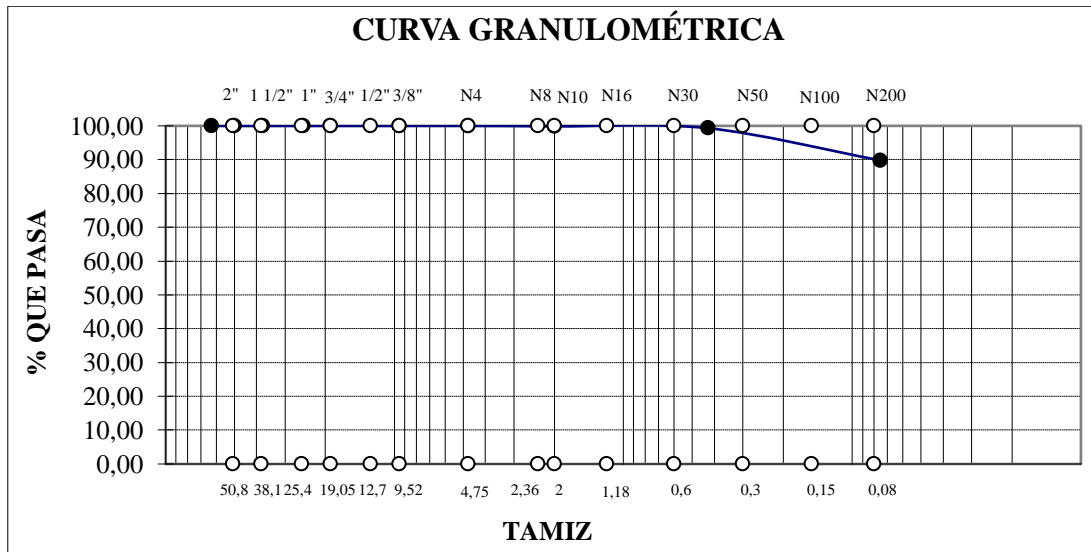
A continuación se muestra las gráficas de la distribución granulométrica del suelo-cal realizado por tamizado.

Figura 4.8 Curva granulométrica suelo-cal Método del Lavado Prueba N° 1



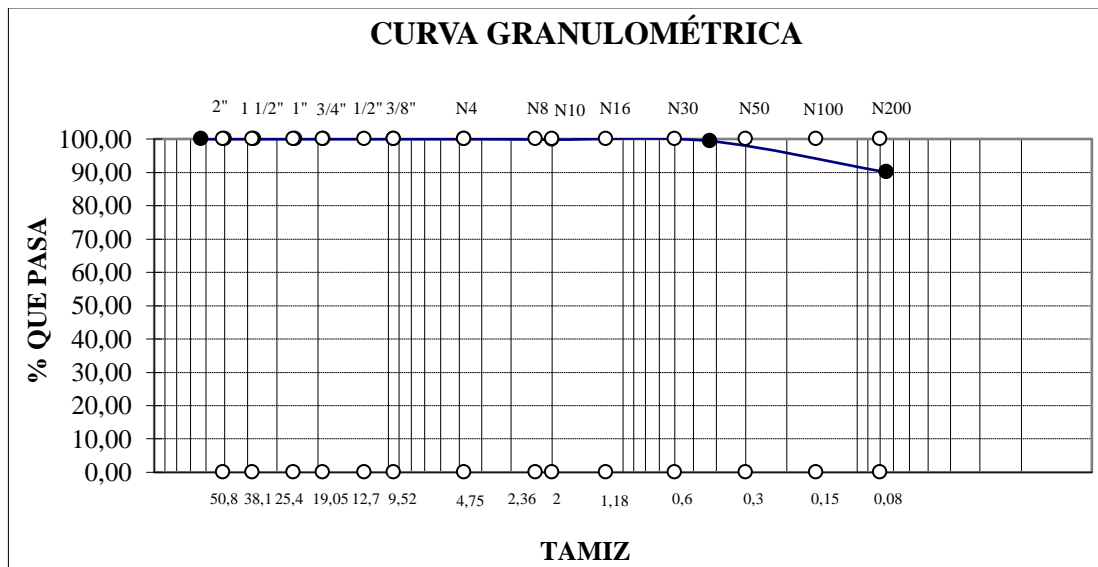
Fuente: Elaboración propia.

Figura 4.9 Curva granulométrica suelo-cal Método del Lavado Prueba N° 2



Fuente: Elaboración propia.

Figura 4.10 Curva granulométrica suelo-cal Método del Lavado Prueba N° 3



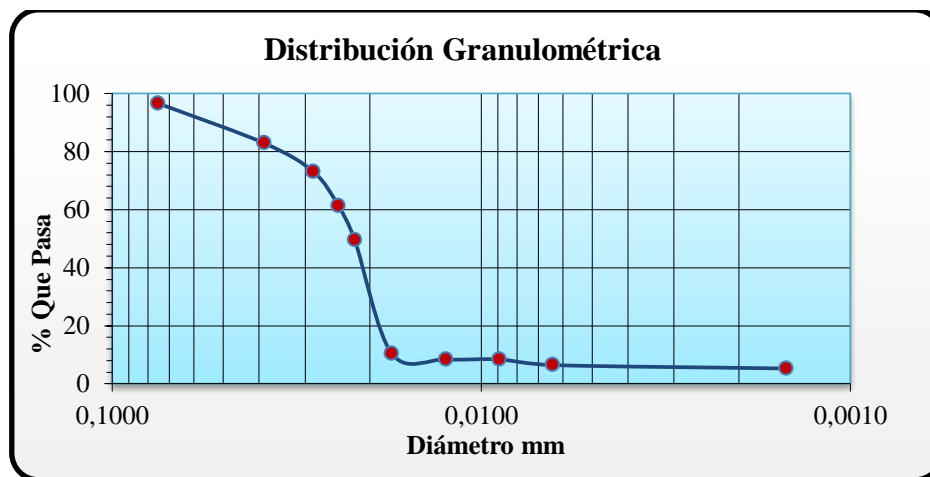
Fuente: Elaboración propia.

Algo similar que en el suelo solo, la granulometría por tamizado nos muestra que es similar con un alto contenido de finos posiblemente limos y arcilla, lo cual requiere un análisis por hidrómetro para establecer el determinado contenido de arcilla.

c) **Análisis granulométrico por Hidrómetro (ASTM D422) del Suelo-Cal.**

Para la realización de la prueba de granulometría por el método del hidrómetro se realizaron tres pruebas que a continuación se detallan.

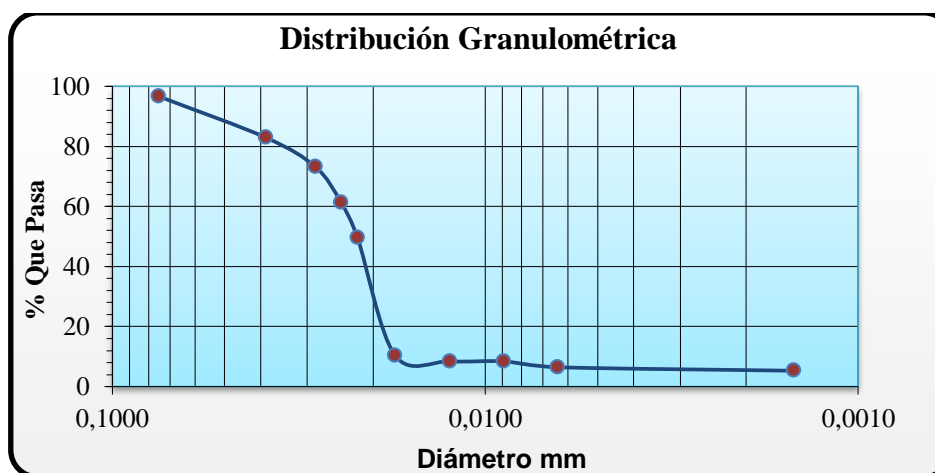
Figura 4.11 Curva granulométrica suelo-cal por Hidrómetro Prueba N° 1



% Pasa 200	=	100,00
% Limo Parcial	=	94,47
% Arcilla Parcial	=	5,53

Fuente: Elaboración propia.

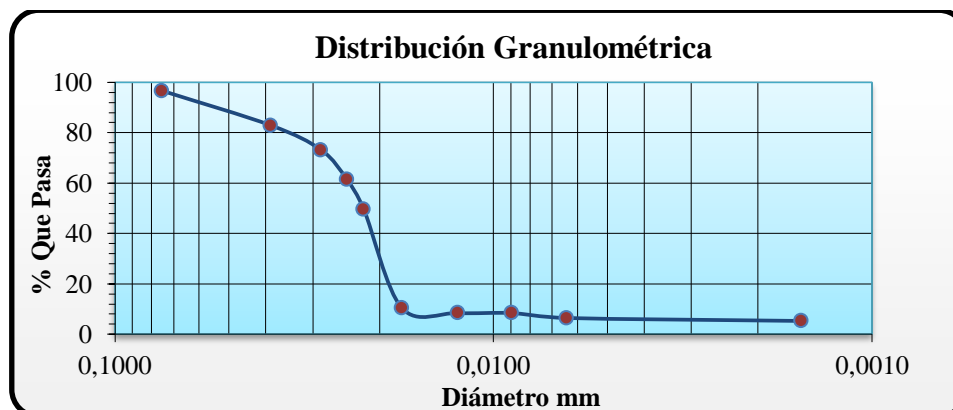
Figura 4.12 Curva granulométrica suelo-cal por Hidrómetro Prueba N° 2



% Pasa 200	=	100,00
% Limo Parcial	=	94,07
% Arcilla Parcial	=	5,93

Fuente: Elaboración propia.

Figura 4.13 Curva granulométrica suelo-cal por Hidrómetro Prueba N° 3



% Pasa 200	=	100,00
% Limo Parcial	=	94,15
% Arcilla Parcial	=	5,85

Fuente: Elaboración propia.

Puede notarse una notable reducción del porcentaje de arcilla al añadirle la cal al suelo, evidenciando que la cal modifica la granulometría del suelo en especial del contenido de arcilla.

c) Determinación del límite de Atterberg e índice de plasticidad ASTM D4318 AASHTO T90) del suelo-cal.

Cuadro 4.8 Resultados del límite de Atterberg del suelo-cal

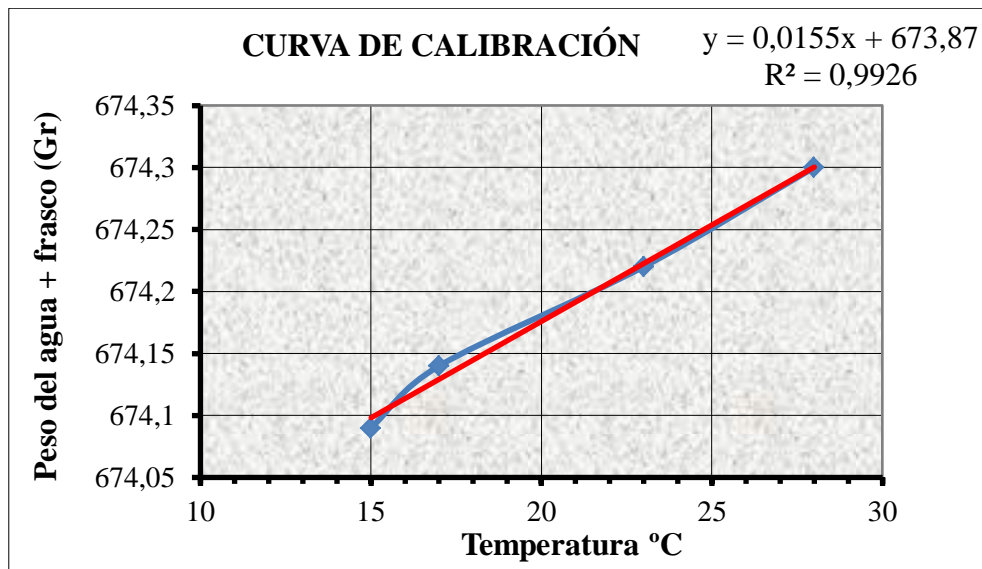
Prueba N°	LIMITES		
	Límite Líquido (%)	Límite Plástico (%)	Índice de Plasticidad (%)
1	28,22	16,24	11,98
2	27,72	16,57	11,14
3	28,60	16,53	12,07

Fuente: Elaboración propia

f) Determinación del peso específico del suelo-cal (ASTM D854 AASHTO T100)

Para la determinación del peso específico se realizó dos pruebas en el mismo frasco que se realizó para el suelo solo por lo que se usa la misma calibración de este frasco usado anteriormente.

Figura 4.14 Calibración del Frasco Peso Específico Suelo-Cal



Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 4.9 Resultados del Peso Específico del Suelo-Cal

PESO ESPECIFICO	
Prueba N°	Peso específico (g/cm ³)
1	2,77
2	2,79

Fuente: Elaboración propia

g) **Ensayo de compactación del suelo-cal (Proctor modificado método "A") (AASHTO T272)**

Cuadro 4.10 Resumen de la compactación del suelo-cal

Prueba N°	PROCTOR T-99 MODIFICADO. MÉTODO "A"	
	Densidad máxima del suelo seco (gr/cm ³)	Humedad Óptima. (%)
1	1,776	14,00
2	1,767	14,50
3	1,773	14,80

Fuente: Elaboración propia

h) Determinación de la relación de soporte del suelo-cal en laboratorio (CBR de laboratorio).

Cuadro 4.11 Resultados de la relación de soporte del suelo-cal en laboratorio (CBR de laboratorio) del suelo-cal

Muestra	Humedad Optima	Peso Unitario	C.B.R.
Nº	(%)	(gr/cm3)	(%)
1	14,5	1,77	21,93
2	14,5	1,77	17,87
3	14,5	1,77	19,81

Fuente: Elaboración propia

En cuanto al C.B.R. se nota un considerable aumento a comparación del suelo sin cal, eso es la función de la cal aumentar la resistencia del suelo.

j) Determinación del ph del suelo-cal

El Ph del suelo-cal con una dosificación del 4% con relación al peso del suelo seco, fue determinado en un laboratorio químico, dando como resultado un valor de Ph igual de 13,50 se nota un aumento en la acidez del suelo que era de 10,25.

k) Clasificación del suelo-cal.

Según la clasificación Unificada (SUCS) es un suelo CL, en la AASTHO corresponde a un suelo A-6(15). Arcillas inorgánicas de baja compresibilidad.



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA JUAN MISAEL SARACHO
FACULTAD DE CIENCIAS Y TECNOLOGÍA
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL
LABORATORIO DE SUELOS Y TECNOLOGÍA DEL HORMIGÓN

RESUMEN DE LA CARACTERIZACIÓN DEL SUELO CAL

4.3.1.4 Resumen de ensayos de caracterización del suelo-cal

Cuadro 4.12 Resumen de la caracterización del suelo-cal

MUESTRA No	CONT. HUM. %	GRANULOMETRÍA				LÍMITES			CLASIFICACIÓN		
		% Pasa No 4	% Pasa No 10	% Pasa No 40	% Pasa No 200	LL	LP	IP	SUCS	AASHTO	IG
1	3,20	100,00	99,87	99,50	90,32	28,22	16,24	11,98	CL	A-6	15
2	3,55	100,00	99,87	99,31	89,78	27,72	16,57	11,14	CL	A-6	15
3	3,04	100,00	99,88	99,42	90,07	28,60	16,53	12,07	CL	A-6	15

MUESTRA No	PESO ESP. (g/cm ³)	HIDROM. Arcilla parcial (%)	PROCTOR T-99 MODIF. MET. A		C.B.R. (%)	PH
			Dens. Max. (gr/cm ³)	H. OP. (%)		
1	2,77	5,51	1,776	14,00	21,93	13,5
2	2,79	5,87	1,767	14,50	17,87	
3		5,85	1,773	14,80	19,81	

Fuente: Elaboración propia

4.3.1.5 Estudios químicos.

ESMOA : ESTUDIO SUELOS Y MONITOREO DE AGUAS

Avda. Guillermo Beltran N° 3102 Telf.6649215-Tarija

Cliente: Nelvi Aleman Ramirez
 Nombre del Proyecto: "Determinación de la evolución de las propiedades mecánicas de un suelo después de ser estabilizado con cal y la influencia del tiempo de curado"
 Procedencia de la muestra: Localidad : Tarija
 Fecha de muestreo : 14 de Marzo 2015
 Responsable: Nelvi Aleman Ramirez
 Fecha de recepción de la muestra 1 (M1) : 15/03/2015
 Fecha de recepción de la muestra 2 (M2): 15/03/2015
 Fecha de recepción de la muestra 3 (M3): 15/03/2015
 Fecha de ejecución del ensayo 1, 2 y 3 : Del 15/03/2015 al 19/03/2015
 Caracterización de la muestra : M1.- Cal
 M2.- Suelo arcilloso
 M3.- Suelo arcilloso modificado con cal

Tarija 20 de Marzo 2015

Msc. Ing. Myrian A. Barrero O.

Jefe - Analista



4.3.1.6 Resultados de los estudios químicos.

Cuadro 4.13 Resultados de los estudios químicos.

Resultados de los ensayos

Nº	TIPO DE ANALISIS	UNIDAD	VALORES GUIAS	RESULTADOS
	ANALISIS M1: CAL			M1
	Perdida carbonatos por calor	%		27.8
	Residuo insoluble	%		99.5
	Óxidos solubles calcio y magnesio	%		0.50
	Pureza: Titulación ácido/base	%		5.85
	ANALISIS FISICOS			
1	TEMPERATURA	°C		21.5
2	pH			>14
	ANALISIS M2: SUELO ARCILLOSO			M2
1	TEMPERATURA	°C		25
2	pH			10.254
	ANALISIS M3: SUELO ARCILLOSO MODIFICADO CON CAL			M3
1	TEMPERATURA	°C		29
2	pH			13.50
	OBSERVACION M1			
	El % de pérdida de carbonatos por calcinación es un indicador de que la muestra de cal presenta carbonatos de calcio y magnesio sin transformar o calcinar y que serán incorporados en su aplicación al suelo arcilloso			
	OBSERVACION M2-M3			
	La diferencia de temperatura demuestra la presencia de cal activa en el suelo modificado			
	La diferencia de pH entre las muestras M3 y M2 es de 2.98 unidades			


 Mirian A. Barrero Ortega
 INGENIERO QUIMICO
 R. N. I. 7290
 SOCIEDAD DE INGENIEROS DE BOLIVIA
M. Barrero

4.3.1.7 Cal

a) Determinación del PH de la cal.

Para la determinación del PH de la cal por ser un ensayo químico y además de otros ensayos de las cal que son necesarios conocer, se mandó a analizar a un laboratorio químico una muestra de las cal utilizada, dando como resultado un PH mayor a 14, lo que no se tiene el valor exacto porque según el análisis químico realizado, sólo se puede establecer valores de PH menores a 14.

b) Pureza de la cal

Del análisis químico de la cal de procedencia del puente, realizado en un laboratorio químico se puede notar que la cal utilizada, es una cal relativamente baja en pureza puesto que existen minerales que no se calcinaron completamente en un aproximado de 27%, disminuyendo la pureza, esto puede deberse según la información de los comerciantes y algunos productores de la ciudad de Tarija que no existe un control de calidad y todo el proceso de obtención de la cal se realiza de forma artesanal en las canteras.

4.3.2 Procesamiento de Datos y Análisis de Estudio.

Como las variables principales de estudio son concretamente las propiedades mecánicas del suelo por lo cual los ensayos necesarios de laboratorio son: la prueba de compresión simple inconfiada, y el ensayo de compactación (Proctor modificado método "A") (AASHTO T272), los resultados de los cuales se analizarán a continuación.

4.3.2.1 Compresión inconfiada en muestras de suelo solo (ASTM D2126 AASHTO T208)

La prueba de compresión inconfiada del suelo se realizó inmediatamente después de terminar de moldear las muestras o probetas, para que no perdiera su humedad de compactación, se las protegió cubriéndolas con bolsas de nylon a cada muestra, mientras se terminaba la elaboración de las demás.

En la siguiente tabla se muestra el resultado de los esfuerzos máximos, la deformación y el tiempo de deformación de 20 especímenes o probetas que se sometieron a la prueba compresión inconfiada de suelos.

Cuadro 4.14 Resultados los máximos de la compresión inconfiada del suelo solo

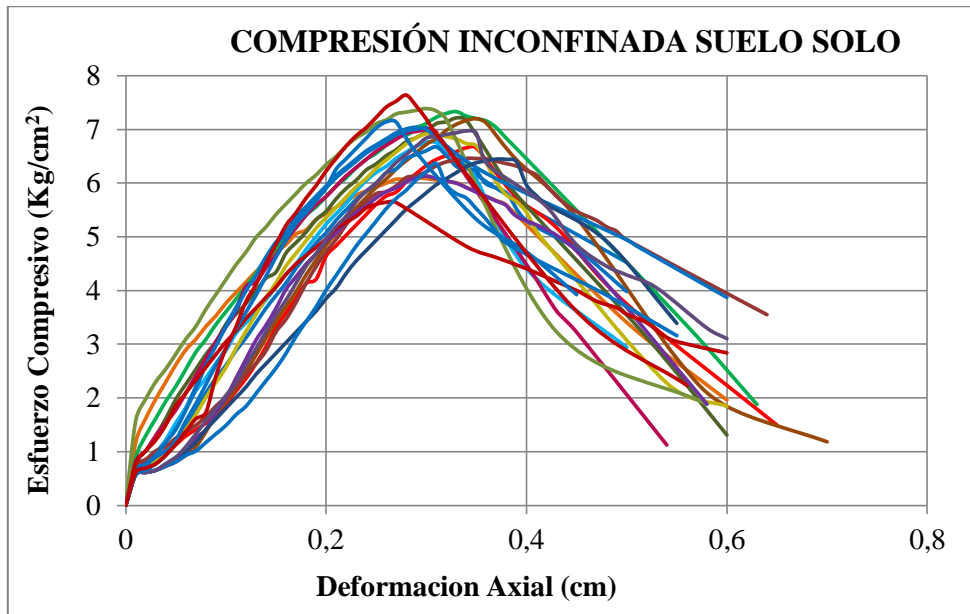
En la siguiente tabla se presenta los resultados del esfuerzo máximo y su respectiva deformación de cada una de las muestras falladas a compresión simple, 20 muestras de suelo solo, las planillas completas del ensayo se encuentra en el Anexo 4.

Nº De probeta	Deformación de la muestra ΔL (cm)	Esfuerzo Aplicado σ (Kg/cm ²)	Tiempo de deformación t (min)	Módulo de Elasticidad $\sigma/(\Delta L/L_0)$ E (Kg/cm ²)
1	0,29	6,102	5,538	252,507
2	0,29	7,043	4,85	286,559
3	0,35	6,652	6,265	222,379
4	0,33	7,331	5,853	262,149
5	0,33	7,214	5,485	257,949
6	0,3	6,76	4,458	263,647
7	0,35	7,199	6,098	240,665
8	0,31	6,676	5,748	251,958
9	0,3	6,996	5,047	272,829
10	0,3	6,917	5,34	269,768
11	0,34	6,463	5,877	222,393
12	0,3	7,388	4,713	288,134
13	0,29	7,003	4,942	284,961
14	0,3	6,132	4,768	239,159
15	0,38	6,442	5,808	200,034
16	0,26	5,643	4,127	256,102
17	0,31	6,364	4,835	242,228
18	0,34	6,971	5,405	239,887
19	0,26	7,14	4,675	324,032
20	0,28	7,638	5,095	321,907
PROMEDIO	0,31	6,804	5,246	259,962

Fuente: Elaboración propia

Las filas (Nº 16 y 20) que se marcaron porque se depuraron esos datos por alejarse demasiado de las demás gráficas que presentan una cierta tendencia hacia una faja central.

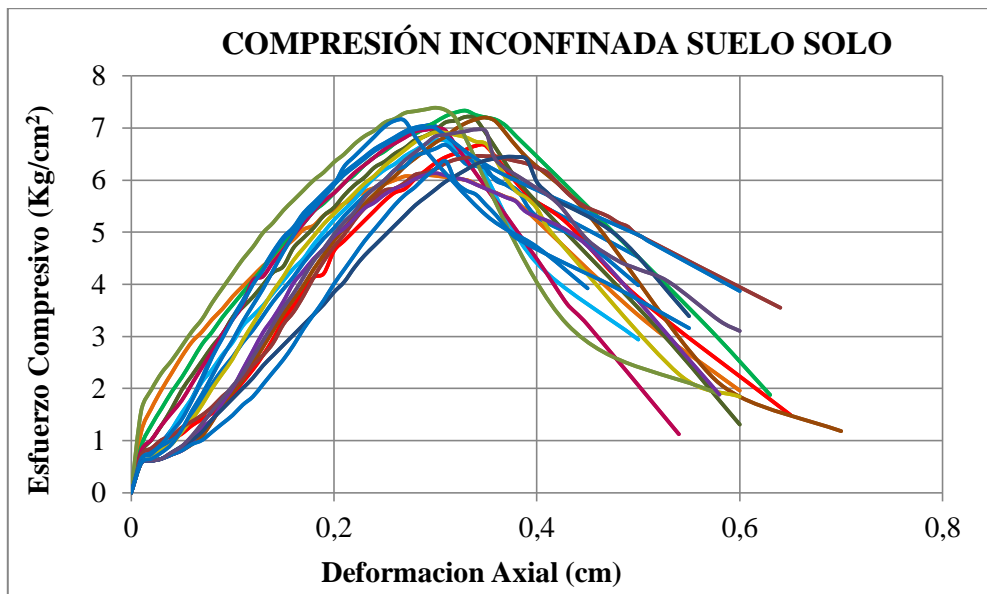
Figura 4.15 Gráficos de la prueba de compresión del suelo solo todos los datos



Fuente: Elaboración propia

Luego de una depuración de datos que se alejan de la tendencia de los demás datos tenemos la siguiente gráfica, los datos que depuraron son los de las probetas 16 y 20 de la anterior tabla.

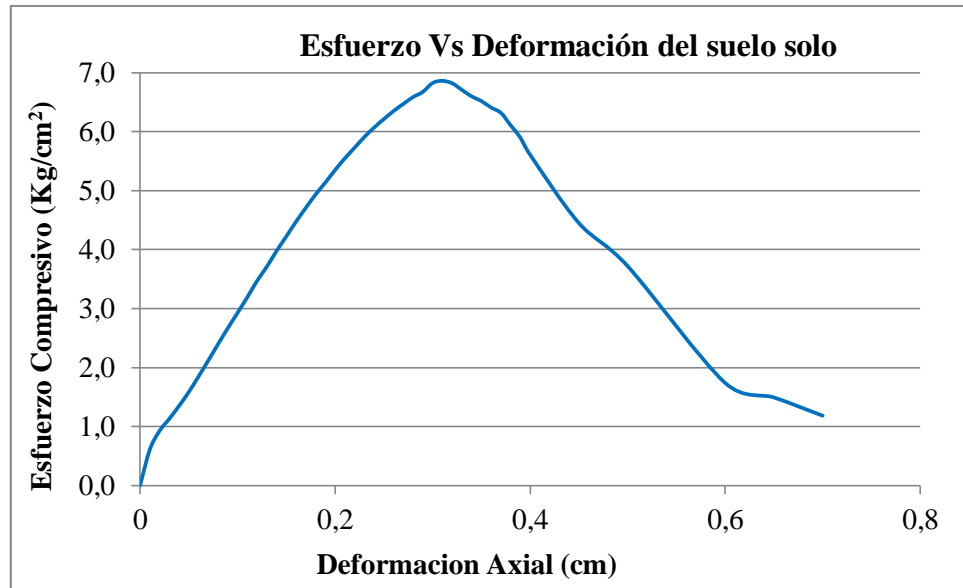
Figura 4.16 Gráficos de compresión del suelo solo con datos depurados



Fuente: Elaboración propia

Luego de depurar, obtenemos un gráfico representativo de todas las muestras.

Figura 4.17 Gráfico representativo esfuerzo deformación del suelo solo



Fuente: Elaboración propia

Observando el gráfico podemos observar un primer tramo donde tiene una tendencia relativamente lineal es la zona elástica, en este tramo si se retirara la carga la muestra teóricamente debería volver a su estado natural. Pasando este tramo nos encontramos con un tramo elastoplástica, donde ya no es lineal en este tramo es antes de llegar a la falla, si se retirara la carga el suelo ya queda con algunos cambios y no teóricamente no vuelve a su estado inicial, luego nos encontramos con el punto máximo donde la muestra de suelo falla y a partir de éste está la zona plástica donde la muestra está destruida.

El esfuerzo máximo admisible promedio y su deformación hasta llegar a la falla del suelo solo se muestra en el siguiente cuadro:

Cuadro 4.15 Esfuerzo máximo admisible y deformación del suelo solo

Esfuerzo máximo Admisible σ (Kg/cm²)	Deformación hasta la falla ΔL (cm)
6,804	0,31

Fuente: Elaboración propia.

4.3.2.2 Gráficos esfuerzo, deformación y tiempo de la prueba de compresión inconfiada del suelo solo.

También se presenta los resultados del control del tiempo a una misma velocidad constante para todas las muestras, controlado en la prueba de compresión inconfiada del suelo solo de dos probetas representativas, el tiempo se controló para todas las muestras.

Figura 4.18 Esfuerzo-deformación y esfuerzo-tiempo de deformación suelo solo.

Figura 4.18 a)

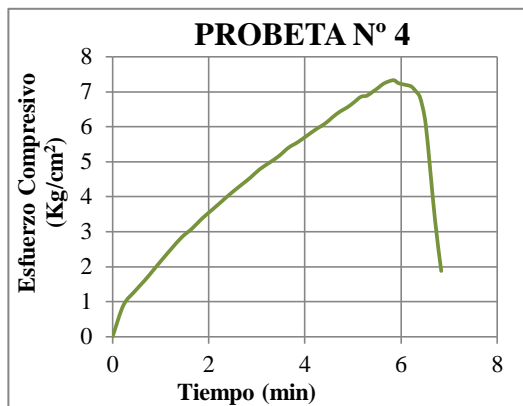
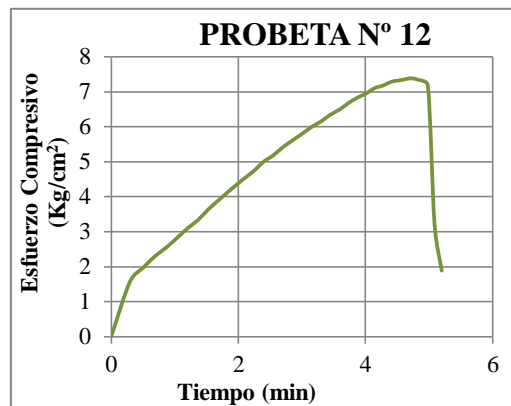


Figura 4.18 b)



Fuente: Elaboración propia.

Figura 4.18 c)

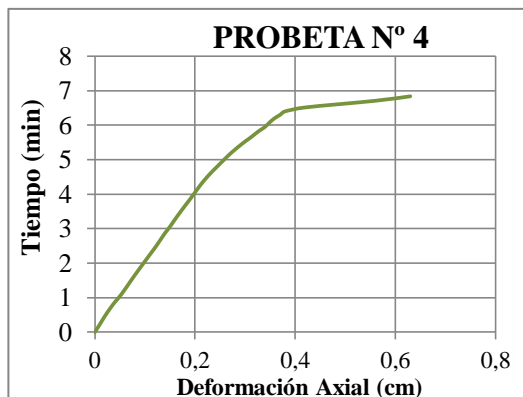
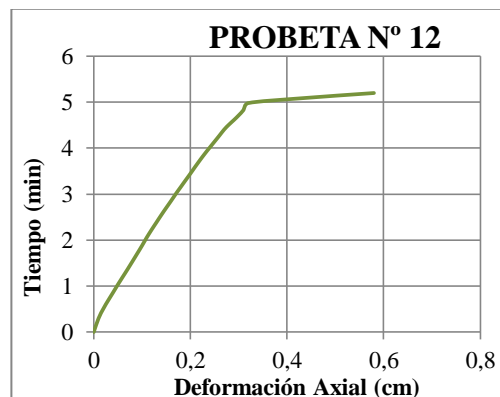


Figura 4.18 d)



Fuente: Elaboración propia.

Se puede notar de forma clara al inicio una tendencia lineal del tiempo, esto se da antes de la falla en la zona elástica del suelo para después tener un cambio, ya en la zona elastoplástica donde ya comienzan a aparecer las fisuras para llegar a la falla.

Figura 4.18 e)

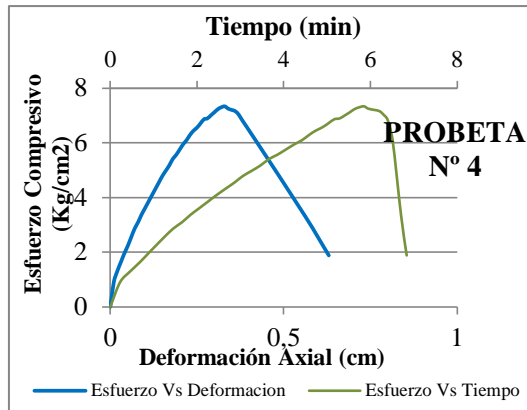
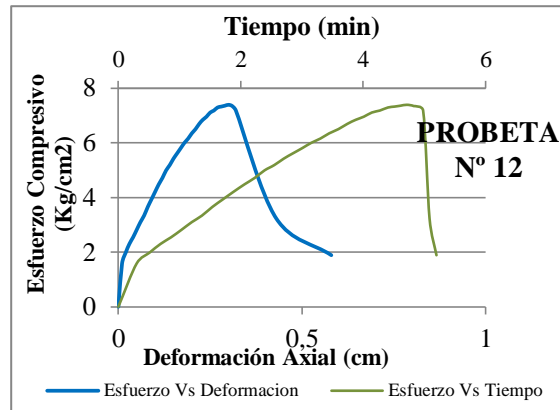


Figura 4.18 f)



Fuente: Elaboración propia.

Sobreponiendo las curvas esfuerzo deformación y esfuerzo tiempo se puede notar una curva similar proyectada como un reflejo, esto por la escala pero se nota que ambas curvas tienen un comportamiento similar.

4.3.2.3 Compresión inconfiada en muestras de suelo-cal a diferentes edades de curado (ASTM D2126 AASHTO T208)

La prueba de compresión inconfiada de suelo-cal se la realizó a diferentes días de curado entre 0, 7, 15, 30 y 50, con un estudio más profundizado a los 7 días, debido a que las normas de estabilización recomiendan a esta edad debido a que es la más representativa a una estabilización insitu ya que a esta edad el suelo con cal ya debería alcanzar una resistencia aceptable para la circulación de los vehículos, y también a esta edad la cal ya tiene una muy buena reacción química con el suelo, para esta prueba es necesario cuidar de la pérdida de agua por evaporación de las probetas moldeadas para esto se utilizaron bolsas de nylon para cubrir cada una de las probetas (1 bolsita por probeta) y se las dejó un tiempo de curado entre 0 a 50 días, debido a que no se cuenta con una cámara de humedad para el curado, las muestras se

guardaron en una conservadora en cuenta de la cámara de humedad, como se muestra en la imagen:



En las siguientes tablas se muestran los resultados de los esfuerzos máximos, la deformación y el tiempo de deformación de las probetas de suelo-cal dosificado al 4% que se sometieron a la prueba compresión inconfiada.

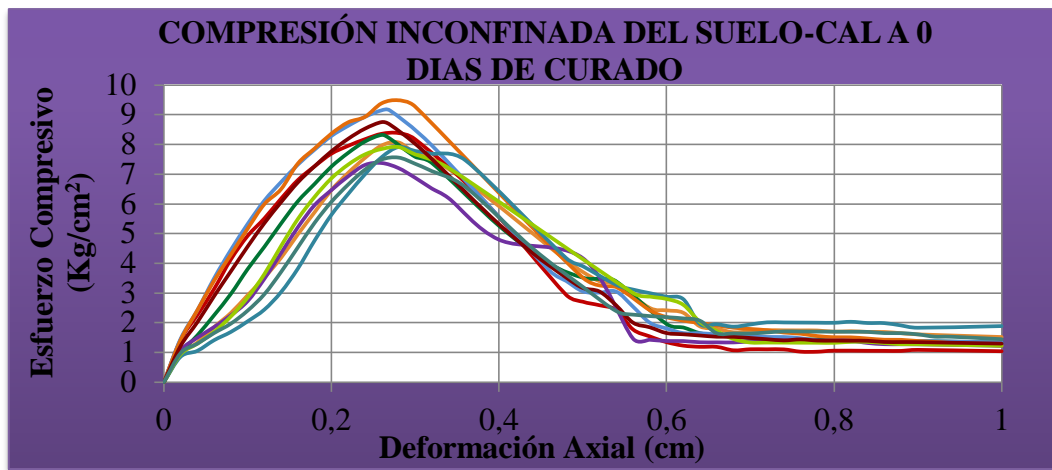
4.3.2.4 Compresión inconfiada en muestras de suelo-cal con 0 días de curado

Cuadro 4.16 Resultados de los máximos de la compresión inconfiada del suelo-cal a 0 días de curado.

Nº De probeta	Deformación de la muestra ΔL (cm)	Esfuerzo Aplicado σ (Kg/cm ²)	Tiempo de deformación t (min)	Módulo de Elasticidad $\sigma/(\Delta L/L_0)$ E (Kg/cm ²)
1	0,280	8,383	4,900	349,40
2	0,260	8,320	4,570	374,39
3	0,260	9,149	4,902	415,92
4	0,280	9,487	5,200	399,79
5	0,260	7,375	4,332	332,73
6	0,280	7,912	4,665	330,61
7	0,280	7,913	4,665	331,77
8	0,260	8,752	4,638	392,50
9	0,280	7,559	5,110	316,93
10	0,280	8,069	4,852	337,18
PROM=	0,272	8,292	4,783	358,123

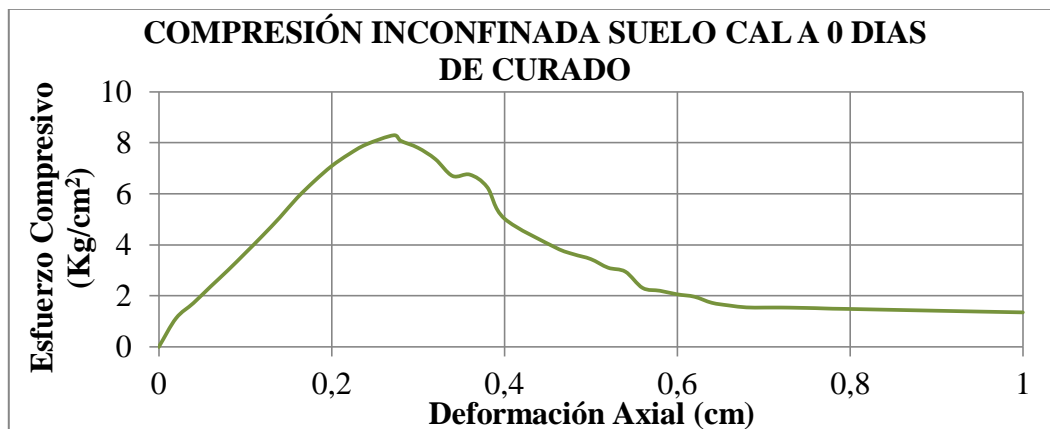
Fuente: Elaboración propia.

Figura 4.19 Gráficos de la prueba de compresión del suelo cal a 0 días de curado con todos los datos



Fuente: Elaboración propia.

Figura 4.20 Gráfico representativo de la prueba de compresión del suelo cal a 0 días de curado



Fuente: Elaboración propia.

En el anterior cuadro y figuras son los resultados de las muestras elaboradas de suelo con cal con una dosificación del 4% con una edad de curado de 0 días es decir sin curado apenas después de moldeadas las muestras se realizó la prueba de compresión simple, también hay una ligera tendencia a recuperarse del esfuerzo después de la falla, pero es muy pequeña.

El esfuerzo máximo admisible promedio y su deformación hasta llegar a la falla del suelo cal a una edad de 0 días de curado se muestra en el siguiente cuadro:

Cuadro 4.17 Esfuerzo máximo admisible y deformación del suelo-cal a 0 días de curado.

Esfuerzo máximo Admisible σ (Kg/cm²)	Deformación hasta la falla ΔL (cm)
8,292	0,272

Fuente: Elaboración propia

Es claramente notorio el aumento de la resistencia a compresión y disminución de la deformación a comparación del suelo sólo con solo añadirle la cal sin ninguna edad de curado.

4.3.2.5 Compresión inconfiada en muestras de suelo-cal con 7 días de curado

Cuadro 4.18 Resultados de los máximos de la compresión inconfiada del suelo-cal a 7 días de curado.

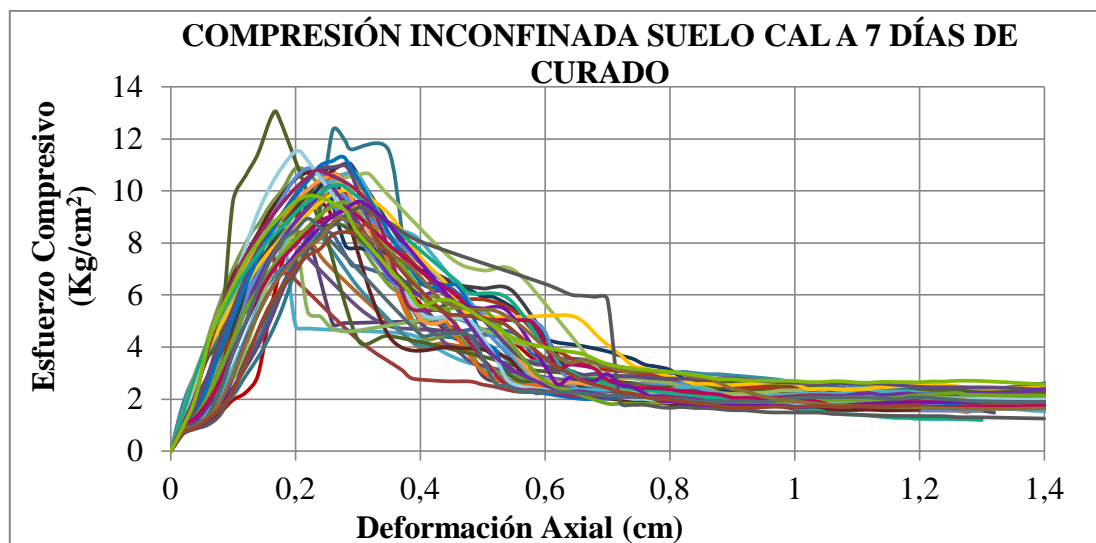
Nº De probeta	Deformación de la muestra ΔL (cm)	Esfuerzo Aplicado σ (Kg/cm²)	Tiempo de deformación t (min)	Módulo de Elasticidad $\sigma/(\Delta L/L_0)$ E (Kg/cm²)
1	0,220	9,811	4,743	521,767
2	0,180	8,339	3,705	545,751
3	0,220	8,325	4,467	446,138
4	0,260	12,338	4,822	557,572
5	0,220	8,364	4,822	447,487
6	0,240	8,375	4,328	410,357
7	0,160	8,274	3,933	610,227
8	0,200	10,858	4,182	638,470
9	0,180	8,775	3,938	571,331
10	0,240	8,256	3,838	403,855
11	0,280	10,624	5,210	442,790
12	0,280	10,585	4,658	442,314
13	0,270	9,928	5,080	434,628
14	0,230	9,962	4,940	511,099
15	0,250	10,298	4,855	483,198
16	0,280	11,057	5,355	462,026
17	0,250	9,747	4,922	457,704
18	0,260	10,800	5,567	484,333
19	0,170	13,030	4,203	899,811
20	0,280	9,956	4,927	416,031
21	0,220	10,878	4,962	578,512

22	0,170	8,861	3,617	609,878
23	0,280	10,663	5,005	444,428
24	0,310	10,676	5,625	403,960
25	0,260	10,643	5,068	478,944
26	0,280	10,035	4,945	419,316
27	0,280	10,977	5,583	456,732
28	0,280	11,256	5,610	474,357
29	0,200	11,530	5,015	674,526
30	0,240	10,131	4,737	493,898
31	0,240	10,780	5,222	525,533
32	0,260	10,210	4,928	459,451
33	0,280	9,563	4,695	399,604
34	0,280	9,248	5,030	385,447
35	0,300	9,351	5,033	365,618
36	0,300	9,585	5,025	372,201
37	0,220	8,941	4,413	473,874
38	0,270	8,980	5,155	387,489
39	0,310	8,714	5,467	328,042
40	0,220	9,810	4,777	518,586
PROM=	0,246	9,777	4,781	475,326

Fuente: Elaboración propia.

Las filas (Nº 4, 7, 15, 16, 19, 23, 24 y 35) que se marcaron y se depuraron esos datos por alejarse demasiado de una cierta tendencia hacia una faja central.

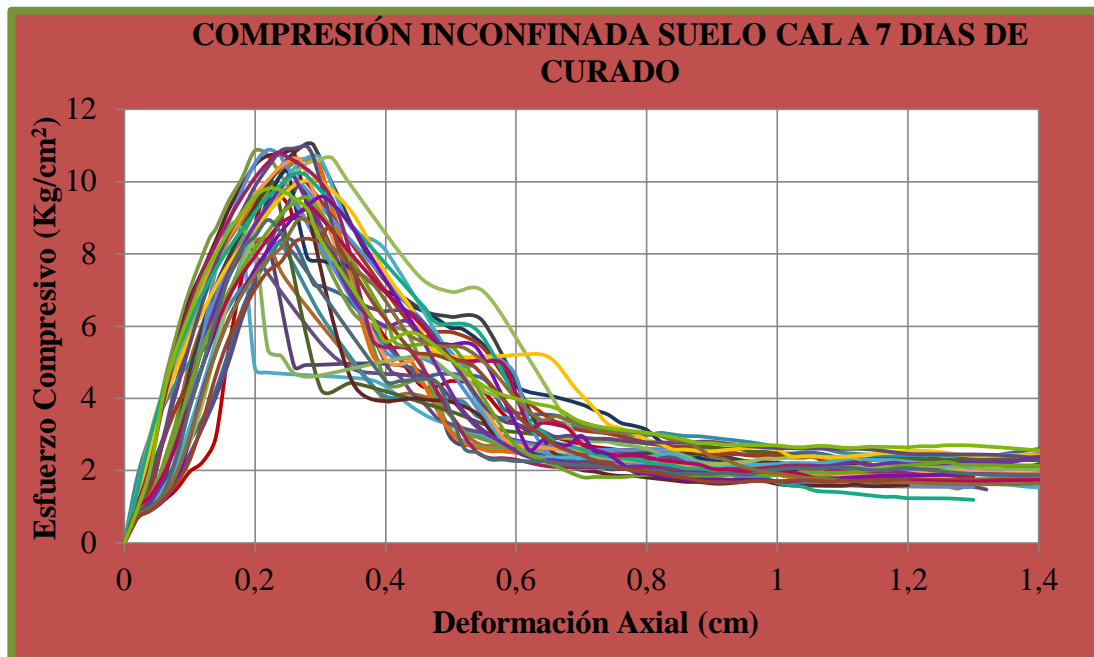
Figura 4.21 Compresión del suelo cal a 7 días de curado todas las muestras



Fuente: Elaboración propia.

Después de un análisis de los resultados se depuraron los resultados de las probetas que se alejan de la tendencia que tienen los demás resultados los cuales son los valores que se resaltaron de la anterior tabla, quedando el siguiente gráfico:

Figura 4.22 Compresión inconfiada del suelo cal a 7 días de curado con datos depurados

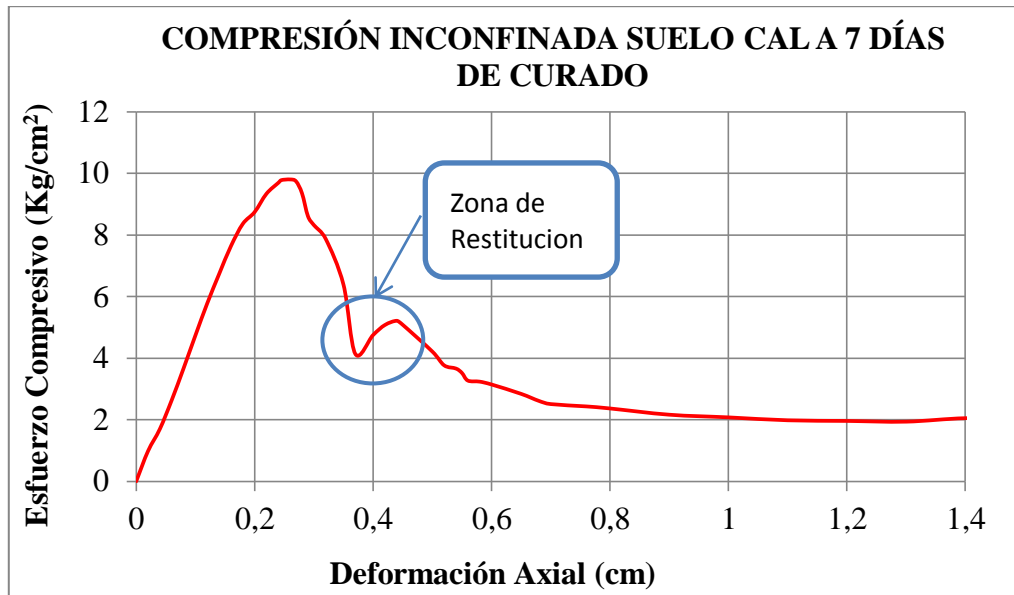


Fuente: Elaboración propia.

Con una edad de curado de 7 días la resistencia a compresión sigue en aumento y también la deformación sigue disminuyendo a esta edad se realiza más números de muestras porque a ésta es la edad que recomiendan las normas de estabilización y en esta edad se estudiarán los máximos del esfuerzo y deformación además, es evidente después de la falla una tendencia de recuperación o restitución del esfuerzo más grande que en el suelo cal curado a 0 días, el mismo que se determinará y estudiará más adelante.

El siguiente es un gráfico representativo de todos las pruebas de compresión inconfiada realizado a las muestras de suelo cal, sin tomar en cuenta los que se depuraron.

Figura 4.23 Gráfico representativo de la compresión del suelo cal a 7 días de curado



Fuente: Elaboración propia.

Claramente se nota dos picos o dos máximos, recorriendo de izquierda a derecha, el primero es el esfuerzo máximo admisible del suelo-cal, luego hay una caída del esfuerzo hasta un cierto punto donde nuevamente dicho suelo comienza a soportar esfuerzos, (zona de restitución) es donde se presenta la restitución del esfuerzo que es fenómeno en estudio que se explicará más adelante por qué ocurre.

El esfuerzo máximo y la deformación del suelo cal a una edad de 7 días de curado es:

Cuadro 4.19 Esfuerzo máximo admisible y deformación del suelo-cal a 7 días de curado.

Esfuerzo máximo Admisible σ (Kg/cm²)	Deformación hasta la falla ΔL (cm)	Esfuerzo de restitución inicial σ (Kg/cm²)	Esfuerzo de restitución final σ (Kg/cm²)
9,777	0,245	4,782	5,181

Fuente: Elaboración propia.

4.3.2.6 Gráficos esfuerzo, deformación y tiempo de la prueba de compresión inconfiada del suelo-cal 7 días de curado.

Al igual que en suelo solo se controló el tiempo para la prueba de compresión del suelo-cal, para realizar un análisis del comportamiento del mismo se presenta el resultado de dos muestras de suelo-cal pero el control del tiempo se realizó para todas las muestras.

Figura 4.24 Esfuerzo-deformación y esfuerzo-tiempo de deformación del suelo-cal 7 días de curado.

Figura 4.24 a)

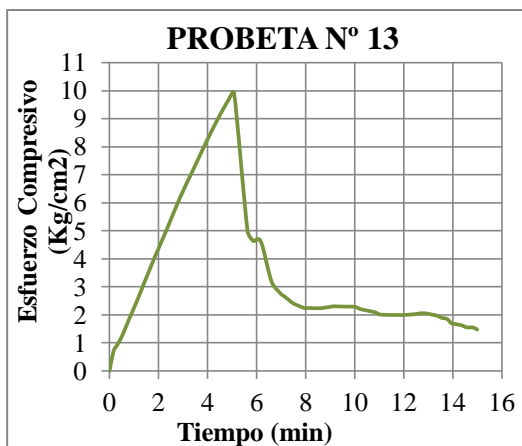
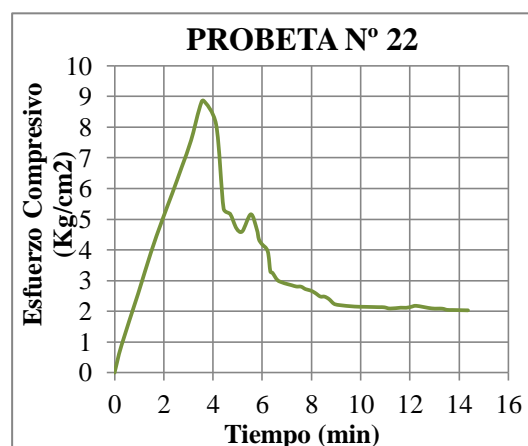


Figura 4.24 b)



Fuente: Elaboración propia.

Figura 4.24 c)

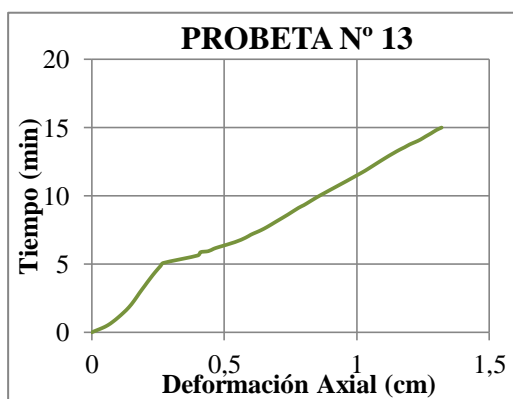
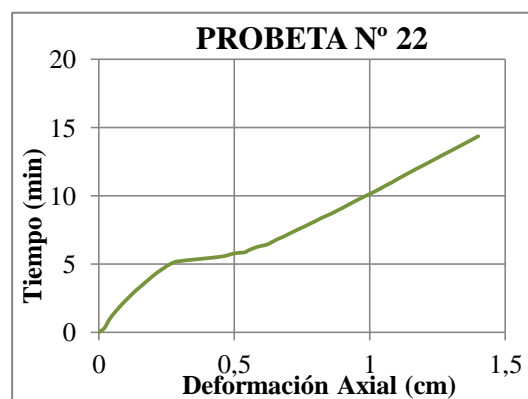


Figura 4.24 d)



Fuente: Elaboración propia.

En las gráficas del tiempo deformación, se nota que el tiempo tiene un cambio de pendiente después de la falla, lo que nos muestra un comportamiento antes y después de la falla.

Se nota una reducción del tiempo hasta llegar a la falla en comparación del suelo sin cal, estos tiempos se controlaron todos a la misma velocidad, tanto para el suelo solo y suelo cal.

Figura 4.24 e)

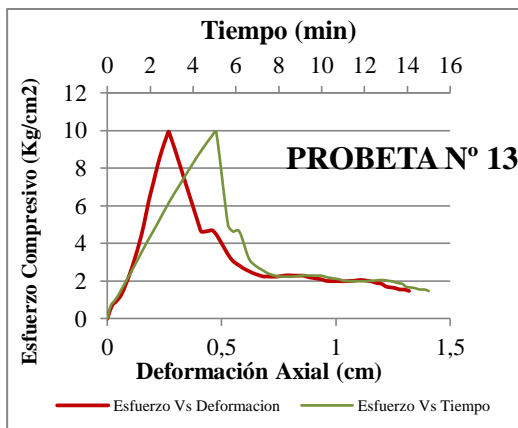
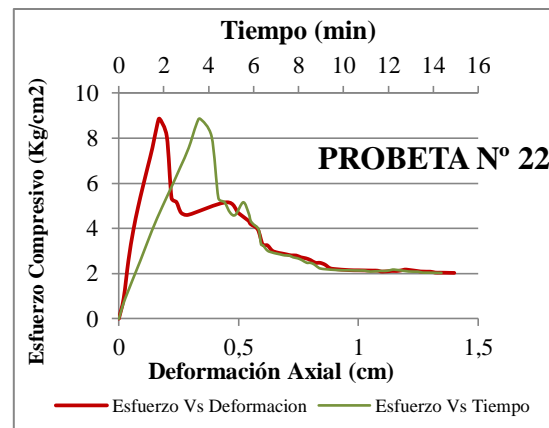


Figura 4.24 f)



Fuente: Elaboración propia.

De igual manera que en el suelo sin cal se puede notar que sobreponiendo las curvas de esfuerzo deformación y esfuerzo tiempo ambas tienen un comportamiento similar entre ambas lo que denota que el tiempo tiene un comportamiento diferente en cada estado de la deformación del suelo-cal.

4.3.2.7 Compresión inconfiada en muestras de suelo-cal remoldeado de 7 días de curado.

Para ampliar la investigación del comportamiento del suelo-cal después de la falla, se realizó el moldeo de nuevas probetas con el suelo-cal después que fallaron a compresión simple a un curado de 7 días, realizando un remoldeo, previo cálculo de su humedad óptima y sin añadirle cal, para nuevamente volver a realizar la prueba de compresión inconfiada la que se realizó quince probetas de suelo-cal remoldeado, para con esto poder hacer un análisis de qué pasa con el suelo y la cal, si el suelo-cal después de la falla puede ser reutilizado.

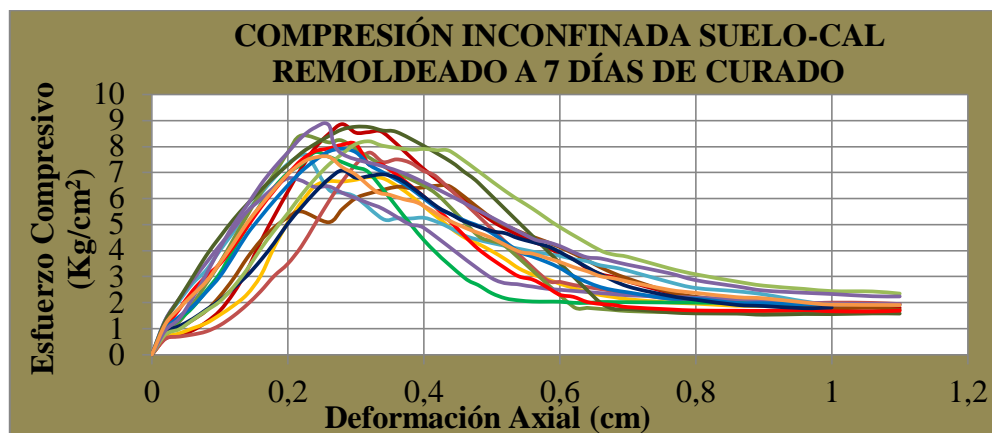
Cuadro 4.20 Resultados de los máximos de la compresión inconfiada del suelo-cal remoldeado con 7 días de curado.

Nº De probeta	Deformación de la muestra ΔL (cm)	Esfuerzo Aplicado σ (Kg/cm ²)	Tiempo de deformación t (min)	Módulo de Elasticidad $\sigma/(\Delta L/L_0)$ E (Kg/cm ²)
1	0,28	8,861	8,98	379,757
2	0,32	6,828	6,63	251,793
3	0,42	6,495	6,29	180,928
4	0,22	7,678	4,13	411,834
5	0,32	7,769	4,76	286,470
6	0,22	8,428	4,19	448,209
7	0,24	7,782	3,72	379,372
8	0,20	6,780	3,42	396,623
9	0,30	8,762	5,25	341,701
10	0,28	8,069	4,93	337,182
11	0,28	7,912	4,84	330,612
12	0,28	7,087	4,53	296,115
13	0,32	8,200	5,17	302,364
14	0,26	8,833	4,99	400,900
15	0,26	7,611	4,08	342,490
PROMEDIO	0,275	7,986	5,059	346,831

Fuente: Elaboración propia.

Las filas (Nº 3 y 8) que se marcaron porque se depuraron esos datos por alejarse de las demás graficas que presentan una cierta tendencia hacia una faja central.

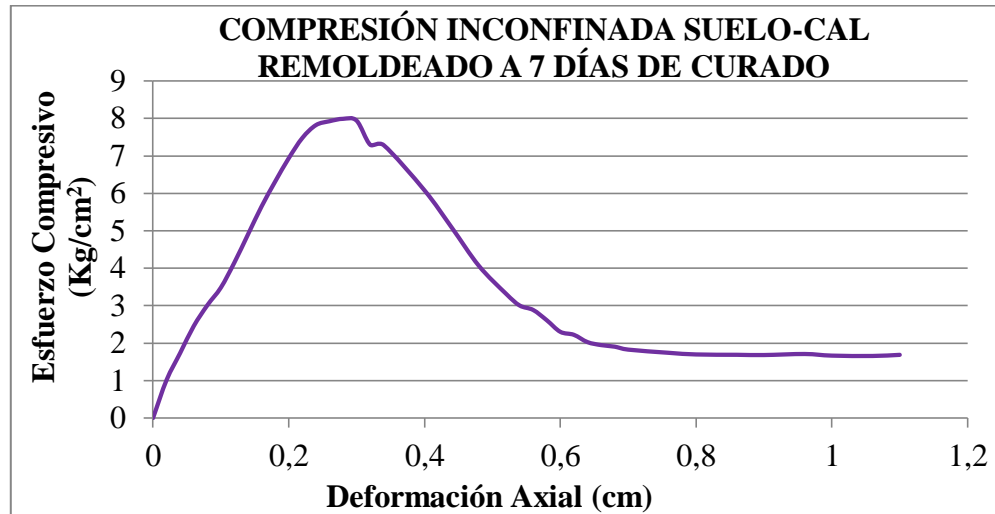
Figura 4.25 Compresión inconfiada de todas las muestras de suelo cal remoldeado a 7 días de curado



Fuente: Elaboración propia.

El siguiente es un gráfico representativo de todas las pruebas realizadas en la prueba de compresión inconfiada de suelo-cal remoldeado.

Figura 4.26 Gráfico representativo de todas las muestras de suelo cal remoldeado con 7 días de curado



Fuente: Elaboración propia.

El esfuerzo máximo admisible promedio del suelo cal remoldeado y su deformación hasta llegar a la falla se muestra en el siguiente cuadro:

Cuadro 4.21 Esfuerzo máximo admisible y deformación del suelo-cal remoldeado

Esfuerzo máximo Admisible σ (Kg/cm²)	Deformación hasta la falla ΔL (cm)
7,968	0,280

Fuente: Elaboración propia

4.3.2.8 Gráficos esfuerzo, deformación y tiempo de la prueba de compresión inconfiada del suelo-cal remoldeado.

En el suelo-cal remoldeado también se controló el tiempo para la prueba de compresión para realizar un análisis del comportamiento del mismo, se presenta el

resultado de dos muestras de suelo-cal remoldeado, pero el control del tiempo se realizó para todas las muestras

Figura 4.27 Esfuerzo-deformación y esfuerzo-tiempo de deformación.

Las muestras son representativas ya que el tiempo se controló para cada muestra de la prueba de compresión simple, se nota que el tiempo hasta la falla es menor a al tiempo de suelo solo.

Figura 4.26 a)

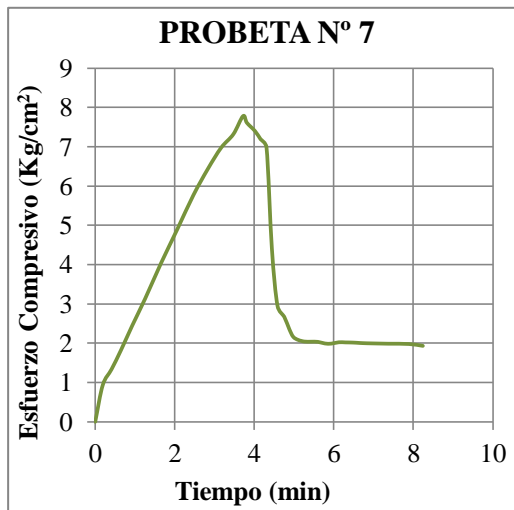
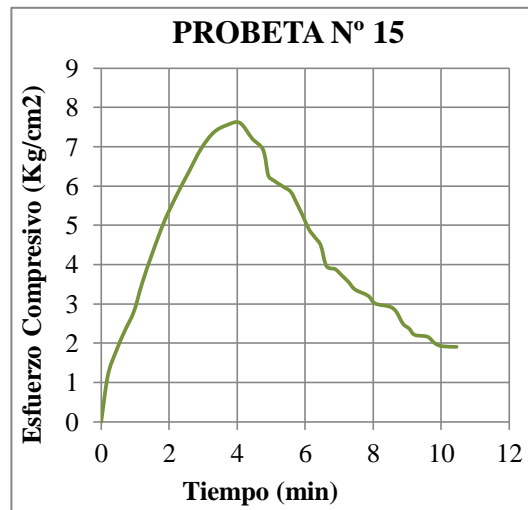


Figura 4.26 b)



Fuente: Elaboración propia

Figura 4.26 c)

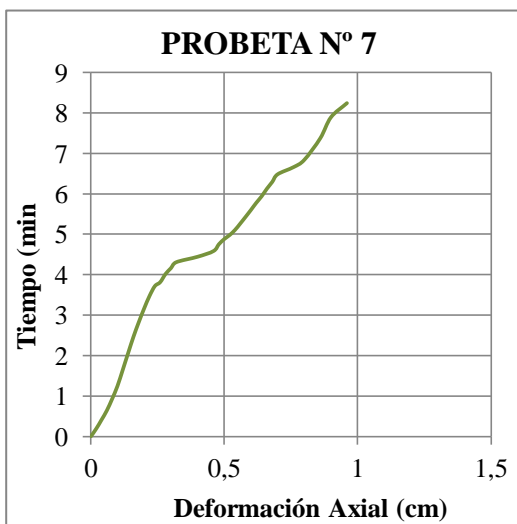
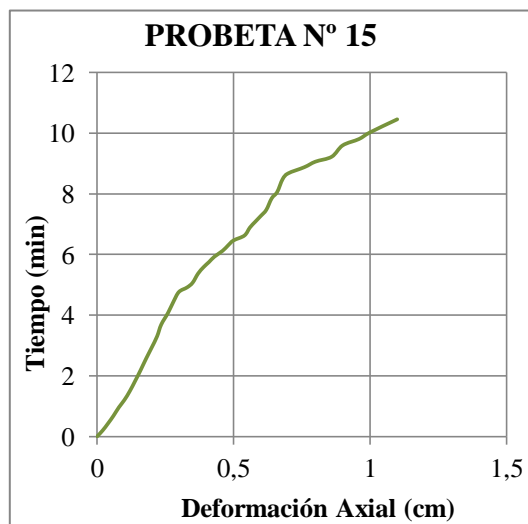


Figura 4.26 d)



Fuente: Elaboración propia

En la graficas tiempo deformación se nota un cambio de pendiente esto se da aproximadamente cuando se da la falla.

Figura 4.26 e)

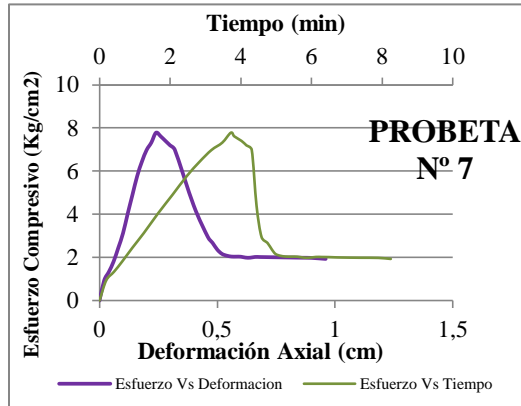
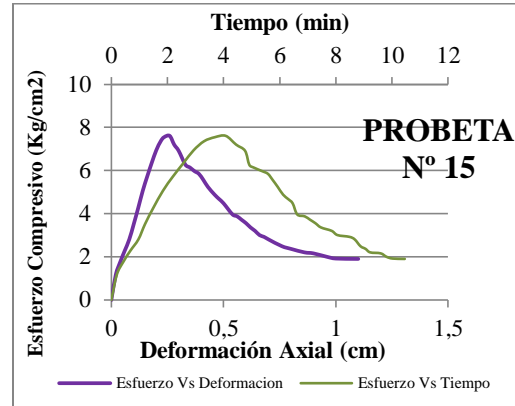


Figura 4.26 e)



Fuente: Elaboración propia

De igual manera que en las anteriores pruebas el comportamiento del esfuerzo tiempo y el esfuerzo deformación es similar, se nota como un reflejo debido a la escala, las pendientes son similares

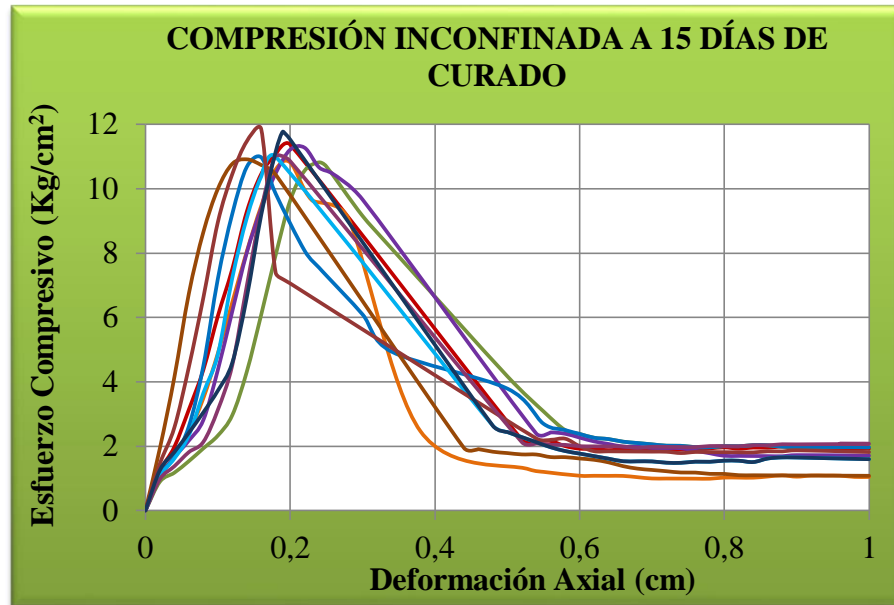
4.3.2.9 Compresión inconfiada en muestras de suelo-cal con 15 días de curado

Cuadro 4.22 Resultados de los máximos de la compresión inconfiada del suelo-cal a 15 días de curado.

Nº De probeta	Deformación de la muestra ΔL (cm)	Esfuerzo Aplicado σ (Kg/cm ²)	Tiempo de deformación t (min)	Módulo de Elasticidad $\sigma/(\Delta L/L_0)$ E (Kg/cm ²)
1	0,20	10,818	4,712	632,840
2	0,24	10,821	4,975	531,138
3	0,22	11,275	4,922	604,229
4	0,16	10,975	3,395	805,994
5	0,14	10,915	4,530	917,623
6	0,18	10,996	4,827	718,412
7	0,16	11,850	3,720	873,932
8	0,18	11,036	4,213	721,003
9	0,19	11,778	4,507	726,544
10	0,20	11,373	4,767	667,576
PROM=	0,187	11,184	4,457	719,929

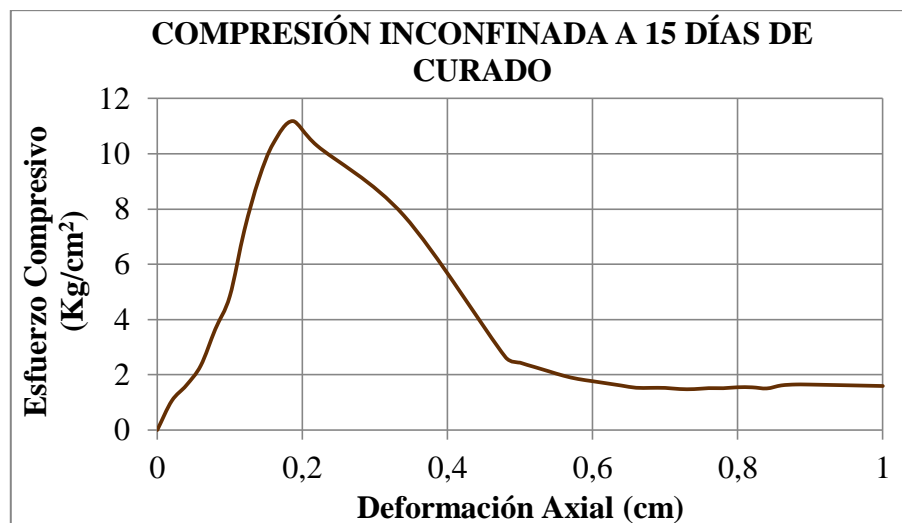
Fuente: Elaboración propia.

Figura 4.28 Gráficos de la prueba de compresión del suelo cal a 15 días de curado con todos los datos



Fuente: Elaboración propia.

Figura 4.29 Gráfico representativo de la prueba de compresión del suelo cal a 15 días de curado



Fuente: Elaboración propia.

El esfuerzo máximo admisible promedio y su deformación hasta llegar a la falla del suelo cal a una edad de 15 días de curado se muestra en el siguiente cuadro:

Cuadro 4.23 Esfuerzo máximo admisible y deformación del suelo-cal a 15 días de curado.

Esfuerzo máximo Admisible σ (Kg/cm²)	Deformación hasta la falla ΔL (cm)
11,184	0,187

Fuente: Elaboración propia

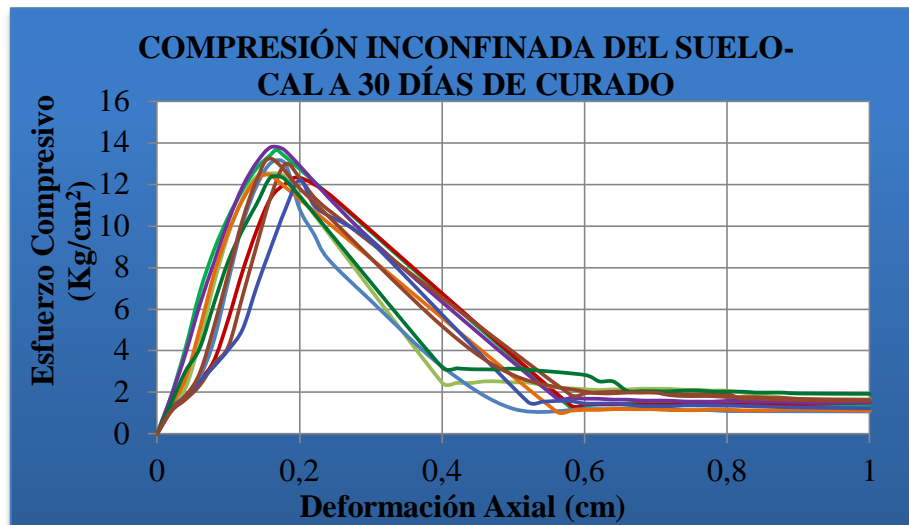
4.3.2.10 Compresión inconfiada en muestras de suelo-cal con 30 días de curado

Cuadro 4.24 Resultados de los máximos de la compresión inconfiada del suelo-cal a 30 días de curado.

N° De probeta	Deformación de la muestra ΔL (cm)	Esfuerzo Aplicado σ (Kg/cm²)	Tiempo de deformación t (seg)	Módulo de Elasticidad $\sigma/(\Delta L/L_0)$ E (Kg/cm²)
1	0,200	12,322	6,305	718,96
2	0,160	12,524	4,357	915,81
3	0,160	13,042	5,238	963,49
4	0,160	13,797	2,663	1017,51
5	0,180	12,979	4,480	845,77
6	0,160	12,444	4,705	910,00
7	0,20	12,20	4,11	716,38
8	0,16	12,36	3,93	901,05
9	0,16	13,24	4,05	971,45
10	0,17	13,62	3,51	937,68
PROM=	0,171	12,854	4,334	889,808

Fuente: Elaboración propia.

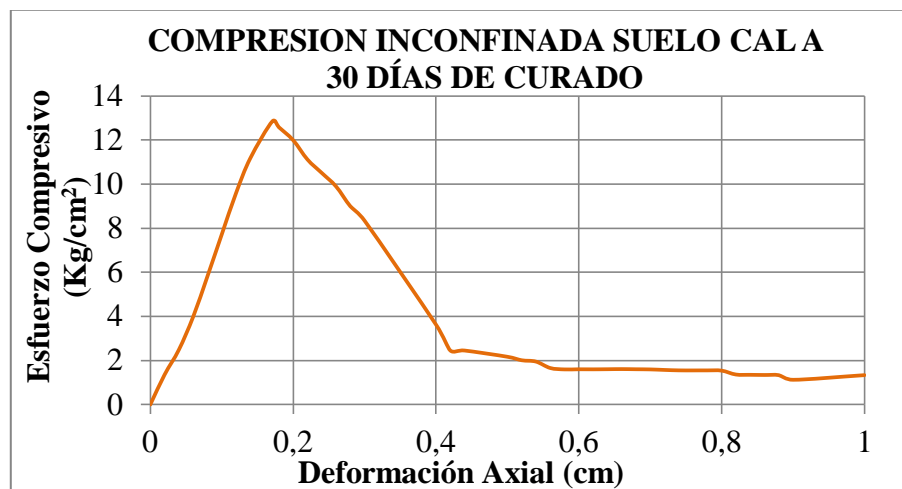
Figura 4.30 Gráficos de la prueba de compresión del suelo cal a 30 días de curado con todos los datos



Fuente: Elaboración propia.

En esta prueba no se depuraron ningún dato, como se puede ver en el grafico todas las pruebas realizadas tienen la misma tendencia, también se puede observar que el maximo va aumentando y después de la falla la pendiente es relativamente continua donde ya no presenta restitución.

Figura 4.31 Gráfico representativo de la prueba de compresión del suelo cal a 30 días de curado



Fuente: Elaboración propia.

El esfuerzo máximo admisible promedio y su deformación hasta llegar a la falla del suelo cal a una edad de 30 días de curado se muestra en el siguiente cuadro:

Cuadro 4.25 Esfuerzo máximo admisible y deformación del suelo-cal a 30 días de curado.

Esfuerzo máximo Admisible σ (Kg/cm²)	Deformación hasta la falla ΔL (cm)
12,854	0,171

Fuente: Elaboración propia

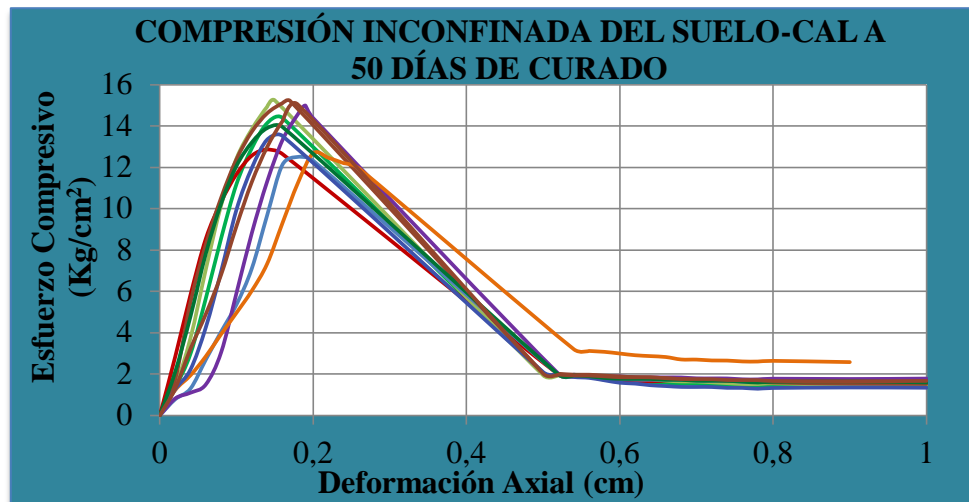
4.3.2.11 Compresión inconfiada en muestras de suelo-cal con 50 días de curado

Cuadro 4.26 Resultados de los máximos de la compresión inconfiada del suelo-cal a 50 días de curado.

N° De probeta	Deformación de la muestra ΔL (cm)	Esfuerzo Aplicado σ (Kg/cm²)	Tiempo de deformación t (min)	Módulo de Elasticidad $\sigma/(\Delta L/L_0)$ E (Kg/cm²)
1	0,140	12,864	4,828	1072,27
2	0,150	15,238	5,635	1188,59
3	0,180	12,504	4,868	821,10
4	0,190	14,990	5,587	930,93
5	0,170	15,213	5,838	1049,67
6	0,200	12,678	4,905	741,69
7	0,16	13,52	5,460	991,86
8	0,16	13,95	4,948	1016,85
9	0,18	15,04	4,573	981,00
10	0,16	14,39	4,943	1052,34
PROM=	0,169	14,039	5,159	984,629

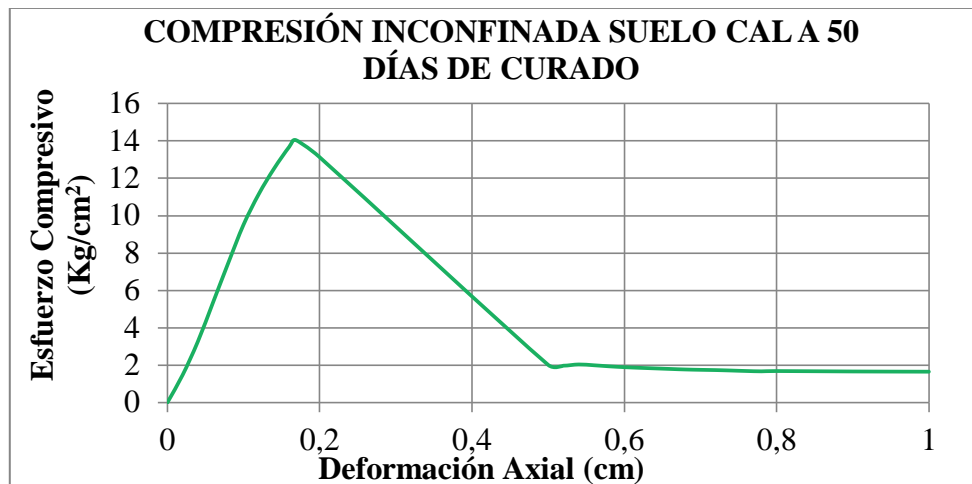
Fuente: Elaboración propia.

Figura 4.32 Gráficos de la prueba de compresión del suelo cal a 50 días de curado con todos los datos



Fuente: Elaboración propia.

Figura 4.33 Gráficos representativo de la prueba de compresión del suelo cal a 50 días de curado



Fuente: Elaboración propia.

El esfuerzo máximo admisible promedio y su deformación hasta llegar a la falla del suelo cal a una edad de 50 días de curado se muestra en el siguiente cuadro:

Cuadro 4.27 Esfuerzo máximo admisible y deformación del suelo-cal a 50 días de curado.

Esfuerzo máximo Admisible σ (Kg/cm²)	Deformación hasta la falla ΔL (cm)
14,039	0,169

Fuente: Elaboración propia

4.4 ANÁLISIS DE LA EVOLUCIÓN DEL ESFUERZO DEFORMACIÓN A DIFERENTES EDADES DE CURADO.

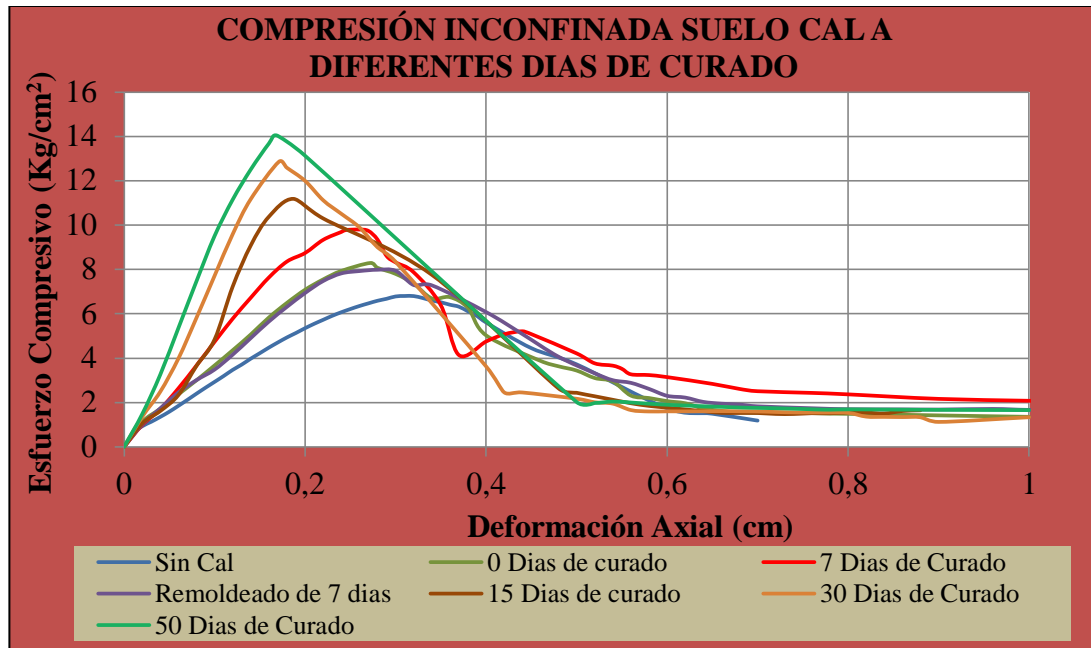
A continuación se presenta un cuadro con el resumen del promedio y gráfico de los máximos tanto del esfuerzo como la deformación para todas las muestras de suelo solo y suelo cal a diferentes edades.

Cuadro 4.28 Relaciones esfuerzo deformación de las muestras de suelo cal compactadas a diferentes edades

RESULTADOS DE LA PRUEBA DE COMPRESIÓN SIMPLE INCONFINADA						
Descripción	Días de curado	Nº de Muestras Ensayadas	Deformación de la muestra ΔL (cm)	Esfuerzo Max. Aplicado σ (Kg/cm²)	Módulo de elasticidad E (Kg/cm²)	Tiempo de deformación t (min)
Sin Cal (suelo solo)	0	20	0,310	6,804	259,96244	5,246
Suelo Cal (dosif.4%)	0	10	0,272	8,292	358,123	4,783
	7	40	0,245	9,777	481,713	4,781
	15	10	0,187	11,184	719,929	4,457
	30	10	0,171	12,854	889,808	4,334
	50	10	0,169	14,039	984,629	5,159
Remoldeado Del suelo cal de 7 días de curado	7	15	0.28	7,986	346,831	5,159

Fuente: Elaboración propia.

Figura 4.34 Compresión inconfínada del suelo cal a diferentes días de curado



Fuente: Elaboración propia

Todas las muestras presentan un primer rango de comportamiento relativamente lineal (similar a una línea recta en la curva esfuerzo deformación) y elástico ante la presencia incremental de sollicitaciones de compresión.

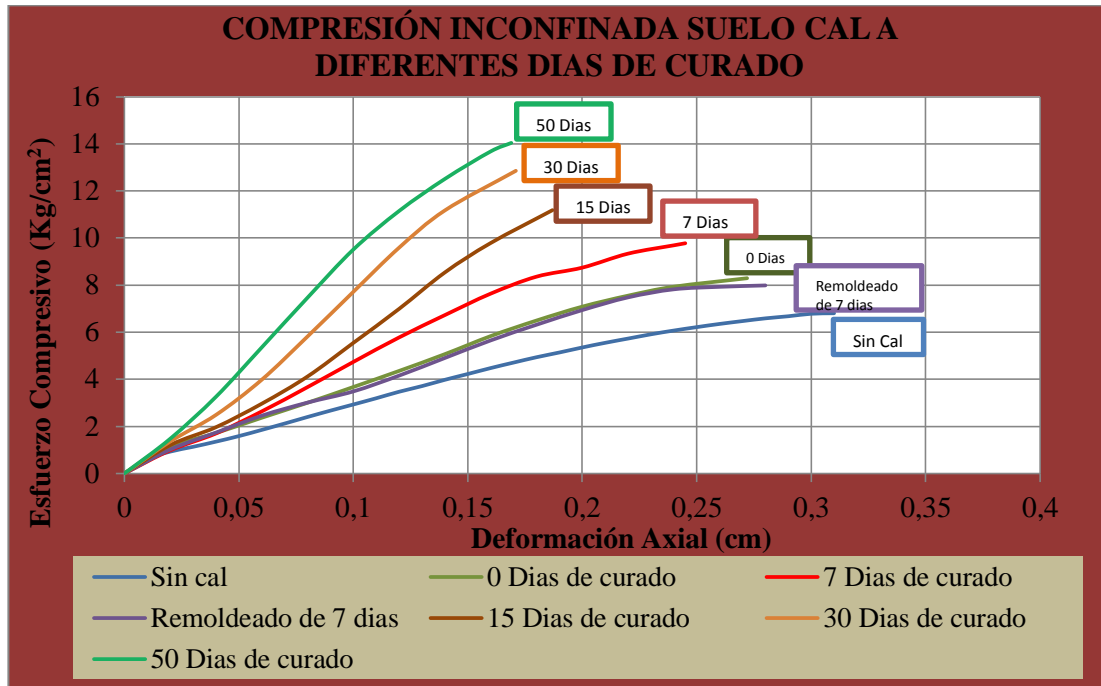
La pendiente de la curva en el rango de comportamiento lineal recibe la denominación de Módulo de Elasticidad o Módulo de Young. El módulo de elasticidad es diferente para distintas resistencias a la compresión.

Analizando los resultados de las curvas esfuerzo deformación de la prueba de compresión inconfínada tomando como referencia del suelo sin cal y a diferentes edades del suelo-cal se nota que hay un considerable aumento en la resistencia a compresión del suelo-cal conforme va aumentando el tiempo de curado y una disminución de la deformación.

Para un análisis más detallado se analizará antes y después de la falla.

4.4.1 Análisis de la Evolución del Esfuerzo y Deformación a Diferentes Edades de Curado Antes de la Falla.

Figura 4.35 Comportamiento del esfuerzo deformación antes de la falla



Fuente: Elaboración propia

Cuadro 4.29 Relaciones de la evolución del esfuerzo y deformación en % diferentes edades

Descripción	Días de curado	Deformación de la muestra ΔL (cm)	Esfuerzo Max. Aplicado σ (Kg/cm ²)	% que aumenta el Esfuerzo (%)	% que disminuye la deformación (%)
Sin Cal (suelo solo)	0	0,310	6,804	-	-
Suelo Cal (dosif.4%)	0	0,272	8,292	21,87	-12,26
	7	0,245	9,777	43,69	-20,97
	15	0,187	11,184	64,38	-39,68
	30	0,171	12,854	88,93	-44,84
	50	0,169	14,039	106,34	-45,48
Remoldeado Del suelo cal de 7 días de curado	7	0.28	7,986	17,38	-9,68

Fuente: Elaboración propia

a) Análisis del esfuerzo

Es evidente la evolución que adquiere el esfuerzo y la deformación a medida que aumenta la edad de curado, en este caso aumenta los valores del esfuerzo y disminuye la deformación.

Para analizar el esfuerzo, partiremos con el máximo del suelo sin cal.

Entre el suelo sin cal y el suelo-cal con un tiempo de curado de 0 días el aumento del esfuerzo es de 21,87 %.

Entre el suelo sin cal y el suelo-cal con un tiempo de curado de 50 días el aumento del esfuerzo es de 106,34 %.

Entre el suelo-cal con un tiempo de curado de 0 días y el suelo-cal con un tiempo de curado de 50 días el aumento del esfuerzo es de 69,31 %.

b) Análisis de la deformación

A continuación se detalla el aumento de la resistencia a compresión inconfiada y la disminución de la deformación ambas en función a la edad de curado, tomando como referencia al suelo sin cal:

Con la adición del 4% de cal al suelo y en un tiempo de curado de 50 días se logra doblar la resistencia a compresión del suelo llegando hasta un 106,33 % de aumento, y la tendencia es a seguir aumentando la resistencia del suelo-cal a medida que el tiempo va pasando.

Lo contrario pasa con la deformación que va disminuyendo notablemente conforme va pasando la edad de curado logrando una disminución del 12,26% con solo añadirle la cal con 0 días de curado, y disminuyendo aproximadamente de un 45,48%, al contrario del esfuerzo no tiene una tendencia de seguir disminuyendo conforme aumenta la edad de curado puesto que entre los 30 y los 50 días solo disminuye un aproximado del 0,64%.

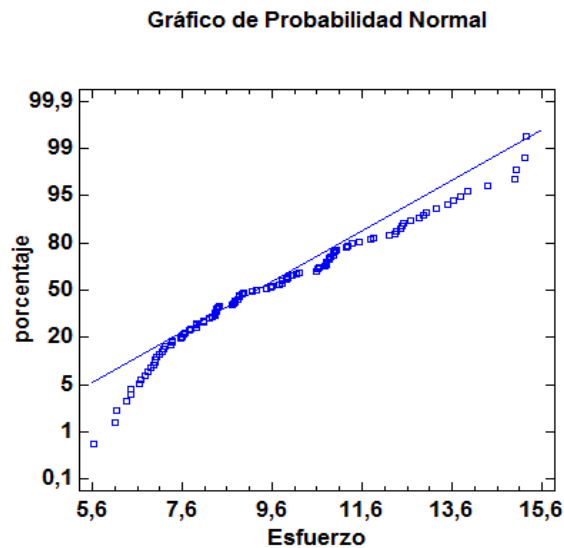
Algo que no debemos dejar pasar por alto es el suelo cal Remoldeado después de la falla teniendo antes un curado de 7 días, ya que a pesar que se moldeo de un suelo

que falló se nota que la cal aún sigue reaccionando químicamente con el suelo ya que se logra un aumento del 17,38% del esfuerzo y disminuye un 9,68% la deformación respectivamente tomando como referencia el suelo sin cal.

4.4.1.1 Análisis estadístico del esfuerzo máximo admisible del suelo cal de todas las muestras a cada edad establecida

Para este análisis estadístico se realizó una estadística básica una regresión lineal de los máximos del esfuerzo de todas las muestra a diferentes edades

Figura 4.36 Análisis estadístico del esfuerzo



Cuadro 4.30 Resumen estadístico para el esfuerzo máximo de las muestras de suelo cal a diferentes edades

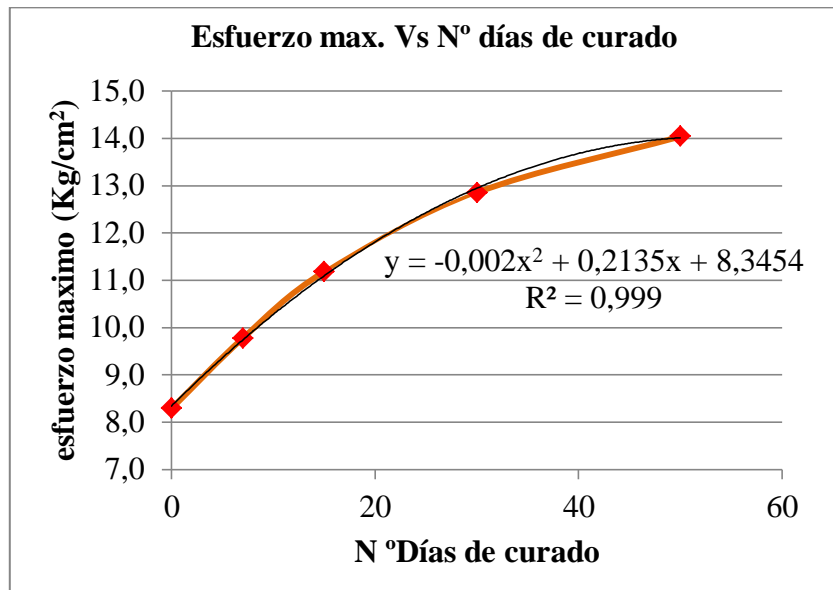
Recuento	105
Promedio	9,680
Mediana	9,248
Desviación Estándar	2,388
Coefficiente de Variación	24,667%
Mínimo	5,643
Máximo	15,238
Rango	9,595
Sesgo Estandarizado	2,141
Curtosis Estandarizada	-1,203

Esta tabla muestra los estadísticos de resumen para Esfuerzo. Incluye medidas de tendencia central, medidas de variabilidad y medidas de forma.

Fuente: Elaboración propia.

4.4.1.2 Evolución del esfuerzo en función del tiempo o edad de curado

Figura 4.37 Evolución del esfuerzo máximo del suelo cal a diferentes tiempos de curado



Fuente: Elaboración propia.

$$\sigma_t = -0,002 * t^2 + 0,2135 * t + 8,3454$$

Dónde:

σ_t = Resistencia a compresión a la edad especificada (kg/cm²)

t = Edad en días.

4.4.1.3 Evolución de la deformación en función del tiempo o edad de curado

Entre el suelo sin cal y el suelo-cal con un tiempo de curado de 0 días la disminución de la deformación es de 12,26 %.

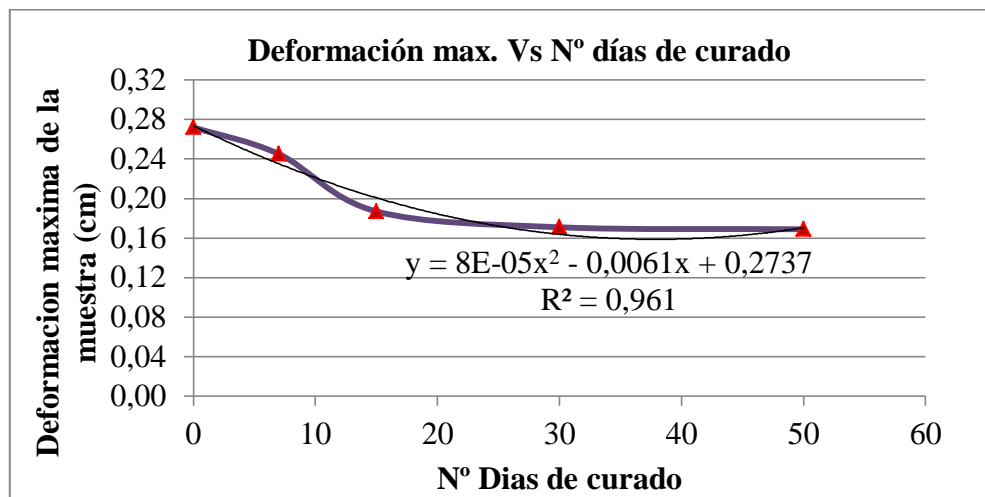
Entre el suelo sin cal y el suelo-cal con un tiempo de curado de 50 días la disminución de la deformación es de 45,48 %.

Entre el suelo-cal con un tiempo de curado de 0 días y el suelo-cal con un tiempo de curado de 50 días la disminución de la deformación es de 37,87 %.

Con la adición del 4% de cal al suelo y en un tiempo de curado de 50 días se logra una considerable disminución de la deformación del 45,48 % con una tendencia mínima de seguir disminuyendo la deformación.

Con la siguiente relación en función a la edad de curado podemos determinar la tendencia que tiene la deformación a disminuir, la disminución más notoria esta entre los 0 a 30 días de curado, a comparación de la disminución de la deformación que se tiene entre los 30 a 50 días.

Figura 4.38 Evolución de la deformación del esfuerzo máximo de compresión a diferentes edades de curado



Fuente: Elaboración propia.

$$\Delta L_t = 8 \times 10^{-5} * t^2 - 0,0061 * t + 0,2737$$

Dónde:

ΔL_t = Deformación a la edad especificada (cm)

t = Edad en días.

Módulo de Elasticidad

El módulo de elasticidad “E” de una capa de firme o explanada indica su capacidad de reparto de tensiones tanto en las capas por debajo de la misma, en caso de existir, como la explanada. A igualdad de espesor, cuanto mayor es dicho modulo, las

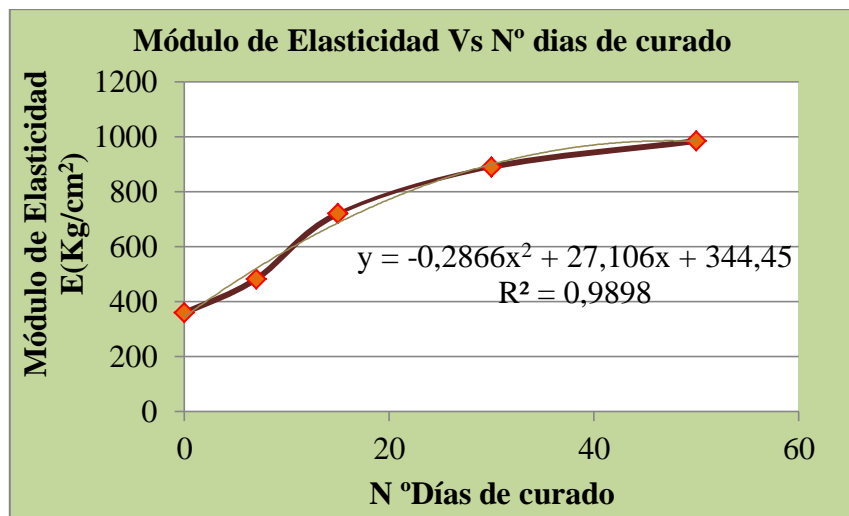
deflexiones que se originan son más reducidas y uniformes, sin valores máximos acusados bajo los puntos de aplicación de las cargas.

Los suelos tratados con cal tienen un comportamiento elástico marcadamente lineal, al menos hasta alcanzar un porcentaje importante de su tensión de rotura. En consecuencia, el módulo de elasticidad de los mismos puede considerarse prácticamente constante en el rango de tensiones dentro del cual se suelen trabajar.

En el siguiente gráfico que son los resultados del cálculo del módulo de elasticidad en el cual se nota un marcado y considerable aumento conforme va pasando el tiempo de curado, con una tendencia marcada y una buena relación.

4.4.1.4 Relación del módulo de elasticidad con el tiempo de curado

Figura 4.39 Comportamiento del módulo de elasticidad a diferentes edades de curado.



Fuente: Elaboración propia.

La relación entre el módulo de elasticidad y el tiempo de curado del suelo cal es:

$$E = -0,2866 * t^2 + 27,106 * t + 344,45$$

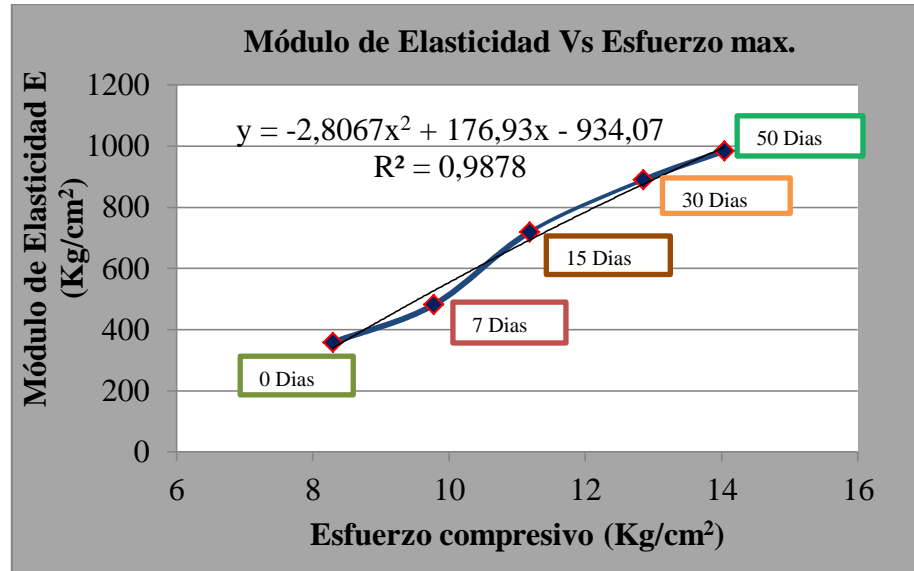
Dónde:

E = Módulo de elasticidad (Kg/cm²)

t = Tiempo de curado en días.

4.4.1.5 Relación del módulo de elasticidad y el esfuerzo máximo de compresión

Figura 4.40 Relación del módulo de elasticidad y esfuerzo máximo a compresión



Fuente: Elaboración propia.

Conociendo la resistencia a compresión del suelo con la siguiente relación es posible conocer el módulo de elasticidad del suelo sin ser necesario contar como dato el tiempo de curado del suelo-cal.

$$E = -2,8067 * \sigma^2 + 176,93 * \sigma - 934,07$$

Dónde:

E = Módulo de elasticidad (Kg/cm²)

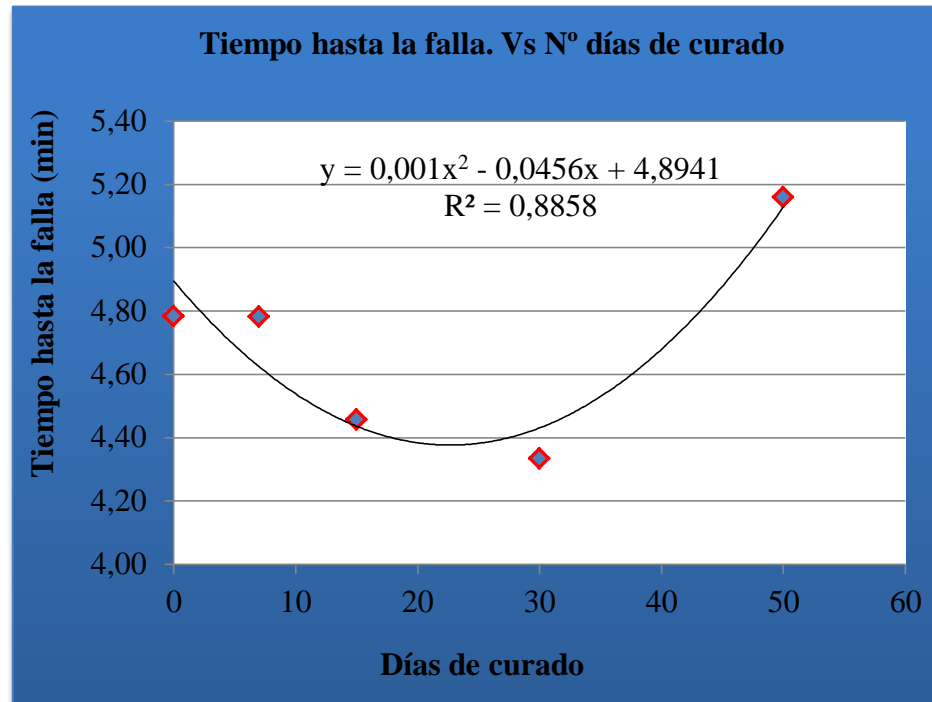
σ = Resistencia a compresión (kg/cm²)

4.4.1.6 Relación del tiempo de hasta la falla con el tiempo de curado

Un factor que se tomó en cuenta en este trabajo en la prueba de compresión simple, es el control de tiempo de la deformación, es decir se cronometra el tiempo en cada espacio recorrido por la deformación de la muestra, este control se realizó desde el inicio y hasta el fin de cada muestra ensayada, es importante hacer notar que las condiciones fueron las mismas para todas las muestras, es decir, todas las muestras de la misma dimensión, con el mismo equipo y a la misma velocidad, con la finalidad de

conocer, si el tiempo en que la muestra tarda en falla tiene alguna variación a medida que aumenta el tiempo de curado.

Figura 4.41 Relación del tiempo hasta la falla en función al tiempo de curado

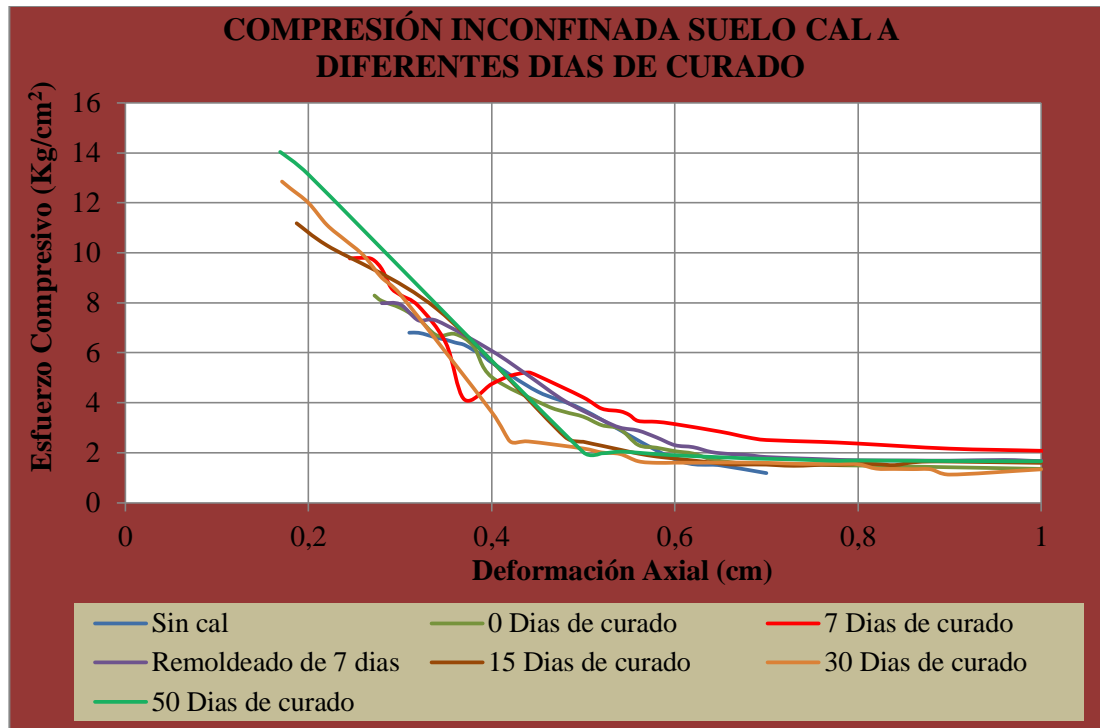


Fuente: Elaboración propia.

En el anterior gráfico se muestra la relación de cuanto tardaron las muestras hasta llegar a la falla según el tiempo de curado, se nota una ligera tendencia a disminuir a media que pasó el tiempo pero esta disminución no es considerable hasta los 30 días pero hay un ligero aumento entre los 30 a 50 días, esto debido a que el suelo está más endurecido debido a que tuvo más tiempo la reacción entre la cal y el suelo como se vio en el esfuerzo, todas las pruebas fueron realizadas a una velocidad constante.

4.4.1.7 Análisis de la evolución del esfuerzo y deformación a diferentes edades de curado después de la falla.

Figura 4.42 Comportamiento del esfuerzo deformación después de la falla



Fuente: Elaboración propia.

En el anterior gráfico se muestra las pendientes después de la falla de la prueba de compresión simple entre 0 y 50 días de edad de curado, las cuales son variables según la edad.

a) Análisis del esfuerzo después de la falla

En cuanto al análisis del esfuerzo deformación después de la falla, es notorio la trayectoria irregular que siguen las curvas a diferencia de la trayectoria más o menos regular que se presenta antes de la falla, esta trayectoria irregular y pendiente variada que se manifiesta después de la falla, varía según la edad de las muestras.

Haciendo una comparación entre todas las curvas, se nota una pendiente suave o menos pronunciada del suelo sin cal, en cuanto al suelo-cal, la pendiente de la curva esfuerzo deformación después de la falla, se nota que a los 0 días de edad, se manifiesta una pendiente más o menos suave similar, a la del suelo sin cal pero se nota que comienza a presentar una ciertas irregularidades en la curva, estas

irregularidades está asociado con la restitución del esfuerzo la cual es más notorio en la curva de 7 días de edad, donde la pendiente es un poco más pronunciada y una clara recuperación o restitución del esfuerzo, es decir donde se nota la tendencia de recuperar o restituir esta propiedad.

4.5 ANÁLISIS DE LA RESTITUCIÓN DEL ESFUERZO DESPUÉS DE LA FALLA.

Después de la falla del suelo-cal, la tendencia de recuperarse el esfuerzo es lo que se llama la restitución.

En las curvas donde se presenta la restitución (7 días de edad) o las curvas con tendencia a restituirse (0 a 15 días de curado) después de la falla la caída del esfuerzo es un poco lenta y se podría decir que algo escalonada o controlada, hasta llegar a una cierta deformación donde el esfuerzo se hace constante, lo que no sucede a la edad de 50 días de curado donde después de la falla el esfuerzo tiene una caída acelerada y nada escalonada hasta encontrar un esfuerzo constante a una cierta deformación.

A medida que la edad de curado aumenta, la pendiente la curva se manifiesta más pronunciada y la restitución se hace menos notoria, ésto es debido al efecto de la carbonatación de la cal que va endureciendo al suelo.

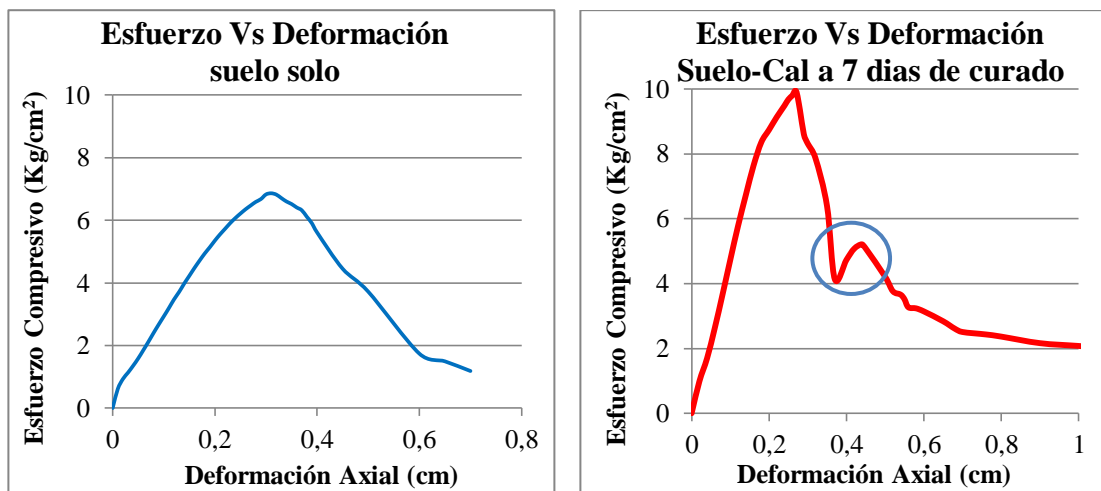
Se nota que la deformación en el punto del gráfico esfuerzo deformación donde el esfuerzo se restituye o tiene la tendencia a restituir, este punto de la deformación varía según la edad de curado haciendo que a mayor edad de curado la deformación disminuya.

4.5.1 Restitución del Esfuerzo Deformación Después de la Falla del Suelo-cal.

La restitución es la capacidad o la tendencia que tiene el suelo de recuperar sus propiedades mecánicas de trabajo, es decir que una vez que el suelo-cal llega a la falla.

Una vez que el suelo falla a compresión inconfiada, en la curva de caída del esfuerzo en un punto antes que el esfuerzo vs la deformación sea constante, la curva de caída del esfuerzo se restituye es decir la curva tiene la tendencia de volver a subir a seguir resistiendo carga hasta llegar a una nueva falla para recién caer completamente.

Figura 4.43 Comparación del esfuerzo deformación del suelo solo y suelo cal a 7 días de curado



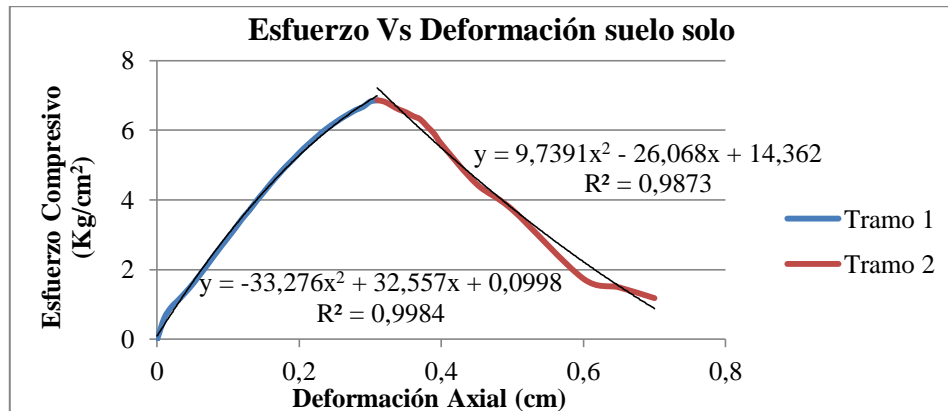
Fuente: Elaboración propia.

Claramente puede notarse un aumento en capacidad de soportar esfuerzos cuando al suelo se le añade la cal y una disminución de la deformación, ya que esa es la función de la cal función cementante que permite darle estabilidad al suelo, tiende a reducir los cambios de volumen y la caída de su resistencia bajo cargas por incremento de la humedad.

4.5.2 Comportamiento del esfuerzo deformación del suelo solo antes y después de llegar a la falla.

El siguiente es el grafico representativo de la prueba de compresión simple de 20 probetas de suelo solo donde se presenta el comportamiento antes y después de la falla.

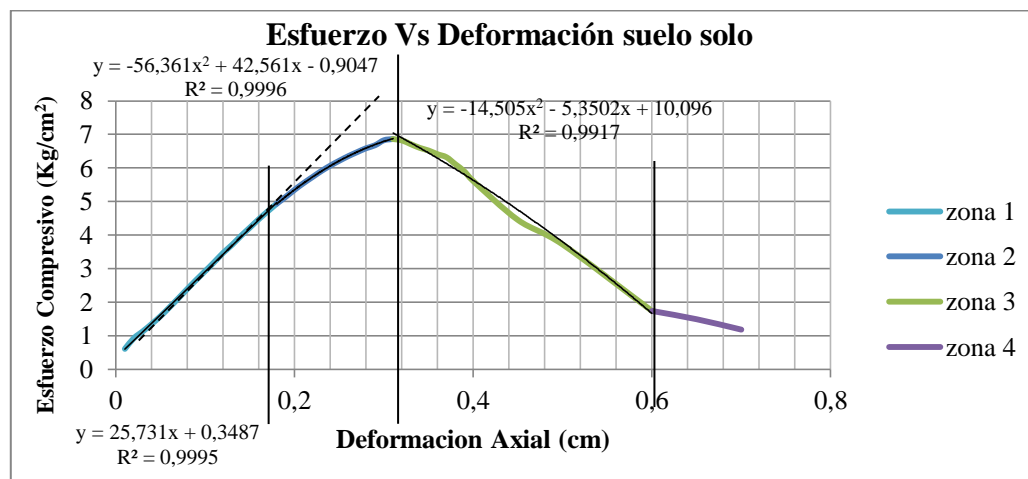
Figura 4.44 Comportamiento antes y después de la falla a compresión del suelo solo.



Fuente: Elaboración propia.

Todo el gráfico no se puede expresar en un solo modelo matemático que represente con una sola ecuación todo el comportamiento antes y después de la falla, por lo que se hace un análisis por separado en tramos antes y después de la falla, siendo por ello que lo separamos en tramo 1 antes de la falla y tramo 2 después de la falla, vemos que el tramo 1 tiende a ser una curva continua debido a que en este tramo el suelo se encuentra compactado y es donde es capaz de ir soportando las cargas.

Figura 4.45 Ecuaciones del comportamiento del esfuerzo deformación del suelo solo



Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 4.31 Resultados y comparación del esfuerzo deformación del suelo

	Límites del esfuerzo (Kg/cm²)	Límite de la Deformación (cm)	Descripción
Zona 1 Zona elástica	0 – 4,936	0 – 0,18	Hasta este punto la relación entre el esfuerzo y la deformación es lineal.
Zona 2 Zona elasto-plástica	4,936 – 6,862	0,18 – 0,31	En esta zona el material no recupera su forma original al ser descargado, quedando con una deformación permanente;
Zona 3 Zona Plástica	6,862 – 1,740	0,31 – 0,6	Esta zona se da a partir de la falla o esfuerzo último la deformación es imposible que el material se recupere.
Zona 4 Zona Plástica	1.740	0,6 – ∞	Esta zona es parte de la zona plástica, siendo en esta zona donde el esfuerzo tiende a ser contante y la deformación permanente tiende hacia el infinito

Fuente: Elaboración propia

En la zona elástica el material en este caso las probetas compactadas de suelo solo la deformación con respecto al esfuerzo aplicado se comporta de forma lineal es decir si no superamos el límite de este esfuerzo puede volver a su estado inicial en esta zona al realizar la prueba de compresión simple la probeta no presenta fisuras.

En la zona elastoplástica el comportamiento ya no es lineal, más bien es una curva de segundo grado, el suelo ya no recupera su deformación en esta zona si quitáramos la carga se quedaría deformado y si la volvemos a aplicar la carga seguirá soportando pero manteniendo una deformación permanente, es en esta zona donde comienzan a aparecer las primeras fisuras, como se ve en las imágenes.



A pesar de presentar fisuras el suelo aún sigue soportando esfuerzos.

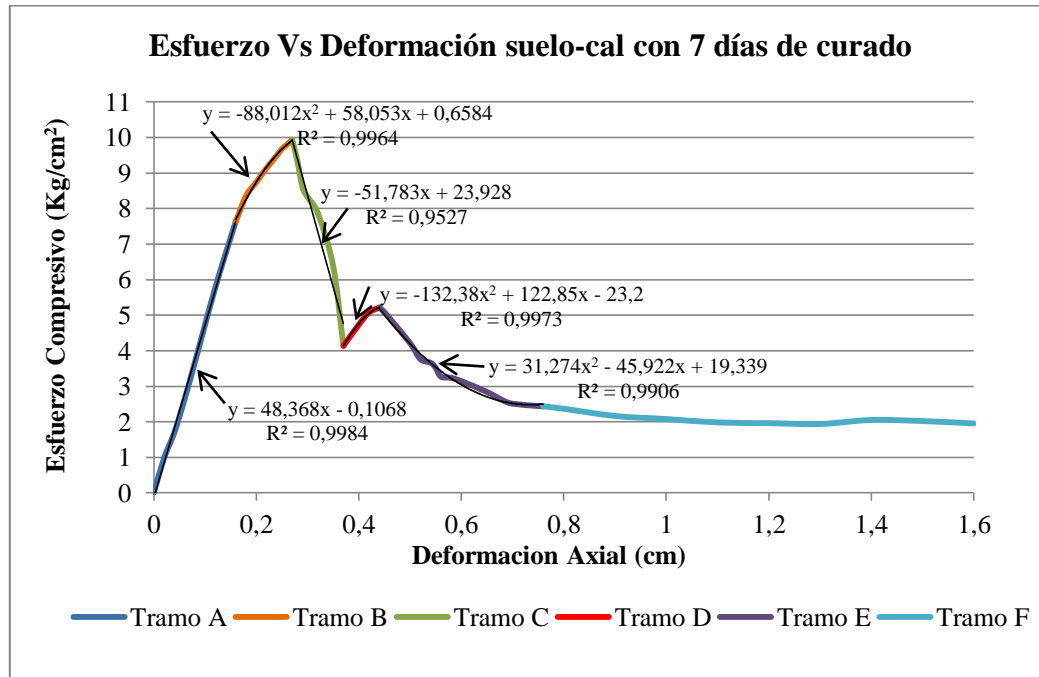
La zona plástica se presenta inmediatamente después de que ocurre la falla, el suelo con una carga mínima sigue manteniendo una deformación permanente irreversible como se muestra en las siguientes imágenes:



Fisuras después de la falla del suelo sin cal

4.5.3 Comportamiento del Esfuerzo Deformación del Suelo-Cal Antes y Después de la Falla con 7 días de Curado.

Figura 4.46 Comportamiento del esfuerzo del suelo-cal antes y después de la falla a compresión suelo cal a 7 de curado.



Analizando el gráfico de esfuerzo deformación del suelo-cal de la compresión inconfiada, vemos que la forma presenta cierta similitud con la del suelo solo con variación en los valores máximos y que después de la falla se presenta el fenómeno que se está estudiando que es la restitución del esfuerzo.

Igual que en el análisis del suelo solo no se puede ajustar a un modelo matemático por no ser una función matemática, por lo cual se lo analizar por tramos antes y después de la falla.

- a) **Antes de la falla.-** Antes de la de la falla se puede distinguir dos tramos el tramo “A” y el tramo “B”.

El tramo A se encuentra en la zona elástica siendo un tramo lineal en este tramo la deformación puede recuperarse al quitar la carga aplicada.

En el tramo B ya deja de ser lineal para tomar la forma de una curva de segundo grado hasta antes de la falla, en este tramo la deformación puede recuperarse pero no de forma completa como en el anterior tramo, es aquí donde ya se presentan las fisuras.

b) **Después de la falla.-** Una vez superado el esfuerzo máximo del suelo cal, el suelo con una carga mínima continua deformándose hasta cierto punto tramo “C”, donde comienza la restitución del esfuerzo del suelo, a partir de este punto el suelo nuevamente es capaz de comenzar a soportar los esfuerzos tramo “D”, después de este tramo ocurre una segunda falla para finalmente llegar a una deformación permanente con un esfuerzo constante, tramos “E” y “F”.

Para analizarla restitución del esfuerzo comparemos las siguientes fotos:



Probeta de suelo solo después de la falla



Probeta de suelo-cal después de la falla



Probeta de suelo solo después de la falla



Probeta de suelo-cal después de la falla



Probeta de suelo solo después de la falla



Probeta de suelo-cal después de la falla

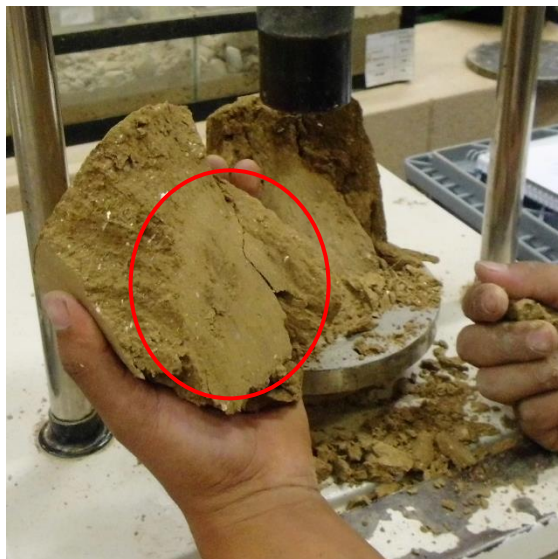
Observando las anteriores fotos de las probetas falladas en la prueba de compresión inconfiada de suelos, se puede apreciar una distinción en el tipo de falla entre el suelo solo y el suelo-cal.

En el suelo solo o sin cal presenta varias fisuras predominando fisuras verticales en toda la circunferencia de la probeta, con presencia de algunas fisuras inclinadas,

luego de la falla la destrucción es más fácil ya que con pequeño esfuerzo llega a destruirse desmoronándose la probeta de una forma fácil.

En cambio el tipo de falla en el suelo-cal después de haber superado el esfuerzo máximo admisible, predomina generalmente una fisura inclinada también está acompañada de fisuras pero más pequeñas, tanto verticales como inclinadas, se nota que después del esfuerzo máximo o la falla, la probeta no se destruye tan fácil como la del suelo sin cal, puesto que esa es la función de la cal de mantener las partículas del suelo más juntas, pero una vez ocurrida la falla, al seguir aplicando carga a la probeta en un cierto punto, hay un reacomodo de las partículas, (donde comienza la restitución) y nuevamente permite soportar esfuerzos pero ya más pequeños hasta llegar a una nueva falla.

Es necesario hacer notar que realizando un análisis visual de las probetas falladas de suelo-cal, como no se destruye completamente solo queda fraccionada en dos o tres partes, y en la parte interior se nota que existe una fricción entre las partes más grandes y que están firmes, siendo al parecer el efecto del trabajo después de la falla del suelo-cal, como se muestra la siguiente imágenes.



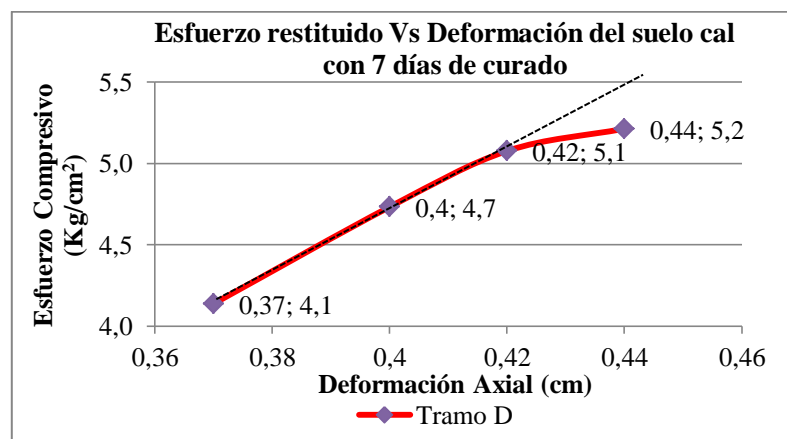
Fricción del suelo cal después de la falla en la línea de fisura



Las zonas marcadas de las imágenes muestran una fricción que al parecer ocurre al momento que ocurre la restitución, ya que la caída del esfuerzo después de la falla llega hasta cierto punto entre 0,48 y 0,52 del esfuerzo máximo y entre 1,70 a 1,90 de la deformación del esfuerzo máximo, con esto podemos afirmar que una vez que el suelo- cal llegue a su esfuerzo máximo y haya fallado, el esfuerzo caerá pero cuando este al 48% del esfuerzo máximo comenzara la restitución del esfuerzo hasta el 52% del esfuerzo máximo aproximadamente, para recién fallar completamente y la deformación continuará en aproximadamente 70% y 90%.

Centrándonos y analizando solo en la zona de restitución:

Figura 4.47 Análisis de la curva de restitución de la prueba de compresión en muestras de suelo cal con 7 días de curado.



Fuente: Elaboración propia.

Trazamos una tangente para analizar el ángulo que tiene la pendiente del esfuerzo de restitución tenemos:

$$\tan \alpha = \frac{Y}{X}$$

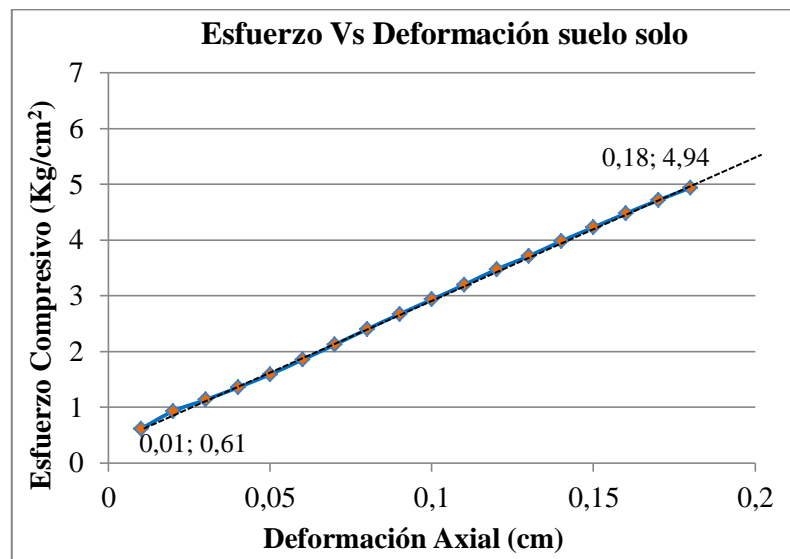
$$\alpha = \text{Arc tan} \frac{5.1 - 4.1}{0.42 - 0.37}$$

$$\alpha = \text{Arc tan} \frac{1}{0,05}$$

$$\alpha = 87,14^{\circ}$$

Ahora hacemos el mismo análisis anterior para la curva ascendente del esfuerzo deformación del suelo solo, teniendo en cuenta de que no parte del cero porque entre el cero y el primer punto tiende es una línea y si seguimos esa línea no tiene la tendencia de los demás puntos, entonces analizamos entre el primer punto y antes de la falla del suelo solo, trazamos una tangente entre sus puntos y sacamos su ángulo aproximado de la pendiente.

Figura 4.48 Análisis del inicio de la curva esfuerzo deformación del suelo solo.



Fuente: Elaboración propia.

$$\tan \alpha = \frac{Y}{X}$$

$$\alpha = \text{Arc tan} \frac{4,94 - 0,61}{0,18 - 0,01}$$

$$\alpha = \text{Arc tan} \frac{4,33}{0,17}$$

$$\alpha = 87,75^{\circ}$$

Una vez obtenidas las tangentes, claramente se puede notar que el ángulo de la pendiente de la curva de restitución tramo (D) es muy similar al ángulo de la recta de la zona elástica del suelo solo o sin cal, esto tiene relación por tratarse del mismo suelo.

El suelo-cal una vez de haber fallado hasta el punto donde sus partículas encuentran un reacomodo, comienza la restitución con un ángulo similar al del suelo solo, entonces cuando comienza la restitución en realidad, el trabajo que comienza a realizar es el suelo solo ya que al haber llegado a la falla el suelo-cal pierde su propiedad de ligante de las partículas del suelo y el suelo tiene la tendencia de soportar esfuerzos no con la misma capacidad que lo hace sin la cal pero aun así son todavía considerables hasta una cierta deformación, esta tendencia es hasta que nuevamente llega al punto de una nueva falla para ya entrar completamente en la zona plástica donde el suelo sufre una deformación continua e irreversible.

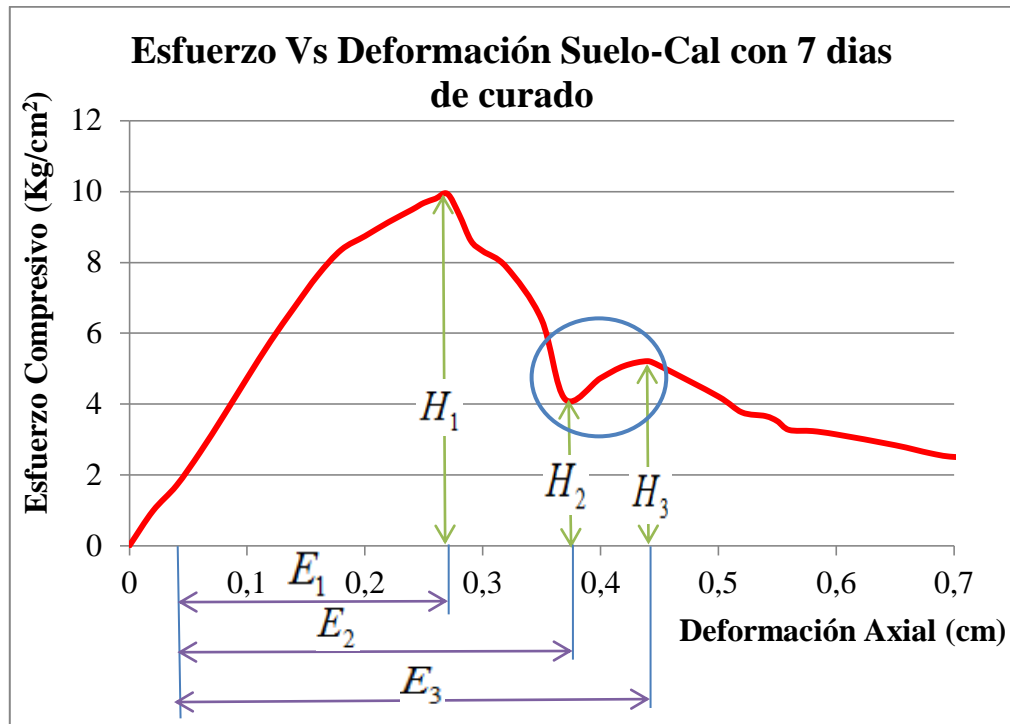
4.5.3.1 Coeficiente de restitución del esfuerzo.

Para determinar el coeficiente de restitución del esfuerzo, se realiza una relación del esfuerzo máximo de falla y el esfuerzo máximo restituido, esto se realizó para cada prueba realizada luego de la depuración de datos, para posteriormente hacer un análisis estadístico de los resultados obtenidos para después obtener un solo valor que representativo para el suelo que se está estudiando.

Como el fenómeno estudiado que es la restitución del esfuerzo ocurre antes del punto donde la deformación vale 0,7 cm y a partir de este punto la deformación tiende a ser

constante, verificando ésto en el análisis de los resultados de la prueba de compresión inconfiada de 40 probetas compactadas de suelo cal y depurar 8 probetas.

Figura 4.49 Esfuerzo máximo y de restitución suelo cal a 7 días de curado.



Fuente: Elaboración propia.

En el lugar marcado en la gráfica es donde se produce la restitución del esfuerzo después de haber ya fallado con el esfuerzo máximo admisible del suelo-cal.

De la gráfica anterior podemos ver que en el lugar marcado (zona de restitución) hay un valor mínimo, el cual es el inicio de la restitución y un máximo el nuevo valor máximo que puede volver a tomar el esfuerzo después de la falla, ambos los podemos relacionar al esfuerzo máximo admisible, lo mismo se realiza para la deformación.

Coefficiente de restitución inicial y el factor para encontrar la deformación para la restitución inicial.

$$CR_i = \frac{H_2}{H_1} \qquad E_i = \frac{E_2}{E_1}$$

Coefficiente de restitución final y el factor para encontrar la deformación para la restitución final.

$$CR_f = \frac{H_3}{H_1} \qquad E_f = \frac{E_3}{E_1}$$

Cuadro 4.32 Resultados del coeficiente de restitución del esfuerzo

Los resultados que a continuación se presentan son el promedio de cada una de las relaciones anteriores de cada muestra ensayada.

Coefficiente de Restitución inicial del esfuerzo CRi	Coefficiente de Restitución final del esfuerzo CRf	Coefficiente de Deformación inicial Ei	Coefficiente de Deformación final Ef
0,48	0,52	1,70	1,90

Fuente: Elaboración propia

4.5.4 Análisis Estadístico de la Restitución del Esfuerzo.

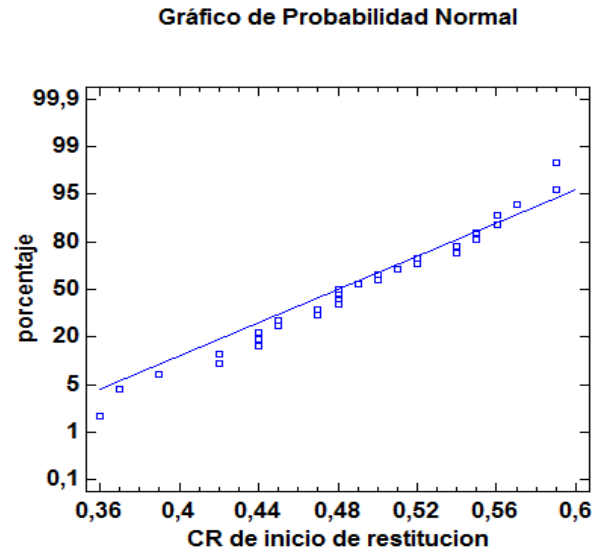
Con las relaciones encontradas anteriormente mencionadas para cada espécimen o probeta sometida a la prueba de compresión inconfiada del suelo-cal, se realizara un análisis estadístico para estimar el valor promedio de la restitución tanto inicial como final para el tipo de suelo estudiado.

Cuadro 4.33 Coeficiente de restitución del esfuerzo (inicio de la restitución)

CR inicio de rest.	Frecuencia "f"
0,36	1
0,37	1
0,38	0
0,39	1
0,4	0
0,41	0
0,42	2
0,43	0
0,44	3
0,45	2
0,46	0
0,47	2
0,48	4
0,49	1
0,5	2
0,51	1
0,52	2
0,53	0
0,54	2
0,55	2
0,56	2
0,57	1
0,58	0
0,59	2
Suma	31

INTERVALO	f	fa	Fr	Fra
0,36-0,39	3	3	0,10	0,10
0,39-0,43	2	5	0,06	0,16
0,43-0,47	7	12	0,23	0,39
0,47-0,51	8	20	0,26	0,65
0,51-0,55	6	26	0,19	0,84
0,55-0,59	5	31	0,16	1,00
suma	31			

Figura 4.50 Probabilidad normal del coeficiente CR del inicio de la restitución



Cuadro 4.34 Resumen estadístico para CR de inicio de la restitución

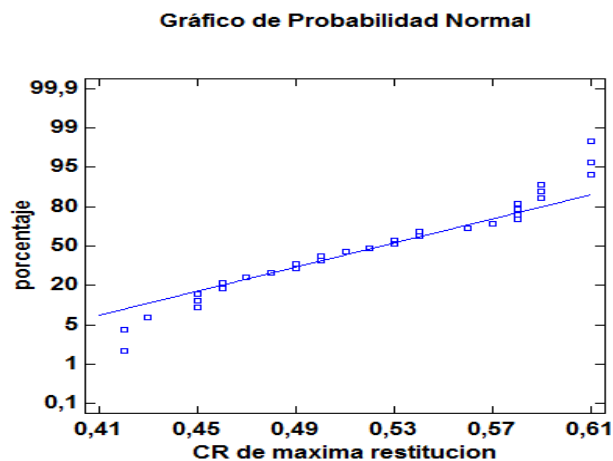
Recuento	31
Promedio	0,488
Mediana	0,48
Desviación Estándar	0,0626
Coficiente de Variación	12,613%
Mínimo	0,36
Máximo	0,59
Rango	0,23
Sesgo Estandarizado	-0,531
Curtosis Estandarizada	-0,621

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 4.35 Coeficiente de esfuerzo de restitución (fin de la restitución)

C.R. max.	Frecuencia "f"
0,42	2
0,43	1
0,44	0
0,45	3
0,46	2
0,47	1
0,48	1
0,49	2
0,5	2
0,51	1
0,52	1
0,53	2
0,54	2
0,55	0
0,56	1
0,57	1
0,58	4
0,59	3
0,6	0
0,61	3
Suma	32

Figura 4.51 Probabilidad normal del coeficiente CR de la restitución máxima



Cuadro 4.36 Resumen estadístico para CR de máxima restitución

Recuento	32
Promedio	0,521
Mediana	0,525
Desviación Estándar	0,0601
Coefficiente de Variación	11,689%
Mínimo	0,42
Máximo	0,61
Rango	0,19
Sesgo Estandarizado	-0,247
Curtosis Estandarizada	-1,513

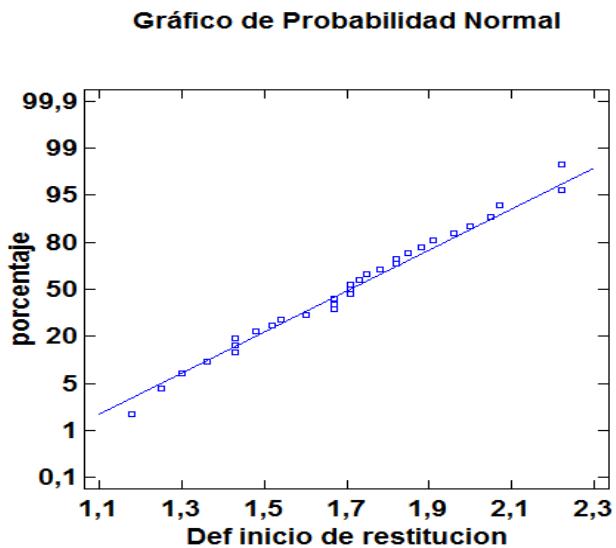
INTERVALO	f	fa	Fr	Fra
0,42-0,45	6	6	0,19	0,19
0,45-0,48	4	10	0,31	0,31
0,48-0,51	5	15	0,47	0,47
0,51-0,54	5	20	0,63	0,63
0,54-0,57	2	22	0,69	0,69
0,57-0,61	10	32	1,00	1,00
suma	32			

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 4.37 Coeficiente de la deformación de inicio de la restitución del esfuerzo

CR	Frecuencia "f"
1,2	1
1,3	2
1,4	4
1,5	3
1,6	1
1,7	7
1,8	5
1,9	2
2	3
2,1	1
2,2	2
Suma	31

Figura 4.52 Probabilidad normal del coeficiente "E" del inicio de la restitución



Cuadro 4.38 Resumen estadístico para el coeficiente de deformación del inicio de la restitución.

INTERVALO	f	fa	Fr	Fra
1,2-1,4	7	7	0,23	0,23
1,4-1,6	4	11	0,13	0,13
1,6-1,8	12	23	0,39	0,39
1,8-2,0	5	28	0,16	0,16
2,0-2,2	3	31	0,10	0,10
suma	31			

Recuento	31
Promedio	1,700
Mediana	1,71
Desviación Estándar	0,269
Coefficiente de Variación	15,858%
Mínimo	1,18
Máximo	2,22
Rango	1,04
Sesgo Estandarizado	0,091
Curtosis Estandarizada	-0,544

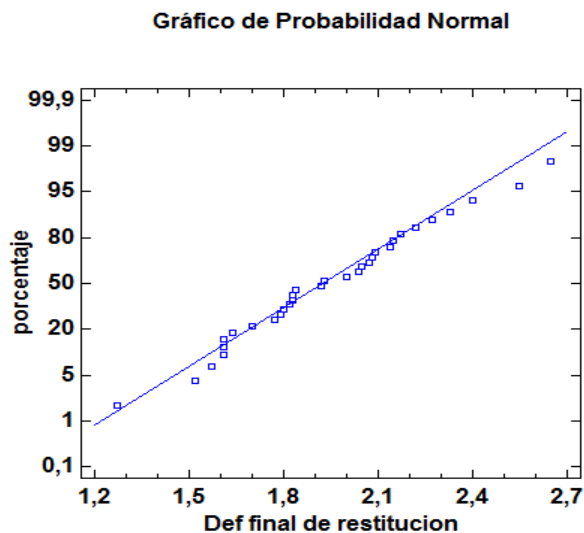
Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 4.39 Coeficiente de la deformación del fin de la restitución del esfuerzo

CR	Frecuencia "f"
1,3	1
1,4	0
1,5	1
1,6	5
1,7	1
1,8	7
1,9	2
2	3
2,1	4
2,2	3
2,3	2
2,4	1
2,5	1
2,6	1
Suma	32

INTERVALO	f	fa	Fr	Fra
1,3-1,5	2	2	0,06	0,06
1,5-1,7	6	8	0,19	0,25
1,7-1,9	9	17	0,28	0,53
1,9-2,1	7	24	0,22	0,75
2,1-2,3	5	29	0,16	0,91
2,3-2,6	3	32	0,09	1,00
suma	32			

Figura 4.53 Probabilidad normal del coeficiente "E" de la restitución máxima



Cuadro 4.40 Resumen estadístico para el coeficiente de deformación de la máxima restitución del esfuerzo

Recuento	32
Promedio	1,94
Mediana	1,925
Desviación Estándar	0,311
Coefficiente de Variación	15,998%
Mínimo	1,27
Máximo	2,65
Rango	1,38
Sesgo Estandarizado	0,5153
Curtosis Estandarizada	-0,064

Fuente: Elaboración propia.

4.6 ANÁLISIS DE LA COMPACTACIÓN DEL SUELO SOLO Y SUELO-CAL REMOLDEADO A DIFERENTES DÍAS DE CURADO

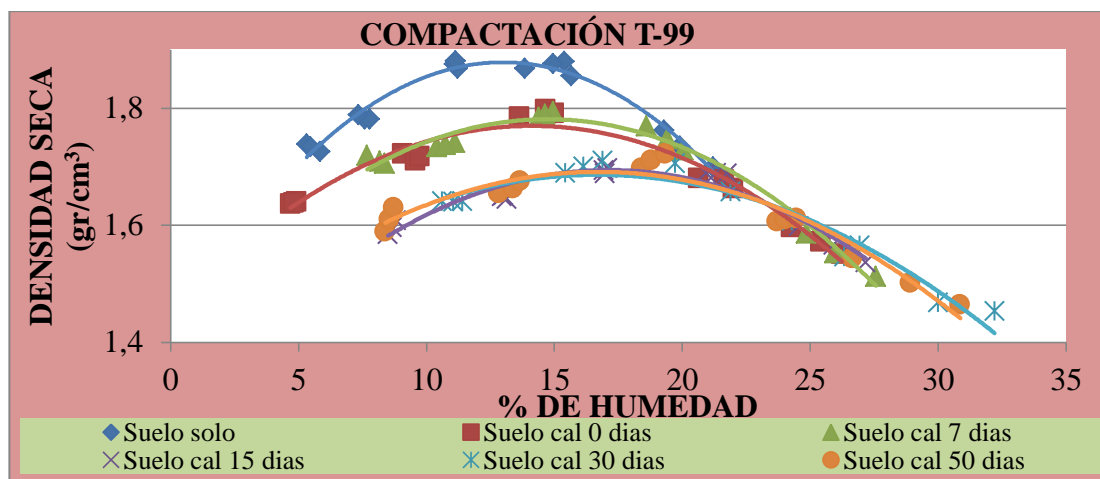
Para analizar la densidad se realizó un remoldeo de las probetas de suelo-cal que se utilizó en la prueba de compresión inconfiada, continuación se presenta un cuadro con un promedio de los resultados de la prueba de Proctor modificado realizado al suelo cal a diferentes días de curado.

Cuadro 4.41 Resultados de la densidad del suelo cal remoldeado a diferentes edades

DENSIDAD Y HUMEDAD ÓPTIMA					
Descripción	Días de curado	Dens. Max. (gr/cm ³)	H. OP. (%)	% que disminuye la Dens. Max. (%)	% que aumenta H. OP. (%)
Sin Cal	0	1,882	12,967	-	-
Con Cal	0	1,772	14,433	-5,86	11,31
	7	1,780	14,833	-5,43	14,40
	15	1,695	17,167	-9,93	32,39
	30	1,662	17,067	-11,19	31,62
	50	1,698	17,000	-9,79	31,11

Fuente: Elaboración propia

Figura 4.54 Compactación del suelo solo y suelo-cal remoldeado a diferentes edades de curado



Fuente: Elaboración propia

4.6.1 Densidad y Humedad Óptima del Suelo-Cal Remoldeado a Diferentes Edades de Curado

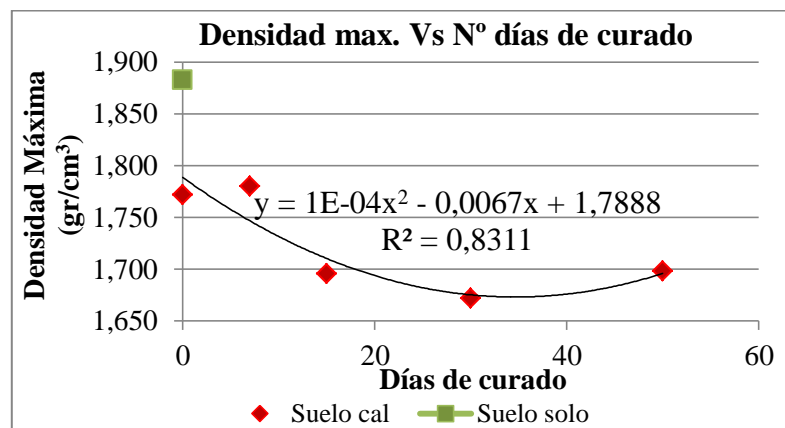
Con la adición de la cal y a medida que la edad de curado avanza se evidencia una disminución de la densidad y un aumento de la humedad óptima.

Con simplemente la adición de la cal y sin ninguna edad de curado se evidencia una disminución de la densidad en un aproximado de 5,86% y un aumento de la humedad óptima de 11,31% llegando una máximo porcentaje de aumento tanto en la densidad como en la humedad óptima a los 30 días de curado y no a los 50 días, un máximo de disminución de la densidad que es de 11,19% y un máximo de aumento de la humedad óptima de 31,66%.

Estos cambios tanto en la densidad como en la humedad óptima es debido a la reacción entre la cal y el suelo, lo que nos indica que estas reacciones asociada también a la absorción de agua en la compactación se presenta aproximadamente hasta los 30 días de curado, donde la cal sigue su proceso de carbonatación haciendo que siga aumentando su resistencia a compresión pero ya no disminuya la densidad ni aumenta la humedad óptima.

4.6.2 Evolución de la Densidad del Suelo-Cal Remoldeado a Diferentes Edades de Curado

Figura 4.55 Evolución de la densidad a diferentes edades de curado

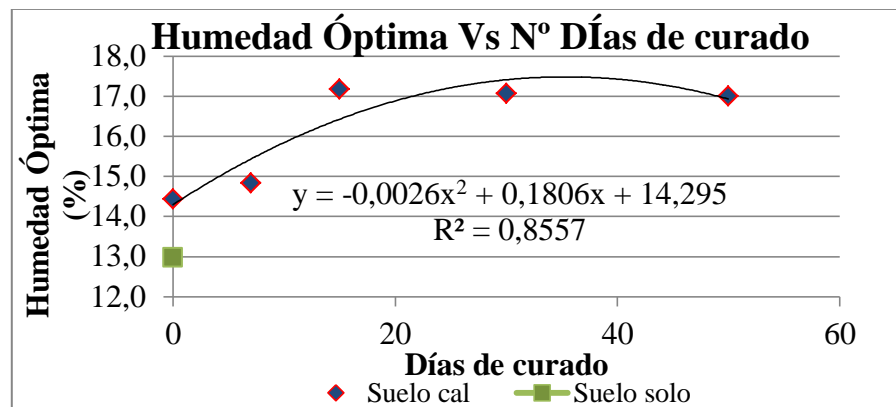


Fuente: Elaboración propia.

Se nota una variación de la densidad al remoldear el suelo cal, mientras la edad de curado avanza hay una disminución de la densidad, la disminución más evidente se presenta entre los 0 a 30 días esto se debe a que esta edad es donde se presenta la mayor reacción entre la cal y el suelo, haciendo también que la resistencia a compresión en esta edad tenga un mayor aumento, pasada esta edad la tendencia es a recuperarse nuevamente la densidad, si bien la variación de estos datos son valores pequeños, pero son muy sensibles para el cálculo de otras propiedades como el C.B.R.

4.6.3 Evolución de la Humedad Óptima del Suelo Cal a Diferentes Edades de Curado

Figura 4.56 Evolución de la humedad óptima a diferentes edades de curado



Fuente: Elaboración propia.

Lo contrario a lo sucedido con la densidad máxima la humedad óptima la tendencia es a aumentar entre los 0 a 30 días comprobándose así que en estos días es donde la cal tiene mayor reacción, siendo en este periodo donde la carbonatación es mayor lo que hace que gane resistencia.

4.7 EXPRESIONES, COMPARACIONES DEL SUELO SOLO O SIN TRATAR CON EL SUELO -CAL.

A continuación se hace las comparaciones de los ensayos realizados para el suelo solo y para el suelo-cal.

4.7.1 Resumen de Resultados de la Caracterización Física

Cuadro 4.42 Resultados y comparación de la caracterización física

Caracterización física		
Variable	Suelo solo	Suelo + 4% de cal hidratada
Contenido de humedad (%)	3,70	3,20
Granulometría por tamizado	% Pasa No 4	100,00
	% Pasa No 10	100,00
	% Pasa No 40	99,92
	% Pasa No 200	91,34
Granulometría por Hidrómetro (%) de arcilla	15,37	5,73
Limite liquido LL(%)	36,65	28,18
Limite plástico (%)	23,28	16,45
Índice de Plasticidad (%)	13,37	11,73
Peso específico (g/cm³)	2,71	2,78

Fuente: Elaboración propia

Comparando el suelo solo con el suelo cal, claramente se nota una variación en todos los resultados comenzando desde la modificación granulométrica debido a que la cal hidratada tiene una granulometría mayor a la del suelo, esto se modifica al realizar la mezcla con el suelo, también se nota una considerable reducción en el porcentaje de arcilla debido al efecto estabilizante que tiene la cal provoca que los enlaces moleculares haciendo que la sedimentación sea más ligera de la mezcla suelo-cal, en cuanto al comportamiento de los limites se nota que la cal disminuye la plasticidad del suelo.

4.7.2 Resumen de Resultados de la Caracterización Mecánica

Cuadro 4.43 Resultados y comparación de la caracterización mecánica

Caracterización mecánica		
Variable	Suelo solo	Suelo-cal
Densidad máxima (gr/cm³)	1,88	1,77
Humedad Óptima (%)	12,97	14,43
Relación de soporte del suelo (C.B.R.) (%)	4,91	19,87

Fuente: Elaboración propia

4.7.3 Resumen de Resultados de la Caracterización Química

Cuadro 4.44 Resultados y comparación de la caracterización química

Caracterización química		
Variable	Suelo solo	Suelo + 4% de cal hidratada
Ph de los suelos	10,52	13,50
Ph de la cal	>14	

Fuente: Elaboración propia

4.7.4 Resumen de Resultados de las Propiedades Mecánicas en Estudio

Cuadro 4.45 Resultados y comparación de las propiedades mecánicas en estudio.

Descripción	Días de curado	Deformación de la muestra ΔL (cm)	Esfuerzo Max. Aplicado σ (Kg/cm ²)	Dens. Max. (gr/cm ³)	H. OP. (%)
Sin Cal (suelo solo)	0	0,310	6,804	1,882	12,967
Suelo Cal (dosif.4%)	0	0,272	8,292	1,772	14,433
	7	0,245	9,777	1,780	14,833
	15	0,187	11,184	1,695	17,167
	30	0,171	12,854	1,662	17,067
	50	0,169	14,039	1,698	17,000

Fuente: Elaboración propia

4.8 CICLOS DE HUMEDECIMIENTO Y SECADO EN MUESTRAS DE SUELO CAL

Se realizó el ensayo de durabilidad por humedecimiento y secado de mezclas de suelo-cal originalmente normada para suelo-cemento en la Norma de ensayo VN - E21 – 66, en la estable que luego del curado de las probetas de siete días, se las debe saturar un tiempo de 5 horas y un secado a horno de 72 horas a 71 °C.

Este ensayo se realizó en dos etapas a dos diferentes edades de curado.

a) Primera etapa

En esta primera etapa como en la norma se indica se realizó este ensayo a los 7 días de curado para 25 probetas de suelo-cal, las cuales al entrar en contacto con el agua luego de unos 30 minutos comenzaron a desmoronarse es decir las probetas que eran de forma cilíndrica iban perdiendo su forma hasta el punto de desmoronarse o desarmarse completamente antes de las 5 horas, aproximadamente a las 3 horas hasta el punto en que todo se volvió una masa completamente saturada (barro) y el cual ya no se pudo continuar con el ensayo que el siguiente paso era el secado en horno para después hacer los cálculos de absorción de agua, pérdida de peso y resistencia a compresión.

En las siguientes imágenes se puede ver como quedaron las probetas después de la primera saturación realizada.



Probetas de suelo-cal después de 7 días de curado



Probetas de suelo-cal en la primera saturación

A las 2 horas de saturación ya deformadas A las 5 horas completamente deformadas (barro)

Como en esta primera etapa con las muestras con un curado de 7 días no se pudo realizar el ensayo, puesto que el mismo es para suelo-cemento, y el cemento tiene mayor resistencia q la cal y un fraguado más rápido, se optó por una segunda etapa con muestras con un mayor tiempo de curado.

b) Segunda etapa

Como en la primera etapa no funcionó el ensayo, ya que las muestra tenían un curado de solo 7 días, se realiza esta segunda etapa con muestras de suelo cal pero con una edad de curado de 30 días, ya que demostró con la resistencia a compresión que a esta edad el suelo adquiere mayor resistencia, y que también a esta edad las demás propiedades mecánicas estudiadas en su relación con el tiempo a la edad de 30 días tienen una inflección en esta relación, es que se opta por realizar este ensayo con esta edad de curado, la misma que dieron resultados satisfactorios, puesto que al realizar el primer humedecimiento y hasta el final no se desmoronaron ni se desarmaron las probetas.

Para este ensayo se realizó 2 probetas por ciclo haciendo un total de 24 probetas



Humedecimiento del Suelo cal en el primer ciclo



Suelo seco y cepillado

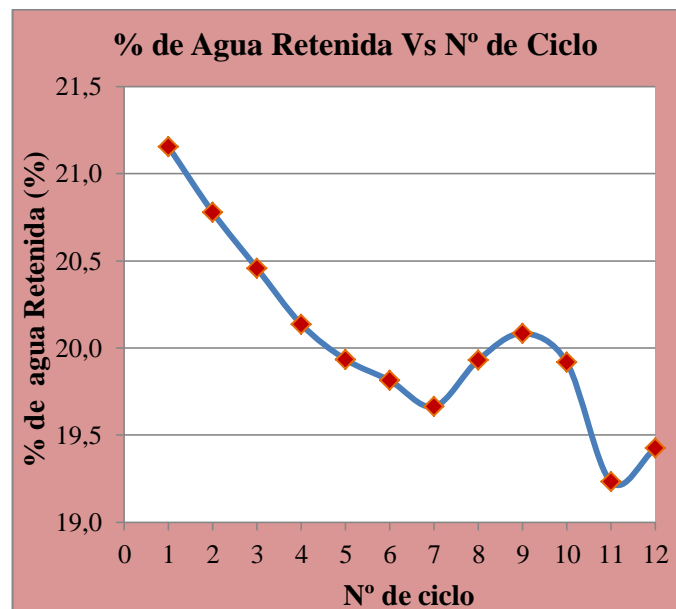
Los resultados de este ensayo se presentan a continuación:

4.8.1 Absorción de Agua del Suelo Cal en los Ciclos de humedecimiento y Secado

4.8.1.1 Absorción de agua del suelo cal en las muestras que se rasparon

Figura 4.57 Absorción de agua del suelo cal de las muestras que se rasparon con cepillo.

CICLO N°	Agua absorbida (g)	Agua absorbida (%)
1	343,917	21,154
2	336,145	20,778
3	330,570	20,457
4	324,422	20,136
5	320,554	19,934
6	318,243	19,813
7	315,383	19,664
8	320,500	19,931
9	323,425	20,084
10	320,233	19,917
11	307,100	19,231
12	310,800	19,425

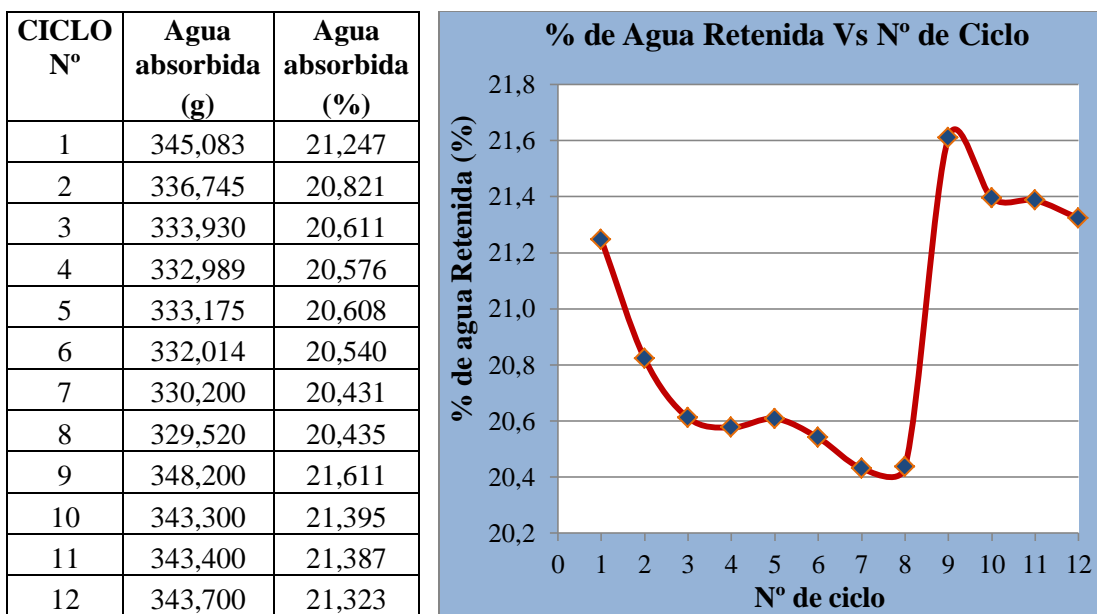


Fuente: Elaboración propia

Se puede notar que en las muestras que desgastaron con cepillo la absorción de agua tiene una cierta tendencia se podría decir lineal, la absorción hasta el ciclo N° 7 va reduciendo esto puede relacionarse con la carbonatación de la cal donde aún se sigue curado y ganando resistencia y reduciendo su permeabilidad puesto a que por más que se raspe y desgaste después de cada ciclo las probetas esto no influye para que la absorción sea mayor, luego del ciclo N° 7 la absorción se hace inestable tendiendo a aumentar y a disminuir ya no tiene una trayectoria definida, podemos decir que a partir de este ciclo el suelo se envejece y la cal ya no tiene la misma permeabilidad que al inicio.

4.8.1.2 Absorción de agua del suelo cal de en las muestras que no se rasparon

Figura 4.58 Absorción de agua del suelo cal de las muestras que no se rasparon



Fuente: Elaboración propia

Algo similar que con las muestras que se desgastaron, sucede con las muestras que no se desgastaron hasta el ciclo N° 8 la absorción de agua presenta una cierta trayectoria de menor a mayor notándose el efecto de carbonatación de la cal donde la permeabilidad sigue reduciéndose, luego de este ciclo la trayectoria se vuelve inestable, y volviendo incluso a absorber la misma cantidad de agua que en el primer

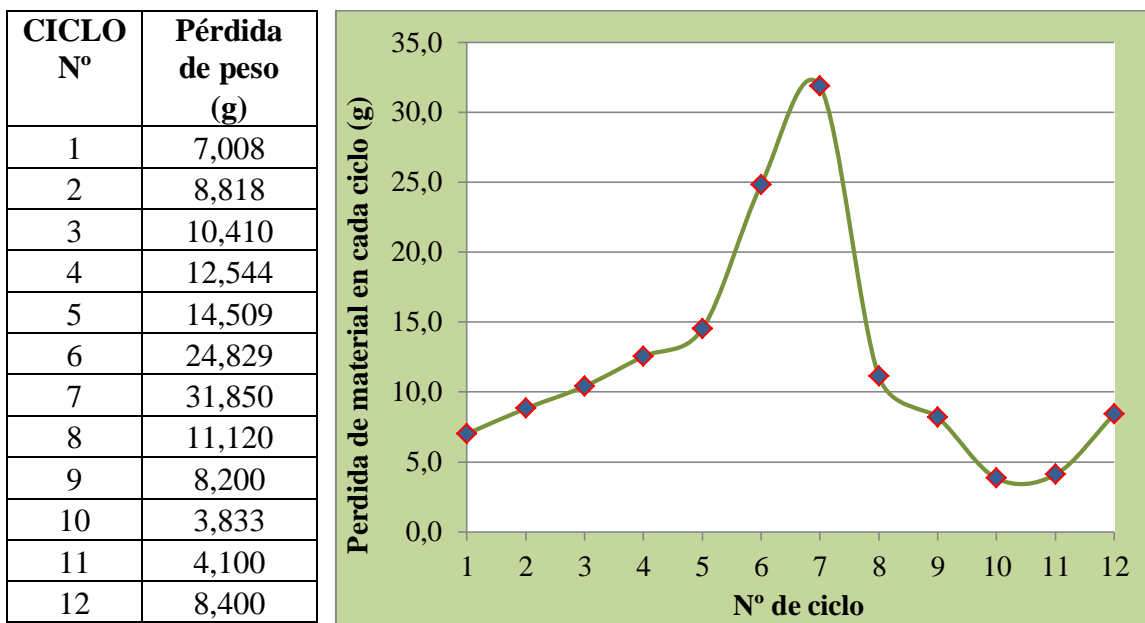
ciclo, notándose en este ciclo una pérdida de la permeabilidad y la cal va perdiendo de apoco sus propiedades.

También se midieron el diámetro y la altura con un vernier en cada ciclo, donde no se mostraron cambios volumétricos por lo que no se realiza el análisis de esto.

4.8.2 Pérdida de Material del Suelo Cal en los Ciclos de Humedecimiento y Secado

Luego de cada ciclo se rasparon las muestras, ahora se mostrara la pérdida de peso debido a la pérdida de material después de cada ciclo:

Figura 4.59 Pérdida de material en cada ciclo



Fuente: Elaboración propia

La anterior tabla y el respectivo grafico corresponden a la pérdida de peso debido a la pérdida de material por el raspado con cepillo después de salir del horno en cada respectivo ciclo, el gráfico nos ilustra que la pérdida de material en toda la prueba, es decir en los 12 ciclos es variado, presentando entre el ciclo 1 y el ciclo N° 5 una pérdida relativamente creciente con una tendencia lineal, donde la perdida es relativamente baja no superando los 15 gramos, a partir del ciclo N° 5 al ciclo N° 7 se

nota un pico una pérdida máxima considerable llegando hasta aproximadamente unos 31,8 gramos, donde a partir de este punto reducir de golpe la pérdida hasta un mínimo de aproximadamente 3,8 gramos en el ciclo N° 10.

Si comparamos la absorción del agua en cada ciclo con la pérdida de material en cada ciclo observamos que mientras el suelo va reduciendo la absorción de agua, el desgaste va aumentando, este aumento del desgaste es debido a que en la muestra se encuentra bien compactada y el relieve superficial de la muestra es liso y uniforme además que al salir del horno se encuentra seco lo cual le endurece a la muestra, experimentalmente se notó que la pérdida de material a partir del segundo ciclo empezó a ser mayor ya que a poco cada ciclo se va perdiendo la superficie lisa de la muestra debido al molde lo que hace que el desgaste sea más fácil y mayor.

4.4 PROPUESTA DEFINITIVA.

Ya es conocido que un suelo fino estabilizado con cal mejora considerablemente sus propiedades físicas y especialmente mecánicas, que en muchos casos es la alternativa para cumplir con los requerimientos de condiciones de diseño, y también utilizar los materiales que se encuentra en el lugar donde se realiza el proyecto.

Con este trabajo, lo que se pretende es demostrar de qué manera evolucionan o cambian las propiedades mecánicas estudiadas en un suelo fino estabilizado con cal lo cual se logró satisfactoriamente ya que los principales cambios conseguidos son elevar considerablemente la resistencia a compresión, como así también un aumento del C.B.R. y una disminución de la deformación, también la importancia de la edad o tiempo de curado del suelo cal y la relación directa que tiene esta edad en la evolución de las propiedades mecánicas en estudio.

Según normas internacionales recomiendan un tiempo de curado óptimo de 7 días con el cual el suelo ya es capaz de resistir esfuerzos, lo cual también queda demostrado en este documento ya que a esta edad el suelo cal alcanzó un aumento del 43% de la resistencia a compresión comparando con la resistencia que antes tenía el suelo solo ,

y en obra en una subrasante a esta edad ya se puede abrir al tránsito vehicular o a la maquinaria para continuar con los trabajos necesarios.

Con todos los estudios de laboratorio realizados y una edad de curado entre 0 a 50 días, se demuestra que la mejor edad de curado es hasta los 30 días, en que la cal puede aumentar aproximadamente unos 88,9% de la resistencia a compresión, y además de aumentar la resistencia del suelo estabilizado con cal a la edad de curado de 30 días es capaz de soportar ciclos de humedecimiento y secado cosa que no sucede a la edad de los 7 días de curado ya que a esta edad si el suelo estabilizado con cal llega tener contacto con el agua en caso extremo la saturación, pierde completamente su estabilización volviéndose lodo, perdiendo completamente sus propiedades físicas y especialmente mecánicas como es la capacidad de soportar esfuerzos, cosa que no sucede con un curado de 30 días ya que es capaz de soportar 5 horas de humedecimiento completamente saturado y sin sufrir ningún deterioro como pasó a los 7 días; ésto es muy importante y relevante puesto a que si este suelo estabilizado con cal se tratara de una subrasante en alguna obra en campo en la construcción de una carretera o camino teniendo un buen curado siguiendo los debidos cuidados recomendados podemos garantizar la estructura que se construirá por encima de este ya que si llegara a entrar en contacto con el agua por la razón que fuere ya sea elevación del nivel freático o deficiencia en el drenaje esta subrasante no tendrá ningún problema de deterioro especialmente por filtración.

También se logró demostrar la restitución del esfuerzo que ocurre después de superar esfuerzos máximos, un suelo estabilizado con cal, en este caso el suelo estudiado según la clasificación AASTHO es un suelo A-6₍₁₅₎ y según la clasificación SUCS un CL tratándose de arcillas inorgánicas de baja compresibilidad con una dosificación de cal de 4% con relación al peso del suelo seco, lo que se presenta después de la falla a compresión de este suelo-cal, tiene un comportamiento muy particular, que es la restitución o la recuperación del esfuerzo, que tiene la tendencia a seguir trabajando hasta llegar a una nueva falla un poco menor al esfuerzo máximo. Una vez superado el esfuerzo máximo o la primera falla, la caída del esfuerzo es acelerada hasta que el

suelo encuentra un reacomodo de sus partículas donde frena la caída acelerada del esfuerzo, para iniciar la restitución hasta un nuevo esfuerzo para luego fallar completamente, pero ya la caída del esfuerzo después de ocurrida la restitución es mucho más lenta.

El fenómeno de la restitución ocurre debido a que la cal es el agente cementante o ligante que hace que las partículas del suelo estén juntas y al llegar a la falla por compresión esta propiedad termina, pero al mismo tiempo el suelo-cal después de la falla queda menos destruido es decir, el suelo se separa en pedazos más grandes lo que permite un nuevo reacomodo de las partículas del suelo pero la deformación continúa, hasta un punto donde el reacomodo permite esta vez al suelo comenzar a soportar nuevos esfuerzos, a diferencia del suelo sin cal donde las fisuras son más próximas y donde el suelo compactado se desmorona más fácilmente quedando en pedazos mucho más pequeños.

Conociendo esta propiedad del suelo-cal aplicado a la estabilización de subrasantes en carreteras, una aplicación práctica que se le podría dar, es que en el caso de falla de la subrasante estabilizada, ésta puede ser controlada de alguna manera, mientras no se exceda el esfuerzo de restitución, se tiene la seguridad de que aún ésta puede seguir soportando carga. Ésto se puede realizar con un control del tráfico según el peso del vehículo, lo que puede permitir ganar tiempo hasta encontrar una alternativa para dar solución.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 CONCLUSIONES.

- Se completó de manera positiva el objetivo general demostrando que el tiempo de curado o edad de un suelo fino cohesivo que se ha estabilizado con cal, tiene una relación directa en la evolución de las propiedades mecánicas estudiadas, en especial un gran aumento en la resistencia a compresión, aumento en la humedad óptima, disminución de la deformación y disminución de la densidad.
- Se demuestra que al superar los esfuerzos máximos un suelo estabilizado con cal, el esfuerzo se restituye, en este caso un suelo A-6₍₁₅₎ con una dosificación del 4% de cal la restitución del esfuerzo se encuentra aproximadamente entre 48% al 52% del esfuerzo máximo.
- Con el suelo cal estudiado se encontró una relación directa del aumento de la resistencia a compresión con el tiempo de curado con la siguiente ecuación:

$$\sigma_t = -0,002 * t^2 + 0,2135 * t + 8,3454$$
 siendo: “ σ_t ” el esfuerzo al tiempo deseado, y “ t ” edad en días.
- La resistencia a compresión a los 7 días de curado tiene un aumento aproximado del 43% de la resistencia que tiene el suelo sin la cal y logrando un aumento aproximado de la resistencia de 106% a la edad de 50 días de curado.
- Conforme aumenta la resistencia a compresión del suelo cal, la deformación contrariamente disminuye, a la edad de 7 días de curado la deformación disminuyó un 20,97% y a los 50 días un 45,48%.

- En cuanto a la densidad, también la tendencia es disminuir, a los 7 días un 5,86% y a los 30 días un 11,19% en cambio la humedad óptima tiende a aumentar con la edad a los 7 días un 14,40% y a los 30 un 31,62% todos relacionados con valores obtenidos del suelo solo es decir suelo sin cal.
- En las edades en las que presenta mayores cambios el suelo cal comprende entre los 0 a 30 días de curado, ya que entre los 30 a 50 días no se logran grandes cambios.
- El suelo cal con 7 días de curado alcanzó $9,777 \text{ Kg/cm}^2$ de resistencia a compresión, al remoldear su resistencia es $7,986 \text{ Kg/cm}^2$, disminuyendo aproximadamente 18 %, pero aún mantiene una resistencia mayor a la del suelo solo, que es $6,804 \text{ Kg/cm}^2$.
- Un suelo fino estabilizado con cal con una edad de curado de 7 días no es capaz de resistir ciclos de humedecimiento y secado en laboratorio, ya que al entrar en contacto en un par de horas saturado el suelo se desmorona quedando una especie de barro.
- La edad óptima de curado según este estudio es una edad de 30 días, donde el suelo cal evoluciona favorablemente en especial aumento de resistencia y disminución de la deformación y algo muy importante que es capaz de resistir ciclos de humedecimiento y secado, un humedecimiento completamente saturado por un tiempo de 5 horas sin sufrir ningún daño en las muestras de suelo cal.

5.2 RECOMENDACIONES.

En cuanto al desarrollo de este trabajo no se tuvo mayores inconvenientes pero se hacen algunas recomendaciones para tener en cuenta en futuras investigaciones.

- No tener un contacto directo de la piel con la ni con la cal hidratada mucho menos con la cal viva, en este caso se trabajó con cal hidratada pero de igual forma al estar en contacto con la piel puede ocasionar severos daños como quemaduras e irritaciones, para trabajar en la mezcla con el suelo ya sea para caracterización o para la compactación en todo momento utilizar guantes para las manos y proteger las zonas del cuerpo propensas a estar en contacto con la cal.
- Al momento de realizar los límites, especialmente el límite plástico se debe usar una balanza con aproximación mínima de 0,01 o más, ya que si varía el segundo decimal influye bastante en obtener dicho límite lo que nos puede afectar para realizar otros estudios y la clasificación del suelo.
- Tener cuidado en el desmolde en la fabricación de las probetas para la prueba de compresión, tanto del suelo solo como la del suelo-cal, en este caso se realizó las probetas en un molde T-99 desmoldable que fue necesario colocar en su interior una hoja de papel porque, al no colocarlo el suelo se queda pegado a sus paredes y al abrir y querer desmoldar la probeta se parte es dos quedando destruída cosa que no ocurre al colocar el papel.
- Se recomienda trabajar con cuidado en la preparación de los materiales, tener cuidado con la sensibilidad de los equipos y especialmente al pesar la cal para la mezcla porque al ser una dosificación pequeña, no requiere de mucha cantidad lo que si se excede de esta cantidad se estaría trabajando con otras condiciones.
- Al momento de realizar la prueba de compresión simple se puede controlar la carga o la deformación, es recomendable por comodidad controlar la deformación y anotar los valores del anillo de carga debido a que la

deformación de la probeta es más rápida, el dial gira mucho más rápido a comparación del anillo.

- En la prueba de compresión en el suelo-cal como el estudio se centra después de la falla se recomienda tratar de anotar todos los valores posibles después que el suelo falle, debido a que así se tendrán muchos más valores y se obtendrá una gráfica más representativa donde muestra el fenómeno estudiado que es la restitución.
- Para la fabricación de las probetas de suelo-cal se puede aumentar entre 1% hasta 2% la humedad óptima, debido a que la cal al entrar en contacto con el agua hace que el agua se evapore entre estos porcentajes.
- La aplicación práctica de este estudio no está limitado solo a subrasantes como se realizó el estudio sino que también podría aplicarse a otro tipo de construcciones como pisos aceras o lugares donde el suelo tenga problemas con filtraciones de agua.