

1.1 Introducción

Un grave problema en la Ingeniería de Pavimentos y en general en proyectos de Ingeniería Civil consiste en trabajar sobre suelos con poca resistencia y con propiedades deficientes que producen deterioro en las obras en corto tiempo.

En proyectos viales, la solución más utilizada consiste en remplazar este tipo de suelos, y en algunas ocasiones se intenta mejorar las propiedades de los suelos con productos existentes en el mercado los cuales pueden llegar a solucionar el problema de una manera satisfactoria pero su elevado costo hace que en nuestro país no sea viable su utilización en todos los suelos que necesiten ser tratados.

La estabilización de un suelo es un proceso orientado hacia el mejoramiento integral de sus propiedades geomecánicas: el incremento de la resistencia al esfuerzo cortante y la disminución de su compresibilidad y su permeabilidad. La estabilidad de un suelo está asociada a su capacidad portante y es una función drenables y no drenables contenidas en él.

Existen diversos tipos de estabilización y mejoramientos de suelos para carreteras, en donde es importante tener conocimiento de conceptos teóricos, prácticos y experimentales sobre características y propiedades de los suelos en especial el comportamiento de los suelos finos, con la finalidad de obtener el método apropiado de estabilización que puede ser: Estabilización mecánica, estabilización química o por medios químicos, estabilización física o granulométrica, estabilización físico-química, estabilización por medios electrónicos, estabilización por drenaje y estabilización por empleo de calor y calcinación, para un tipo de suelo en especial teniendo en cuenta consideraciones climatológicas, regionales, criterios técnicos de resistencia-durabilidad y aspectos económicos.

Es frecuente que el ingeniero no encuentre los suelos adecuados que ha de utilizar en algún lugar específico para un determinado fin. Esta situación abre obviamente tres posibilidades de decisión: Eliminar el material que esté por debajo de las especificaciones solicitadas; sustituirlo por otro de características adecuadas; o

modificar las propiedades del material existente, para hacerlo capaz de cumplir los requerimientos exigidos.

Se identifican productos estabilizantes que reúnan las especificaciones técnicas económicos adecuados para su utilización en el mejoramiento de las propiedades químicas, físicas y mecánicas de los suelos finos (limos y arcillas), de diferente naturaleza.

1.2 Justificación

Con la estabilización de suelos arcillosos plásticos se pretende mejorar las propiedades de los suelos que son arcillas como ser: las propiedades físicas y mecánicas. Utilizando como mineralizadores sulfato de calcio y yeso.

Se determinó como zonas de estudio los barrios Los Chapacos, Los Olivos, La Nueva Terminal y Fortaleza, estos suelos son de características expansivos.

Con los resultados que se determinen en el laboratorio se usará para una subrasante, eligiendo una alternativa para la estabilización de suelos arcillosos plásticos usando como mineralizadores sulfato de calcio y yeso.

1.3 Diseño teórico

1.3.1 Planteamiento del problema

1.3.1.1 Situación problemática

No siempre se encuentra el suelo adecuado que garantice la estabilidad y durabilidad de una explanada. Si unimos a ello la creciente importancia medioambiental y la presión social por minimizar la apertura de nuevos préstamos y vertederos necesarios para el movimiento de tierras de una infraestructura, es evidente que se debería esforzar en utilizar materiales calificados como tolerables, marginales e incluso inadecuados.

Una gran parte de la superficie terrestre está cubierta por suelos parcialmente saturados, y son estos suelos los que son susceptibles a presentar expansiones. Son muchos los países que sufren los efectos de los suelos plásticos, y a pesar de que es difícil estimar el monto total de las afectaciones globales, claramente se observa que es un problema a nivel mundial.

La problemática en Tarija es que los suelos en su mayoría son suelos arcillosos, y a la hora de construir una carretera se encuentran con este tipo de suelos los cuales afectan a las sub rasantes cuando llueve ya que estos suelos se alteran y cambian su volumen, haciendo que las capas de rodadura no cumplan su vida útil.

Por parte otra en el departamento se mejora el suelo estabilizando suelos finos con suelos granulares, pero muchas veces no da resultados favorables esto se debe a que los suelos no están mezclados homogéneamente, no tienen una buena compactación, otra solución sería cambiar todo el suelo pero esto implica un costo elevado.

Para evitar este tipo de problemas en las carreteras que se van a construir se busca nuevas alternativas para mejorar la estabilización de suelos finos, por ello el interés de este trabajo es de plantear la posibilidad de investigar sobre la estabilización de suelos arcillosos plásticos con mineralizadores en ambientes sulfatados o yesíferos.

1.3.1.2 Problema

¿Los suelos arcillosos tienen por lo general propiedades y características no suficientes para utilizar en carreteras, al mezclar con contenidos de sulfato de calcio y yeso como mineralizadores puede mejorarse estas propiedades?

1.3.2 Objetivos de investigación

1.3.2.1 Objetivo general

Evaluar la estabilización de suelos arcillosos utilizando mineralizadores sulfatados o yesíferos, con cantidades que mejoren las propiedades físicas y mecánicas para obtener una alternativa de solución para la utilización de suelos arcillosos en subrasantes de carreteras.

1.3.2.2 Objetivos específicos

- Fundamentar la teoría de estabilización de suelos con mineralizadores que contienen sulfatos y yesos.
- Hacer el análisis comparativo de un suelo natural, con un suelo estabilizado con sulfato de calcio y yeso.
- Identificar las zonas de aplicación del proyecto que tengan suelos arcillosos para estabilizar utilizando como mineralizadores sulfato de calcio y yeso.
- Hacer la caracterización de los suelos arcillosos plásticos.
- Realizar la estabilización de suelos arcillosos plásticos utilizando como mineralizadores sulfato de calcio y yeso con diferentes porcentajes para obtener la combinación óptima.
- Establecer conclusiones y recomendaciones sobre la investigación realizada.

1.3.3 Hipótesis

Si los suelos compuestos por arcillas que tienen características y propiedades bajas se mezclan con un porcentaje óptimo de mineralizadores, entonces se podrá obtener un mejoramiento en las propiedades del suelo estabilizado con mineralizadores, incrementando su resistencia.

1.3.4 Definición de variables conceptuales y operacionales

- Variable Independiente: Suelo arcilloso.
- Variable Dependiente: Propiedades del suelo estabilizado con mineralizadores.

Variable independiente

Variable	Dimensión	Indicador	Valor o acción
Suelos arcillosos	Granulometría	A-6 – A-7	Norma A.A.S.T.H.O
	Límites	>10	
	Compactación	1800-1900 kg/cm ²	
	C.B.R.	<6	

Variable dependiente

Variable	Dimensión	Indicador	Valor o acción
Suelo estabilizado con mineralizadores	C.B.R.	>6	Norma A.A.S.T.H.O
	Compresión simple	>1200	

1.4 Diseño metodológico

1.4.1 Unidades de estudio y decisión muestral

1.4.1.1 Unidades de estudio

- Estabilización de suelos arcillosos plásticos por medio de estabilizantes químicos como ser el sulfato de calcio y el yeso.

1.4.1.2 Población

Todos los elementos o materiales disponibles para estabilizar un suelo arcilloso que tenga $CBR \leq 3\%$ y una expansión $> 4\%$ entre estos están por ejemplo el sulfato de calcio y yeso.

1.4.1.3 Muestra

Son el sulfato de calcio y el yeso que se utilizará para estabilizar 4 tipos de suelos arcillosos plásticos en la ciudad de Tarija los cuales serán extraídos de los siguientes lugares:

- Barrio Los Chapacos
- Barrio Los Olivos
- Nueva Terminal
- Barrio Fortaleza

1.4.1.4 Muestreo

Para la obtención del sulfato de calcio y yeso se hará la exploración a la zona donde se sacará el sulfato de calcio, luego éste será quemado para obtener el yeso.

Para las muestras de arcillas se hará un muestreo a cada una de la zonas para obtener el suelo, se dividirá en partes iguales viendo que sean homogéneas, que tengan características de arcillas plásticas y expansivas.

1.4.2 Métodos y técnicas empleadas

1.4.2.1 Experimentales

La realización de la investigación se planteará como experimental ya que se realizarán ensayos de caracterización en el laboratorio del comportamiento de las arcillas naturales y con el sulfato de calcio y yeso.

Ensayo: los ensayos se harán para cuatro muestras las cuales serán extraídas de los lugares mencionados para el análisis de los suelos finos aplicado en la subrasante, estos serán llevados al laboratorio.

El sulfato de calcio y yeso serán extraídos de Huayco para luego ser mezclados en porcentajes con las arcillas.

1.4.2.2 Experimento

Se realizarán ensayos de caracterización a todos los materiales, que son los siguientes:

- S0302. ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO (ASTM D422 AASHTO T88).
- DETERMINACIÓN DEL LÍMITE LÍQUIDO DE LOS SUELOS (ASTM D4318 AASHTO T89).
- DETERMINACIÓN DEL LÍMITE PLÁSTICO E ÍNDICE DE PLASTICIDAD (ASTM D4318 AASHTO T90).
- RELACIÓN DE SOPORTE DE CALIFORNIA (ASTM D1883-99)
- PROCTOR SEGÚN: AASHTO T-180/ASTM D1557.
- COMPRESIÓN CONFINADA EN MUESTRAS DE SUELOS (ASTM D2126 AASHTO T208).

1.4.2.3 Descripción de equipos e instrumentos

- Extracción y preparación de muestras

Picota: para cavar las muestras del lugar donde se analizará.

Pala: para recolectar los suelos.

Bolsas: serán usadas para traer las muestras al laboratorio y estas no pierdan humedad.

- Horno eléctrico: será usado para secar los suelos y estará a una temperatura constante.
- Balanza: será usada para obtener los distintos pesos de los suelos. Deberá tener una sensibilidad de 0.1 g.
- Granulometría según la norma (ASTM D422 AASHTO T88).

Tamiz: se usará el tamiz número 200 con tapa y fondo.

- Determinación del límite líquido según la norma (ASTM D4318 AASHTO T89).

Equipo de casa grande: el cual será usado para determinar el límite líquido a un determinado número de golpes al suelo.

- Determinación del límite plástico según la norma (ASTM D4318 AASHTO T89).

Superficie de amasado: será una placa de vidrio esmerillado de 20*20 cm.

- Determinación del proctor según (AASHTO T-180/ASTM D1557).

T-99: se determinará la densidad máxima del suelo y el contenido óptimo de humedad.

- Determinación de la relación de Soporte de California (ASTM D1883-99).

Molde cilíndrico: se usará para determinar la capacidad de soporte del suelo.

- Determinación de la compresión confinada según la norma (ASTM D2126 AASHTO T208).

Aparato de compresión: es una prensa para la rotura de probetas, de velocidad controlada manual o mecánicamente.

1.4.3 Procedimiento de aplicación

Se plantea disponer de muestras de suelos arcillosos alterados procedentes de los de las zonas de los barrios, Los Chapacos, Los Olivos, Nueva Terminal y Fortaleza de la ciudad de Tarija pertenecientes a los grupos A-6 y A-7 con límites mayor al 10%, la compactación en un rango de 1800-1900 kg/cm² y finalmente un C.B.R. menor al 6% según la norma A.A.S.T.H.O. donde la calidad para subrasantes son de regular a mala por su plasticidad.

Los suelos estabilizados con sulfato de calcio y yeso serán extraídos de los bancos de préstamos de la comunidad de Huayco estos suelos que serán estabilizados deben tener un C.B.R. mayor a 6% y una resistencia a compresión simple a 1200 kg/cm² según la A.A.S.T.H.O.

Este plan de trabajo consiste en trabajar con diferentes proporciones de sulfato de calcio y yeso, para que en base al análisis de las propiedades físicas y mecánicas más

relevantes de cada una de las combinaciones se pueda estimar el contenido adecuado de sulfato de calcio y yeso a fin de obtener una buena estabilización del suelo tratado.

Por otro lado también cuando se proceda a someter los especímenes de suelos a pruebas de compactación, C.B.R. y compresión simple y tomando como referencia los resultados de los distintos ensayos se optará como óptimo al primer valor que proporcione el C.B.R.

Se adoptará un criterio de diseño semejante al método de dosificación de suelo –cloruro de sodio, suelo-cemento y suelo-cal, para encontrar la mezcla óptima de suelo sulfato de calcio y yeso.

Las mezclas con sulfato de calcio y yeso se darán entre un 3, 5, 10, 12%.

- Suelo natural
- Suelo natural + 3 (%) sulfato de calcio
- Suelo natural + 5 (%) sulfato de calcio
- Suelo natural + 10 (%) sulfato de calcio
- Suelo natural + 12 (%) sulfato de calcio
- Suelo natural + 3 (%) yeso
- Suelo natural + 5 (%) yeso
- Suelo natural + 10 (%) yeso
- Suelo natural + 12 (%) yeso

1.4.4 Tratamiento estadístico

Para este estudio se utilizará la estadística descriptiva que es una rama de las matemáticas que recolecta, presenta y caracteriza un conjunto de datos, con el fin de describir apropiadamente las diversas características de ese conjunto.

- **Media Aritmética**

$$X = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x$$

Donde:

X = Datos de la serie

n =Número de datos de la serie

- **Moda**

La moda de un conjunto de datos numéricos es el valor que más se repite, es decir, el que tiene el mayor número de frecuencias absolutas. La moda puede ser no única e inclusive no existir.

La moda es una medida de tendencia central muy importante, porque permite planificar, organizar y producir para satisfacer las necesidades de la mayoría.

- **Mediana**

La mediana es el punto central de una serie de datos ordenados de forma ascendente o descendente.

- **Desviación estándar**

$$s^2 = \frac{(X_1 - \bar{X})^2 + \dots + (X_n - \bar{X})^2}{n - 1} = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n - 1}$$

- **Varianza**

La varianza mide la mayor o menor dispersión de los valores de la variable respecto a la media aritmética. Cuanto mayor sea la varianza mayor dispersión existirá y por tanto, menor representatividad tendrá la media aritmética. La varianza se expresa en las mismas unidades que la variable analizada, pero elevadas al cuadrado.

La varianza de un conjunto de datos se define como el cuadrado de la desviación estándar y está dada por:

$$v = s^2$$

1.5 Alcance de la investigación

La siguiente investigación busca la estabilidad de los suelos plásticos estabilizándoles con mineralizadores como ser el sulfato de calcio y yeso, esta estabilización pretende mejorar las características de los suelos finos con la finalidad de mejorar su comportamiento en cuanto a su resistencia y deformación. Para disminuir los cambios volumétricos del mismo.

Para esta estabilización lo que se hará es lo siguiente, se traerá material arcilloso de las zonas ya mencionadas se hará su caracterización de todo este material fino luego se lo clasificará para saber si el material fino tiene limos o si es plástico. Una vez clasificado el suelo, se dosificará con el sulfato de calcio y yeso en diferentes porcentajes del 3%, 5% y 10% y 12%, se hará la compactación, C.B.R. y compresión no confinada y luego se buscará el más adecuado para saber si cumple con la resistencia que se necesita para una subrasante.

2.1 Definición

Es frecuente que el ingeniero encuentre no adecuados en algún sentido los suelos que ha de utilizar para un determinado fin, en un lugar específico.

Este hecho abre obviamente tres posibilidades de decisión:

- 1.- Aceptar el material tal como lo encuentre, pero tomando en cuenta realistamente su calidad en el diseño efectuado.
- 2.- Eliminar el material insatisfactorio o prescindir de usarlo, substituyéndolo por otro de características adecuadas.
- 3.- Modificar las propiedades del material existente, para hacerlo capaz de cumplir los requerimientos a los que será sometido.

La última alternativa da lugar a las técnicas de estabilización de suelos. En rigor son muchos los procedimientos que pueden seguirse para lograr esa mejoría en las propiedades de los suelos. Con vistas a hacerlos apropiados para algún uso específico. La siguiente lista de tipos de procedimiento no agota seguramente el tema, aunque reúna los más comunes:

- 1.- **Estabilización por medios mecánicos**, de los que la compactación es el más conocido, pero entre los que las mezclas de suelos se utilizan también muy frecuentemente.
- 2.- **Estabilización por drenaje.**
- 3.- **Estabilización por medios eléctricos**, de los que la electrosmosis y la utilización de pilotes electrometálicos son probablemente los mejor concidos.
- 4.- **Estabilización por empleo de calor y calcinación.**
- 5.- **Estabilización por medios químicos**, generalmente lograda por la adición de agentes estabilizantes específicos, como el cemento, la cal, el asfalto u otros.

La gran variabilidad de los suelos y sus composiciones hacen que cada método resulte sólo aplicable a un número limitado de tipos de ellos: en muchas ocasiones, esa variabilidad se manifiesta a lo largo de algunos kilómetros, pero en cualquier caso suele ser frecuente que para aplicar un método económicamente hayan de involucrarse varios tipos de suelos a veces con variaciones de alguna significación, renunciando correspondientemente al empleo del procedimiento “óptimo” en cada clase.

Desde el principio tiene que reconocerse que la estabilización no es una herramienta ventajosa en todos los casos y, desde luego, no es siempre igualmente ventajosa en las situaciones en que pueda resultar conveniente; por consiguiente, habrá que guardar siempre muy claramente el conjunto de propiedades que se desee mejorar y la relación entre lo que se logrará al mejorarlas y el esfuerzo y dinero que en ello haya de invertirse. Sólo balanceando cuidadosamente estos factores podrá llegarse a un correcto empleo de la estabilización de suelos.

2.1.1 Propiedades de interés en estabilización de suelos

Las propiedades de los suelos que más frecuentemente se estudian en problemas de estabilización son:

- Estabilidad volumétrica
- Resistencia
- Permeabilidad
- Compresibilidad
- Durabilidad

Frecuentemente será posible utilizar tratamiento que mejoren simultáneamente varias de esas propiedades, pero también debe estarse preparado a encontrar evoluciones contradictorias en la lista, de manera que el mejoramiento de una propiedad signifique el deterioro de otra u otras. No debe verse a la estabilización sólo como una medida correctiva; algunos de los mejores usos de estas técnicas representan más bien medidas preventivas contra condiciones adversas susceptibles de ulterior desarrollo. A continuación se insiste un poco sobre las propiedades de los suelos más susceptibles de ser mejoradas por estabilización.

- Estabilidad volumétrica

Se refiere por lo general a los problemas relacionados con los suelos expansivos por cambio de humedad, relacionado con variaciones estacionales o con la actividad del ingeniero. La estabilización suele ofrecer una alternativa de tratamiento para estos

suelos, diferente del uso de cargas, capas permeables, introducción de agua, etc., que forma la gama de líneas de acción más usual.

Se trata de transformar la masa de arcilla expansiva bien sea en una masa rígida o en una granulada, con sus partículas unidas por lazos suficientemente fuertes como para resistir las presiones internas de expansión. Esto se logra por tratamientos químicos o térmicos, la experiencia, muy orientada por factores económicos, ha demostrado que los tratamientos químicos son útiles sobre todo para arcillas ubicadas cerca de la superficie del terreno, en tanto que los tratamientos térmicos se han aplicado más bien a arcillas más profundas.

- Resistencia

Existen varios métodos de estabilización que se han revelado útiles para mejorar la resistencia de muchos suelos. Pero antes de profundizar más en este aspecto será preciso decir que todos ellos parecen perder mucho de su poder en el momento en que se tienen importantes contenidos de materia orgánica, circunstancia desafortunada, dado que, como es bien sabido muchos de los más graves problemas de falta de resistencia ocurren precisamente en suelos orgánicos. Da una idea muy precisa de la influencia del contenido de materia orgánica en los efectos de la estabilización en suelos análogos en otros conceptos.

La compactación es de hecho una forma de estabilización mecánica a la que se ocurre para incrementar la resistencia de los suelos, como uno de sus objetivos más comunes. El empleo de mayores intensidades de compactación no siempre conduce a valores más altos de la resistencia, muy especialmente si se considera la necesidad de mantener dicho parámetros en valores razonables durante tiempos largos. Algunas de las formas de estabilización más usadas para elevar resistencia son las siguientes:

- Compactación
- Vibroflotación
- Precarga
- Drenaje

- Estabilización mecánica con mezclas de otros suelos.
- Estabilización química con cemento, cal o aditivos líquidos.

- Permeabilidad

No suele ser muy difícil modificar sustancialmente la permeabilidad de formaciones de suelo por métodos tales como la compactación, la inyección, etc. En materiales arcillosos, el uso de defloculantes (por ejemplo, polisulfatos) puede reducir la permeabilidad también significativamente; el uso de floculantes (muchas veces hidróxido de cal o yeso) aumenta correspondientemente el valor de la permeabilidad. En la actualidad se va disponiendo de algunas sustancias que introducidas en el suelo en forma de emulsión pueden reducir mucho su permeabilidad, si bien el uso de estas sustancias ha de ser cuidadosamente analizado, pues no es raro que ejerzan efectos desfavorables en la resistencia al esfuerzo cortante de los suelos.

- Compresibilidad

La compactación es una forma rutinaria de estabilización que modifica fuertemente la compresibilidad de los suelos. Sin embargo, la compactación no es la única forma de estabilización que influye en la compresibilidad y, de hecho, puede decirse que todos los métodos de estabilización mencionados tienen influencia en dicho concepto.

- Durabilidad

Suelen involucrarse en este concepto aquellos factores que se refieren a la resistencia al intemperismo, a la erosión o a la abrasión del tráfico; de esta manera, los problemas de durabilidad en las vías terrestres suelen estar muy asociados a suelos situados relativamente cerca de la superficie de radamiento. En rigor, estos problemas pueden afectar tanto a los suelos naturales como a los estabilizados, si bien en estos últimos los peores comportamientos suelen ser consecuencia de diseños inadecuados, tales como una mala elección del agente estabilizador o un serio error en su uso, tal como podría ser el caso cuando se ignora la bien conocida susceptibilidad de los suelos arcillosos estabilizados con cemento a la presencia de sulfatos.

2.2 Tipos de estabilización de suelos

2.2.1 Estabilización mecánica

La estabilización de suelos por mezcla se hace remontar usualmente a la segunda década del presente siglo, ocurriendo en los E.U.A. los primeros trabajos en los que se usó con plena conciencia de sus objetivos. Los nombres de algunos ilustres pioneros de la Mecánica de Suelos, como Terzaghi, Casagrande y Hogentogler no son ajenos a los desarrollos más pioneros de estas técnicas.

Cuando se diseñan mezclas de suelos, para lograr con ellas unas determinadas propiedades deseables, la granulometría suele ser el requisito más relevante en la fracción gruesa, en tanto que la plasticidad lo es, naturalmente, en la fina.

El tamaño máximo de las partículas de la mezcla tiene importancia, puesto que tamaños demasiado grandes son difíciles de trabajar y producen superficies muy rugosas; una proporción demasiado grande de tamaños gruesos conduce a mezclas muy segregables. La presencia de contenidos importantes de materiales finos, menores que la malla 40, hace difícil lograr buenas características de resistencia y de deformabilidad, además de que puede conducir a superficies demasiado lisas y fangosas, cuando están húmedas y pulverulentas, cuando están secas.

Tabla 2.1 Respuesta de algunos minerales típicos a los diferentes métodos de estabilización

Mineral o componente del suelo típico	Estabilización recomendable	Finalidad
Materia orgánica	Estabilización mecánica	Los demás métodos no son efectivos
Arenas	Mezcla con materiales finos no plásticos	Para estabilidad mecánica

	Cemento	Para incrementar resistencia
	Asfalto	Para adquirir cohesión
Limos	No responden a los métodos de estabilización en uso	-
Alófanos	Cal o mezclas de cal y yeso	Para incrementar la resistencia
Caolín	Arena	Para estabilidad mecánica
	Cemento	Para incrementar resistencia a corto plazo
	Cal	Para mejorar trabajabilidad y adquirir resistencia a corto plazo
Ilita	Cemento	Para incrementar resistencia a corto plazo
	Cal	Para mejorar trabajabilidad y adquirir resistencia a largo plazo
Montmorilonita	Cal	Para mejorar trabajabilidad y adquirir resistencia a corto plazo
Clorita	Cemento	Aún no hay experiencia concluyente sobre los efectos de esta estabilización

Fuente: Vías terrestres – Rico Rodríguez Tomo II

2.2.2 Estabilización química

La estabilización química hace referencia principalmente a la utilización de ciertas sustancias químicas patentizadas y cuyo uso involucra la sustitución de iones metálicos y cambios en la constitución de los suelos involucrados en el proceso. El diseño de estabilizaciones con agentes químicos estabilizantes, consiste en llevar a cabo una adecuada clasificación del suelo y de acuerdo a ello determinar el tipo y cantidad de agente estabilizante así como el procedimiento para efectuar la estabilización.

-Cal: disminuye la plasticidad de los suelos arcillosos y es muy económica.

-Cemento Portland: aumenta la resistencia de los suelos y se usa principalmente para arenas o gravas finas.

-Productos Asfálticos: es una emulsión muy usada para material triturado sin cohesión.

-Cloruro de Sodio: impermeabilizan y disminuyen los polvos en el suelo, principalmente para arcillas y limos.

-Cloruro de Calcio: impermeabilizan y disminuyen los polvos en el suelo, principalmente para arcillas y limos.

-Escorias de Fundición: este se utiliza comúnmente en carpetas asfálticas para darle mayor resistencia, impermeabilizarla y prolongar su vida útil.

-Polímeros: este se utiliza comúnmente en carpetas asfálticas para darle mayor resistencia, impermeabilizarla y prolongar su vida útil.

-Hule de Neumáticos: este se utiliza comúnmente en carpetas asfálticas para darle mayor resistencia, impermeabilizarla y prolongar su vida útil.

2.3 Tipos de agentes estabilizadores

2.3.1 Cementos

El cemento se usa cada vez más como estabilizador para suelos, particularmente en la construcción de carreteras y presas de tierra. El cemento se usa para estabilizar suelos arenosos y arcillosos; como en el caso de la cal, el cemento ayuda a disminuir el límite líquido y a incrementar el índice plástico y la manejabilidad de los suelos arcillosos; para suelos arcillosos, la estabilización con cemento es efectiva cuando el límite líquido –contenido de humedad, en porcentaje– es menor que 45 - 50 y el índice plástico 18 es menor que aproximadamente 25. Los requisitos óptimos del cemento por volumen para la estabilización efectiva de varios tipos de suelos están dados en la siguiente tabla:

Tabla 2.2 Cemento requerido por volumen para la estabilización efectiva de varios suelos

Tipo de suelo		
Clasificación AASHTO	Clasificación Unificada	Porcentaje de Cemento por volumen
A-2 y A-3	GP, SP y SW	6-10
A-4 y A-5	CL, ML y MH	8-12
A-6 y A-7	CL, CH	10-14
*Según Mitchell Freitag (1959)		

Fuente: Principios de Ingeniería de Cimentaciones, p. 814.

Al igual que la cal, el cemento ayuda a incrementar la resistencia de los suelos y la resistencia crece con el tiempo de curado. En la tabla 3 presenta algunos valores típicos de la resistencia a compresión no confinada de varios tipos de suelos no tratados y mezclas hechas con aproximadamente el 10% de cemento de peso. Los suelos granulares y arcillosos con baja plasticidad son obviamente los más adecuados para la estabilización con cemento. Por estas razones debe ponerse atención a la selección del material estabilizador. Para compactación en campo la cantidad apropiada de cemento se mezcla con suelo ya sea en el sitio o en una planta mezcladora y luego se lleva al sitio. Igual que la inyección de cal, el mortero hecho de cemento Portland y agua (relación agua-cemento = 0.5:5) se usa para que la cementación disminuye la permeabilidad hidráulica de los suelos e incrementa la resistencia y la capacidad de carga. En el diseño de cimentaciones de maquinaria de baja frecuencia sometidas a fuerzas vibratorias, a veces es necesario rigidizar la cimentación por cementación incrementando así la frecuencia de resonancia.

2.3.2 Cales

La cal es uno de los agentes estabilizadores más utilizados a lo largo de la historia y sin lugar a dudas con grandes propiedades para el mezclado con suelos naturales muy plásticos de tal manera que logra regular esta plasticidad y mejora las características mecánicas del mismo. Proviene de las rocas calizas puras, sometidas a un proceso de calcinación que se origina con el incremento de la temperatura alrededor de los 880°C a los 900°C.

Es muy difícil encontrar en la naturaleza cales químicamente puras, normalmente están acompañadas de otros materiales como el Carbonato de Magnesio, arcilla, hierro, azufre, álcalis, etc. Esto da origen a una clasificación según el estado de pureza de la misma y la proporción de los materiales que la conforman.

2.3.3 Sales

Las sales se forman a partir de la neutralización de un ácido con una base. Las sales normales tales como el cloruro de sodio (NaCl), cloruro de calcio (CaCl₂) o cloruro de potasio (KCl) son sales completamente neutralizadas, es decir que no contienen exceso de iones ácidos de hidrógeno (H⁺) ni básicos de hidróxilo (OH⁻).

Se designan como sales ácidas aquellas que contienen exceso de iones de hidrógeno, como el bicarbonato de sodio (NaHCO₃) y a las que contienen exceso de iones hidroxilo se les designa como sales básicas.

En el laboratorio, se han estudiado, un gran número de sales (NaCl, CaCl₂, NaNO₃, Na₂CO₃, BaCl₂, MgCl₂, KCl) pero tanto la economía como su disponibilidad han hecho que solamente se utilicen algunas, siendo las más utilizadas el cloruro de sodio y el cloruro de calcio.

2.3.4 Sulfatos

2.3.4.1 Definición

Los sulfatos son las sales o los ésteres del ácido sulfúrico. Contienen como unidad común un átomo de azufre en el centro de un tetraedro formado por cuatro átomos de oxígeno. Las sales de sulfato contienen el anión SO₄²⁻.

2.3.4.2 Los sulfatos inorgánicos

Los sulfatos inorgánicos son las sales del ácido sulfúrico. En la naturaleza se encuentran en forma de yeso, o aljez, (sulfato de calcio dihidratado CaSO₄ · 2 H₂O), baritina (sulfato de bario) o sulfato de sodio (Na₂SO₄). Por oxidación se forma de los sulfuros de muchos elementos cuando estos entren en contacto con el oxígeno del aire.

-Composición

El sulfato de calcio por lo consiguiente mejora el rendimiento y la calidad de sus productos, contribuye en la asimilación del nitrógeno, el metabolismo del fósforo y potasio provocando así, la mineralización más rápida de los recursos orgánicos del suelo.

Sulfato de Calcio (CaSO₄):

- Nitrógeno (N).....1,6% (Aprox.)
- Fósforo (P).....14,0% (Aprox.)
- Potasio (K).....7,0% (Aprox.)
- Azufre (S).....40,0% (Aprox.)
- Calcio (Ca).....23,0% (Aprox.)
- Otros.....1,8% (Aprox.)

Propiedades Físicas

- Densidad a granel 1100-1200 kg/ m³
- Solubilidad en agua (20° g/100g): Soluble
- PH (20 °C) 10M 7
- Apariencia granos de color gris/ blancos/ marrón
- Olor de inodoro a leve olor

Composición Material

- Azufre (S) 21 %
- Calcio(Ca) 23 %

2.3.4.3 Estado natural del sulfato de calcio

La roca natural denominada aljez (sulfato de calcio dihidrato: $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), mediante deshidratación, al que puede añadirse en fábrica determinadas adiciones de otras sustancias químicas para modificar sus características de fraguado, resistencia, adherencia, retención de agua y densidad, que una vez amasado con agua, puede ser utilizado directamente.

También, se emplea para la elaboración de materiales prefabricados. El yeso, como producto industrial, es sulfato de calcio hemihidrato ($\text{CaSO}_4 \cdot \frac{1}{2}\text{H}_2\text{O}$), también llamado

vulgarmente "yeso cocido". Se comercializa molido, en forma de polvo. Una variedad de yeso, denominada alabastro.

En estado natural el aljez, piedra de yeso o yeso crudo, contiene 79,07% de sulfato de calcio anhidro y 20,93% de agua y es considerado una roca sedimentaria, incolora o blanca en estado puro, sin embargo, generalmente presenta impurezas que le confieren variadas coloraciones, entre las que encontramos la arcilla, óxido de hierro, sílice, caliza, etc.

En la naturaleza se encuentra la anhidrita o karstenita, sulfato cálcico, CaSO_4 , presentando una estructura compacta y sacaroidea, que absorbe rápidamente el agua, ocasionando un incremento en su volumen hasta de 30% o 50%, siendo el peso específico 2,9 y su dureza es de 2 en la escala de Mohs.

2.3.4.4 Origen del yeso

El yeso se originó hace 200 millones de años como resultado de depósitos marinos cuando parte de lo que ahora son nuestros continentes eran inmensas extensiones oceánicas. Durante este período algunos mares se secaron dejando lechos de yeso que se recubrieron para ser descubiertos posteriormente por el hombre.

2.3.4.5 Definición del yeso

Yeso es un término que procede del latín gypsum, aunque su origen se remonta a la lengua griega. Se trata del sulfato de calcio hidratado, que suele ser blanco y que resulta compacto o terroso.

El yeso puro es un mineral blanco, pero debido a impurezas puede tornarse gris, castaño o rosado. Se denomina sulfato de calcio dihidratado y su estructura cristalina está constituida por dos moléculas de agua y por una de sulfato de calcio.

El yeso se deshidrata mediante la acción del fuego y logra endurecerse con rapidez cuando se amasa con agua. Este material es utilizado en el ámbito de la construcción.

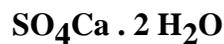
Como producto industrial, el yeso es el sulfato de calcio semihidratado y suele conocerse como yeso cocido. Se vende en forma de polvo, es decir, molido.

No obstante, no hay que olvidar que existen muchos tipos diferentes de yeso que se emplean por los profesionales de la construcción. Entre los más significativos están el negro, el mate, el cristalizado o el blanco.

Entre los usos del yeso, puede destacarse su utilización como pasta para revoques, guarnecidos o juntas y para la prefabricación de paneles para techos. El yeso también funciona como aislante térmico y puede usarse en la fabricación de cemento.

2.3.4.6 Características de los yesos

El yeso es un conglomerante no estable en presencia de humedad, constituido por sulfato de calcio con dos moléculas de agua.



Su composición química es: 32.6 % CaO

46.5 % SO₃

20.9 % H₂O

Las propiedades principales de los yesos son:

- Material conglomerante aéreo (material noble)
- Buena estabilidad volumétrica
- Excelente adherencia
- Fraguado rápido y modificable
- Propiedades aislantes: térmicas y acústicas
- Baja transferencia de calor
- Bajo peso
- Bajo costo de producción
- Óptima textura de la superficie endurecida
- Fidelidad de copiado superficial

- Poco solubilidad en agua
- Elemento poroso de baja conductividad

Otras propiedades físicas son:

- **Dureza:** 2 en la escala de Mohs
- **Solubilidad:** 1.8 - 2.0 g/l
- **Densidad:** Dihidrato: 2.3 g/cm^3
 Hemidrato α : 2.7 g/cm^3
 Hemidrato β : 2.6 g/cm^3
 Anhidrita III α : 2.5 g/cm^3
 Anhidrita III β : 2.4 g/cm^3
- **Peso volumétrico - masa unitaria:**
 Hemidrato suelto: $0.6 - 0.7 \text{ g/cm}^3$
 Hemidrato compactado: 0.8 g/cm^3
 Pasta de yeso (relación a/y= 0.5): 1.7 g/cm^3

Se puede conseguir como un mineral natural de pureza y composición variables, que introduce un amplio rango granulométrico. Cuando posee cantidades importantes de cloruros, magnesio, u otras sales solubles no debe emplearse para producir materiales de construcción. Las impurezas de los yesos de mina, son generalmente arcillas, cuarzos, dolomitas y calcitas. Se obtiene también químicamente como un sulfato de calcio de alta pureza. Actualmente, se emplean con buenos resultados, los yesos derivados como subproductos de la Industria química de fertilizantes y cítricos, o de la desulfurización de los gases de chimenea, para la elaboración de yesos de alta calidad. Este sulfato de calcio difiere del natural, en su estado físico, con una finura uniforme, en el mínimo de impurezas que contiene y su alta pureza.

La pureza requerida para obtener un buen yeso aglomerante, debe ser mínima del 90% en sulfato de calcio. Si el yeso contiene anhidritas, se puede admitir un límite mínimo del 80% de pureza. El grado de blancura nos indica su pureza y de ella depende la calidad de los productos obtenidos a partir del yeso.

2.3.4.6.1 Transformación del yeso en un material aglomerante

El yeso en su estado natural se encuentra como un sulfato de calcio dihidratado, es decir, tiene dos moléculas de agua de hidratación. En el proceso de calcinación pierde parte de esa agua, dependiendo de la temperatura a que se someta. Idealmente se debe alcanzar la forma de hemidrato, en la cual el yeso ha perdido molécula y media de agua.



A temperaturas mayores de 130° C el yeso puede continuar perdiendo agua, hasta llegar al estado de anhidrita.

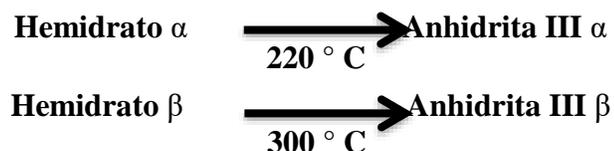
Todas las formas de sulfato de calcio dihidratado son termodinámica y cristalográficamente equivalentes, dependiendo únicamente de su pureza. Su forma puede ser de agujas, de conchas o prismática.



Esta anhidrita producida a bajas temperaturas fragua rápidamente y reacciona ávidamente con agua o con la humedad del aire para formar nuevamente un hemidrato. Por esta razón se recomienda estabilizar el yeso en grandes silos, almacenándolo con una humedad relativa del 80% durante 12 horas. Esta anhidrita tipo III es soluble. Las variedades alotrópicas más importantes, relacionadas con las propiedades de un hemidrato, son los tipos α y β . La producción de un yeso hemidratado del tipo α , se

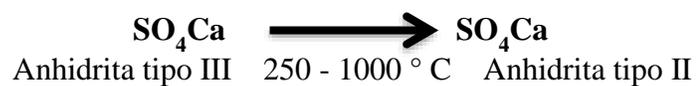
logra a presiones mayores de 1 atmósfera en autoclaves y en ambientes saturados de vapor de agua.

En el proceso de calcinación se puede producir:

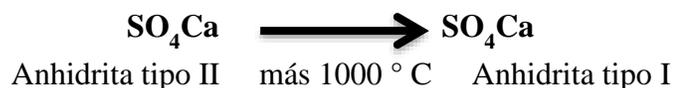


Generalmente el hemidrato beta se obtiene en horno rotatorio y el alfa en autoclaves. Dependiendo del proceso se pueden obtener los dos tipos en un horno rotatorio y se pueden separar por una extracción en lugares distintos o mezclados al final.

Industrialmente en los procesos de calcinación, se obtiene de los granos gruesos un yeso hemidrato que no alcanza a reaccionar, mientras que de las partículas finas se obtienen anhidritas que están directamente expuestas a las altas temperaturas de cocción. El hemidrato α es muy compacto, resistente y de cristales grandes. El hemidrato β es más poroso, menos denso, ávido de agua, reacciona liberando gran calor y tiene un tiempo de fraguado de 4 o 5 minutos.



Esta anhidrita tipo II, es relativamente inerte e insoluble. Su reactividad depende de la temperatura y el tiempo de calcinación relacionados con el tamaño de las partículas. La anhidrita tipo II se le conoce como un yeso cocido a muerte.



La anhidrita tipo I producida a altas temperaturas contiene óxido de calcio libre, generado por la descomposición del sulfato de calcio. Esta anhidrita es soluble y puede fraguar incluso bajo el agua. (Tiene propiedades hidráulicas).

Las anhidritas producen un conglomerante más denso y con mayor resistencia. Los yesos comerciales, contienen además del hemidrato, cantidades variables de anhidritas y de dihidratos. La presencia de uno u otro, afecta la calidad de los yesos producidos. La variedad del tipo de yeso se puede determinar por análisis térmico diferencial.

Cuando se utiliza yeso de roca como materia prima, se introduce al horno un material con un amplio rango granulométrico, que genera toda la gama de yesos descrita anteriormente. Esto dificulta la estandarización de la calidad del producto final.

Cuando se utiliza como materia prima sulfato de calcio de origen químico, se tiene un material de alta pureza y una distribución del tamaño de las partículas dentro de un rango más estrecho, lo cual permite un control del proceso más eficiente para la obtención de un yeso de calidad uniforme. La calcinación en hornos rotatorios confiere además una cocción más uniforme por el efecto de clasificación neumática de los gases de combustión, que arrastran las partículas más pequeñas disminuyendo su exposición excesiva al calor y evitando su deshidratación total. Debido a la ausencia de vapor de agua dentro del horno, la anhidrita tipo III que se forma, que es muy inestable, se transforma en un hemidrato beta con la humedad del aire.

La calidad y las propiedades de los yesos dependen de muchas variables. Las principales de ellas son:

- Pureza en la composición de la materia prima.
- El grado de selección realizado a la materia prima.
- El método empleado para la cocción.
- La temperatura y el tiempo empleado para la cocción.
- El grado de molienda.
- La clasificación de los tipos de yeso y su mezcla.
- El tipo de aditivos usado.

De la combinación de estas variables, se pueden producir diversas clases de yesos, con propiedades diferentes, que le confieren a los productos aptitudes para diversas aplicaciones. Un yeso apropiado para la elaboración de estucos, debe tener las siguientes características:

- Entre un 50 y 70 % de hemidrato
- Entre el 50 y el 30 % de anhidrita tipo II
- Mínimas cantidades de dihidrato
- Ausencia total de anhidrita tipo III

Por razones técnicas y de la calidad de las materias primas y de los procesos de cocción, los yesos comerciales poseen proporciones elevadas de anhídrita del tipo III y de dihidratos que son indeseables. También la presencia de inertes finos puede favorecer el proceso de cristalización.

Industrialmente se pueden elaborar mezclas de los diferentes tipos de yeso dependiendo de su uso específico, principalmente de hemidratos y anhídratas.

2.3.4.6.2 Propiedades físico-químicas y mecánicas de los yesos

La calidad de los yesos aglomerantes puede valorarse teniendo presente las siguientes características:

- Tiempo de utilización y agua de amasado.
- Resistencia mecánica y secado.
- Expansión diferencial.
- Adherencia a otros materiales.

-Tiempo de utilización

Para efectos de aplicación, interesa que sea acondicionado con retardadores para facilitar su puesta en obra, sin afectar las propiedades finales. Los tiempos de utilización para los yesos hemidratados de uso común y los acondicionados mediante aditivos modificadores de fraguado son:

- Hemidrato puro 3 a 5 minutos
- Yeso blanco de uso común 5 a 7 minutos
- Yeso con retardador 7 a 12 minutos
- Yeso con retardador y plastificante hasta 60 minutos

El fenómeno de fraguado corresponde al entumecimiento o endurecimiento por cristalización de la pasta de yeso, cuya rapidez de desarrollo depende de la cantidad de agua empleada, del modo y el tiempo de mezclado, de la reactividad del yeso y de los modificadores utilizados. La reacción química de fraguado, va acompañada de una elevación de la temperatura y un ligero aumento de volumen. Esta reacción exotérmica puede elevar la temperatura hasta 20 °C por encima de la temperatura ambiente. En el proceso de cristalización se revierte el hemidrato a su forma original como dihidrato. Al contacto con el agua empieza la solubilización del hemidrato, que es cinco veces más soluble (2.30-2.65 g/l) que el dihidrato. Este se forma al hidratarse el hemihidrato con 1½ molécula de agua. Así se sobresatura la disolución favoreciendo la formación de los nuevos cristales. Esta cristalización continúa mientras quede hemihidrato por disolver y se mantenga la sobresaturación del líquido. Este fenómeno de saturación explica por qué el fraguado es una función de la cantidad de agua de amasado, y será más rápido en cuanto se utilice menos agua. Del mismo modo, un yeso puro necesita mayor cantidad de agua que un yeso impuro, debido a su contenido mayor de productos activos lo cual lo hace saturar más pronto. En conclusión, a mayor diferencia de solubilidades, menor será el tiempo de fraguado. Los agentes retardadores actúan compitiendo en solubilidad con el hemidrato o inhibiendo la cristalización por cambio de la viscosidad de la disolución. Otro tipo de retardadores tienden a igualar las solubilidades, formando complejos que desplazan el equilibrio de la reacción y disminuyen la concentración del ión de calcio o forman productos insolubles. El uso de retardadores que contengan boratos, silicatos, fosfatos o carbonatos no es recomendable por el peligro de la formación de eflorescencias. Los retardadores orgánicos de elevado peso molecular aumentan la viscosidad y frenan en cierto modo las reacciones iónicas. También un incremento en la temperatura disminuye la diferencia de las solubilidades, aumentando los tiempos de fraguado. De esta forma el agua tibia puede ser un retardador de fraguado en ciertos límites.

Los tiempos de empleo suelen alargarse en la práctica, mediante el “remezclado” o “rebatido” de la masa yeso - agua antes de su fraguado final. Cuando dicho fraguado

ha comenzado el “remezclado” ocasiona un descenso en las resistencias, por el rompimiento de las estructuras cristalinas, lo cual conlleva a graves problemas en la puesta en obra y a presentar contracciones diferenciales. Debido al rompimiento de los enlaces entre las partículas, se debilita el yeso en su formación de dihidrato y finalmente puede llegar a impedirse su fraguado normal.

-La cantidad de agua de amasado

En la tabla 2.3 se presentan datos prácticos sobre la cantidad de agua requerida por un yeso según su tipo y aplicación, expresada en porcentaje en peso de la cantidad de yeso.

Tabla 2.3 Cantidad de agua de amasado según los resultados a obtener

Tipo de aplicación	% En peso de yeso seco
Para asegurar la hidratación del yeso	18.6
Para obtener una masa plástica	
En yesos de moldeo	50.0 - 60.0
En yesos de construcción	40.0 - 60.0
Para obtener una pasta de fraguado lento	
En yesos de moldeo	80 - 100
En yesos de construcción	60 - 80

Fuente: http://www.ecoingenieria.org/docs/LOS_YESOS_2005.pdf

El efecto de la cantidad de agua de amasado en la densidad aparente del yeso se presenta en la tabla 2.4.

Tabla 2.4 La cantidad de agua en la mezcla de yeso y la densidad aparente

% De agua de amasado	Densidad aparente (g/cm³)
70	1.11
80	1.02
90	0.94
100	0.87

Fuente: http://www.ecoingenieria.org/docs/LOS_YESOS_2005.pdf

-Resistencia mecánica y secado

El valor normalizado de las resistencias se refiere a la flexotracción obtenida a partir de las probetas secadas previamente a una temperatura no mayor de 45°C y preparadas con una relación agua/yeso = 0.8. Las resistencias a la flexotracción, según la norma, se muestran en la tabla 2.5.

Tabla 2.5 Resistencia de los yesos según su tipo y la aplicación

Tipo de yeso	Resistencia (kg/cm²)	Empleo
Y-12	12	Revestimientos
Y-20	20	Enrasillados
Y-25G	25	Estucos
Y-25F	25	Prefabricados
E-30	30	Prefabricados
E-35	35	Moldeo

Fuente: http://www.ecoingenieria.org/docs/LOS_YESOS_2005.pdf

Para darse al servicio, el yeso debe secarse totalmente pues de lo contrario, no se alcanza la resistencia máxima. Cualquier humedad remanente afecta la calidad. También, debe evitarse el choque térmico después del secado.

-Mezclado, agua de amasado y tiempo de fraguado

Para efectuar la operación de mezclado, se recomienda adicionar uniformemente el yeso al agua de mezclado. Inicialmente hay que dejar reposar la mezcla durante 15 segundos y luego agitar vigorosamente hasta conseguir una mezcla homogénea libre de grumos. La limpieza de los recipientes es recomendable para no afectar los tiempos de fraguado, pues los cristales formados de antemano, actúan como centros de cristalización y disminuyen los tiempos de trabajo.

La forma, el tiempo de mezclado y la cantidad de agua de amasado son importantes y actúan sobre el tiempo de fraguado de la siguiente manera:

Tabla 2.6 Tiempo de mezclado y la cantidad de agua de amasado

	Intenso	Suave
Forma de Mezclado	< tiempo fraguado	> tiempo fraguado
	Mayor	Menor
Tiempo de mezclado	< tiempo fraguado	> tiempo fraguado
	Mayor	Menor
Relación agua/yeso (no debe ser mayor de 1)	> tiempo fraguado	< tiempo fraguado

Fuente: http://www.ecoingenieria.org/docs/LOS_YESOS_2005.pdf

La cantidad de agua de amasado, tiene una influencia decisiva en el secado y sobre las resistencias mecánicas del yeso endurecido. Un exceso de agua, puede llegar a impedir la aglomeración de los cristales formados y evitar el endurecimiento del yeso.

Los valores de resistencia a la compresión de los yesos finos, obtenidos según la cantidad de agua de amasado son:

Tabla 2.7 Valores de resistencia a la compresión de los yesos finos

% De agua	Resistencia MPa
45	17
50	15
60	12
80	8.6
100	5.7

Fuente: http://www.ecoingenieria.org/docs/LOS_YESOS_2005.pdf

-Expansión diferencial:

Cuando una masa de yeso se mezcla con agua y se endurece, las dimensiones obtenidas inmediatamente después del fraguado cambian en función del tiempo, dando lugar a serias perturbaciones en la puesta en obra de los yesos o de sus productos prefabricados.

Estas variaciones en la dimensión dependen de una parte, de la velocidad de secado, y de otra, de la relación agua/yeso. También puede depender de la composición de las fases del yeso aglomerante y muy especialmente de las condiciones de amasado o remezclado de la pasta durante el tiempo de empleo. La velocidad de secado está influenciada por la temperatura, por la humedad relativa del ambiente y por la ventilación.

La expansión normal del yeso en un corto tiempo de curado a 20°C, y con una humedad relativa del 50 %, oscila entre 1.0 y 1.6 mm por metro lineal, cuando se emplea una relación de agua/yeso de 0.6. Cuando la temperatura de secado es mayor de 90° C, es decir, es mayor que la temperatura de deshidratación del yeso, se produce una fuerte contracción de 2 mm por metro al cabo de 20 horas.

El rebatido durante la preparación de la pasta es otra causa de la variación de volumen del yeso, siendo su efecto menos notorio cuando el yeso contiene anhidritas del tipo II, o se le ha adicionado un retardador de fraguado.

Al cabo de las primeras 24 horas, una masa de yeso puede conseguir un aumento de volumen hasta de un 19%. Después del endurecimiento y de la evaporación del agua de amasado se produce una ligera retracción de volumen, teniéndose al final un aumento global de volumen del 17%. Esta variación debe ser tenida en cuenta en los trabajos de construcción.

-Adherencia a otros materiales

La adherencia del yeso a otro tipo de superficies como los revoques, es inferior a su propia cohesión y alcanza 3.0 kg/cm^2 cuando la tracción tiene lugar perpendicularmente al plano de ruptura y de 1.5 kg/cm^2 cuando la tracción se ejerce paralelamente a éste plano. La adherencia a la madera es aún más débil. La adherencia al hierro alcanza 10 kg/cm^2 a los 9 días y 17 kg/cm^2 a los 17 días. Con el tiempo, la adherencia del yeso a los otros materiales disminuye. Lo mismo ocurre con su dureza.

La adherencia aumenta con la porosidad del soporte, siendo relativamente baja en el mortero u hormigón denso. Es necesaria la humectación previa de la superficie que ha de ser enlucida para aumentar el poder adherente, el cual mejora con la aplicación previa de una base de soporte adecuada o mediante la inclusión de aditivos. Tanto la calidad adherente como las resistencias se malogran cuando la relación agua /yeso es mayor que 1.

-Usos del yeso

Son múltiples y variadas las aplicaciones del yeso, siendo las principales las siguientes:

✓ **En la Albañilería:**

- Como aglomerante de morteros simple o compuestos
- Para fabricar hormigones de yeso
- En la construcción de muros y paredes
- En la construcción de tabiques y paneles.
- Para revoques, enlucidos y estucos diversos
- Para aislamiento térmico y acústico de paredes y cielos rasos.
- Como defensa contra incendios

✓ **En la Prefabricación:**

- Elaboración de ladrillos y bloques
- Fabricación de baldosines

- Construcción de placas decorativas
- En moldeo y vaciado
- En elementos decorativos
- En esculturas
- ✓ **Industrialmente:**
 - Como carga en la fabricación de papel
 - Como mastico adhesivo en la fabricación de bombillas
 - Como pigmento y relleno inerte de pinturas y tintas
 - Como vehículo de sustancias químicas
 - Como floculante en la industria cervecera
 - Como fijador de sustancias volátiles
 - Como retardador en la fabricación de cemento
- ✓ **Medicinalmente:**
 - Como férula para fracturas
 - En el moldeo de piezas dentales
 - En los moldes ortopédicos
- ✓ **En la Agricultura:**
 - Para la corrección del pH y fijación del calcio
 - Para el tratamiento de aguas

-Tipos de yesos y su uso más destacado:

Esta clasificación obedece a los nombres y usos corrientes de los yesos diferenciándose principalmente en la composición de sus fases.

▪ **Yeso de moldeo o escayola:**

Este material debe poseer las máximas cualidades de pureza y resistencia, por ser el requerido en la industria de yesos de moldeo y prefabricados, cuyo desarrollo ha promovido la tecnificación de los métodos convencionales con exigencias específicas de calidad.

Están constituidos fundamentalmente por hemidratos. Estos yesos se caracterizan también por tener un grado de finura más elevado. Medido sobre el tamiz de 0.2 mm debe ser inferior al 2%. Se requieren yesos con un grado de pureza próximo al 90%, y debe poseer una resistencia a flexotracción superior a 35 kg/cm².

- **Yeso de enlucir o yeso blanco:**

Está constituido por dos componentes fundamentales, yeso hemihidratado y yeso sobrecocido, que está integrado por una mezcla de anhidritas III y II, en la cual predomina ésta última. La anhidrita produce efectos importantes sobre la calidad, tales como evitar el descenso de las resistencias a corto plazo del hemidrato que presenta una caída de la resistencia entre los 2 y 5 días de fraguado, absorber agua del medio ambiente lo cual compensa el efecto de contracción y reduce la variación de volúmenes y también aumentar la plasticidad del yeso. Todas estas propiedades son importantes en los revestimientos.

Las proporciones de hemidrato y anhidrita varían según los distintos procedimientos de obtención. Los tiempos de fraguado oscilan entre 3 y 7 minutos y deben ajustarse para su aplicación en estucos. El espesor de los recubrimientos con mezclas de yeso, puede variar de 10 a 15 mm. Se debe tener en cuenta que el orden de resistencias en los estucos debe ir de mayor en el interior, a menor en el exterior para garantizar la adherencia. Estos yesos eran conocidos como yesos de París, por constituir el material primordial en los enlucidos de las fachadas de ésta ciudad. Se debe resaltar su conservación a través del tiempo y su poder de transpiración por absorción de la humedad de condensación, gracias a su porosidad que los hace aptos para los recubrimientos de superficies.

- **Otros tipos de yeso:**

Los yesos calcinados a temperaturas altas, se han empleado fundamentalmente en pavimentos y acondicionamientos acústicos. El denominado yeso mármol o cemento Keene, está constituido por un yeso de enlucido al cual se le adicionan sales de alumbre y es sometido a una segunda cocción alrededor de los 600 °C. Tiene un fraguado lento

y desarrolla una resistencia a la compresión entre los 150 y 200 kg/cm². Su propiedad fundamental es no presentar retracciones ni expansiones y se usa principalmente en el sellamiento de juntas y en la colocación de placas de revestimiento.

-El yeso como aglomerante en la construcción

Existen tres aglomerantes inorgánicos usados en la construcción: cemento, cal, yeso. El respectivo tiempo de calcinación es respectivamente 1450°C, 800 a 1100°C y menos de 300 °C. La producción de yeso consume menos energía que la producción de cemento.

El yeso se puede utilizar para la elaboración de morteros con arena fina u otros agregados sólidos para revoques y enlucidos que le mejoran su resistencia pero que le hacen perder sus cualidades aislantes. Por su porosidad, en su aplicación sin mezclas, el yeso puede absorber la humedad ambiental y regula de éste modo la higrometría de las construcciones, permitiendo la transpiración del agua.

En la construcción se aprovechan sobre todo, sus propiedades de fraguado rápido modificable, sus propiedades aislantes y su bajo peso. Al modificar el tiempo de fraguado del yeso, debe tenerse en cuenta la composición de los aditivos para evitar posteriores eflorescencias de sustancias como las sales orgánicas. Mediante la adición de plastificantes (reductores de agua) y retardantes es posible prolongar el tiempo de fraguado hasta por una hora. También es posible reducir la porosidad mediante el rebatido de la masa antes de su fraguado inicial, aunque se pueden generar descensos de las resistencias y la contracción diferencial que puede ocasionar problemas de fisuramiento.

Aunque la pureza del yeso determina la calidad de los productos, desde la antigüedad se usó el yeso en la construcción para preparar mortero, siguiendo la norma convencional para su uso, de que un buen yeso para la construcción no debe ser puro. La proporción más corriente era:

1 volumen de cal	17%
2 volúmenes de arena	33%

3 volúmenes de yeso	50%
---------------------	-----

La cal adicionada, debe ser del tipo aérea o apagada es decir, que pueda sufrir un proceso de carbonatación en presencia del aire y nunca una cal del tipo hidráulico en la cual no se han neutralizado sus elementos constitutivos. Las cales grasas provienen de la cocción de una caliza pura, mientras que las cales hidráulicas contienen además de cal grasa, silicatos y aluminatos de calcio. Con la adición de cal al yeso, se pierde su propiedad de transpiración y se impermeabiliza la mezcla pero adquiere plasticidad, manejabilidad y adherencia. También aumenta la cantidad de agua retenida, pues una cal puede absorber entre el 40 y el 50% de agua. Cuando los rellenos llegan a ser muy gruesos, se pueden formar diaclasas que crean rupturas.

La protección contra el fuego está asociada a tres cualidades: La porosidad, el contenido de agua de cristalización que es del orden del 20% y el contenido de agua higroscópica. Estas propiedades le confieren una reacción endotérmica importante. Además su punto de fusión está alrededor de los 1450°C.

El yeso presenta bajo consumo de energía en su elaboración. Al utilizar subproductos químicos como materia prima, se observa una clara preservación del medio ambiente. En Colombia se utilizan algunas materias primas residuales para fabricar yeso, obteniéndose yesos de excelente calidad y menores costos.

-Desventajas del uso del yeso en la construcción

A pesar de las cualidades mencionadas anteriormente, el uso del yeso en la construcción presupone algunas desventajas como la acción corrosiva sobre el hierro y el acero en presencia de la humedad. Cualquier elemento de estos materiales que deba estar en contacto con el yeso debe protegerse con algún recubrimiento.

El yeso también puede afectar la durabilidad de los morteros y hormigones, pues en contacto con la humedad el ion SO_4^- reacciona con los aluminatos tricálcicos (AC_3) del cemento, formando la sal de Candlot más conocida como el “bacilo del cemento”

o etringita. Este fenómeno va acompañado de un considerable aumento de volumen o expansión que ocasiona fisuras generalizadas.

2.3.4.6.3 Normas para el control de calidad. (ASTM C471, C 472)

- Pureza del yeso

Se exige que el yeso tenga como mínimo un 37.5% de óxido de calcio y un mínimo de 53.5% expresado como SO_3 , determinados por valoración, y un máximo del 6% como agua combinada. Este último parámetro limita el contenido de los hemidratos o yeso sin calcinar.

- Consistencia

La consistencia indica la relación agua yeso para que la pasta adquiera una consistencia dada y se reporta como los mililitros de agua adicionados a 100 gramos de yeso. Dependiendo del tipo de yeso se encuentra entre 30 y 80 ml. Se mide con el diámetro de 6" formado por la pasta de yeso retardado, usando la copa con orificio de salida o con la aguja de Vicat modificada y con una penetración de tres centímetros.

- Tiempo de vida de la suspensión

Este método se aplica para la determinación del tiempo de vida de las suspensiones de yeso retardado que indica el tiempo requerido para perder sus propiedades de fluido.

- Tiempo de fraguado

Nos indica el tiempo útil de la pasta de yeso y se mide con la aguja de Vicat convencional. El yeso se considera fraguado cuando la aguja no penetra más hacia el fondo de la pasta. Los tiempos de fraguado indican la velocidad de las reacciones químicas y varían para cada yeso. Estos se deben acondicionar según las necesidades.

- Granulometría

Se mide la distribución del tamaño de las partículas de yeso con la serie de tamices estándar. En los yesos finos regularmente hay un porcentaje considerable de material que pasa la malla 325 y un porcentaje mínimo en la malla 200. La muestra se debe secar a una temperatura de 40° C.

- Otros ensayos son la medición de la masa específica y la masa unitaria que pueden indicar sobre la homogeneidad del yeso y se usa como en los cementos el frasco de Le Chatelier. Dependiendo del peso unitario se debe corregir el peso de 50 gramos que indica la norma. Las resistencias mecánicas a los esfuerzos de ruptura para flexión, tracción, dureza y compresión. La humedad total y el pH a una temperatura de 25 °C, también son importantes.

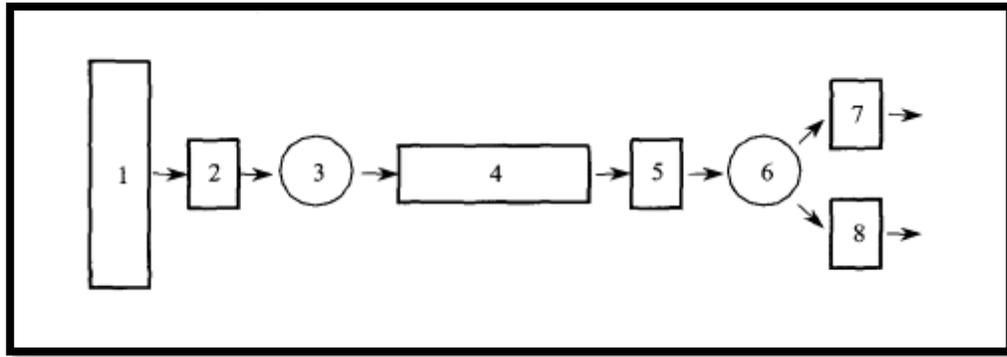
En algunos casos especiales es importante determinar el color y la apariencia que indiquen su pureza, blancura, olores, sabores y la presencia de materias extrañas. Otro parámetro importante es la observación de la estabilidad del yeso bajo condiciones adversas.

2.3.4.7 Fabricación del yeso

La piedra de yeso o aljez se extrae de canteras a cielo abierto o de canteras subterráneas. Esta materia prima extraída, previamente a su cocción, se tritura utilizando maquinaria apropiada, como pueden ser: los molinos de rodillos, machacadoras de mandíbulas, etc. El tamaño de grano tras su trituración viene determinado principalmente por el método o sistema de cocción a emplear.

2.3.4.8 Proceso productivo del yeso

Figura 2.1 Proceso productivo del yeso



Fuente: <http://www.yesosproinsa.com/yeso2.html>

- 1.- Canteras.
- 2.- Trituración de la materia prima.
- 3.- Almacenado en silos de la materia prima.
- 4.- Horno de cocción.
- 5.- Molienda del yeso fabricado.
- 6.- Almacenado en silos del yeso fabricado.
- 7.- Zona de carga directa del yeso en camiones cisterna.
- 8.- Zona de ensacado automático del yeso.

2.4 Propiedades de los suelos como subrasantes en carreteras

2.4.1 Conceptos básicos necesarios

El pavimento es un sistema estructural a base de capas que le dan las propiedades y resistencias necesarias para cumplir con las solicitaciones funcionales y estructurales. A nivel de capacidad funcional, debe poseer una calidad aceptable en la carpeta de rodadura, una adecuada fricción superficial, una buena geometría por seguridad, y determinado aspecto estético. A nivel estructural debe soportar las solicitaciones a las que se somete todo el paquete estructural (base, subbase y subrasante), teniendo en cuenta las cargas impuestas por el tránsito y las condiciones ambientales.

Las fallas que presente el pavimento serán el resultado de la interacción de los siguientes factores:

- Mal diseño. El diseño del pavimento debe estar orientado a cumplir los requisitos estructurales y funcionales.
- Mala práctica en la construcción.
- Falta de mantenimiento o mantenimiento inadecuado.
- Tránsito: Influye en magnitud y frecuencia; la frecuencia es importante porque en cada punto del pavimento habrá situaciones de carga y descarga. La principal característica de esta variable es que tiene una naturaleza cíclica o repetitiva.
- Materiales inadecuados; aquellos materiales que no cumplen con las especificaciones técnicas para la construcción de carreteras.
- Condiciones ambientales; como la temperatura ambiente que tiene influencia directa durante la construcción ya que hay que ver la humedad necesaria para la compactación del terreno de fundación; la napa freática, que puede alterar considerablemente la temperatura de equilibrio; el régimen de precipitaciones, que en nuestro medio se presenta en la estación de verano y que puede causar el incremento del nivel freático además de infiltración, pudiendo afectar el funcionamiento de la superficie del pavimento ocasionando desprendimientos, hundimientos, etc.

Un punto importante es la capacidad de drenaje que todas las capas deben tener. Este es un proceso mediante el cual el agua de infiltración superficial o agua de filtración subterránea es removida de los suelos por medios naturales o artificiales. El drenaje es uno de los factores más importantes en el diseño de carreteras, pues el agua tiene efectos altamente perjudiciales en la estructura, adonde ingresa a través de las grietas, juntas, bermas o como agua subterránea por el nivel freático; reduciendo la resistencia de las capas granulares como son la base y subbase y hasta del suelo de subrasante.

El diseño de las capas estructurales, exige que éstas sean hechas para resistir las solicitaciones mencionadas anteriormente con el fin de proporcionar seguridad a bajo costo, logrando una larga vida útil del pavimento.

2.4.2 Subrasante

Es el suelo de fundación (suelo natural libre de vegetación y compactado) en el que se apoya todo el paquete estructural. Este material puede ser tanto granular como afirmado, empedrados u otras carpetas granulares, seleccionados o cribados, producto de cortes y extracciones de canteras.

Si el terreno de fundación es malo, debe desecharse el material que lo compone, sustituyéndolo por un suelo de mejor calidad; si no es tan malo se le puede colocar una sub-base prescindiendo de ésta última si el material de fundación es bueno o regular. La subrasante tiene una gran influencia en la construcción del pavimento y en la eficiencia del mismo, así las subrasantes inestables presentan problemas relativos a la colocación y compactación de los materiales de la base y subbase y no dan el soporte adecuado para las subsiguientes operaciones de pavimentación, los problemas que se presentan no serán observados sino hasta después de la culminación de la construcción, cuando la estructura entre en funcionamiento y deba soportar las cargas del tránsito. Los esfuerzos, desplazamientos y agrietamientos son influidas en gran porcentaje por ésta capa, un gran porcentaje de las deflexiones que se producen en la superficie de un pavimento se le puede atribuir a las subrasantes, por este motivo se debe asegurar una buena caracterización de la subrasante.

Entre las propiedades requeridas para estos suelos tenemos:

- Resistencia
- Drenaje
- Fácil compactación
- Conservación de la compactación
- Estabilidad volumétrica

2.4.3 Características y Control

El material deberá cumplir con las normas y características de calidad, a continuación presentamos tablas en las cuales clasificamos de acuerdo al C.B.R., el tipo de terracerías y subrasantes:

Tabla 2.8 Categorías de suelos para Terracerías y capa Subrasante

Característica	Suelos Tolerables	Suelos Adecuados	Suelos Seleccionados
Tamaño máximo	25 % > 15 cm	< 10 cm	< 8 cm
Contenido de finos, %	....	≤ 35	≤ 25
Límite Líquido, %	≤ 40	≤ 40	≤ 30
Índice de Plasticidad, %	....	....	≤ 10
Peso vol. Máximo, Kg/m ³	≥ 1450	≥ 1750	....
C.B.R. %	> 3	> 5	> 10
Expansión, %	....	< 2	0

Fuente: Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto IMCYC

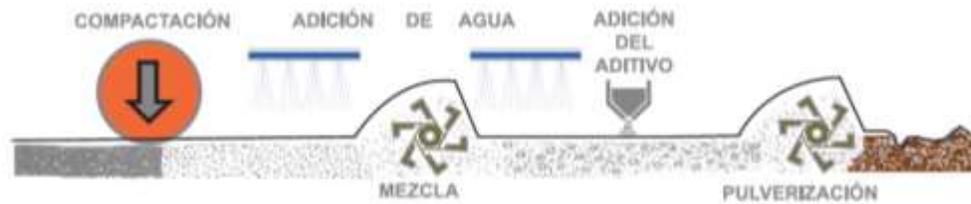
Para el control tecnológico se ejecutan los siguientes ensayos:

- Un ensayo de compactación para la determinación de la densidad máxima según el método AASHTO T-180-D para cada 1000 m³ del mismo material, con un espaciamiento máximo de 100 metros lineales; con las muestras recogidas en puntos que obedezcan siempre el orden: borde derecho, eje, borde izquierdo y viceversa.
- Determinación de la densidad en sitio cada 100 metros. lineales en los puntos donde fueran obtenidas las muestras para los ensayos de compactación.
- Determinación del contenido de humedad cada 100 metros lineales inmediatamente antes de la compactación.

Ensayos de granulometría AASHTO 27, de límite líquido AASHTO T-89 y límite plástico AASHTO T-90; espaciamiento máximo de 250 metros lineales.

2.4.4. Procedimientos de construcción

Figura 2.2 Fases de la estabilización en sitio



Fuente: Ingeniería de carreteras vol II. Del val Melús, Miguel Ángel; Kraemer Heilperno, Carlos; Pardillo, José María; Rocci, Sandro; Romana, Manuel G. & Sánchez Blanco, Victor. Primera Edición, 2004

El procedimiento básico para la construcción de una modificación con cal o cemento es muy similar, puede realizarse en sitio o en planta. En el caso de la estabilización en sitio puede dividirse en dos etapas (Figura 2.1): la preparación y el procesamiento o construcción, cuyas fases se detallan a continuación:

1. Preparación inicial:
 - Conformar la superficie, coronar y preparar pendientes transversales.
 - De ser necesario; escarificar, pulverizar y prehumedecer el suelo.
 - Reconformar la superficie.
2. Procesamiento:
 - Dispersar el aditivo y mezclar.
 - Aplicar agua y mezclar.
 - Compactar.
 - Afinar.
 - Curar.

El proceso constructivo incluye una serie de variables que dependen del aditivo, del material e inclusive del equipo que se utilice para la construcción, entre otros. En la guía se presentan indicaciones específicas para cada caso.

2.5 Suelos arcillosos características y propiedades

2.5.1 Definición

Se puede entender a los materiales arcillosos como aquéllos que poseen una parte relevante de suelos cohesivos y que como tales condicionan su comportamiento, frente a los restantes materiales existentes en las obras o en el terreno.

2.5.2 Arcillas

Las arcillas están constituidas básicamente por silicatos de aluminio hidratados, presentando además, en algunas ocasiones, silicatos de magnesio, hierro u otros metales, también hidratados. Estos minerales tienen, casi siempre, una estructura cristalina definida, cuyos átomos se disponen en láminas. Existen dos variedades de tales láminas: la silícica y la alumínica.

2.5.3 Características de las arcillas

- Material de estructura laminar
- Sumamente higroscópico
- Su masa se expande con el agua
- Con la humedad se reblandece y se vuelve plástica
- Adquiere gran dureza al ser sometida a temperaturas mayores a 600°C.

2.5.4 Clasificación de las arcillas

Desde el punto de vista geológico: Se pueden distinguir entre primarias las cuales son de tipo hipogénico y que permanecieron en el mismo lugar de su formación, y las secundarias que fueron acarreadas a lugares diferentes al de su origen.

- Fluviales: Depositadas por ríos y siendo depósitos de baja calidad
- Lacustres: Asentados en lagos y estando en capas uniformes de buena calidad
- En deltas: Son arenosas y de composición irregular
- Glaciales: Formadas por la acción de grandes masas de hielo sobre rocas cristalinas.

2.5.5 Clasificación de los minerales arcillosos

Mineral de arcilla caolinita: Están formadas por una lámina silícica y otra alumínica, que se superponen indefinidamente. La unión entre todas las retículas es lo suficientemente firme para no permitir la penetración de moléculas de agua entre ellas (adsorción). En consecuencia, las arcillas caoliniticas serán relativamente estables en presencia del agua.

Mineral de Arcilla Illita: Por lo general, están estructuradas análogamente que las montmorilonitas, pero su constitución interna manifiesta tendencia a formar grumos de materia, que reducen el área expuesta al agua por unidad de volumen y, en general, las arcillas illíticas, se comportan mecánicamente en forma más favorable para el ingeniero.

Mineral de Arcilla Montmorilonita: Están formadas por una lámina alumínica entre dos silícicas, superponiéndose indefinidamente. En este caso la unión entre las retículas del mineral es débil, por lo que las moléculas de agua pueden introducirse en la estructura con relativa facilidad, a causa de las fuerzas eléctricas generadas por su naturaleza dipolar. Lo anterior produce un incremento en el volumen de los cristales, lo que se traduce, macrofísicamente, en una expansión. Las arcillas montmoriloníticas, especialmente en presencia de agua, presentarán fuerte tendencia a la inestabilidad. Las bentonitas son arcillas del grupo montmorilonítico, originadas por la descomposición química de las cenizas volcánicas y presentan la expansividad típica del grupo en forma particularmente aguda, lo que las hace sumamente críticas en su comportamiento mecánico. Estas arcillas aparecen, desdichadamente, con frecuencia en los trabajos de campo; por otra parte, en ocasiones, ayudan al ingeniero en la resolución de ciertos problemas prácticos.

Tabla 2.9 Caracterización de minerales arcillosos más comunes

Grupo mineral arcilloso	Composición	Capas	Espesor entre capas	Observación
Coalín	$\text{Al}_4\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_8$	Tetraédrica, con Si^{4+} : 1 capa Octaédrica, con Al^{3+} : 1 capa	7 Å	Presenta la plasticidad más baja entre los minerales arcillosos. La caolinita y la halloysita pertenecen a este grupo.
Ilita	$\text{K}_{0.74}(\text{Al}_{1.56}\text{Mg}_{0.28}\text{Fe}_{0.22})(\text{Si}_{3.4}\text{Al}_{0.6})(\text{OH})_2$	Tetraédrica, con Si^{4+} : 2 capas Octaédrica, con Al^{3+} : 1 capa	10 Å	Los minerales ilíticos pertenecen a este grupo. Muestran carga laminar similar a las micas, en especial con la moscovita.
Esmectitas	$\text{Al}_4\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_8$	Tetraédrica, con Si^{4+} : 2 capas Octaédrica, con Al^{3+} : 1 capa	De 9.6 Å hasta 18 Å	La montmorillonita es el mineral más frecuente. La montmorillonita sódica presenta la plasticidad más alta dentro de los minerales arcillosos. La bentonita se compone en su mayor parte de montmorillonita.

Fuente: González de Vallejo et al., 2006

Clasificación de las arcillas en base a su estabilidad

- Arcillas Caolinitas:

Formadas por una lámina de silicio y una de aluminio. La unión de estas arcillas no permite la penetración de moléculas de agua entre ellas (se les considera estables).

- Arcillas Ilicas:

Formadas por una lámina de aluminio entre dos de silicio. Son menos expansivas que las montmorilonitas y su comportamiento es más favorable para el ingeniero civil.

- Arcillas Montmorilonitas:

Formadas por una lámina de aluminio entre dos de silicio. Su unión es débil por lo que las moléculas de agua pueden introducirse en la estructura con facilidad, por lo que son inestables en presencia de agua y pueden producir problemas en las construcciones que se cimienten en este tipo de arcillas.

2.6.6 Arcillas en la ingeniería civil:

En general el estudio de suelos en la ingeniería civil incluye mineralogía y comportamiento bajo condiciones diversas.

La determinación mineralógica es importante porque permite predecir su comportamiento y la forma de controlarlo. La mineralogía permite estimar características de un suelo pero no calcular los valores absolutos representativos de su comportamiento actual. De aquí que se hagan una serie de pruebas características entre las cuales se encuentran:

Tamaño del grano: El orden del tamaño arcilloso varía desde 0.005 mm hasta dimensiones coloidales, teniendo muchas partículas arcillosas un diámetro inferior a 0.0002 mm.

En el cuadro que se adjunta se destaca la división adoptada para los distintos sistemas de clasificación que actualmente utilizamos los ingenieros en nuestros proyectos

Tabla 2.10 Definición del tamaño de partículas

Nombre de la Organización	Tamaño de los granos (mm)			
	Grava	arena	limo	arcilla
Massachusetts Institute of Tec.	> 2	2 a 0,06	0,06 a 0,002	<0,002
U.S. Dep. of Agriculture	> 2	2 a 0,05	0,05 a 0,002	<0,002
AASHTO	76,2 a 2	2 a 0,075	0,075 a 0,002	<0,002
Sistema Unificado de Clasif. US Army Corp. Of Engineering US Bureau of Reclamation ASTM	76,2 a 4,75	4,75 a 0,075	<0,075	

Nota: El tamaño correspondiente a 76,2 mm corresponde al tamiz US de 3".

El tamaño correspondiente a 4,75 mm corresponde al tamiz US N° 4.

El tamaño correspondiente a 2 mm corresponde al tamiz US N° 10.

El tamaño correspondiente a 0,075 mm corresponde al tamiz US N° 200.

Fuente:<http://apuntesingenierocivil.blogspot.com/2010/10/distribucion-del-tamano-de-particulas.html>

2.6.7 Incidencia de arcillas en obras viales

La incidencia de las arcillas, radica en que constituyen en alto porcentaje los suelos naturales (subrasantes), con mayor énfasis en los que geológicamente aún se encuentran en formación.

Todas las estructuras viales que el hombre ha diseñado, desde siempre, incluyendo las actuales, se basan en dos premisas: la 1° de ellas considera las cargas que deberá soportar la vía, durante el tiempo de vida útil que requerimos. Es un dato estadístico muy difícil de modificar.

La 2° premisa es la capacidad portante del suelo natural sobre el que debemos soportar nuestra vía. En la medida en que mayor sea la capacidad portante de este estrato menor será el espesor de la estructura requerida, para una carga o esfuerzo determinados, lo que redundará en economía, en todos los aspectos y menor deterioro ambiental.

Cuando la capacidad portante del suelo natural no es la adecuada o es muy baja, se busca mejorar la calidad del suelo ya sea adicionando materiales que le ayuden a mejorar las características de mencionado estrato o sustituyéndolo por otro, de ahí nace la idea de estabilizarlo.

Son suelos inadecuados para su empleo en subrasantes los suelos orgánicos o con materia orgánica (hojas, hierba, raíces, desechos orgánicos y otros materiales putrescibles), por ello no se empleará la capa de tierra vegetal, ni materiales procedentes turberas, etc., tampoco es conveniente emplear escombros y vaciados heterogéneos, que pueden dar lugar a asientos diferenciales en servicio.

En cambio es conveniente estudiar la posibilidad de empleo de subproductos y desechos industriales locales, que en algunas zonas presentan problemas ecológicos y de acopio; cenizas volantes, desechos de cantera, ciertos materiales minerales subproductos de industrias químicas, materiales puzolánicos, etc.

2.7 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.

2.8 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 Clasification (Corps of engineers, Departament 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.

Tabla 2.11 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.

2.8.1 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)

$$IP = LL - PL$$

Plasticidad: La plasticidad y el uso extenso que de ella hace el especialista en mecánica de suelos, constituyen una de las cuestiones más difíciles de comprender para el ingeniero ajeno a la especialidad. Y sin embargo, el concepto que se halla debajo de la utilización de las ideas de plasticidad es ampliamente familiar en nuestra vida cotidiana. Es común que en la naturaleza existan magnitudes cuya medición directa sea difícil o costosa; en tal caso, el intentar una medición indirecta constituye una técnica común a muchos campos de la actividad científica. Se trata de buscar una magnitud, diferente de la que se desea medir, que sea fácilmente medible y cuya correlación con la magnitud problema sea conocida y confiable.

Dentro de los límites del sentido que se da al término en la mecánica de suelos, plasticidad puede definirse como la propiedad de un material por la que es capaz de soportar deformaciones rápidas, sin rebote elástico, sin variación volumétrica apreciable y sin desmoronarse ni agrietarse.

Según su contenido de agua decreciente, un suelo susceptible de ser plástico puede estar en cualquiera de los siguientes estados de consistencia, definidos por Atterberg: límite líquido, estado semilíquido, estado plástico, estado semisólido y estado sólido.

El Índice de Plasticidad (IP): Es una medida de cuánta agua puede absorber un suelo antes de disolverse en una solución. Mientras más alto es este número, el material es

más plástico y más débil. Generalmente la cal reacciona con suelos plástico que tengan un IP entre 10 a 50, reduciendo así significativamente el IP, creando de esta manera un nuevo material con resistencia estructural. Suelos con IP menores a 10, usualmente, no reaccionan tan fácilmente con la cal.

2.9 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**

2.9.1 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:

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

que pasa el tamiz N° 40										
LL: IP:	6max	NP	40má x 10má x	41min 10má x	40má x 1min	40min 11min	40má x 10má x	41min 10má x	40má x 11min	41min 11min
Índice de Grupo	0	0	0		4máx		18má x	12má x	16má x	20má x

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

2.9.2 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.

Tabla 2.13 Clasificación de suelos sistema unificado.

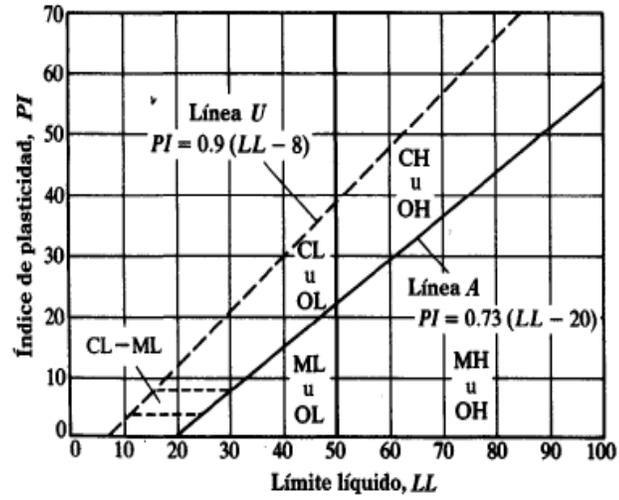
Símbolo	G	S	M	C	O	Pt	H	L	W	P
Descripción	Grava	Arena	Limo	Arcilla	Limos Orgánicos y arcilla	Turba y Suelos Altamente orgánicos	Alta plasticidad	Baja plasticidad	Bien graduados	Mal graduados

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

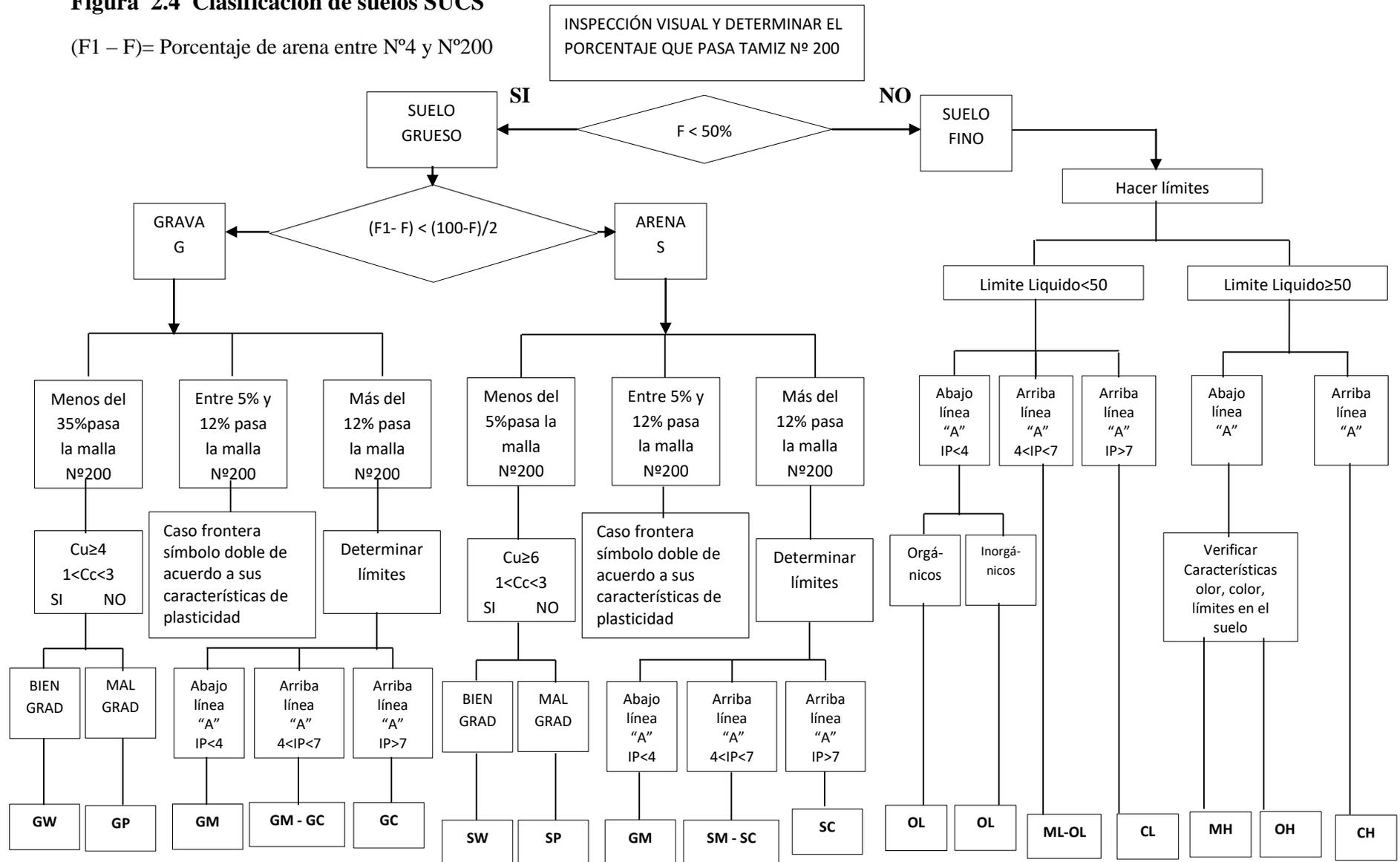
Figura 2.3 Carta de plasticidad.



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

Figura 2.4 Clasificación de suelos SUCS

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



2.10 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).

Tabla 2.14 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.

2.11 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 ún 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)

2.11.1 Prueba Proctor estándar.

En la prueba Proctor, el suelo es compactado en un molde que tiene un volumen de 943,3 cm³. 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:

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

Donde:

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:

$$\gamma_d = \frac{\gamma}{1 + \frac{w(\%)}{100}}$$

Donde:

$w(\%)$ = 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.

2.11.2 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 $943,3 \text{ cm}^3$ 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 ($943,3 \text{ cm}^3$) 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.

Tabla 2.15 Especificaciones para prueba de Proctor estándar (ASTM D698-91)

Concepto	Método A	Método B	Método C
Diámetro del molde	4 pulg	4 pulg	6 pulg

	(101,6 mm)	(101,6 mm)	(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)
Número de golpes del pizón por capa de suelo	25	25	56
Número 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 3/4 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 3/4 pulg (19,0 mm).

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

Tabla 2.16 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	18 pulg	18 pulg

	(457,2 mm)	(457,2 mm)	(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

2.11.3 Método C.B.R.

Fue propuesto en 1929 por los ingenieros T. E. Stanton y O. J. Porter, del Departamento de Carreteras del Estado de California. Desde esa fecha, tanto en Europa como en América, el método C.B.R. (California Bearing Ratio= Relación de Soporte California) se ha generalizado y es, hoy en día, uno de los más empleados para el cálculo de pavimentos flexibles.

Se establece en él una relación entre la resistencia a la penetración de un suelo, y su capacidad de soporte como base de la sustentación para pavimentos flexibles. Si bien este método es empírico, se base en un sinnúmero de trabajos de investigación terreno, lo que permite considerarlo como uno de los mejores procedimientos prácticos sugeridos hasta hoy.

Dado que el comportamiento de los suelos varía de acuerdo con su “grado de alteración”, con su granulometría y sus características físicas, el método a seguir para determinar el C.B.R., será diferente en cada caso. Así tendremos:

-Determinación del C.B.R. de suelos perturbados y remoldeados.

-Gravas y arenas.

-Suelos cohesivos y expansivos.

-Determinación del C.B.R. de suelos inalterados.

-Determinación del C.B.R. in situ.

2.11.4 Resistencia a compresión confinada: Se pueden distinguir entre suelos:

Muy blandos.- resistencia menor de 0.25 kg/cm^2

Blandos.- resistencia entre 0.25 y 0.50 kg/cm^2

Medios.- resistencia entre 0.50 y 1 kg/cm^2

Rígidos.- resistencia entre 1 y 2 kg/cm^2

Muy rígidos.- resistencia entre 2 y 4 kg/cm^2

3.1 Ubicación

Los materiales para el respectivo estudio se trajeron de los de los barrios Los Chapacos, Los Olivos, Nueva Terminal y Fortaleza.

La primera unidad se encuentra en el barrio Los Chapacos. El terreno está compuesto por material fino con contenido de arcillas de color blanquecino, seca de textura fina.

La segunda unidad está ubicada en el Barrio Los Olivos carretera hacia Tomatitas, está compuesto por material muy fino de arcillas de color amarillo, de textura secas.

La tercera unidad está ubicada en La Nueva Terminal, está compuesto por material muy fino de arcillas de color amarillo, de textura secas.

La cuarta unidad está ubicada en el Barrio Fortaleza, está compuesto por material muy fino de arcillas de color amarillo, de textura secas.

3.2 Muestreo de materiales

Para elegir las muestras de los suelos, se tuvo en cuenta que fueran arcillas finas con un comportamiento plástico y expansivo.

Con este objeto fue necesaria una previsualización de los terrenos y sus aptitudes geotécnicas para la futura estabilidad de las mismas. La muestra se la extrajo cumpliendo las especificaciones y siguiendo los pasos indicados en las guías de laboratorio para la extracción de muestra (ASTM D4220) del manual de carreteras V4C.

3.2.1 Muestreo para el Barrio Los Chapacos:

Para este muestreo se procedió a la toma directa del material debido a que en la zona se encontraba excavado y amontonado en un costado y estaba libre de materia orgánica, las muestras tomadas se las colocaron en bolsas de nylon para la caracterización del mismo y especialmente para evitar la pérdida de humedad natural del suelo y saquillos para los ensayos de estabilización debido a que se trabajará con muestras secas. En las siguientes figuras se observa la zona de extracción de las muestras de campo.

Figura 3.1: Zona de procedencia del material extraído: Muestra (arcilla blanquecina)



Fuente: Elaboración Propia

3.2.2 Muestreo para el Barrio Los Olivos

El muestreo consistió en recoger el material debido a que estaba removido y excavado por maquinaria y en montones por los costados, luego se procedió a recoger el material en bolsas para los respectivos ensayos.

Figura 3.2: Zona de procedencia del material extraído: Muestra (arcilla media ploma)



Fuente: Elaboración Propia

3.2.3 Muestreo para la Nueva Terminal

El muestreo consistió en recoger el material debido a que estaba removido y excavado por maquinaria y en montones por los costados, luego se procedió a recoger el material en bolsas para los respectivos ensayos.

Figura 3.3: Zona de procedencia del material extraído: Muestra (arcilla ploma con blanco)



Fuente: Elaboración Propia

3.2.4 Muestreo para el Barrio Fortaleza

El muestreo consistió en recoger el material debido a que estaba removido y excavado por maquinaria y en montones por los costados, luego se procedió a recoger el material en bolsas para los respectivos ensayos.

Figura 3.4: Zona de procedencia del material extraído: Muestra (arcilla blanca con amarillo)



Fuente: Elaboración Propia

3.2.5 Proceso de obtención del sulfato de calcio y yeso

El yeso se encuentra abundantemente en la naturaleza, en nuestro medio el yeso se encuentra en el Chaco como comunidades de Huayco, ubicado cerca de Entre Ríos en la Provincia O'Connor.

Se obtiene directamente de la naturaleza por extracción en forma de roca de yeso (mineral de sulfato de calcio dihidratado) en canteras y se procesa en hornos rústicos industrialmente con poca alteración. Este proceso consiste en la calcinación térmica del mineral triturado, eliminando total o parcialmente el agua de cristalización químicamente combinada. Al mezclarse con agua forma una pasta que fragua y endurece, reconstituyendo su estado original.

Figura 3.5: Proceso de obtención del sulfato de calcio



Fuente: Elaboración Propia



Fuente: Elaboración Propia

3.3 Selección del porcentaje de sulfato de calcio y yeso

La selección del porcentaje de sulfato de calcio y yeso se realizó basándose de forma general en otros estudios aplicados para suelos cohesivos y los porcentajes de sulfato de calcio y yeso 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 sulfato de calcio y yeso, porque no se realiza la dosificación según lo indicado por la teoría.

Tabla 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.

Tabla 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 3%, 5%, 10% y 12% de sulfato de calcio y yeso referido al suelo seco, según una recomendación general de estudios que recomiendan usarla para suelos cohesivos dosificaciones entre 3% hasta 12%.

3.4 Caracterización de materiales

Para conocer las propiedades de los suelos utilizados en el proyecto, se tomaron muestras en todo el desarrollo del mismo, posteriormente en el Laboratorio de suelos se determinarán sus propiedades y clasificación de las mismas según la norma AASHTO y SUCS (ver tabla 2.7 y figura 2.4 Clasificación de suelos según AASHTO).

3.4.1 Análisis granulométrico (ASTM D 422 AASHTO T88)

La prueba de granulometría sirve para determinar el porcentaje en peso de las partículas de diferentes tamaños, teniendo una visión de la distribución del tamaño de los granos presentes en un suelo. El ensayo de análisis granulométrico por tamizado se realizó mediante el método del lavado en el cual se pesa 500 gr como peso total, se procede a realizar el lavado por la malla número 200 de acuerdo a la norma AASHTO-T88 (Ver Figura 3.6). Después que el suelo está seco se pesa y se procede al tamizado por la malla N° 40 y 200, desde arriba hacia abajo. El primer tamiz, es el de mayor tamaño y es donde inicia el tamizado. Se tapa con el fin de evitar pérdidas de finos; el último tamiz está abajo y descansa sobre un recipiente (base) de forma igual a uno de los tamices, y recibe el material más fino no retenido por ningún tamiz.

Luego proceder a realizar el pesaje del material retenido en cada malla. (Ver Figura 3.7).

Figura 3.6.- Lavando el suelo por la malla N°200



Fuente: Elaboración Propia

Figura 3.7.- Tamizando lo que queda en la malla N°200



Fuente: Elaboración Propia

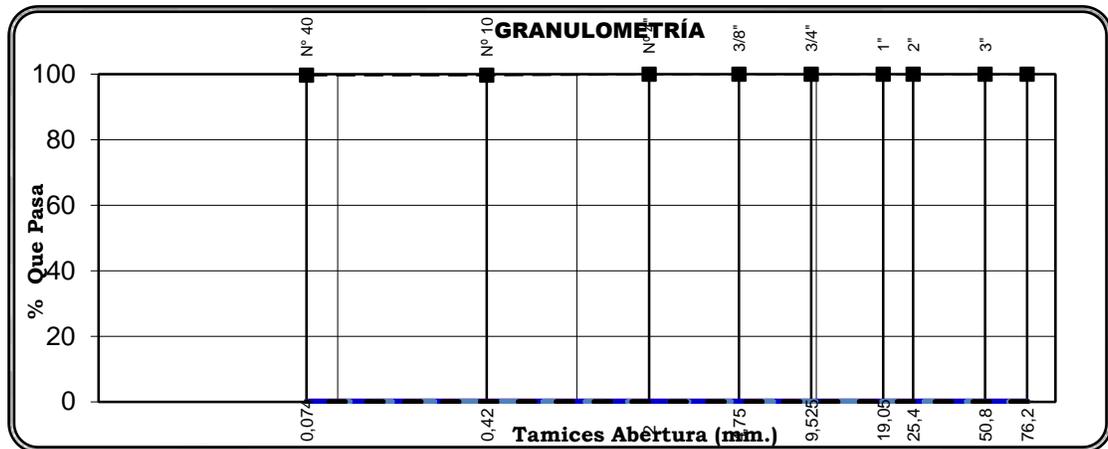
Tabla 3.3 Resultados de granulometría de los suelos naturales

Zona de Estudio	N°1	N°2	N°3	N°4
Tamices	% Que Pasa del total	% Que Pasa del total	% Que Pasa del total	% Que Pasa del total
3"	100	100	100	100
2"	100	100	100	100
1 1/2"	100	100	100	100
1"	100	100	100	100
3/4"	100	100	100	100
1/2"	100	100	100	100
3/8"	100	100	100	100
N°4	100	100	100	100
N°10	100	100	100	100
N°40	99.7	99.8	99.8	97.5
N°200	99.7	97.3	97.7	94.4

Fuente: Elaboración Propia

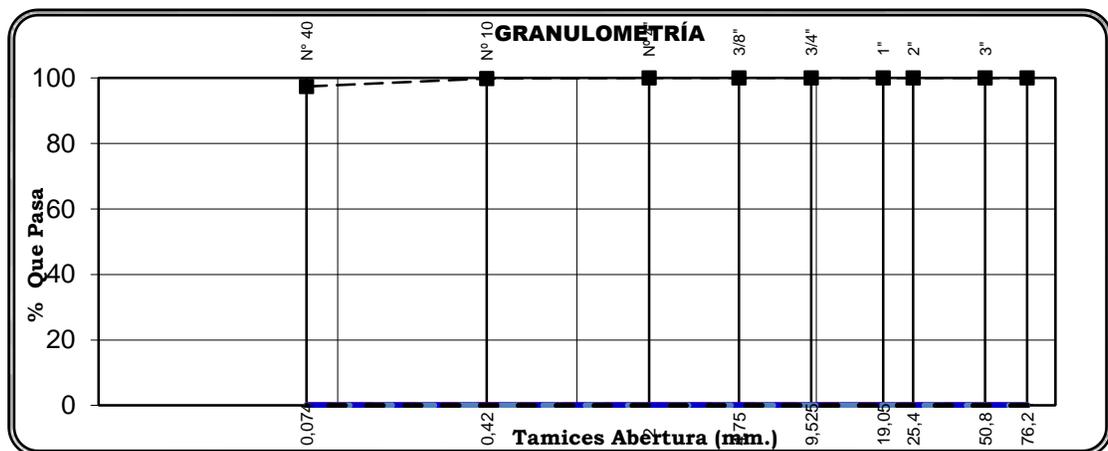
La granulometría de la zona 1 correspondiente al Barrio Los Chapacos, la granulometría de la zona 2 corresponde al Barrio Los Olivos, la granulometría de la zona 3 corresponde a la Nueva Terminal y la granulometría de la zona 4 corresponde al Barrio Fortaleza, todos estos lugares son de características finas propias de las arcillas, siendo el barrio Los Chapacos y el Barrio Los Olivos suelos A-7 y la Nueva Terminal y el Barrio Fortaleza suelos A-6.

Gráfica 3.1. Granulometría del suelo natural del Barrio Los Chapacos



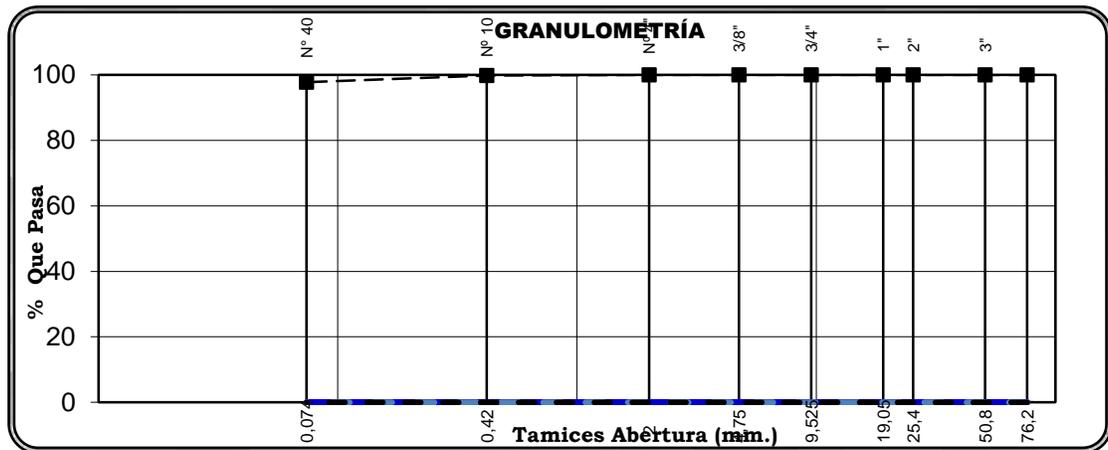
Fuente: Elaboración Propia

Gráfica 3.2. Granulometría del suelo natural del Barrio Los Olivos



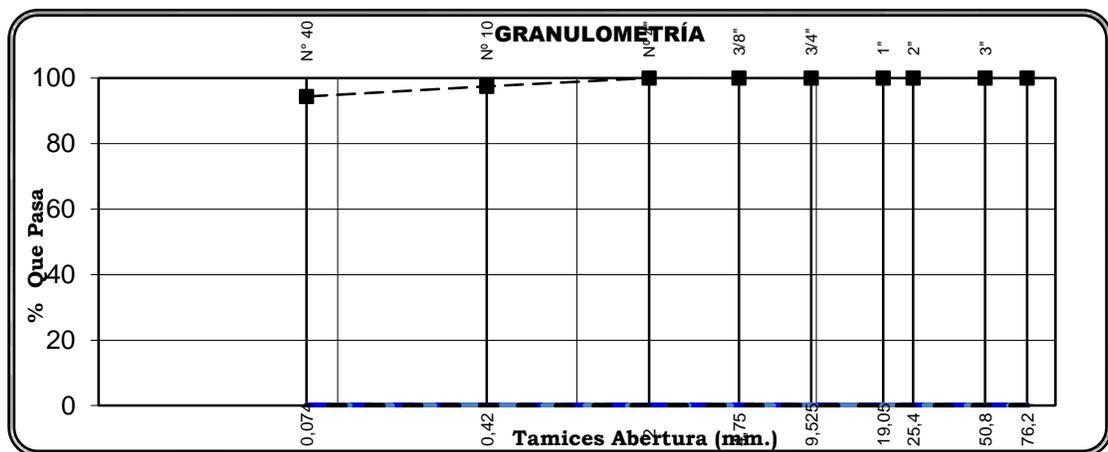
Fuente: Elaboración Propia

Gráfica 3.3. Granulometría del suelo natural de la Nueva Terminal



Fuente: Elaboración Propia

Gráfica 3.4. Granulometría del suelo natural del Barrio Fortaleza



Fuente: Elaboración Propia

3.4.2 Límites de Atterberg (ASTM D4318 AASHTO T90-T89)

Los límites de plasticidad se realizaron conforme a la norma y este corresponde a la humedad, o sea el porcentaje de agua respecto al peso de los sólidos en que los finos de los materiales pasan de una consistencia a otra.

- ✓ **Límite Líquido:** Se determina mediante el método de la cuchara de casa grande (NLT-105). El ensayo se basa en la determinación de la cantidad de agua mínima que se puede contener en una pasta formado de más o menos 100 gr de suelo seco que haya pasado el tamiz N°40. Para ello, se coloca sobre el mencionado artefacto y se acciona el mecanismo de este, contándose el número de golpes necesario para cerrar un surco (realizado previamente con un ranurador normalizado) en una longitud alrededor de 12 mm. El ensayo se dará por válido cuando se obtengan determinaciones entre 15-25; 25-30; 30-35; 35-40 golpes. La humedad correspondiente al límite líquido será la correspondiente a 25 golpes, y se determinará interpolando en una gráfica normalizada las cuatro determinaciones obtenidas experimentalmente.
- ✓ **Límite Plástico (NLT-106):** Se determina en base de la menor humedad de un suelo que permite realizar con el cilindro de 3 mm de diámetro que presenten fisuras sin que se desmoronen, realizándose 4 determinaciones y hallando la media. Este ensayo se realiza con aproximadamente 200 gr. de muestra seca y filtrada a través del tamiz N°40, como en el caso anterior.

A la diferencia entre ambos límites se denomina “índice de plasticidad” (IP), y da una idea del grado de plasticidad que presenta el suelo; un suelo muy plástico tendrá un alto índice de plasticidad.

En las Figuras se puede observar parte del desarrollo del ensayo del límite líquido y plástico.

Figura 3.8: Límites de Atterberg



Fuente: Elaboración Propia

Tabla 3.4 Resultados correspondientes a la plasticidad de las muestras sin estabilizar

Zona de estudio	Nº1	Nº2	Nº3	Nº4
Límite Líquido (L.L.) %	44.80	44.6	29.7	32.4
Límite Plástico (L.P.)%	23.8	30.4	16.9	16.4
Índice de Plasticidad (I.P.)%	21.10	14.2	12.8	16

Fuente: Elaboración Propia

3.4.3 Contenido de Humedad y Clasificación

El ensayo de contenido de humedad natural (ASTM D2216) se realizó de acuerdo a lo especificado en el Vol.4C del manual de carreteras.

Tabla 3.5 Resultados correspondientes al contenido de humedad natural

Zona de estudio	N°1	N°2	N°3	N°4
W %	8.74	7.10	6.16	8.43

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 3.6 Clasificación de los suelos según AASHTO y SUCS

CLASIFICACIÓN DEL SUELO		DESCRIPCIÓN
N°1	CL	Arcilla ligera
	A-7-6(13)	
N°2	CL	Arcilla ligera
	A-7-5(11)	
N°3	CL	Arcilla ligera
	A-6(9)	
N°4	CL	Arcilla ligera
	A-6(10)	

Fuente: Elaboración Propia

3.4.4 Compactación (AASHTO T-180/ ASTM D1557)

El ensayo de proctor se realizó por el método de la norma (AASHTO T-180/ ASTM D1557) modificado y permite conocer el grado de humedad de un suelo para alcanzar una densidad máxima aplicando una energía de compactación determinada, para este caso se utilizó por el tipo de material el método C.

El agua, al actuar como lubricante de las partículas de un suelo facilita la compactación de un suelo seco y encontrar la humedad óptima para alcanzar una densidad máxima seca con una misma energía de comparación. La prueba es importante para controlar la calidad de los procesos de compactación que se le dan a las capas de subrasantes varían entre el 90% y el 95%.

El procedimiento de ensayo consiste en apisonar en 5 capas consecutivas una cantidad aproximadamente de 6 kg de suelo previamente tamizada por el tamiz N°4 y dividida por cuarteo en 5 partes aproximadamente iguales. La muestra se humecta y se introduce en un molde metálico de dimensiones normalizadas (2113 cm³).

Para llevar a cabo el apisonado se emplea un pistón también normalizado, de forma que su peso y altura de caída no varíen, lo que asegura una energía de compactación constante. La normativa estipula una cantidad de 56 golpes con el pistón por cada capa de suelo. Se realizan alrededor de 4 a 5 determinaciones con diferente grado de humedad construyendo la curva “humedad-densidad seca”.

En las siguientes Figuras se muestra la realización del ensayo compactación.

Figura 3.9: Ensayo de compactación



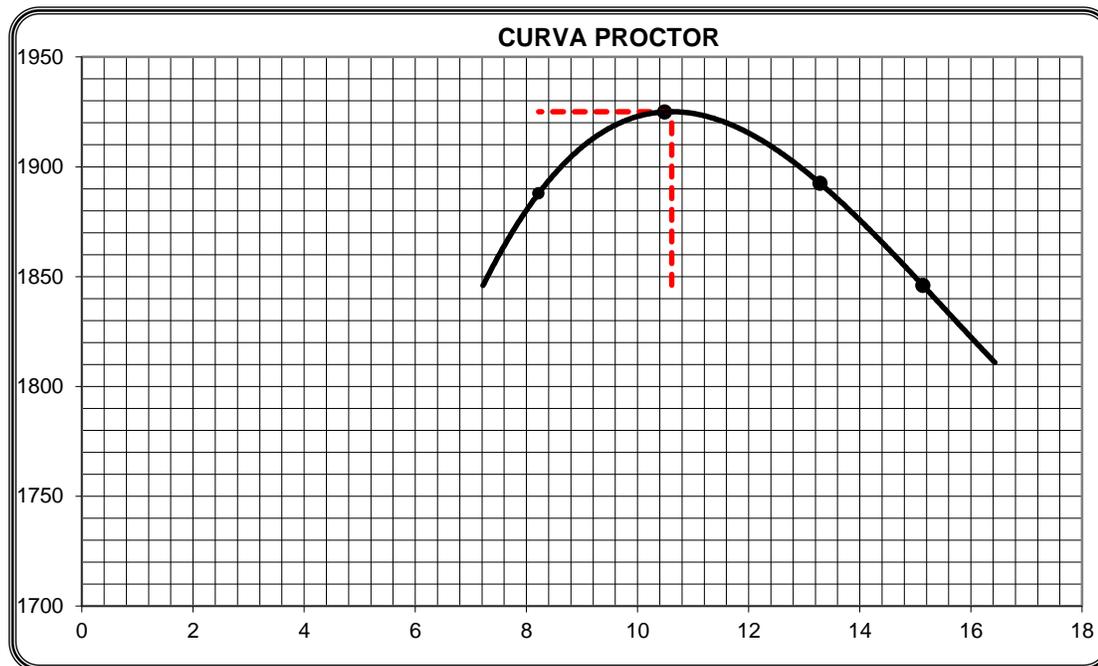
Fuente: Elaboración Propia

Tabla 3.7 Resultados del ensayo de compactación del suelo natural

Zona de estudio	N°1	N°2	N°3	N°4
Densidad máxima al 95% (kg/m^3)	1829	2137	1859	1829
Humedad Óptima (%)	10.6	12.2	11.2	12.4

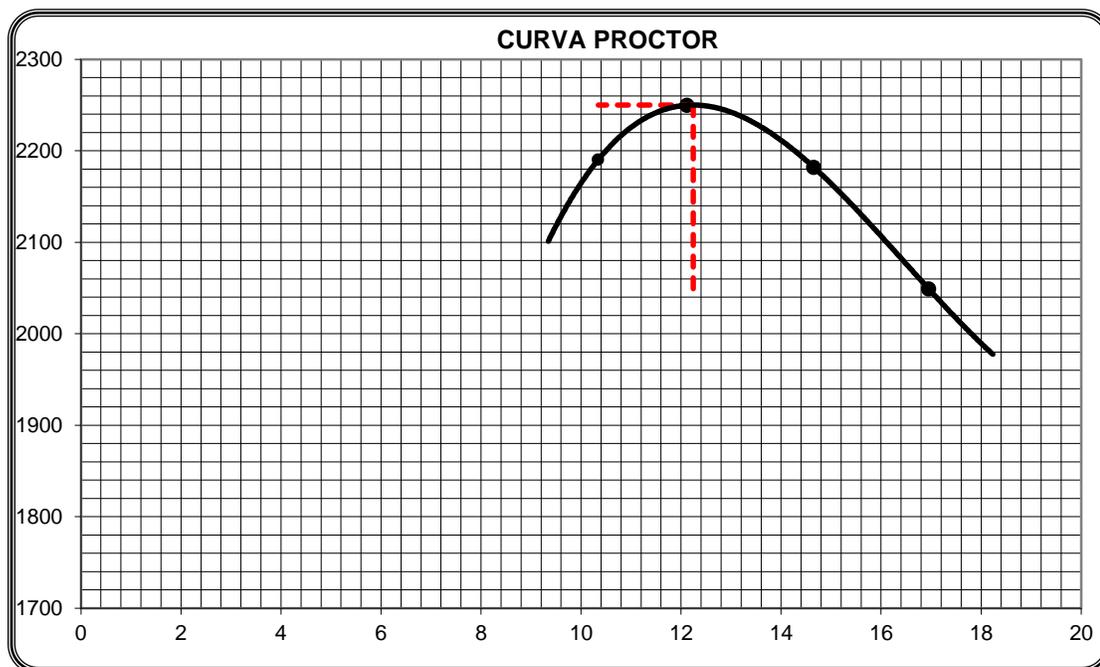
Fuente: Elaboración Propia

Gráfica 3.5. Curva de compactación para el Barrio Los Chapacos



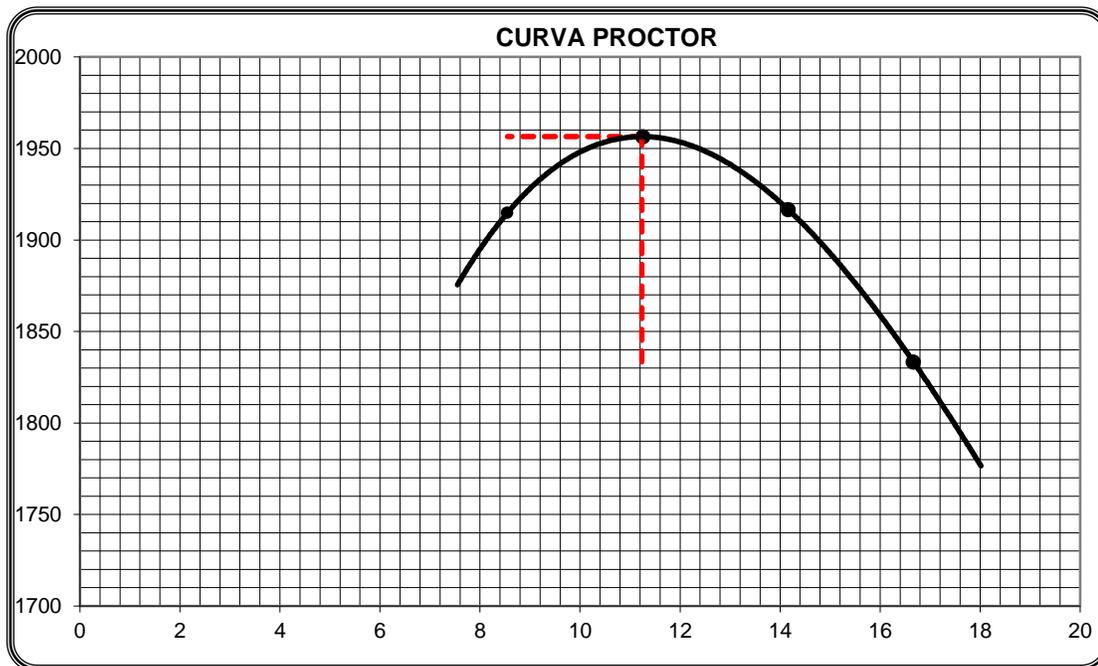
Fuente: Elaboración Propia

Gráfica 3.6. Curva de compactación el Barrio Los Olivos



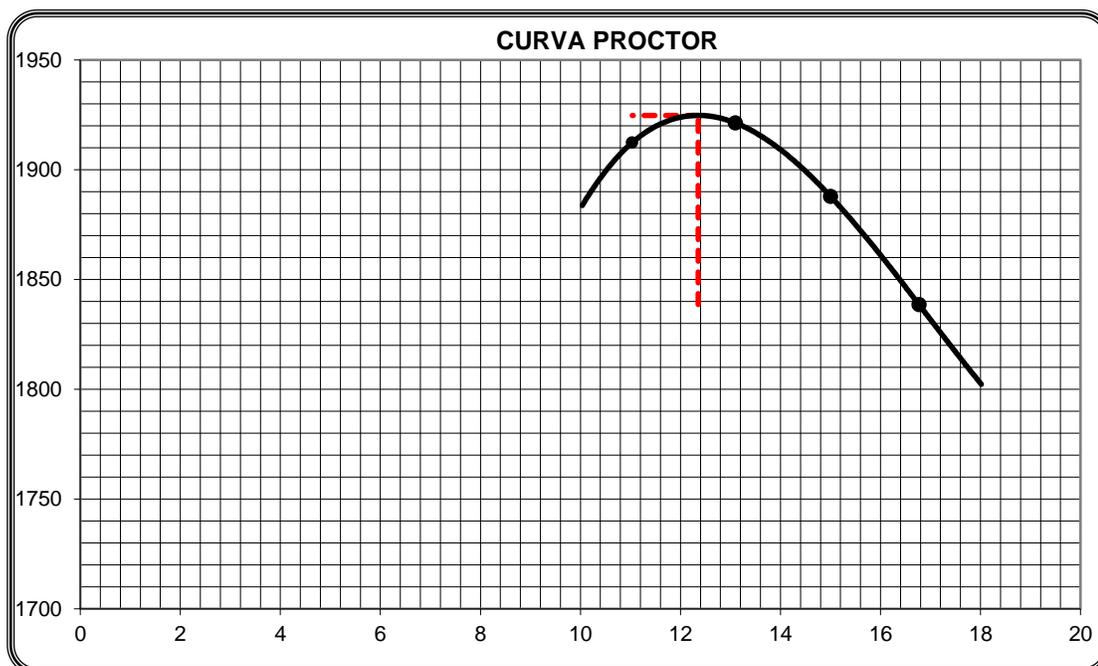
Fuente: Elaboración Propia

Gráfica 3.7. Curva de compactación para la Nueva Terminal



Fuente: Elaboración Propia

Gráfica 3.8. Curva de compactación el Barrio Fortaleza



Fuente: Elaboración Propia

3.4.5 Relación de Soporte de California CBR (ASTM D 1883_ AASHTO T-193).-

El ensayo C.B.R, se realizó de acuerdo a la norma AASHTO T-193, para obtener la resistencia del suelo, y así evaluar la capacidad de soporte del suelo en la capa de subrasante.

Para la obtención de los diferentes C.B.R. se efectuaron tres moldes con distinta energía de compactación; la primera con 12 golpes, la segunda con 25 golpes y la tercera, con 56 golpes por cada ensayo de C.B.R.

Las muestras elaboradas bajo estos procedimientos, se sometieron a un proceso de inmersión en agua para simular las condiciones de saturación a las cuales podrían estar sometidos los suelos como es la subrasante de una carretera, y en esta forma, obtener los C.B.R de los suelos bajo las condiciones más críticas ; esto durante un período mínimo de 96 horas donde se colocan pesas sobre las mismas, con el objeto de simular las cargas tanto vehiculares, como de la estructura de pavimento y por otro lado determinar su expansión efectuando 4 lecturas empleando un extensómetro debidamente calibrado.

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

Luego de realizar el ensayo de penetración se procede a sacar humedades de cada molde del fondo, superficie y 2" de superficie para determinar sus densidades.

A continuación se gráfica el proceso del ensayo de C.B.R.

Figura 3.10: Proceso de inmersión y penetración del ensayo de C.B.R.



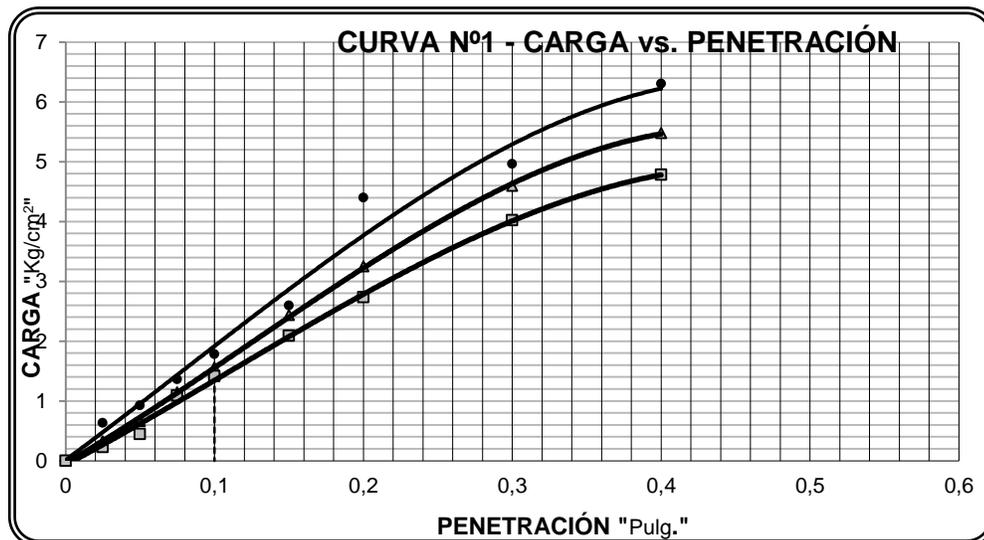
Fuente: Elaboración Propia

Tabla 3.8 Resultados del ensayo de C.B.R. sin estabilizar

Zona de estudio	Nº1	Nº2	Nº3	Nº4
CBR 95 % de D _{máx}	2.2	2.4	3.0	2.6
CBR 100 % de D _{máx}	2.6	3.2	3.7	3.0
Expansión 95(%)	4	3.4	2.7	2.5
Expansión 100(%)	2.9	2.2	2.5	1.7

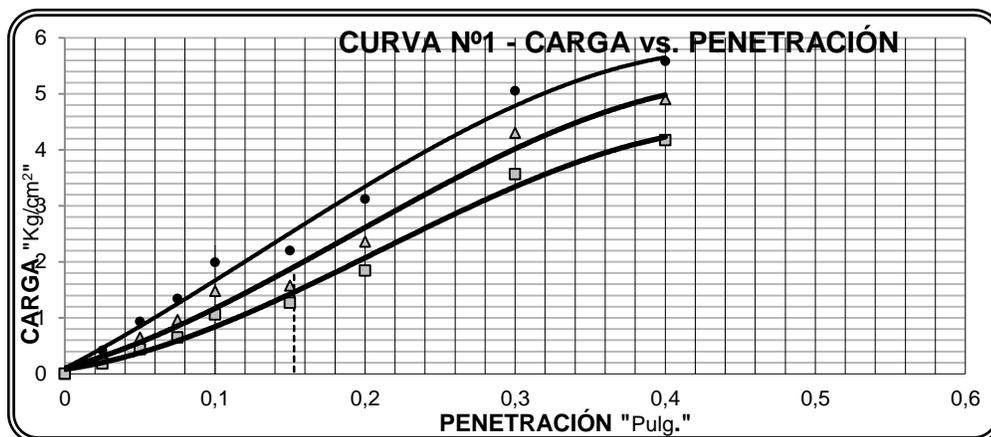
Fuente: Elaboración Propia

Gráfica 3.9. Curva de Carga Vs Penetración para el Barrio Los Chapacos



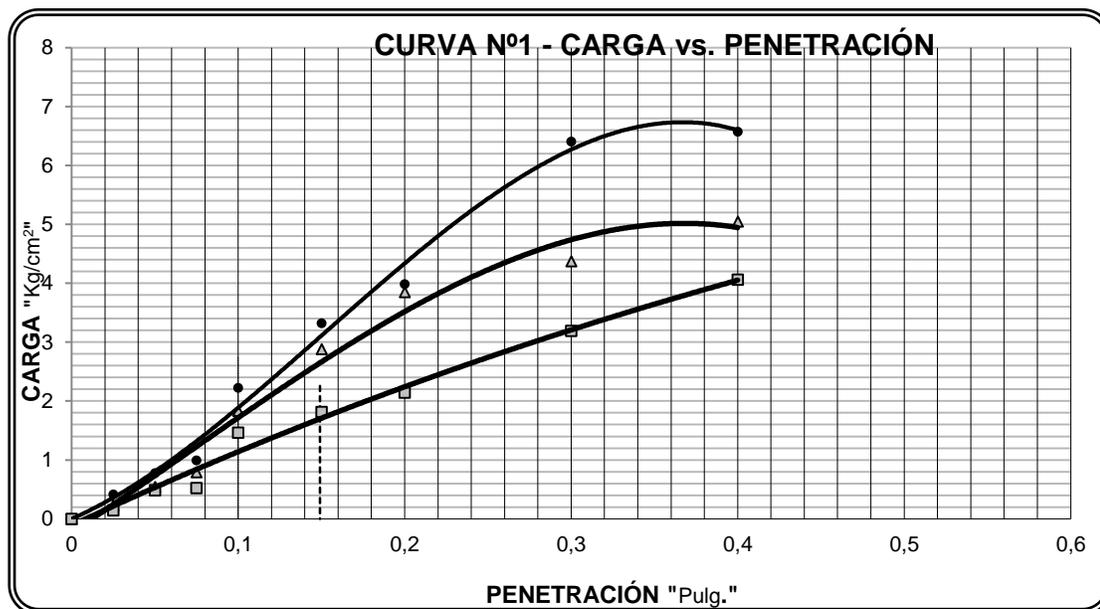
Fuente: Elaboración Propia

Gráfica 3.10. Curva de Carga Vs Penetración para el Barrio Los Olivos



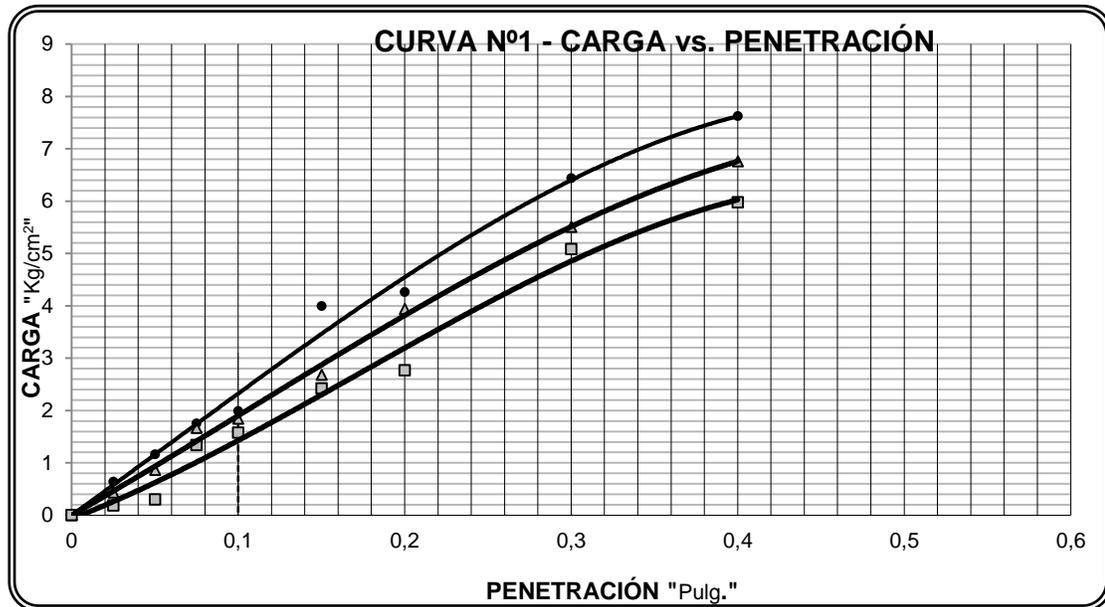
Fuente: Elaboración Propia

Gráfica 3.11. Curva de Carga Vs Penetración para la Nueva Terminal



Fuente: Elaboración Propia

Gráfica 3.12. Curva de Carga Vs Penetración para el Barrio Fortaleza



Fuente: Elaboración Propia

3.4.6 Compresión confinada en muestras de suelos (ASTM D2126 AASHTO T208).-

El ensayo de compresión confinada se realizó para probetas compactadas con una humedad y densidad seca prefijados en el ensayo de compactación.

Se hizo uso de un extractor de muestras para no dañar la probeta compactada. Luego se procedió a la medición de la altura y diámetro, posteriormente se registró su peso.

A continuación se llevó la probeta a la prensa para su rotura por compresión controlando en este caso la deformación y registrando la carga total en el momento de la rotura.

Figura 3.11: Realización del ensayo de compresión confinada



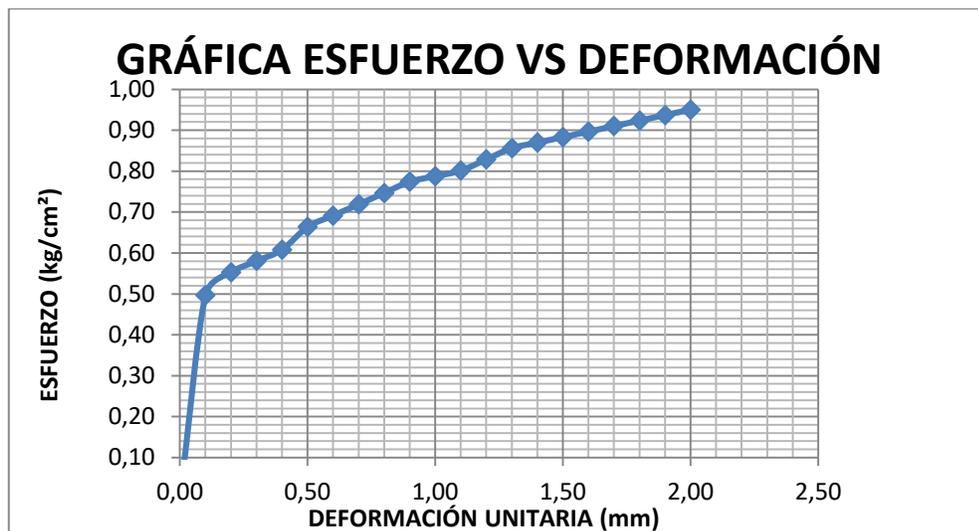
Fuente: Elaboración Propia

Tabla 3.9 Resultados de esfuerzo último de compresión confinada

Zona de estudio	Nº1	Nº2	Nº3	Nº4
Q_u (kg/cm ²)	0.95	1.09	1.19	1.05

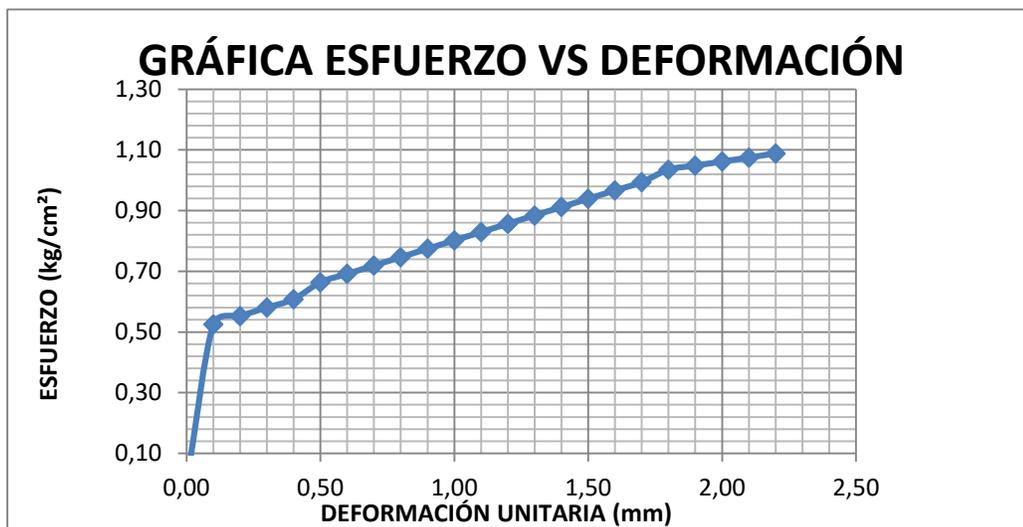
Fuente: Elaboración Propia

Gráfica 3.13 Esfuerzo Vs Deformación para el Barrio Los Chapacos



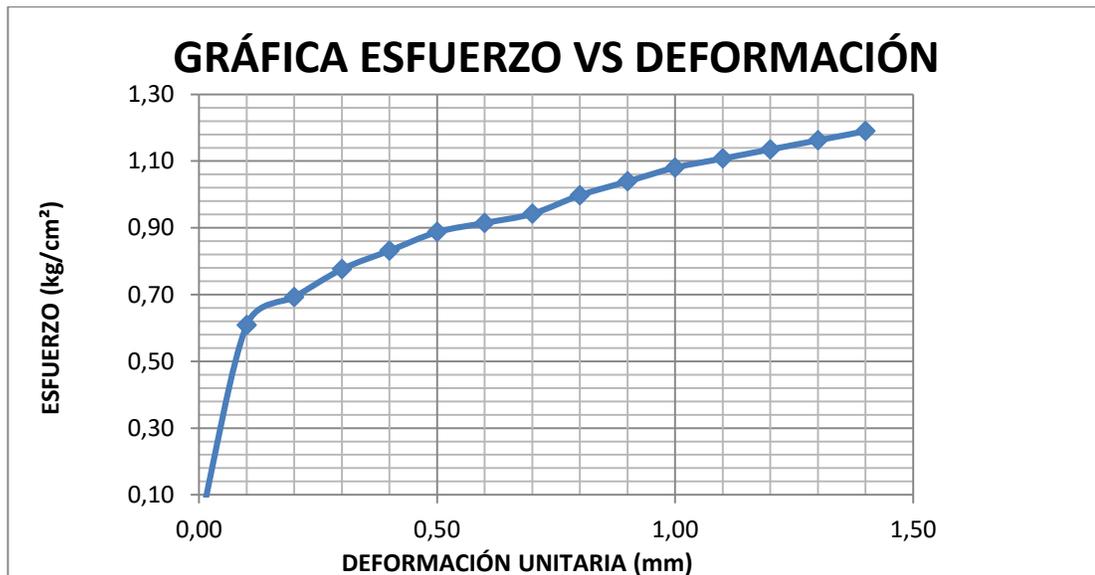
Fuente: Elaboración Propia

Gráfica 3.14 Esfuerzo Vs Deformación para el Barrio Los Olivos



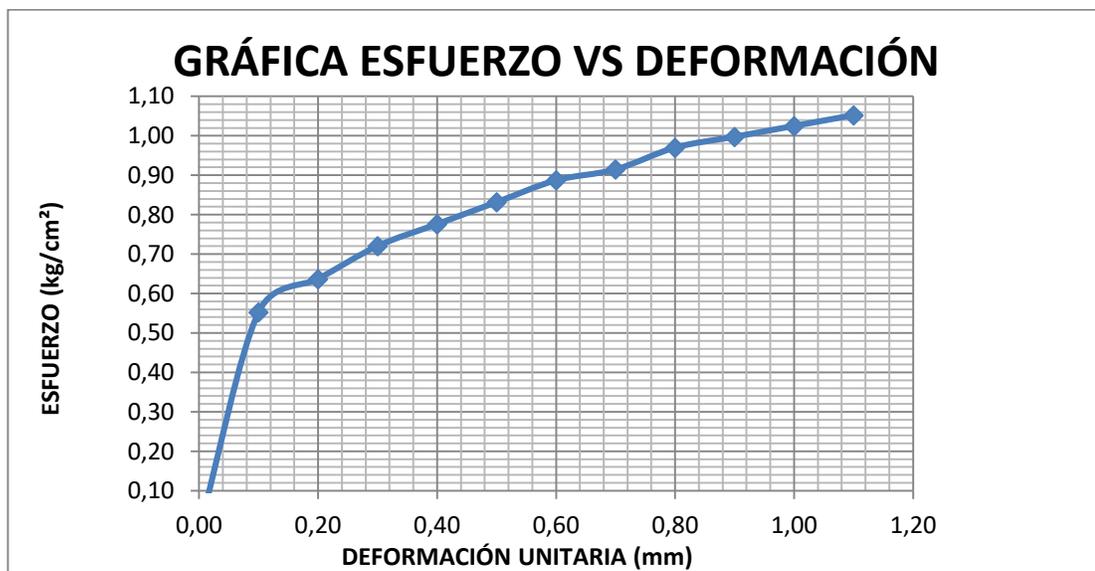
Fuente: Elaboración Propia

Gráfica 3.15 Esfuerzo Vs Deformación para la Nueva terminal



Fuente: Elaboración Propia

Gráfica 3.16 Esfuerzo Vs Deformación para el Barrio Fortaleza



Fuente: Elaboración Propia

4.1 Dosificación de mezclas estabilizadas

4.1.1 Dosificación con sulfato de calcio y yeso

La dosificación utilizada para este trabajo es de 3%, 5%, 10%, 12% de sulfato de calcio y yeso referido siempre al peso del suelo seco, tanto para la caracterización del suelo-sulfato de calcio y yeso como para los ensayos de estudio.

Para la preparación de las mezcla suelo-sulfato de calcio y yeso, 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, para determinar el contenido de humedad del suelo se deja muestras de suelo 24 horas en taras pequeñas en el horno.

Una vez que se conoce el contenido de humedad en porcentaje se procede a determinar a cuanto equivale este porcentaje en los 6 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.

Para el porcentaje de Sulfato de calcio y yeso se procedió a dar rangos de 3% al 12% basándose en otras estabilizaciones ya que para el sulfato de calcio y yeso no se cuenta con mucha información; por tanto la dosificación para hallar el % óptimo de la mezcla Suelo-Sulfato de calcio y yeso es la siguiente:

- ✓ Mezcla 1: Suelo-3% Sulfato de calcio
- ✓ Mezcla 2: Suelo-5% Sulfato de calcio
- ✓ Mezcla 3: Suelo-10 % Sulfato de calcio
- ✓ Mezcla 4: Suelo-12 % Sulfato de calcio
 - ✓ Mezcla 1: Suelo-3% yeso
 - ✓ Mezcla 2: Suelo-5% yeso
 - ✓ Mezcla 3: Suelo-10 % yeso
 - ✓ Mezcla 4: Suelo-12 % yeso

4.1.2 Resumen de la dosificación con sulfato de calcio

4.1.2.1 Límites de Atterberg con sulfato de calcio

- Resultados del ensayo de límite de Atterberg para el Barrio Los Chapacos

Tabla 4.1. Resultados de Límite Líquido, Límite Plástico e Índice de Plasticidad con sulfato de calcio

Porcentaje %	Límite líquido	Límite plástico	Índice de plasticidad	Índice de grupo
3	37.6	19.9	17.7	11
5	26.6	14.8	11.7	9
10	21.8	13.9	7.9	8
12	10.4	8.8	1.6	8

Fuente: Elaboración Propia

- Resultados del ensayo de límite de Atterberg para el Barrio Los Olivos

Tabla 4.2. Resultados de Límite Líquido, Límite Plástico e Índice de Plasticidad con sulfato de calcio

Porcentaje %	Límite líquido	Límite plástico	Índice de plasticidad	Índice de grupo
3	31.3	18.6	12.7	9
5	28	15.7	12.3	9
10	26.7	14.6	12.1	9
12	15.2	11.8	3.4	8

Fuente: Elaboración Propia

- Resultados del ensayo de límite de Atterberg para La Nueva Terminal

Tabla 4.3. Resultados de Límite Líquido, Límite Plástico e Índice de Plasticidad con sulfato de calcio

Porcentaje %	Límite Líquido	Límite Plástico	Índice de Plasticidad	Índice de grupo
3	26.7	16.4	10.2	8
5	23.3	14.6	8.7	8
10	15.3	11.1	4.1	8
12	13.3	8.6	4.7	8

Fuente: Elaboración Propia

- **Resultados del ensayo de límite de Atterberg para el Barrio Fortaleza**

Tabla 4.4. Resultados de Límite Líquido, Límite Plástico e Índice de Plasticidad con sulfato de calcio

Porcentaje %	Límite líquido	Límite plástico	Índice de plasticidad	Índice de grupo
3	28.3	15.5	12.8	9
5	20.8	15.3	5.4	8
10	17.3	13.9	3.3	8
12	11.2	10.4	0.7	8

Fuente: Elaboración Propia

4.1.2.2 Por compactación para el sulfato de calcio

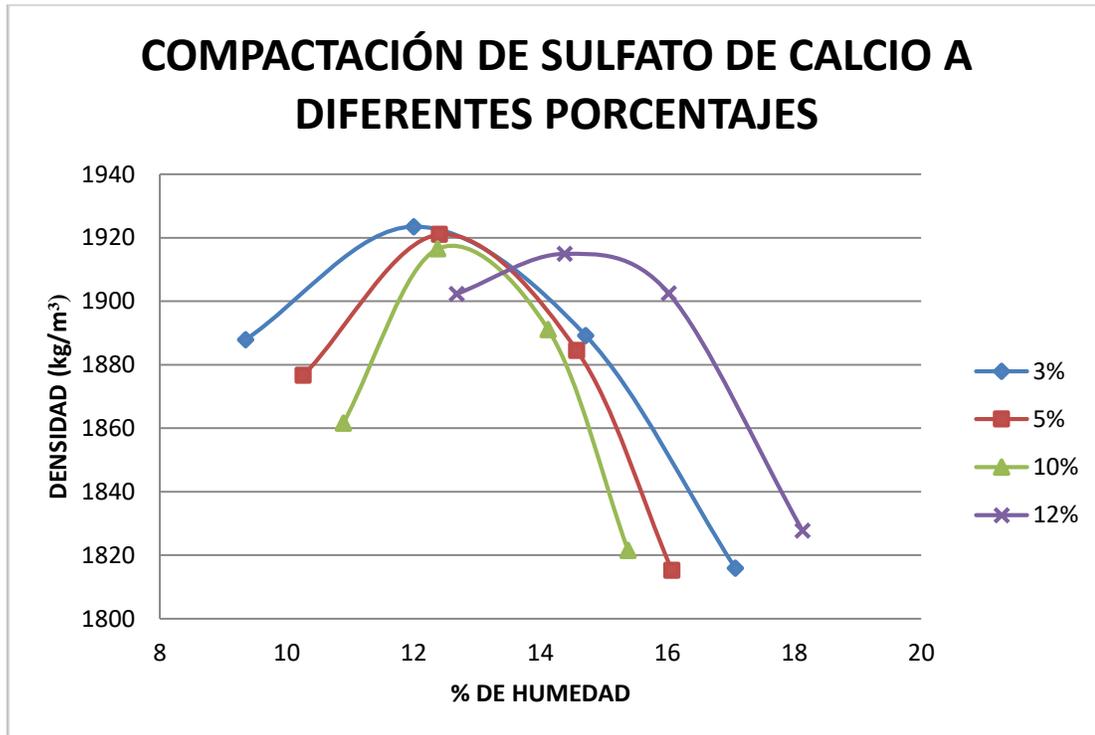
- **Resultados del ensayo de compactación para el Barrio Los Chapacos**

Tabla 4.5. Resultados de compactación con sulfato de calcio

Porcentaje %	Humedad óptima	Densidad (g/cm ³)		
		90%	95%	100%
3	11.9	1.731	1.827	1.923
5	12.5	1.729	1.825	1.921
10	12.7	1.727	1.823	1.919
12	14.5	1.724	1.819	1.915

Fuente: Elaboración Propia

Gráfica 4.1. Curvas de compactación con porcentajes de 3%, 5%, 10%, 12%



Fuente: Elaboración Propia

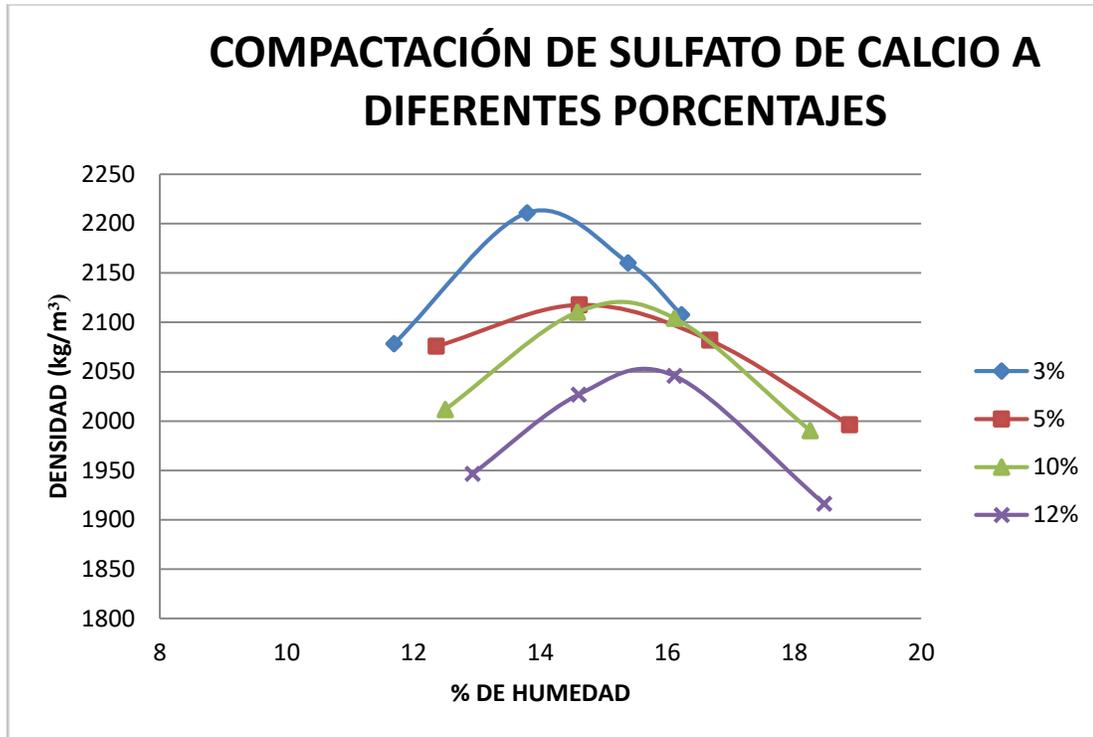
- **Resultados del ensayo de compactación para el Barrio Los Olivos**

Tabla 4.6. Resultados de compactación con sulfato de calcio

Porcentaje %	Humedad Óptima	Densidad (g/cm³)		
		90%	95%	100%
3	13.8	1.99	2.1	2.211
5	14.5	1.906	2.012	2.118
10	15.2	1.904	2.01	2.115
12	15.8	1.843	1.945	2.047

Fuente: Elaboración Propia

Gráfica 4.2. Curvas de compactación con porcentajes de 3%, 5%, 10%, 12%



Fuente: Elaboración Propia

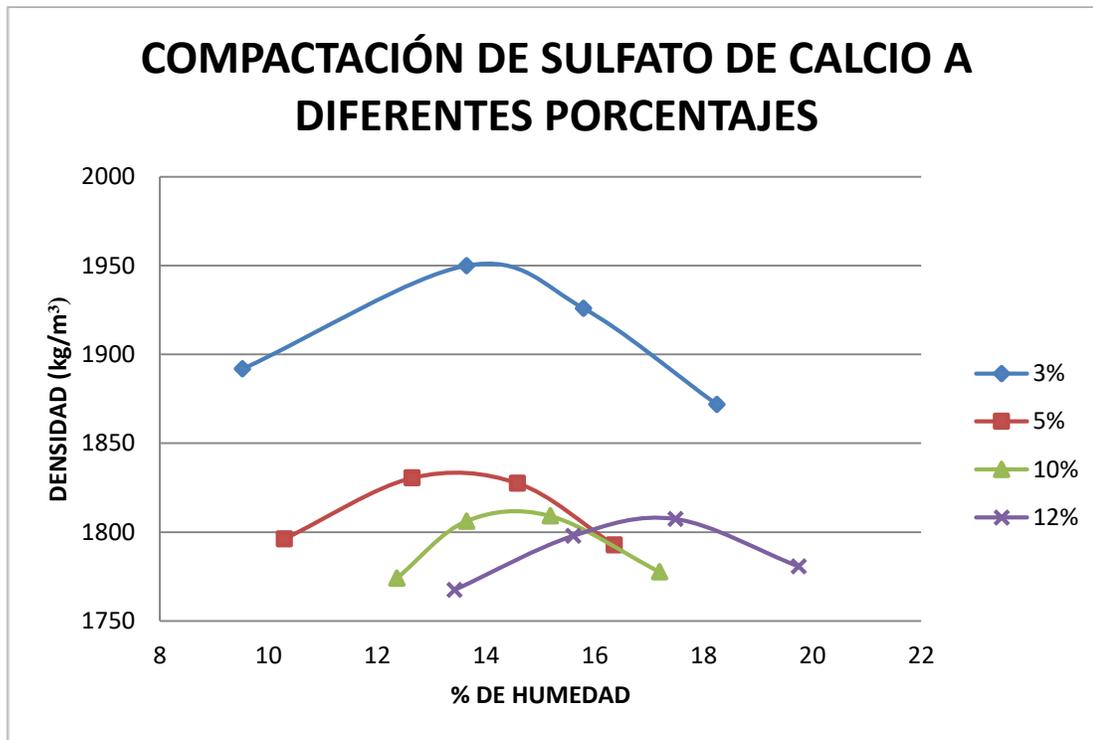
- **Resultados del ensayo de compactación para La Nueva Terminal**

Tabla 4.7. Resultados de compactación con sulfato de calcio

Porcentaje %	Humedad Óptima	Densidad (g/cm ³)		
		90%	95%	100%
3	13.1	1.756	1.854	1.951
5	13.5	1.65	1.742	1.833
10	14.5	1.631	1.721	1.812
12	17.3	1.627	1.717	1.807

Fuente: Elaboración Propia

Gráfica 4.3. Curvas de compactación con porcentajes de 3%, 5%, 10%, 12%



Fuente: Elaboración Propia

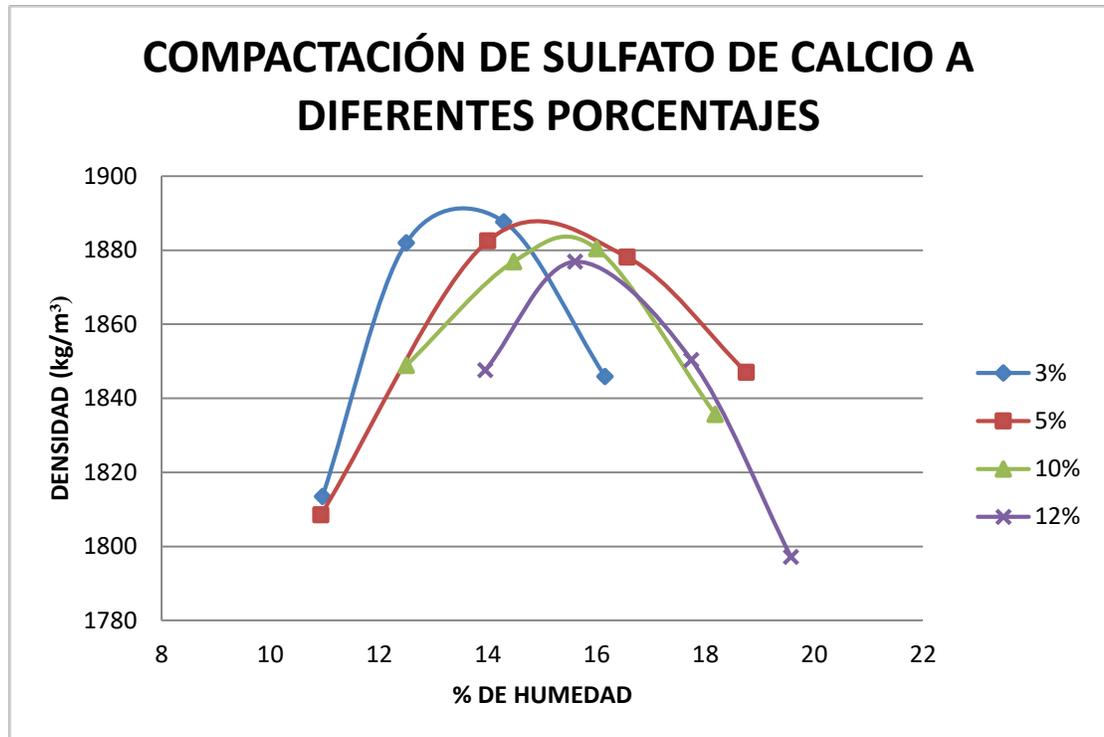
- Resultados del ensayo de compactación para el Barrio Fortaleza

Tabla 4.8. Resultados de compactación con sulfato de calcio

Porcentaje %	Humedad Óptima	Densidad (g/cm ³)		
		90%	95%	100%
3	13.5	1.704	1.798	1.893
5	15	1.698	1.792	1.886
10	15.5	1.694	1.788	1.882
12	15.7	1.689	1.783	1.877

Fuente: Elaboración Propia

Gráfica 4.4. Curvas de compactación con porcentajes de 3%, 5%, 10%, 12%



Fuente: Elaboración Propia

4.1.2.3 C.B.R. y Expansión

- Resultados del ensayo de C.B.R. para el Barrio Los Chapacos

Tabla 4.9. Resultados de % de C.B.R. y expansión con sulfato de calcio

Porcentaje %	Expansión		C.B.R.		
	95%	100%	90%	95%	100%
3	3.2	1.7	1.7	2.6	3.4
5	2.7	1.3	1.7	2.9	4.1
10	2.3	1.5	2	3.4	4.9
12	2.2	0.5	1.4	3.8	6.2

Fuente: Elaboración Propia

- **Resultados del ensayo de C.B.R. para el Barrio Los Olivos**

Tabla 4.10. Resultados de % de C.B.R. y expansión con sulfato de calcio

Porcentaje %	Expansión		C.B.R.		
	95%	100%	90%	95%	100%
3	2.8	1.6	1.4	3	4.5
5	1.9	1.3	2.9	3.3	3.7
10	1.7	1.6	2.7	4.0	5.4
12	1.4	1.3	3.1	4.2	5.3

Fuente: Elaboración Propia

- **Resultados del ensayo de C.B.R. para La Nueva Terminal**

Tabla 4.11. Resultados de % de C.B.R. y expansión con sulfato de calcio

Porcentaje %	Expansión		C.B.R.		
	95%	100%	90%	95%	100%
3	2.4	1.6	2.2	3.7	5.2
5	1.6	1.4	2	4.2	6.4
10	1.5	1.4	3.3	5.5	7.6
12	1.2	1.1	3.2	6.3	9.4

Fuente: Elaboración Propia

- **Resultados del ensayo de C.B.R. para El Barrio Fortaleza**

Tabla 4.12. Resultados de % de C.B.R. y expansión con sulfato de calcio

Porcentaje	Expansión		C.B.R.		
	95%	100%	90%	95%	100%
3%	2.3	1.4	1.0	3.2	5.5
5%	2.1	0.9	1.1	3.6	6.0
10%	1.4	1.0	1.6	4.5	7.4
12%	1.2	0.9	1.3	5.0	8.7

Fuente: Elaboración Propia

4.2.1 Resumen de la dosificación con yeso

4.2.1.1 Límites de Atterberg

- Resultados del ensayo de límite de Atterberg para el Barrio Los Chapacos

Tabla 4.13. Resultados de Límite Líquido, Límite Plástico e Índice de Plasticidad con yeso

Porcentaje %	Límite líquido	Límite plástico	Índice de plasticidad	Índice de grupo
3	51.6	29.9	21.7	15
5	40.7	13.4	27.3	15
10	63.6	29	34.6	20
12	73.9	26.9	47	20

Fuente: Elaboración Propia

- Resultados del ensayo de límite de Atterberg para El Barrio Los Olivos

Tabla 4.14. Resultados de Límite Líquido, Límite Plástico e Índice de Plasticidad con yeso

Porcentaje %	Límite líquido	Límite plástico	Índice de plasticidad	Índice de grupo
3	47.2	20.8	26.3	16
5	53.2	25.6	27.6	18
10	57.6	18.4	39.2	20
12	43.1	16.4	26.7	15

Fuente: Elaboración Propia

- **Resultados del ensayo de límite de Atterberg para La Nueva Terminal**

Tabla 4.15. Resultados de Límite Líquido, Límite Plástico e Índice de Plasticidad con yeso

Porcentaje %	Límite líquido	Límite plástico	Índice de plasticidad	Índice de grupo
3	33.8	15.9	17.9	11
5	35.6	14	21.6	13
10	32.6	12	20.6	12
12	39	11	28	15

Fuente: Elaboración Propia

- **Resultados del ensayo de límite de Atterberg para el Barrio Fortaleza**

Tabla 4.16. Resultados de Límite Líquido, Límite Plástico e Índice de Plasticidad con yeso

Porcentaje %	Límite líquido	Límite plástico	Índice de plasticidad	Índice de grupo
3	37.3	15.3	22	13
5	40.4	25.6	14.8	10
10	37.2	20.6	16.6	11
12	38.6	11.4	27.3	15

Fuente: Elaboración Propia

4.2.1.2 Por compactación para el yeso

- **Resultados del ensayo de compactación para el Barrio Los Chapacos**

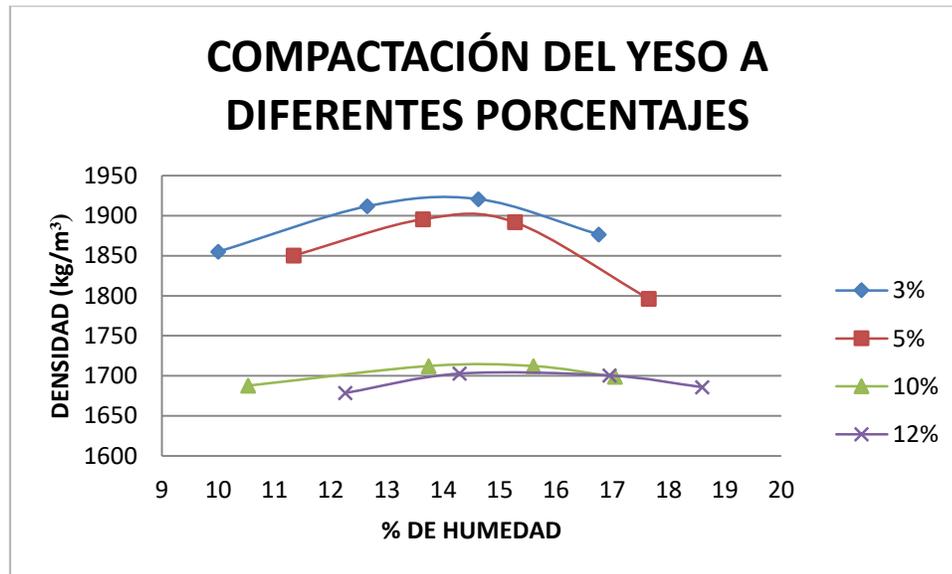
Tabla 4.17. Resultados de compactación con yeso

Porcentaje %	Humedad Óptima	Densidad (g/cm ³)		
		90%	95%	100%
3	14.1	1730	1826	1922
5	14.3	1709	1804	1899
10	14.7	1543	1628	1714

12	15.4	1535	1620	1706
----	------	------	------	------

Fuente: Elaboración Propia

Gráfica 4.5. Curvas de compactación con porcentajes de 3%, 5%, 10%, 12%



Fuente: Elaboración Propia

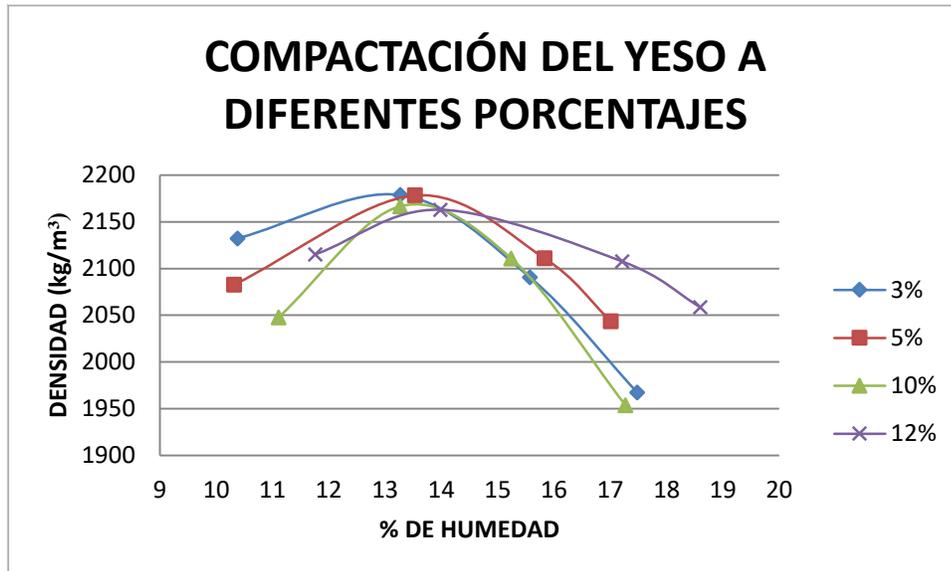
- Resultados del ensayo de compactación para el Barrio Los Olivos

Tabla 4.18. Resultados de compactación con yeso

Porcentaje %	Humedad Óptima	Densidad (g/cm³)		
		90%	95%	100%
3	12.4	1968	2077	2187
5	13.2	1962	2071	2180
10	13.4	1950	2059	2167
12	14.1	1947	2055	2163

Fuente: Elaboración Propia

Gráfica 4.6. Curvas de compactación con porcentajes de 3%, 5%, 10%, 12%



Fuente: Elaboración Propia

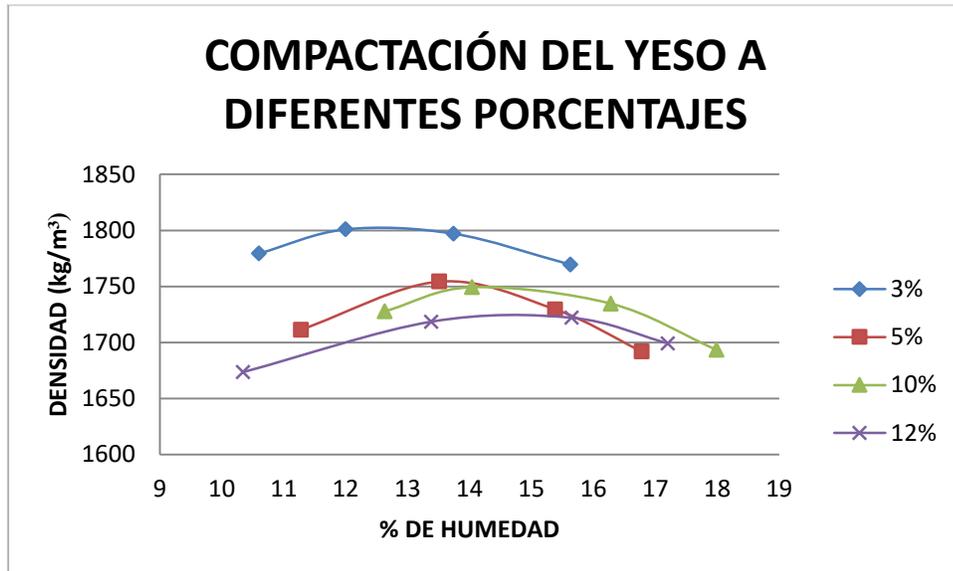
- **Resultados del ensayo de compactación para La Nueva Terminal**

Tabla 4.19. Resultados de compactación con yeso

Porcentaje %	Humedad Óptima	Densidad (g/cm ³)		
		90%	95%	100%
3	12.6	1623	1713	1803
5	13.4	1579	1667	1754
10	14.5	1576	1663	1751
12	14.8	1553	1639	1725

Fuente: Elaboración Propia

Gráfica 4.7. Curvas de compactación con porcentajes de 3%, 5%, 10%, 12%



Fuente: Elaboración Propia

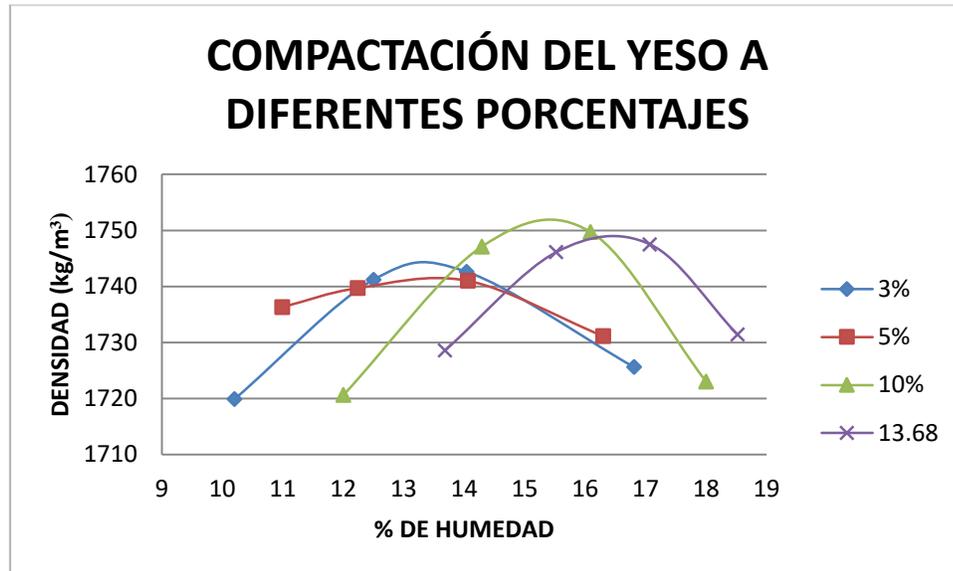
- **Resultados del ensayo de compactación para el Barrio Fortaleza**

Tabla 4.20. Resultados de compactación con yeso

Porcentaje %	Humedad Óptima	Densidad (g/cm ³)		
		90%	95%	100%
3	13.5	1569	1656	1743
5	13.6	1567	1654	1741
10	15.4	1576	1664	1751
12	16.5	1574	1661	1749

Fuente: Elaboración Propia

Gráfica 4.8. Curvas de compactación con porcentajes de 3%, 5%, 10%, 12%



Fuente: Elaboración Propia

4.2.1.3 C.B.R. y Expansión

- Resultados del ensayo de C.B.R. para el Barrio Los Chapacos

Tabla 4.21. Resultados de % de C.B.R. y expansión con yeso

Porcentaje %	Expansión		C.B.R.		
	95%	100%	90%	95%	100%
3	4	1.5	1.8	2.5	3.2
5	3.3	2.1	1.8	2.7	3.6
10	2.9	1.7	0.6	3.1	5.7
12	2.4	1.7	1.4	3.3	5.1

Fuente: Elaboración Propia

- **Resultados del ensayo de C.B.R. para el Barrio Los Olivos**

Tabla 4.22. Resultados de % de C.B.R. y expansión con yeso

Porcentaje %	Expansión		C.B.R.		
	95%	100%	90%	95%	100%
3	2.9	2.5	1.4	2.8	4.1
5	2.1	1.8	2.3	3	3.7
10	2	1.8	1.3	3.5	5.7
12	1.9	1.6	2.5	3.7	4.9

Fuente: Elaboración Propia

- **Resultados del ensayo de C.B.R. para La Nueva Terminal**

Tabla 4.23. Resultados de % de C.B.R. y expansión con yeso

Porcentaje %	Expansión		C.B.R.		
	95%	100%	90%	95%	100%
3	2.5	2.4	2.7	3.3	3.9
5	2.2	2.2	2.7	3.6	4.5
10	2.1	1.8	3.7	4.5	5.4
12	1.6	1.6	3.7	4.8	5.8

Fuente: Elaboración Propia

- **Resultados del ensayo de C.B.R. para el Barrio Fortaleza**

Tabla 4.24. Resultados de % de C.B.R. y expansión con yeso

Porcentaje %	Expansión		C.B.R.		
	95%	100%	90%	95%	100%
3	2.4	1.2	1.6	2.9	4.2
5	1.7	1.7	1.4	3.2	5.1
10	1.7	1.0	2.7	4.0	5.3
12	1.4	0.8	2.3	4.4	6.5

Fuente: Elaboración Propia

4.2 Análisis de resultados

4.2.1 Análisis de los resultados de las propiedades de los suelos naturales

Las muestras de suelo natural se clasificaron según el lugar de donde fueron extraídas como ser la muestra 1 fue proveniente del Barrio Los Chapacos, la muestra 2 del Barrio Los Olivos, la muestra 3 de la Nueva Terminal y finalmente la muestra 4 que fue extraída del Barrio Fortaleza.

El suelo que procede del Barrio Los Chapacos, en la granulometría ver tabla 3.3 nos muestra un alto contenido de material fino, esto nos indica que es un suelo arcilloso con material fino de 99.70% con muy poca presencia de arena fina y por lo tanto no tiene nada de material granular.

Según el límite de consistencia y en función del Índice Plasticidad, el sistema de clasificación AASTHO para el Barrio Los Chapacos se clasificó como un suelo A-7-6 (13).

Al realizar el Ph del suelo se obtuvo un valor de 8.22 por lo que se considera un suelo básico o ligeramente alcalino, el pH del suelo nos indica que es un suelo estable.

Haciendo el C.B.R. para este tipo de suelo arcilloso el resultado fue un valor muy bajo el cual se pretende mejorar a través de estabilización con sulfato de calcio y yeso.

Para el Barrio Los Olivos en la granulometría el porcentaje de fino es 97.30 esto también nos indica que es suelo arcilloso con muy poca presencia de material fino.

Para clasificar este suelo se tomó en cuenta el límite de consistencia y el índice plasticidad y se clasificó como un A-7-5 (11).

Con un pH del suelo de 8.86 y 8.94 este valor indica que es un suelo estable y se clasifica como una arcilla muy alcalina.

El C.B.R. para este suelo es del 2.4 al 95% de su densidad máxima a diferencia del suelo del Barrio Los Chapacos que es más bajo que este suelo. La resistencia a

compresión simple también nos muestra que es un suelo rígido con un valor de 1.09 (kg/cm²).

La Nueva Terminal el porcentaje que pasa del total es del 97.7% también se trata de un suelo arcilloso con poca presencia de material fino y no tiene material grueso.

Según su clasificación por el sistema AASTHO nos da un suelo A-6 con un Índice de plasticidad de 9.

El pH para este suelo es 11.98 se trata de un suelo estable y es muy alcalino.

El C.B.R. para este suelo también es bajo, la resistencia a compresión simple es de 1.19 kg/cm² y según este dato es un suelo rígido.

El Barrio Fortaleza la cantidad que pasa del total es del 94.4% por lo tanto es una arcilla con muy poca cantidad de material fino.

El límite líquido y el índice de plasticidad nos indican que el suelo se clasificó en un suelo A-6 (10).

Según su Ph se trata de un suelo estable muy alcalino con un valor de 9.33 y 9.44, su C.B.R. nos muestra un valor bajo debido a que es un suelo arcilloso plástico y su resistencia a compresión simple es de 1.05 kg/cm².

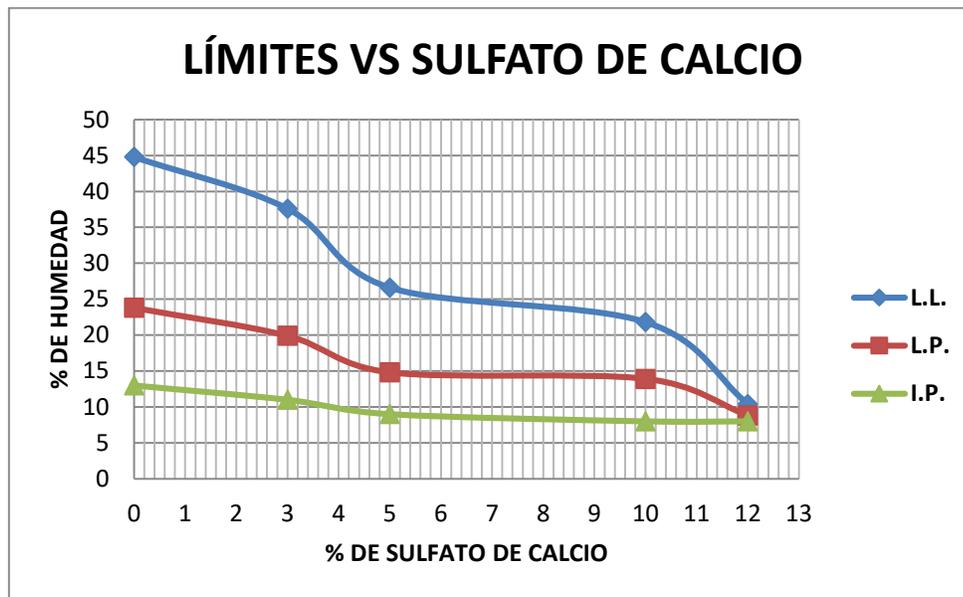
4.2.2 Análisis de los resultados de las propiedades de los suelos tratados con sulfato de calcio

Después de presentar los resultados de los ensayos realizados a las muestras de suelo sin tratamiento, se presentan ahora los resultados de los ensayos con la adición de sulfato de calcio y los cambios producidos en las muestras al ser mezcladas.

Los resultados obtenidos en los ensayos de laboratorio realizados a las diferentes mezclas que se propusieron para estabilizar los 4 tipos de arcilla, revelaron datos que muestran diferentes comportamientos de cada mezcla, conforme se aplicaban diferentes proporciones de cada una de los % sulfato de calcio y yeso.

4.2.2.1 Influencia de la mezcla propuesta para la estabilización en los límites de consistencia de un suelo arcilloso

Gráfica 4.9. Influencia del sulfato de calcio en los límites de consistencia para el Barrio Los Chapacos



Fuente: Elaboración Propia

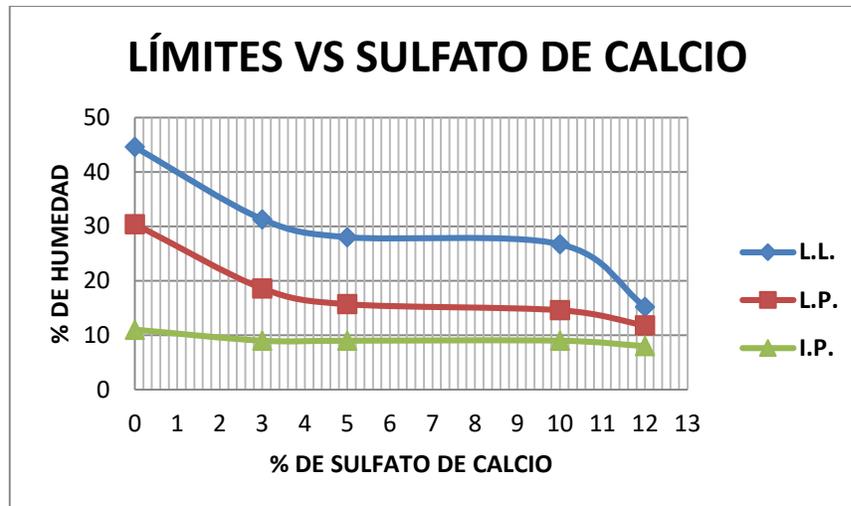
Para el Barrio Los Chapacos se observa en la Gráfica 4.9 que el límite líquido en suelo natural es de 44.8 a medida que se va aumentando el sulfato de calcio va disminuyendo llegando así al 12% con un valor de 10.4. En estado natural el suelo se clasifica en un A-7-6 con un índice de grupo de 13, incrementando los diferentes porcentajes de sulfato de calcio, la clasificación va cambiando al 12% se convierte en un suelo A-4 siendo su índice de grupo de 8.

Lo propio ocurre con límite plástico en estado natural tiene un valor de 23.8, cuando se incrementa los diferentes porcentajes va decreciendo la plasticidad llegando al 12% de sulfato de calcio con un valor de 8.8.

El índice de plasticidad decrece de 21.1 en suelo natural a 1.6 con sulfato de calcio con el porcentaje máximo de 12%.

De acuerdo a este comportamiento el suelo va mejorando sus propiedades, de ser un suelo natural de A-7-6 se vuelve un A-6 con porcentajes 3% y 5%, A-4 con porcentajes de 10% y 12% de sulfato de calcio.

Gráfica 4.10. Influencia del sulfato de calcio en los límites de consistencia para el Barrio Los Olivos



Fuente: Elaboración Propia

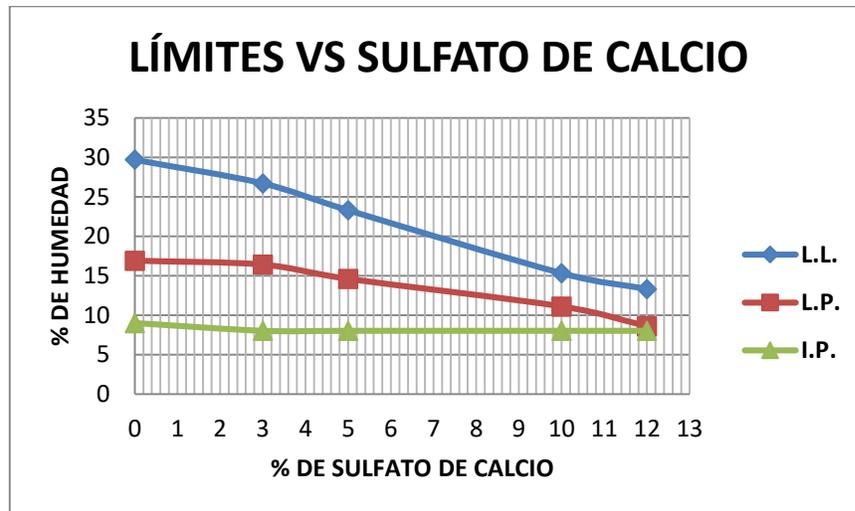
Para el barrio Los Olivos el suelo se clasifica en un suelo A-7-5, siendo su límite líquido de 44.6, su límite plástico es de 30.4, el índice de plasticidad es de 14.2 con un índice de grupo de 11.

Mezclando con sulfato de calcio vemos en la Gráfica 4.10 que el límite líquido disminuye con los diferentes porcentajes al 12% es de 15.2.

El límite plástico es de 11.8, el índice de plasticidad es de 3.4 con un índice de grupo de 8 todo esto al máximo porcentaje de 12%.

De acuerdo a este comportamiento el suelo va mejorando sus propiedades, de ser un suelo natural de A-7-5 se vuelve un A-6 con porcentajes 3% y 10%, A-4 con porcentajes de 12% de sulfato de calcio.

Gráfica 4.11. Influencia del sulfato de calcio en los límites de consistencia para la Nueva Terminal

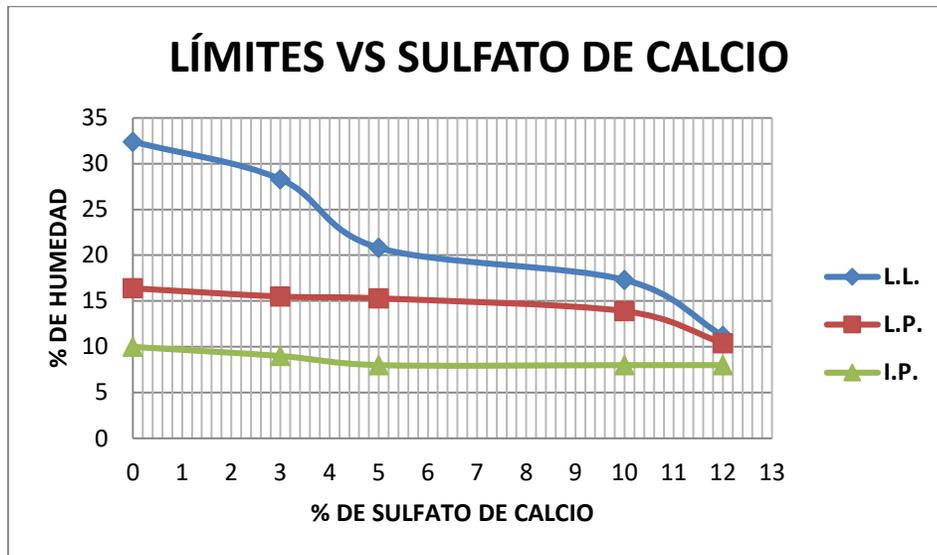


Fuente: Elaboración Propia

A esta arcilla se la clasificó como un A-6, teniendo un límite líquido de 29.7, su límite plástico es de 16.9 su índice de plasticidad es de 4.7, teniendo un índice de grupo de 8. Incrementando los diferentes porcentajes el suelo natural va cambiando sus propiedades al 12%, su límite líquido cambia a 13.3, su límite plástico es de 8.6, su índice de plasticidad es de 4.7 y finalmente el índice de grupo es de 8 como se observa en la Gráfica 4.11.

A los diferentes porcentajes el suelo se mantiene en un A-4.

Gráfica 4.12. Influencia del sulfato de calcio en los límites de consistencia para el Barrio Fortaleza



Fuente: Elaboración Propia

Analizando a este suelo en su estado natural se tiene un límite líquido de 32.4, su límite plástico es de 16.4, el índice plasticidad es de 16 clasificando al suelo como un A-6 con un índice de grupo de 10.

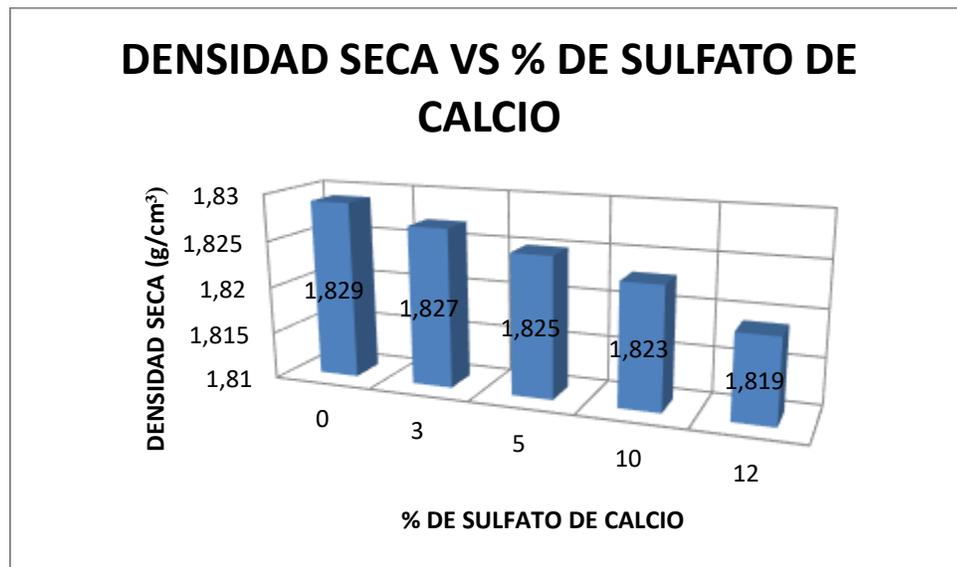
Agregando los porcentajes de 3%, 5%, 10% y 12% el suelo va cambiando como se ve en la gráfica Gráfico 4.12.

Al máximo porcentaje que es 12% el límite líquido es de 11.2, el límite plástico es de 10.4, el índice de plasticidad es de 0.7 siendo el suelo un A-4 con un índice de grupo de 8.

Al 3% de porcentaje el suelo es un A-6, al 5%, 10% y 12% el suelo se mantiene en un A-4.

4.2.2.2 Influencia de la mezcla propuesta para la estabilización en los resultados del ensayo de compactación

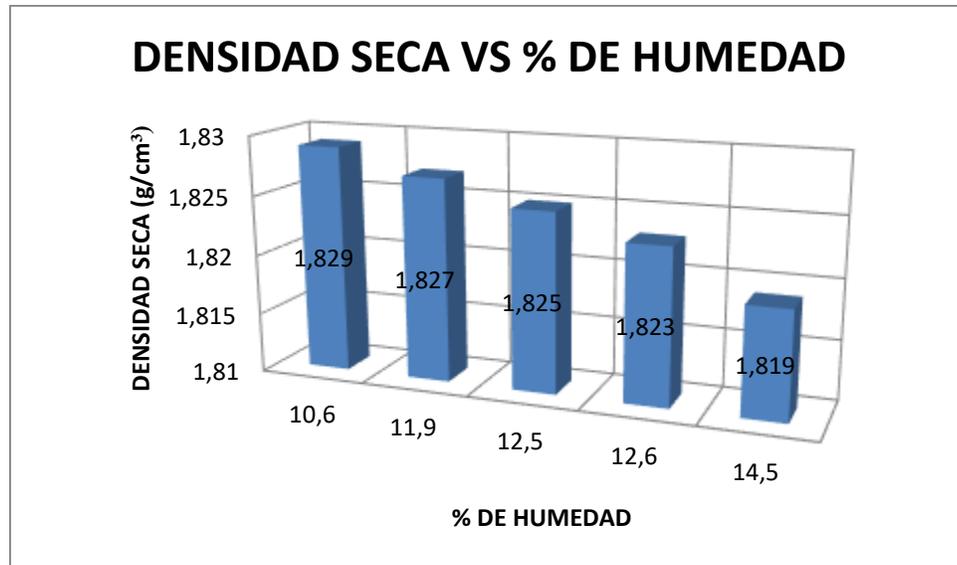
Gráfica 4.13. Influencia de sulfato de calcio en la densidad seca para el Barrio Los Chapacos



Fuente: Elaboración Propia

En la Gráfica 4.13 se observa que la densidad seca para el suelo natural es 1.829 kg/m^3 y al 3% de sulfato de calcio disminuye llegando a un valor de 1.827 kg/m^3 , al 5% la densidad es 1.825 kg/m^3 , al 10% es de 1.823 kg/m^3 y finalmente agregando el porcentaje de 12% la densidad disminuye a 1.819 kg/m^3 .

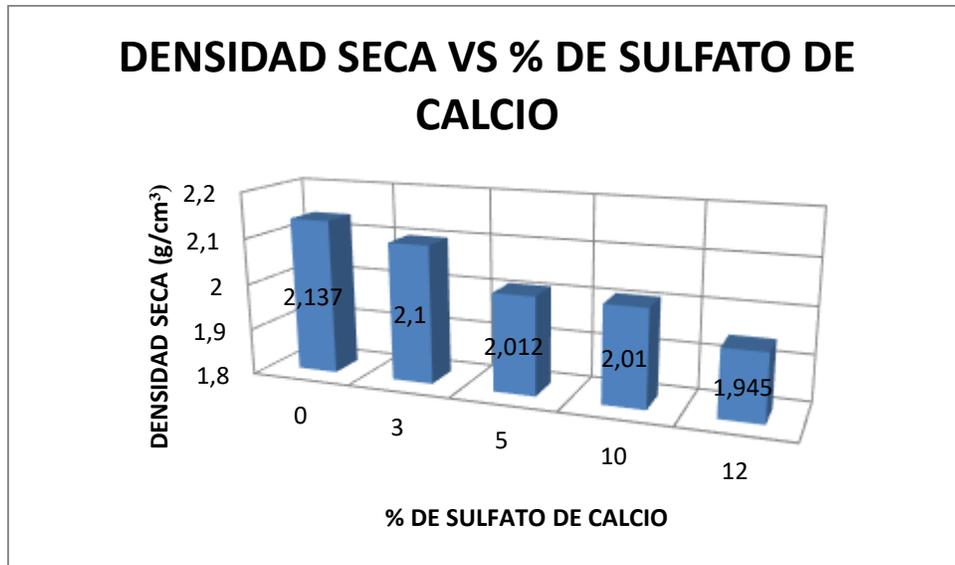
Gráfica 4.14. Relación densidad seca vs % de humedad para el Barrio Los Chapacos



Fuente: Elaboración Propia

Según el Gráfico 4.14 la humedad para el suelo natural es de 10.60% con una densidad máxima de 1.829 kg/m³, según los resultados las humedades van aumentando, cuando se agrega un 3% de sulfato de calcio se tiene una humedad de 11.9% con una densidad de 1.827 kg/m³, al 5% la humedad aumenta a 12.5% y la densidad disminuye a 1.825 kg/m³, la densidad es de 1.823 kg/m³ con una humedad de 12.6%, llegando al 12% con un valor de 14.5 de su humedad óptima y su densidad de 1.819 kg/m³.

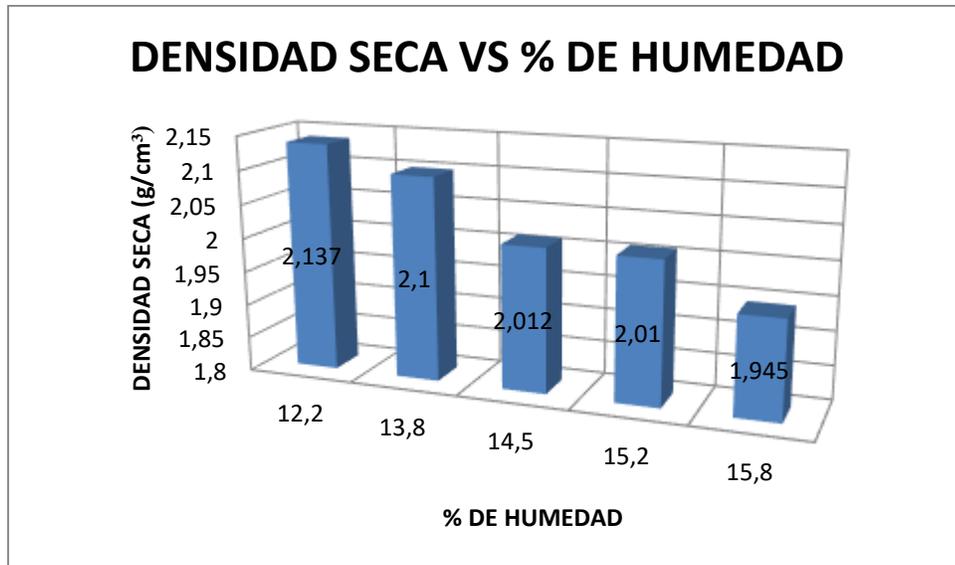
Gráfica 4.15. Influencia de sulfato de calcio en la densidad seca para el Barrio Los Olivos



Fuente: Elaboración Propia

En la Gráfica 4.15 se observa que la densidad seca para el suelo natural es 2.137 kg/m^3 y al 3% de sulfato de calcio disminuye a un valor de 2.100 kg/m^3 , al 5% la densidad es 2.012 kg/m^3 , al 10% la densidad es de 2.010 kg/m^3 y finalmente agregando el porcentaje de 12% la densidad disminuye a 1.945 kg/m^3 .

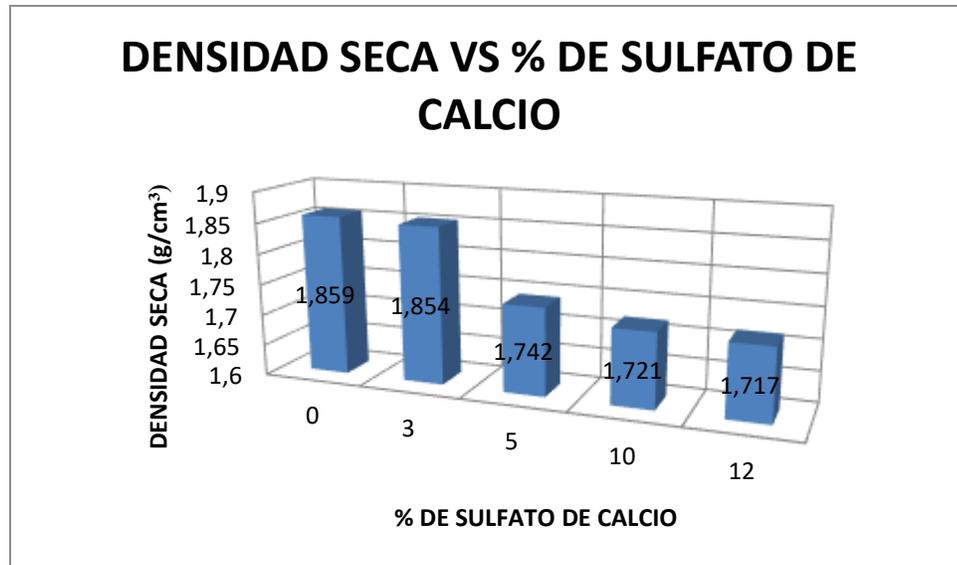
Gráfica 4.16. Relación densidad seca vs % de humedad para el Barrio Los Olivos



Fuente: Elaboración Propia

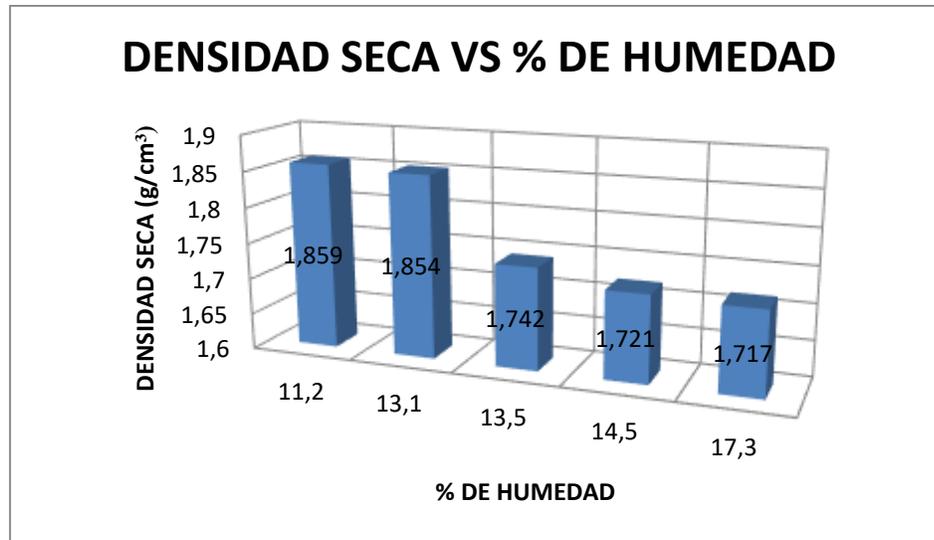
Según el Gráfico 4.16 la humedad para el suelo natural es de 12.20% con una densidad máxima de 2.137 kg/m³, según los resultados las humedades van aumentando, cuando se agrega un 3% de sulfato de calcio se tiene una humedad de 13.8% con una densidad de 2.100 kg/m³, al 5% la humedad aumenta a 14.5% y la densidad disminuye a 2.012 kg/m³, la densidad es de 2.010 kg/m³ con una humedad de 15.2% al 10%, llegando al 12% con un valor de 15.8 de su humedad óptima y su densidad de 1.945 kg/m³.

Gráfica 4.17. Influencia de sulfato de calcio en la densidad seca para la Nueva Terminal



Fuente: Elaboración Propia

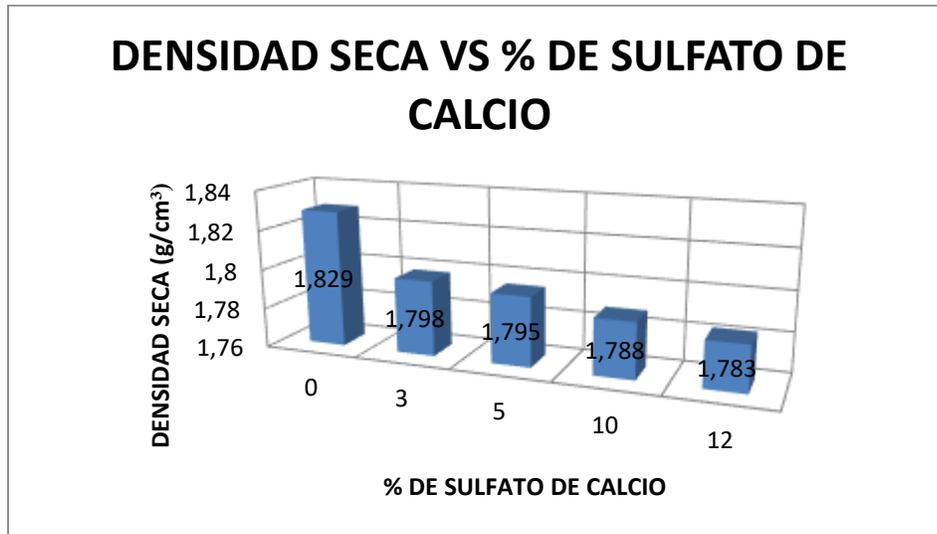
En la Gráfica 4.17 se observa que la densidad máxima para el suelo natural es 1.859 kg/m³ y al 3% de sulfato de calcio disminuye a un valor de 1.854 kg/m³, al 5% la densidad es 1.742 kg/m³, al 10% la densidad es de 1.721 kg/m³ y finalmente agregando el porcentaje de 12% la densidad disminuye a 1.717 kg/m³.

Gráfica 4.18. Relación densidad seca vs % de humedad para la Nueva Terminal

Fuente: Elaboración Propia

Según el Gráfico 4.18 la humedad para el suelo natural es de 11.20% con una densidad máxima de 1.859 kg/m³, según los resultados las humedades van aumentando respecto al suelo natural, cuando se agrega un 3% de sulfato de calcio se tiene una humedad de 13.1% con una densidad de 1.854 kg/m³, al 5% la humedad aumenta a 13.5% y la densidad disminuye a 1.742 kg/m³, la densidad es de 1.721 kg/m³ con una humedad de 14.5% al 10%, llegando al 12% con un valor de 17.3% de su humedad óptima y su densidad de 1.717 kg/m³.

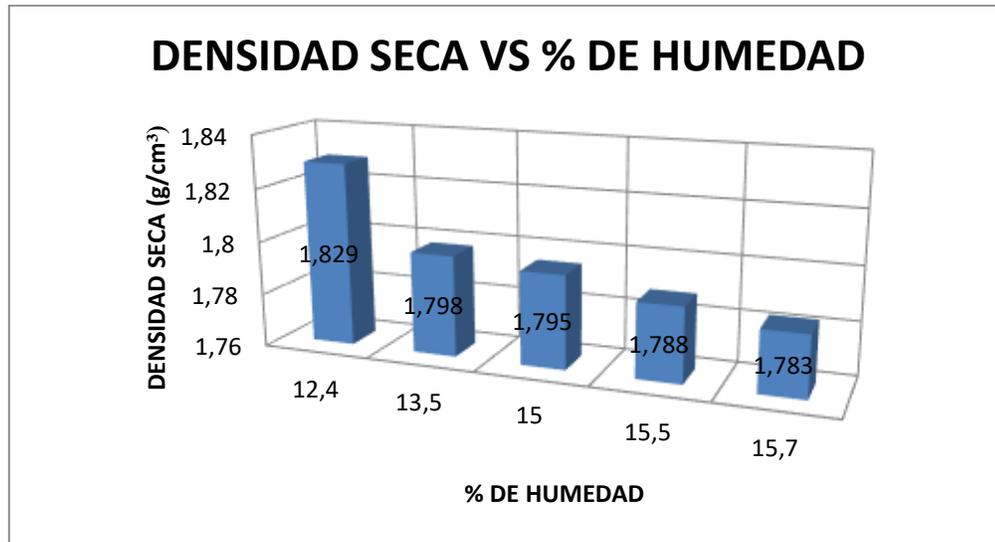
Gráfica 4.19. Influencia de sulfato de calcio en la densidad seca el Barrio Fortaleza



Fuente: Elaboración Propia

En la Gráfica 4.19 se observa que la densidad máxima para el suelo natural es 1.829 kg/m^3 y al 3% de sulfato de calcio disminuye a una densidad de 1.798 kg/m^3 , al 5% la densidad es 1.795 kg/m^3 , al 10% la densidad es de 1.788 kg/m^3 y finalmente agregando el porcentaje de 12% la densidad disminuye a 1.783 kg/m^3 .

Gráfica 4.20. Relación densidad seca vs % de humedad para el Barrio Fortaleza

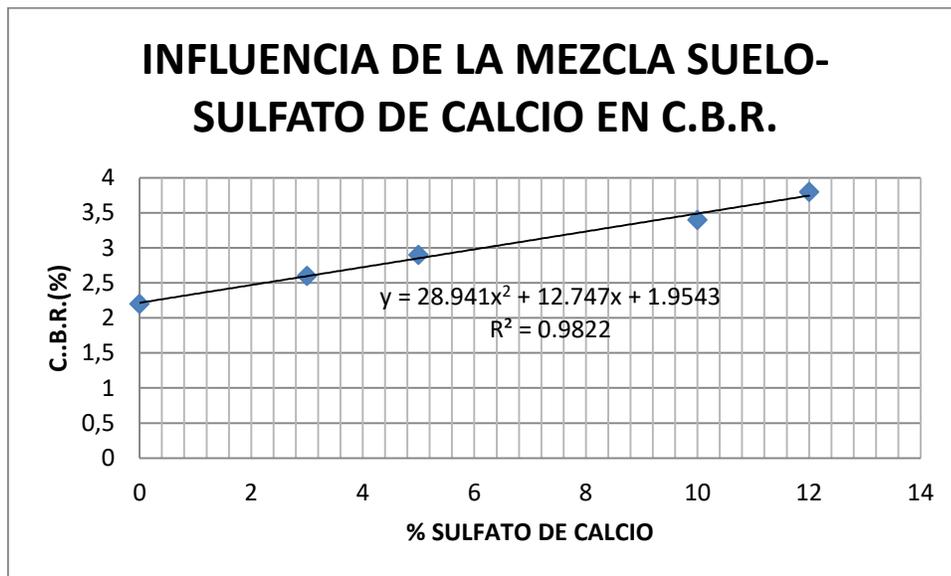


Fuente: Elaboración Propia

Según el Gráfico 4.20 la humedad para el suelo natural es de 12.4% con una densidad máxima de 1.829 kg/m³, según los resultados las humedades van aumentando, cuando se agrega un 3% de sulfato de calcio se tiene una humedad de 13.5% con una densidad de 1.798 kg/m³, al 5% la humedad aumenta a 15% y la densidad disminuye a 1.795 kg/m³, la densidad es de 1.788 kg/m³ con una humedad de 15.5% al 10%, llegando al 12% con un valor de 15.7 de su humedad óptima y su densidad de 1.783 kg/m³.

4.2.2.3 Influencia de la mezcla propuesta para la estabilización en los resultados del ensayo de C.B.R.

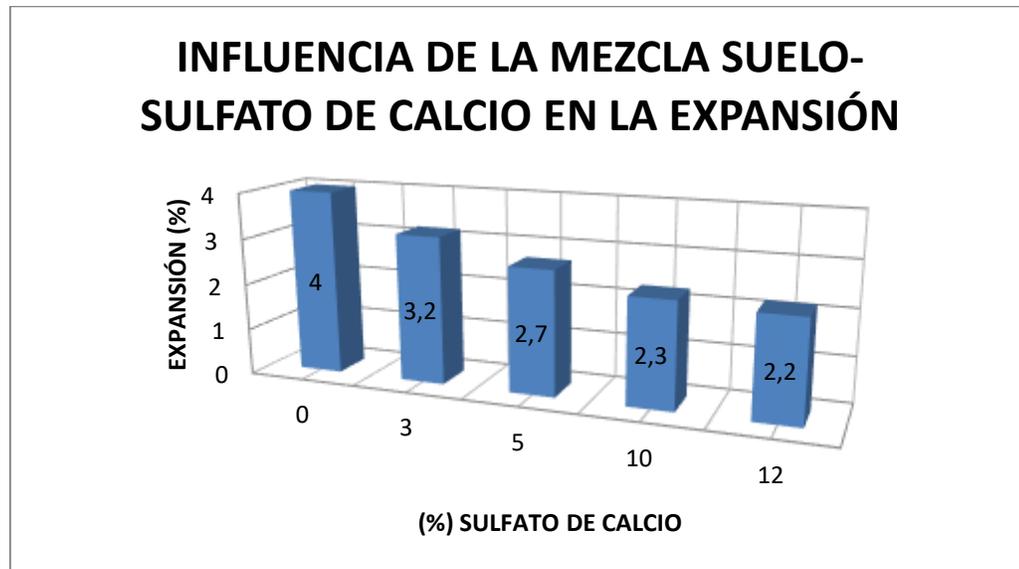
Gráfica 4.21. Influencia de la mezcla suelo –sulfato de calcio en el C.B.R. para el Barrio Los Chapacos



Fuente: Elaboración Propia

En la Gráfica 4.21 se observa que el suelo natural tiene un C.B.R. de 2.2% al 95 por ciento de su densidad máxima de compactación, asciende hasta un 2.6% con la muestra preparada con 3% de sulfato de calcio, mientras que con la mezcla de 5% este índice se eleva a 2.9%, al 10% se eleva a un 3.4% y al 12% aumenta a un 3.8% haciendo notable la mejoría en el suelo que se está estabilizando.

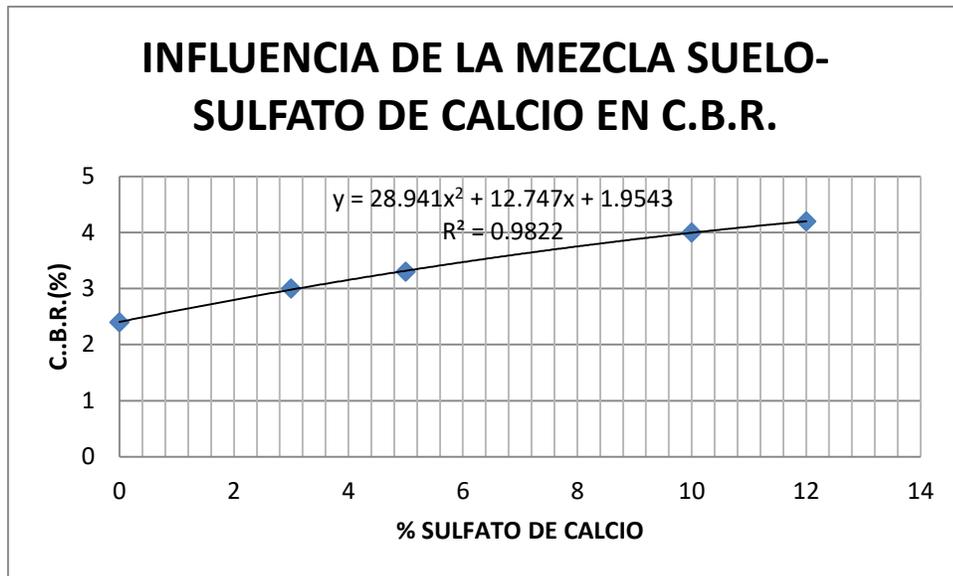
Gráfica 4.22. Influencia de la mezcla suelo-sulfato de calcio en la expansión para el Barrio Los Chapacos



Fuente: Elaboración Propia

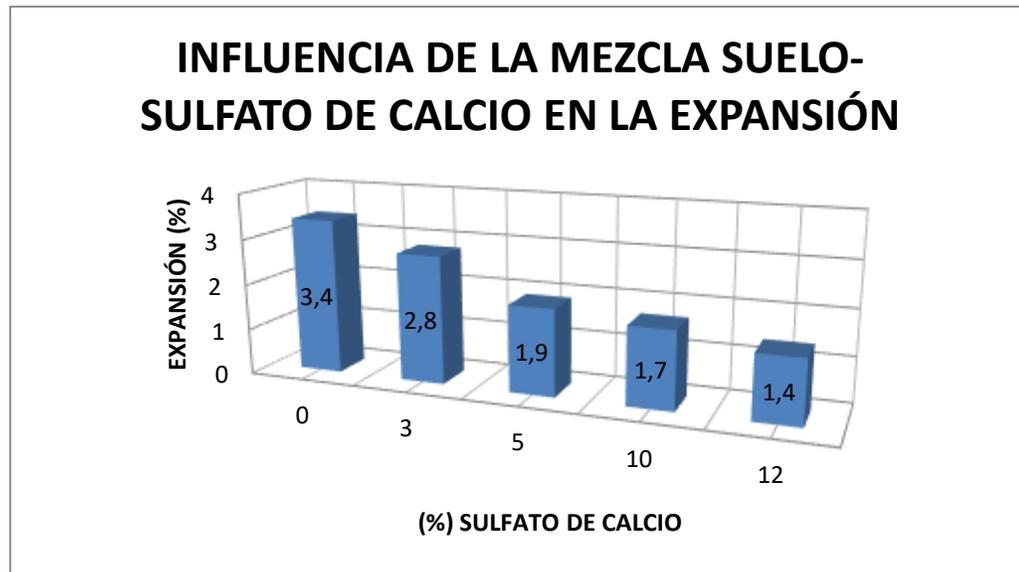
Se puede observar en la Gráfica 4.22 la influencia de la mezcla (suelo-sulfato de calcio) en el porcentaje de expansión para el suelo que tiende a disminuir, siendo 4% la expansividad en el suelo natural, y disminuyendo a medida que se aumenta los diferentes porcentajes de sulfato de calcio al 3% es 3.2, al 5% se tiene un valor de 2.7%, al 10% es de 2.3% hasta llegar al 12% que reduce a un valor de 2.2% la expansión.

Gráfica 4.23. Influencia de la mezcla suelo –sulfato de calcio en el C.B.R. para el Barrio Los Olivos



En la Gráfica 4.23 se observa que el suelo natural tiene un C.B.R. de 2.4% al 95 por ciento de su densidad máxima de compactación, asciende hasta 3% el C.B.R. con la muestra preparada con 3% de sulfato de calcio, mientras que con la mezcla de 5% este índice se eleva a 3.3%, al 10% es de 4% y al 12% aumenta a un 4.2% haciendo que el suelo mejore su C.B.R. respecto del suelo natural.

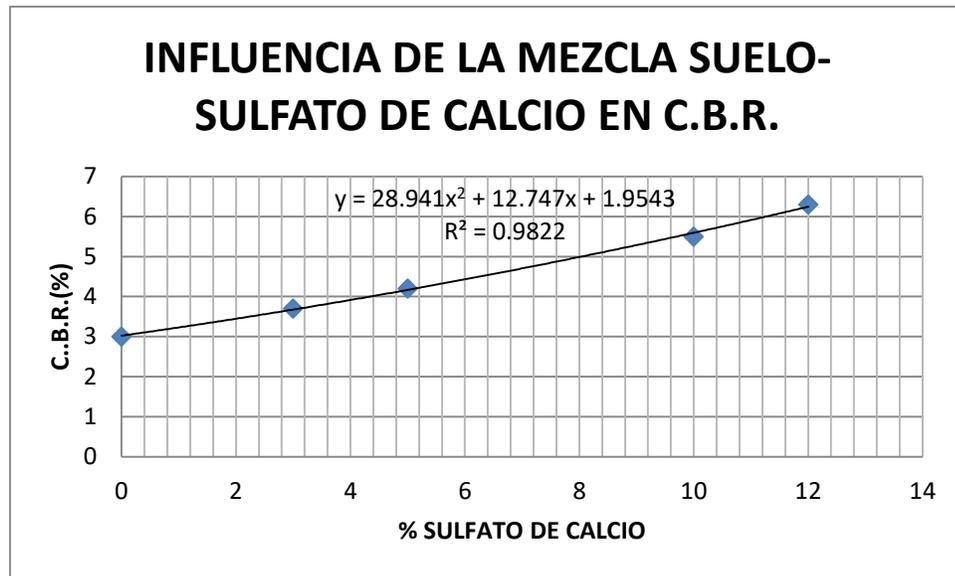
Gráfica 4.24. Influencia de la mezcla suelo-sulfato de calcio en la expansión para el Barrio Los Olivos



Fuente: Elaboración Propia

En la Gráfica 4.24 la influencia de la mezcla (suelo-sulfato de calcio) en el porcentaje de expansión para el suelo tiende a disminuir, siendo 3.4% la expansión en el suelo natural, y disminuyendo a medida que se aumenta los diferentes porcentajes de sulfato de calcio al 3% es 2.8, al 5% se tiene un valor de 1.9%, al 10% es de 1.7% hasta llegar al 12% que reduce a 1.4% a este porcentaje el suelo es menos expansivo.

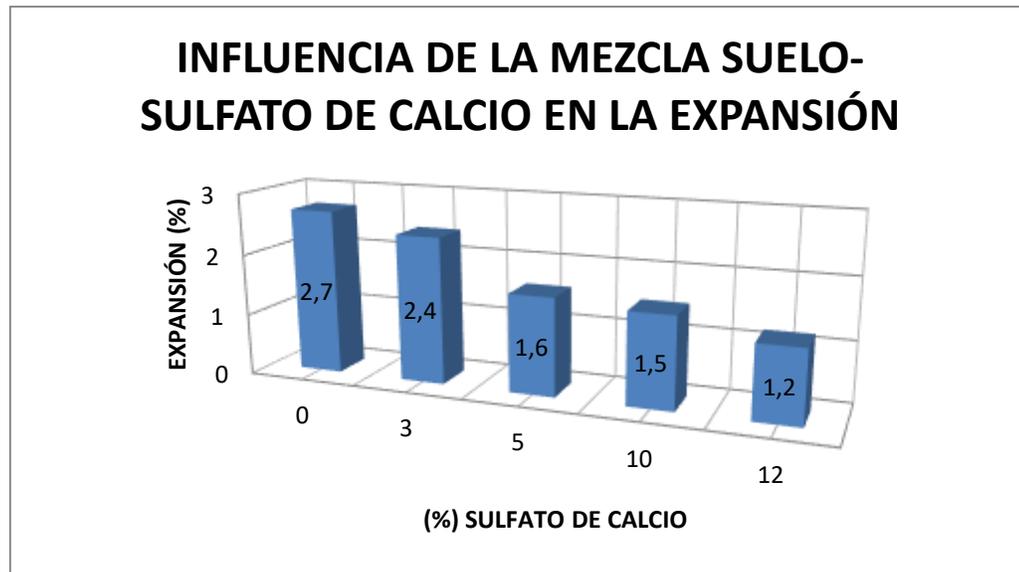
Gráfica 4.25. Influencia de la mezcla suelo –sulfato de calcio en el C.B.R. para la Nueva Terminal



Fuente: Elaboración Propia

Para la mezcla (suelo-sulfato de calcio) se tiene un índice de C.B.R. de 3.0% al 95% de su densidad máxima de compactación, al 3% se tiene un C.B.R. de 3.7%, incrementando el 5% de sulfato de calcio el C.B.R. aumenta a un valor de 4.2%, al 10% el C.B.R. es de 5.5% y al 12% tiene un valor de 6.3%, siendo el valor máximo, Gráfica 4.25 donde se puede observar que con este último % se logra el valor óptimo del C.B.R., se puede decir que los C.B.R.s a diferentes porcentajes van de manera creciente.

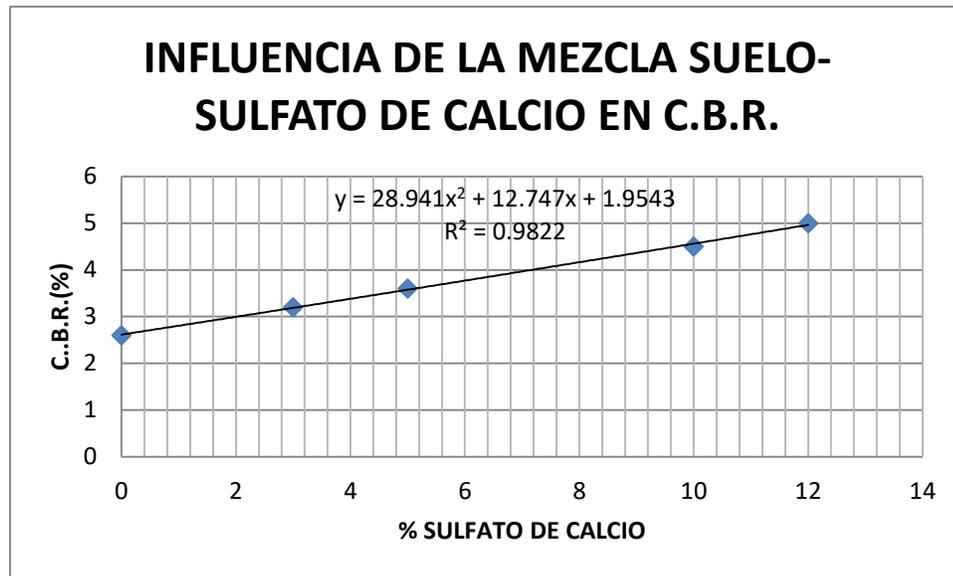
Gráfica 4.26. Influencia de la mezcla suelo-sulfato de calcio en la expansión para la Nueva Terminal



Fuente: Elaboración Propia

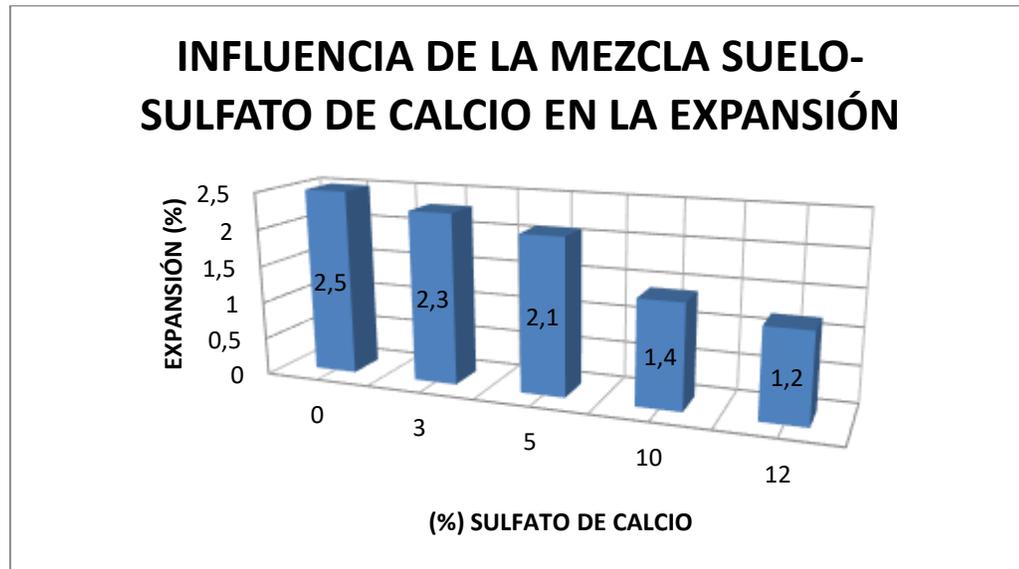
Como se observa en la Gráfica 4.26 la expansión disminuye respecto al suelo natural teniendo un valor de 2.7% viendo que es una arcilla plástica, ahora al 3% de sulfato de calcio la expansión es de 2.4%, disminuyendo a 1.6% al 5%, luego agregando al 10% decrece a 1.5%, finalmente el suelo al aumentar un 12% de estabilizante vemos que se vuelve menos plástico llegando a un valor de 1.4%.

Gráfica 4.27. Influencia de la mezcla suelo –sulfato de calcio en el C.B.R. para el Barrio Fortaleza



Para el suelo natural se tiene un índice de C.B.R. de 2.6% al 95% de su densidad máxima de compactación, al 3% se tiene un C.B.R. 3.2%, incrementando el 5% sulfato de calcio el C.B.R. aumenta a un valor de 3.6%, al 10% el C.B.R. es de 4.5% y al 12% tiene un valor de 5.0%, siendo el valor máximo, Gráfica 4.27 donde se puede observar que ya con este último % se logra una estabilización con respecto a su capacidad de soporte del suelo, también se puede observar en la gráfica que los C.B.R.s a diferentes porcentajes van de manera creciente.

Gráfica 4.28. Influencia de la mezcla suelo-sulfato de calcio en la expansión para el Barrio Fortaleza



Fuente: Elaboración Propia

Como se observa en la Gráfica 4.28 la expansión disminuye respecto al suelo natural teniendo un valor de 2.5% viendo que es una arcilla plástica, ahora al 3% de sulfato de calcio la expansión es de 2.3%, disminuyendo a 2.1% al 5%, luego agregando al 10% decrece a 1.4%, finalmente el suelo al aumentar un 12% de estabilizante vemos que se vuelve menos plástico llegando a un valor de 1.2%.

4.2.3 Análisis de los resultados de las propiedades de los suelos tratados con yeso

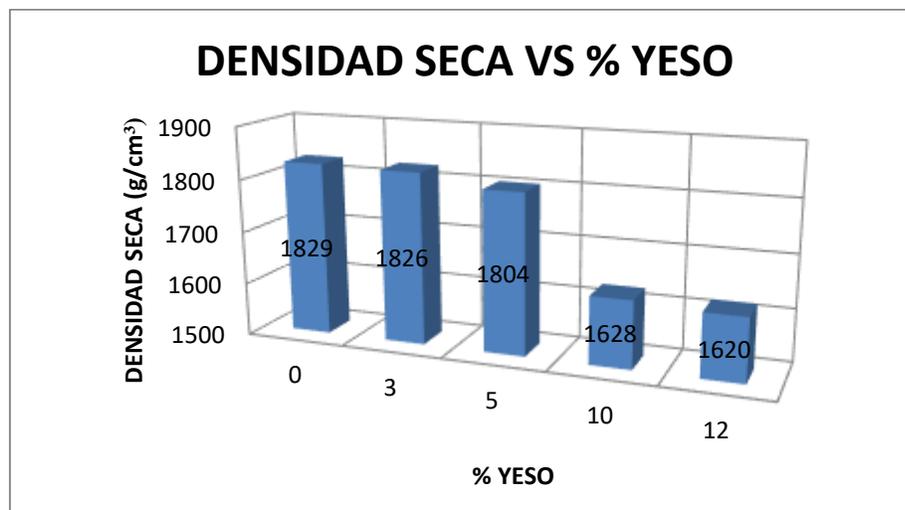
4.2.3.1 Influencia de la mezcla propuesta para la estabilización en los límites de consistencia de un suelo arcilloso

A diferencia de los límites que se mezcló con sulfato de calcio estos fueron disminuyendo su límite líquido, su límite plástico y su índice plasticidad de ser un suelo A-7-6(13) se convirtió en un suelo A-4(8), el Barrio Los Olivos se clasifica como un A-7-5(11), haciendo la mezcla al 12% se vuelve un suelo A-4(8), para la Nueva Terminal era un suelo A-6(9) luego pasando a ser un A-4(8), y finalmente el Barrio Fortaleza se clasificaba como un suelo A-6(10) para luego que ser un A-(8).

Haciendo la mezcla con el yeso estos suelos cambian significativamente sus propiedades se vuelven más expansivos, aumenta su plasticidad su índice de grupo y volviéndose más plásticos aún, como se observa en las tablas 4.13, 4.14, 4.15 y 4.16.

4.2.3.2 Influencia de la mezcla propuesta para la estabilización en los resultados del ensayo de compactación

Gráfica 4.29. Influencia de yeso en la densidad seca para el Barrio Los Chapacos

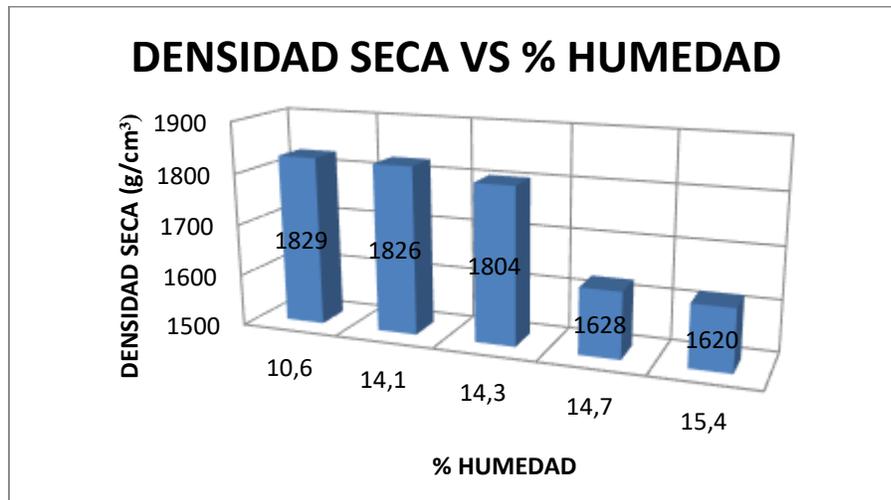


Fuente: Elaboración Propia

En la Gráfica 4.29 se observa que la densidad máxima para el suelo natural es 1.829 kg/m³ y al 3% de yeso disminuye a 1.826 kg/m³, al 5% la densidad es 1.804 kg/m³, al

10% la densidad es de 1.628 kg/m³ y finalmente agregando el porcentaje de 12% la densidad disminuye a 1.620 kg/m³.

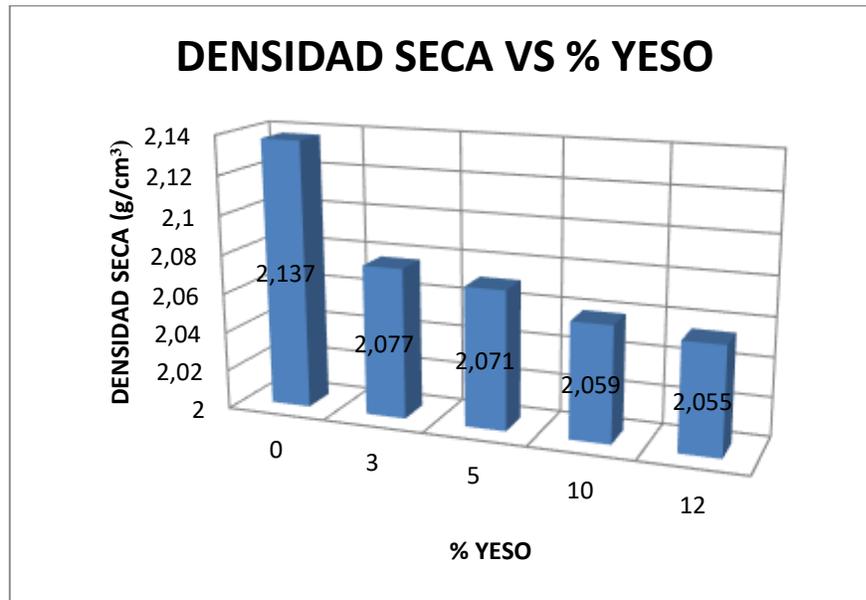
Gráfica 4.30. Relación densidad seca vs % de humedad para el Barrio Los Chapacos



Fuente: Elaboración Propia

Según el Gráfico 4.30 la humedad para el suelo natural es de 10.6% con una densidad máxima de 1.829 kg/m³, según los resultados las humedades van aumentando, cuando se agrega un 3% de sulfato de calcio se tiene una humedad de 14.1% con una densidad de 1.826 kg/m³, al 5% la humedad aumenta a 14.3% y la densidad disminuye a 1.804 kg/m³, la densidad es de 1.628 kg/m³ con una humedad de 14.7%, llegando al 12% con un valor de 15.4% de su humedad óptima y su densidad de 1.620 kg/m³.

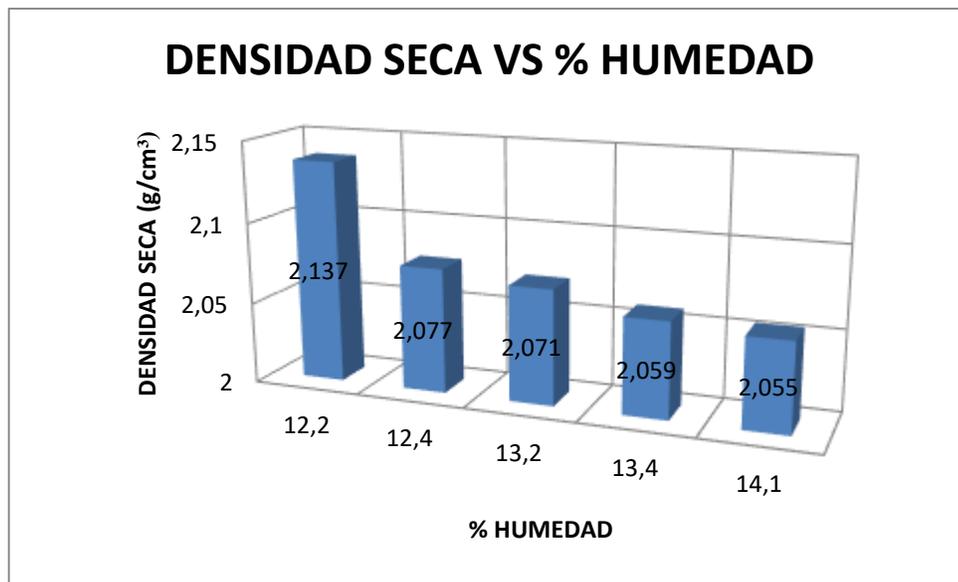
Gráfica 4.31. Influencia de yeso en la densidad seca para el Barrio Los Olivos



Fuente: Elaboración Propia

En la Gráfica 4.31 se observa que la densidad máxima para el suelo natural es 2.137 kg/m^3 y al 3% de yeso disminuye a un valor de 2.077 kg/m^3 , al 5% la densidad es 2.071 kg/m^3 , al 10% la densidad es de 2.059 kg/m^3 y finalmente agregando el porcentaje de 12% la densidad disminuye a 2.055 kg/m^3 .

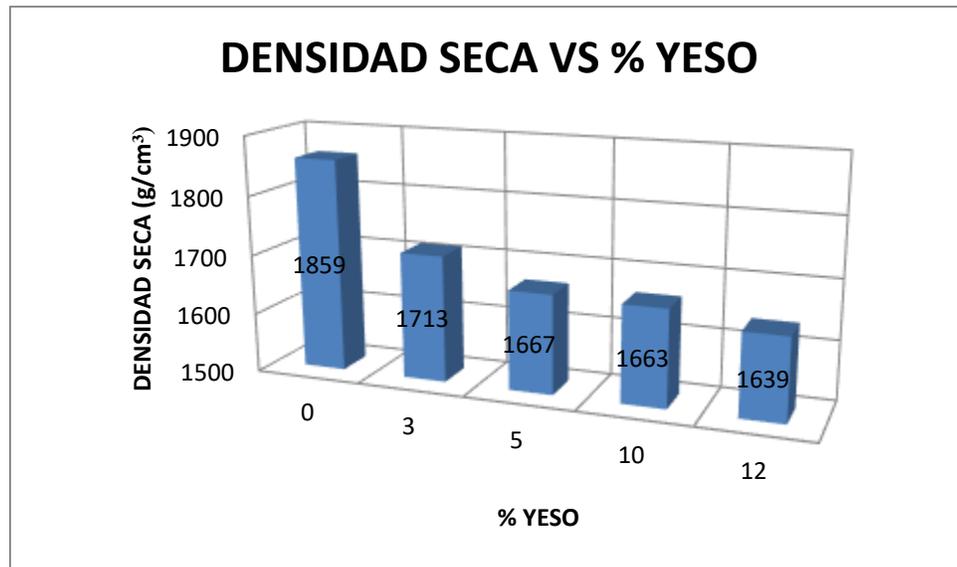
Gráfica 4.32. Relación densidad seca vs % de humedad para el Barrio Los Olivos



Fuente: Elaboración Propia

Según el Gráfico 4.32 la humedad para el suelo natural es de 12.2% con una densidad máxima de 2.137 kg/m³, según los resultados las humedades van aumentando, cuando se agrega un 3% de yeso se tiene una humedad de 12.4% con una densidad de 2.077 kg/m³, al 5% la humedad aumenta a 13.2% y la densidad disminuye a 2.071 kg/m³, la densidad es de 2.059 kg/m³ con una humedad de 13.4%, llegando al 12% con un valor de 14.1% de su humedad óptima y su densidad de 2.055 kg/m³.

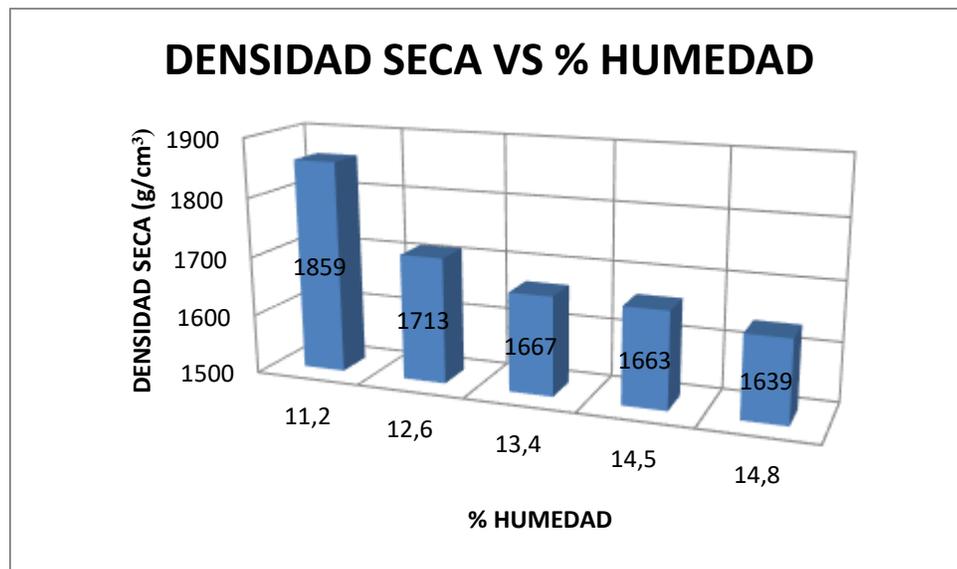
Gráfica 4.33. Influencia de yeso en la densidad seca para la Nueva Terminal



Fuente: Elaboración Propia

En la Gráfica 4.33 se observa que la densidad máxima para el suelo natural es 1.859 kg/m³ y al 3% de yeso disminuye teniendo un valor de 1.713 kg/m³, al 5% la densidad es 1.667 kg/m³, al 10% la densidad es de 1.663 kg/m³ y finalmente agregando el porcentaje de 12% la densidad baja a 1.639 kg/m³.

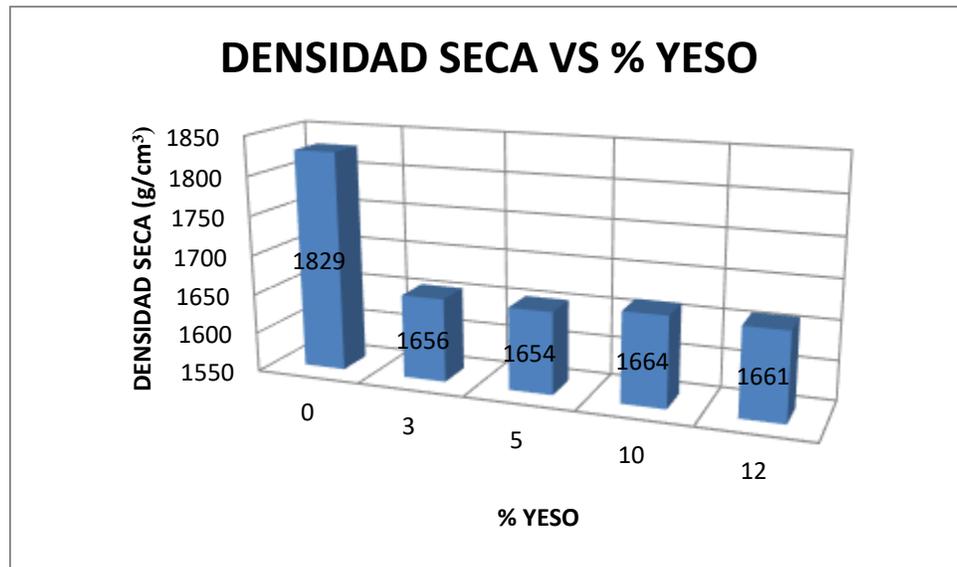
Gráfica 4.34. Relación densidad seca vs % de humedad para la Nueva Terminal



Fuente: Elaboración Propia

Según el Gráfico 4.34 la humedad para el suelo natural es de 11.2% con una densidad máxima de 1.859 kg/m³, según los resultados las humedades van aumentando, cuando se agrega un 3% de yeso se tiene una humedad de 12.6% con una densidad de 1.713 kg/m³, al 5% la humedad aumenta a 13.4% y la densidad disminuye a 1.667 kg/m³, la densidad es de 1.663 kg/m³ con una humedad de 14.5%, llegando al 12% con un valor de 14.8% de su humedad óptima y su densidad de 1.639 kg/m³.

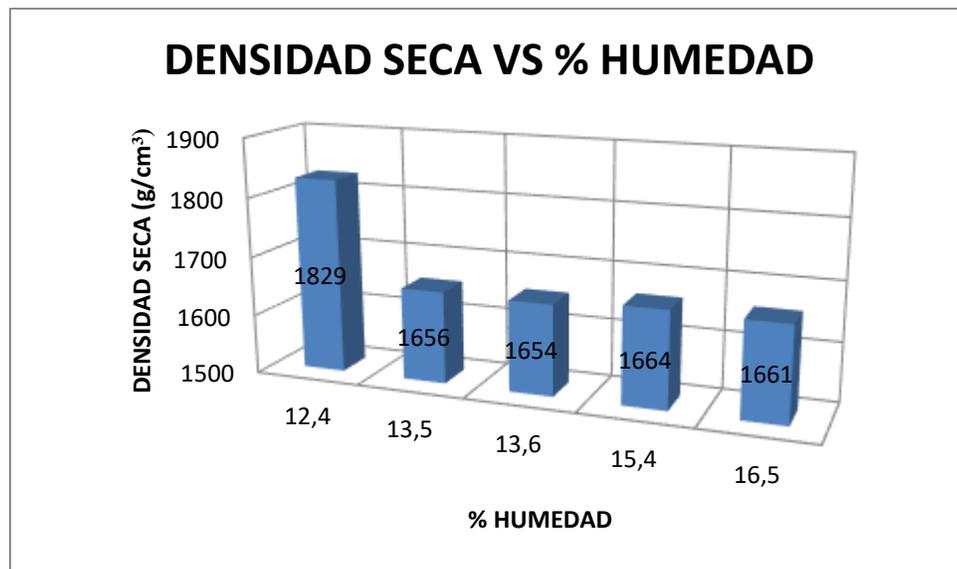
Gráfica 4.35. Influencia de yeso en la densidad seca para el Barrio Fortaleza



Fuente: Elaboración Propia

En la Gráfica 4.35 se observa que la densidad máxima para el suelo natural es 1.829 kg/m^3 y al 3% de yeso disminuye teniendo un valor de 1.656 kg/m^3 , al 5% la densidad es 1.654 kg/m^3 , al 10% la densidad es de 1.664 kg/m^3 y finalmente agregando el porcentaje de 12% la densidad baja a 1.661 kg/m^3 .

Gráfica 4.36. Relación densidad seca vs % de humedad para el Barrio Fortaleza

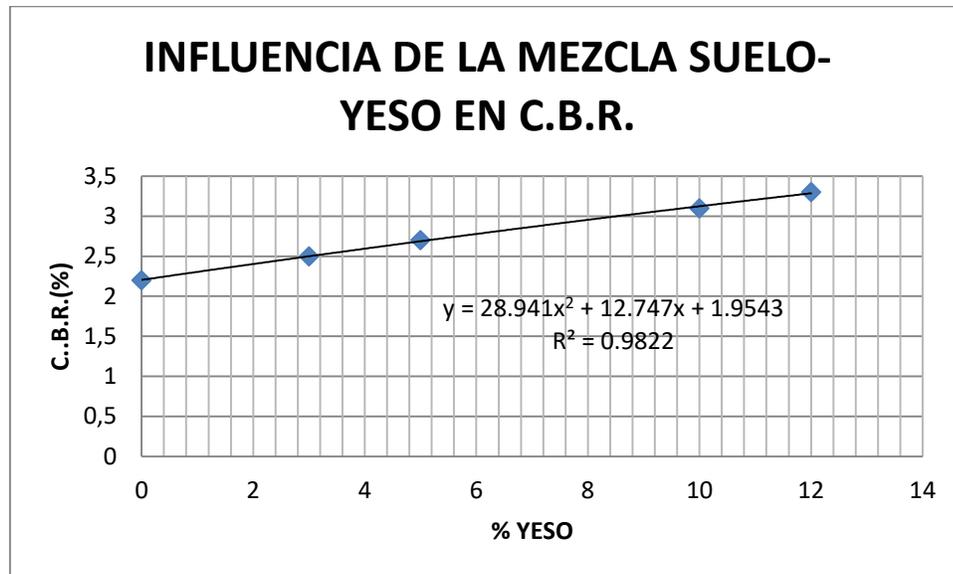


Fuente: Elaboración Propia

Según el Gráfico 4.36 la humedad para el suelo natural es de 12.4% con una densidad máxima de 1.829 kg/m³, según los resultados las humedades van aumentando, cuando se agrega un 3% de yeso se tiene una humedad de 13.5% con una densidad de 1.656 kg/m³, al 5% la humedad aumenta a 13.6% y la densidad disminuye a 1.654 kg/m³, la densidad es de 1.664 kg/m³ con una humedad de 15.4%, llegando al 12% con un valor de 16.5% de su humedad óptima y su densidad de 1.661 kg/m³.

4.2.3.3 Influencia de la mezcla propuesta para la estabilización en los resultados del ensayo de C.B.R.

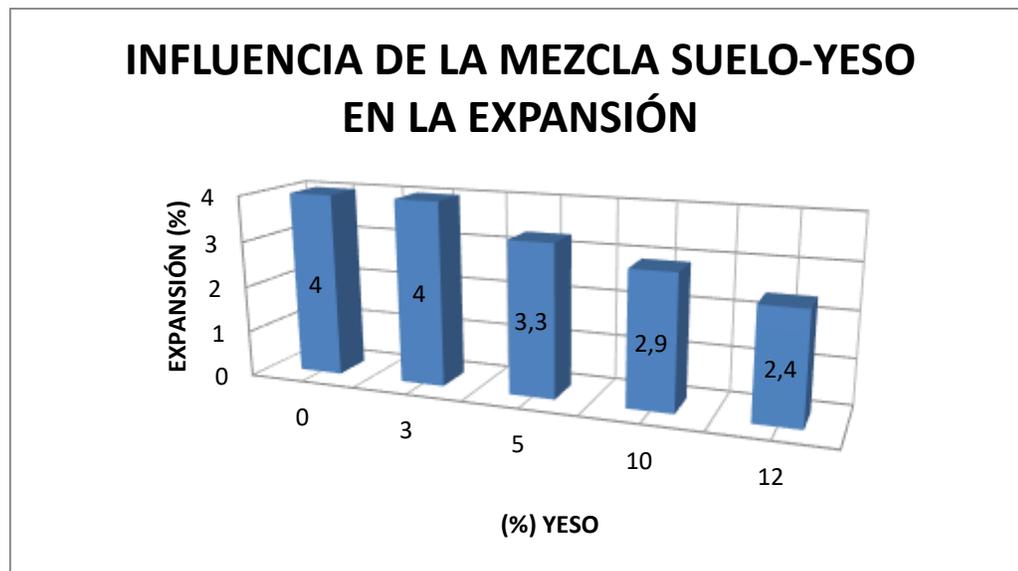
Gráfica 4.37. Influencia de la mezcla suelo –yeso en el C.B.R. para el Barrio Los Chapacos



Fuente: Elaboración Propia

Se analizó anteriormente la estabilización con yeso realizadas a los cuatro tipos de suelos cohesivos las cuales fueron positivas, cada una de las estabilizaciones presentó un C.B.R. diferente. En la Gráfica 4.37 también se observa que los C.B.R.s van de forma creciente respecto del suelo natural que tiene un valor de 2.2%, al 3% se tiene un valor de 2.5%, al 5% aumenta a 2.7, 3.1% al 10% de yeso y al 12% incrementa a un 3.3%.

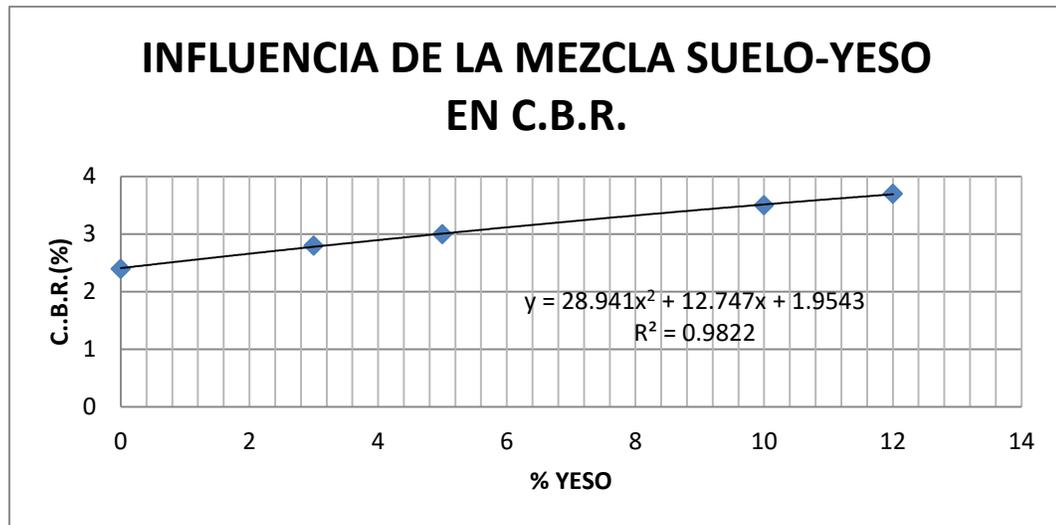
Gráfica 4.38. Influencia de la mezcla suelo-yeso en la expansión para el Barrio Los Chapacos



Fuente: Elaboración Propia

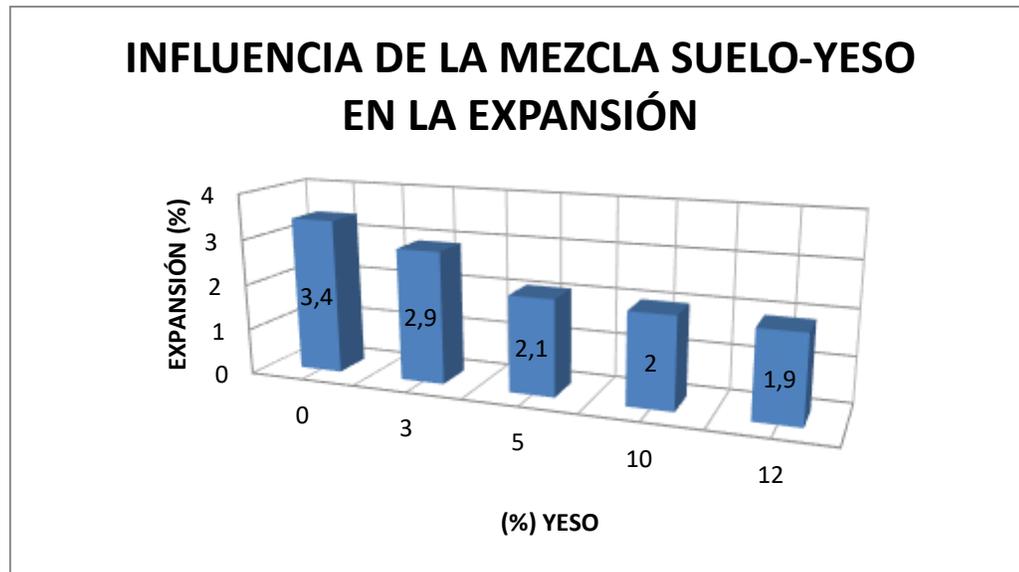
La muestra del Barrio Los Chapacos es un suelo de alta plasticidad por lo tanto es de características expansivas y esto se ve en la Gráfica 4.38, con un valor de 4% para el suelo natural, mezclando el suelo a un 3% la expansión se mantiene al 4%, aumentando el 5% yeso disminuye a 3.3%, 2.9% al 10% de esta forma el suelo va disminuyendo su expansividad hasta llegar a un 2.4% al 12%.

Gráfica 4.39. Influencia de la mezcla suelo –yeso en el C.B.R. para el Barrio Los Olivos



Se analizó anteriormente la estabilización con yeso realizadas a los cuatro tipos de suelos cohesivos las cuales fueron positivas, cada una de las estabilizaciones presentó un C.B.R. diferente. En la Gráfica 4.39 también se observa que los C.B.R.s van de forma creciente respecto del suelo natural que tiene un valor de 2.4%, al 3% se tiene un valor de 2.8%, al 5% aumenta a 3.0%, 3.5% al 10% de yeso y al 12% incrementa a un 3.7%.

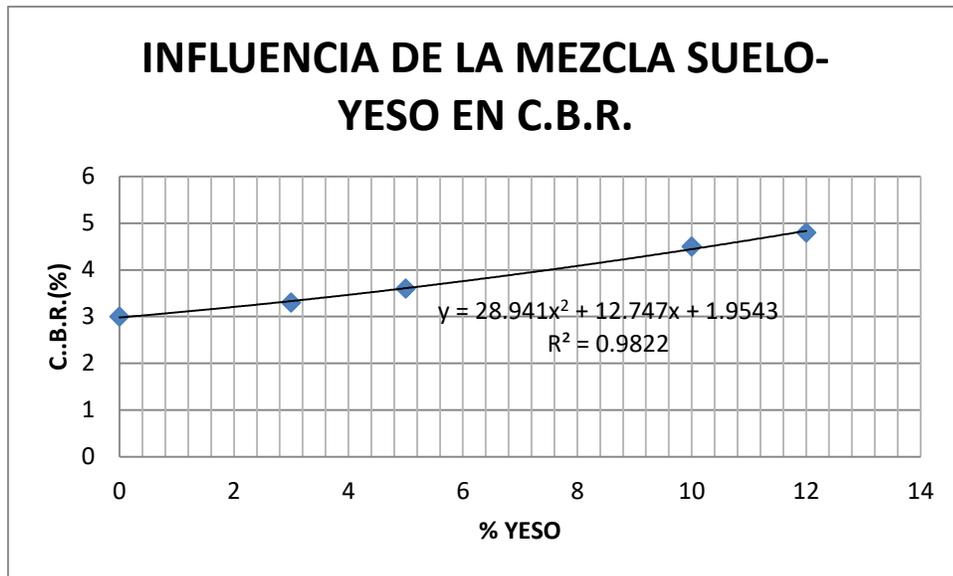
Gráfica 4.40. Influencia de la mezcla suelo-yeso en la expansión para el Barrio Los Olivos



Fuente: Elaboración Propia

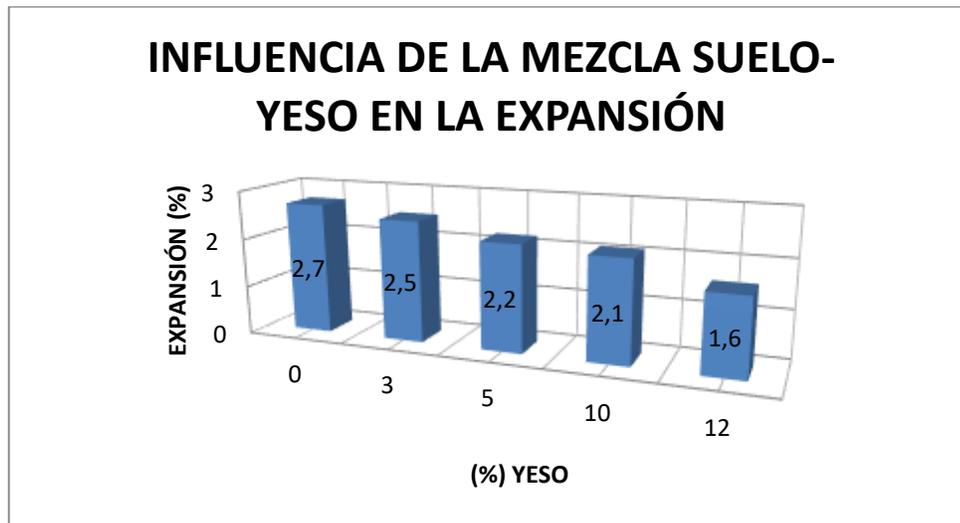
La muestra del Barrio Los Olivos es un suelo de alta plasticidad por lo tanto es de características expansivas y esto se ve en la Gráfica 4.40, con un valor de 3.4% para el suelo natural, mezclando el suelo a un 3% la expansión baja a 2.9%, aumentando el 5% de yeso disminuye a 2.1%, 2.0% al 10% de esta forma el suelo va disminuyendo su expansividad hasta llegar a un 1.9% al 12%.

Gráfica 4.41. Influencia de la mezcla suelo –yeso en el C.B.R. para la Nueva Terminal



Se analizó anteriormente la estabilización con yeso realizadas a los cuatro tipos de suelos cohesivos las cuales fueron positivas, cada una de las estabilizaciones presentó un C.B.R. diferente. En la Gráfica 4.41 también se observa que los C.B.R.s van de forma creciente respecto del suelo natural que tiene un valor de 3.0%, al 3% se tiene un valor de 3.3%, al 5% aumenta a 3.6%, 4.5% al 10% de yeso y al 12% incrementa a un 4.8%.

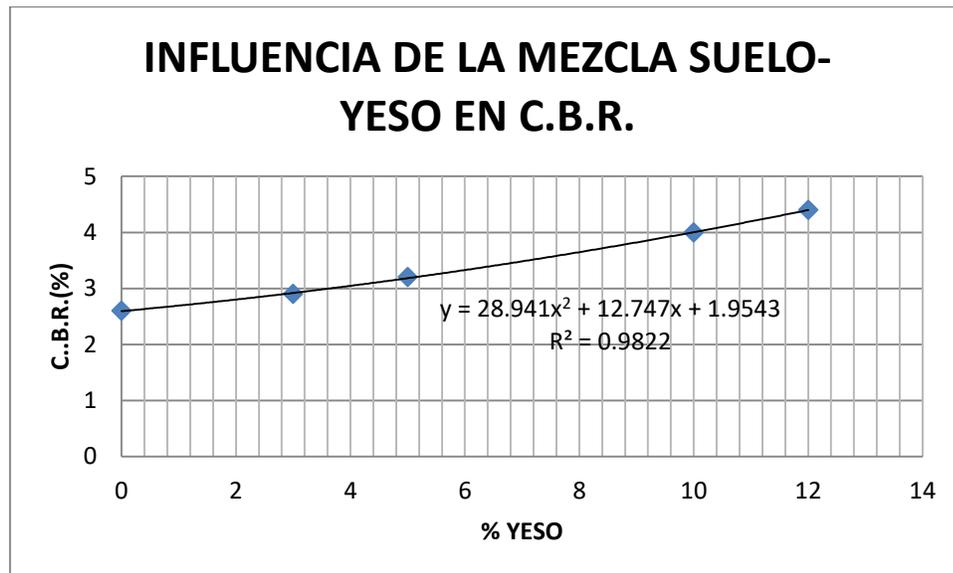
Gráfica 4.42. Influencia de la mezcla suelo-yeso en la expansión para la Nueva Terminal



Fuente: Elaboración Propia

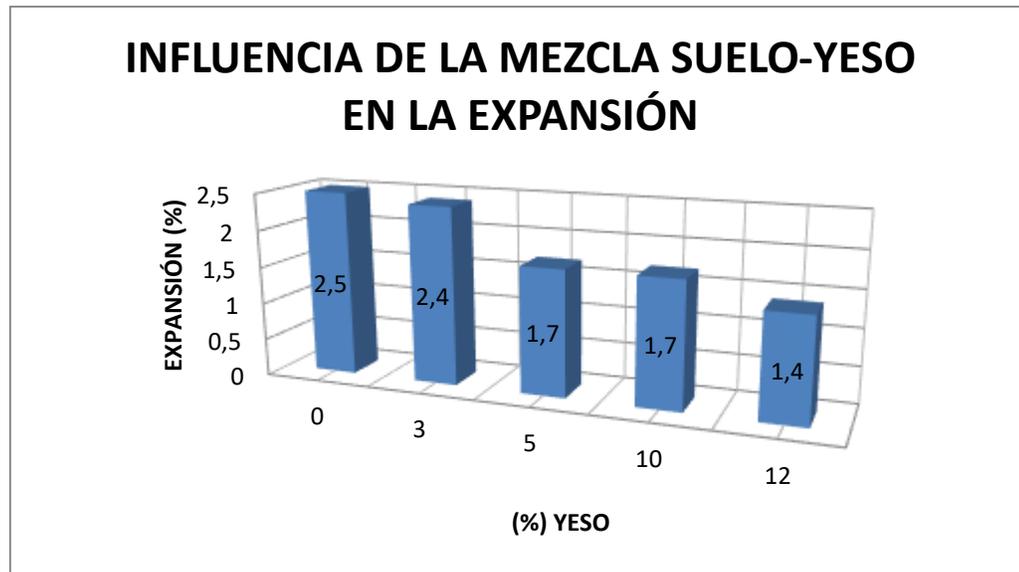
En la Gráfica 4.42 se observa que la expansión va disminuyendo, ya que para la Nueva Terminal se tiene un suelo A-6, siendo este un suelo arcilloso de alta plasticidad el cual se pretende mejorar adicionando yeso, y se observa que para el suelo natural tiene un valor de 2.7%, el cambio es notorio porque mezclando al 3% se tiene un valor 2.5, al 5% el C.B.R. es de 2.2, al 10% es de 2.1, mejorando al 12% de yeso a 1.6% de expansión.

Gráfica 4.43. Influencia de la mezcla suelo –yeso en el C.B.R. para el Barrio Fortaleza



Se analizó anteriormente la estabilización con yeso realizadas a los cuatro tipos de suelos cohesivos las cuales fueron positivas, cada una de las estabilizaciones presentó un C.B.R. diferente. En la Gráfica 4.43 también se observa que los C.B.R.s van de forma creciente respecto del suelo natural que tiene un valor de 2.6%, al 3% se tiene un valor de 2.9%, al 5% aumenta a 3.2%, 4.0% al 10% de yeso y al 12% incrementa a un 4.4%.

Gráfica 4.44. Influencia de la mezcla suelo-sulfato de calcio en la expansión para el Barrio Fortaleza

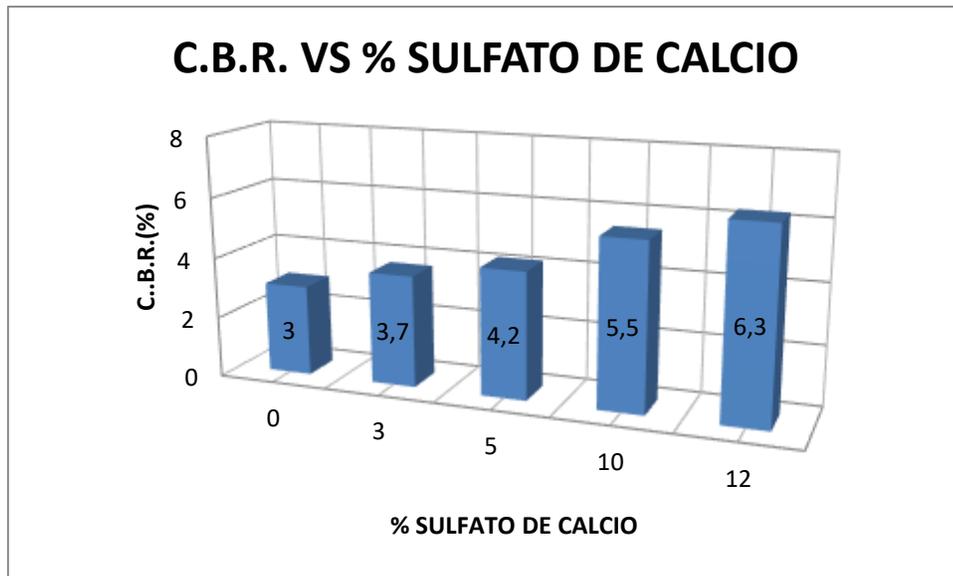


Fuente: Elaboración Propia

En la Gráfica 4.44 se observa que la expansión va disminuyendo, ya que para la Nueva Terminal se tiene un suelo A-6, siendo este un suelo arcilloso de alta plasticidad el cual se pretende mejorar adicionando yeso, y se observa que para el suelo natural tiene un valor de 2.5%, el cambio es notorio porque mezclando al 3% se tiene un valor 2.4, al 5% el C.B.R. es de 1.7, al 10% es de 1.7, mejorando al 12% de yeso a 1.4% de expansión.

4.2.3.4 Histogramas para la influencia de la mezcla propuesta para la estabilización en los resultados del ensayo de C.B.R.

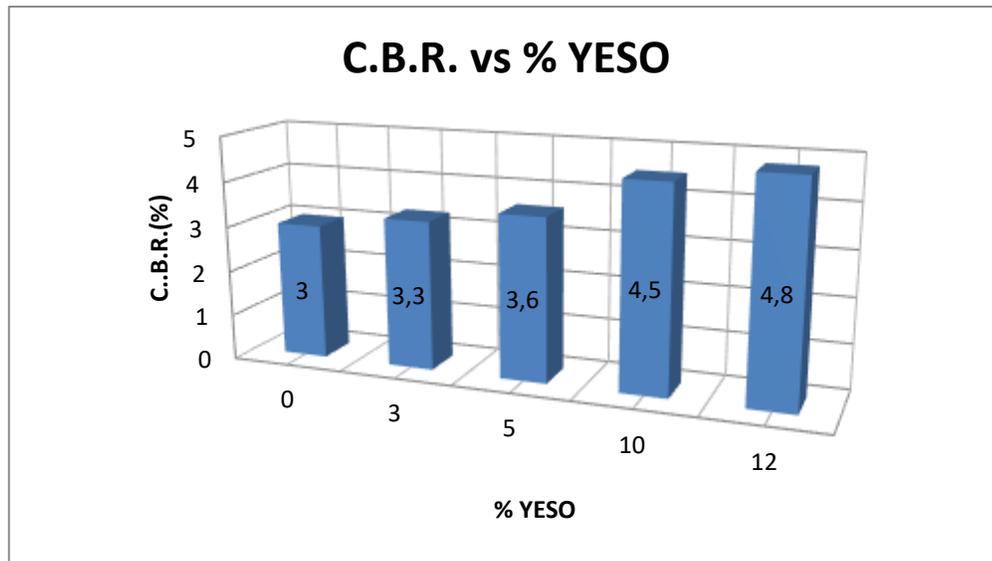
Gráfica 4.45. C.B.R. vs % sulfato de calcio para la Nueva Terminal



Fuente: Elaboración Propia

Como se observa en la Gráfica 4.45 el C.B.R. para la Nueva Terminal al 95% de su compactación es de 3% en el suelo natural, luego va incrementando al 3% el C.B.R. es 3.7%, al 5% es de 4.2%, al 10% es de 5.5% y al 12% de sulfato de calcio el C.B.R. es de 6.3% siendo este el valor óptimo para una subrasante.

Gráfica 4.46. C.B.R. vs % yeso para la Nueva Terminal



Fuente: Elaboración Propia

Como se observa en la Gráfica 4.46 se observa que el C.B.R. para la Nueva Terminal al 95% de su compactación en el suelo natural es de 3%, según el porcentaje que se incrementa el C.B.R. va aumentando al 3% es de 3.3%, al 5% es de 3.6%, al 10% es de 4.5% y al 12% de yeso es de 4.8% siendo este el valor óptimo para una subrasante.

4.3 Validación

Tabla 2.25 Categorías de suelos para Terracerías y capa Subrasante

Característica	Suelos Tolerables	Suelos Adecuados	Suelos Seleccionados
Tamaño máximo	25 % > 15 cm	< 10 cm	< 8 cm
Contenido de finos, %	....	≤ 35	≤ 25
Limite Líquido, %	≤ 40	≤ 40	≤ 30
Índice de Plasticidad, %	....	....	≤ 10
Peso vol. Máximo, Kg/m ³	≥ 1450	≥ 1750	....
C.B.R. %	> 3	> 5	> 10
Expansión, %	....	< 2	0

Fuente: Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto IMCYC

Según el Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto IMCYC para capas subrasantes el C.B.R. es mayor a 3%, por tanto los resultados obtenidos en laboratorio nos muestran que los C.B.R.s están en dentro del rango para estabilizar una capa subrasante siendo el suelo más adecuado el de la Nueva Terminal con la mezcla de sulfato de calcio.

4.4 Tratamiento estadístico

4.4.1 Tratamiento estadístico para la mezcla suelo-sulfato de calcio

Tabla 4.26 Estadística para los LI, LP, IP, IG

LUGAR	CLASIFICACIÓN	%	L.L.	L.P.	I.P.	I.G.
CHAPACOS	A-7-6	S.N.	44.8	23.8	21.1	13
	A-6	3	37.6	19.9	17.7	11
	A-6	5	26.6	14.8	11.7	9
	A-4	10	21.8	13.9	7.9	8
	A-4	12	10.4	8.8	1.6	8
Media			28.24	16.24	12	9.8
Mediana			26.6	14.8	11.7	9
D. estándar			13.46	5.78	7.75	2.17
Varianza			181.07	33.36	60.09	4.70
Coefficiente de variación			47.65	35.57	64.60	22.12
LOS OLIVOS	A-7-5	S.N.	44.6	30.4	14.2	11
	A-6	3	31.3	18.6	12.7	9
	A-6	5	28	15.7	12.3	9
	A-6	10	26.7	14.6	12.1	9
	A-4	12	15.2	11.8	3.4	8
Media			29.16	18.22	10.94	9.2
Mediana			28	15.7	12.3	9
D. estándar			10.55	7.23	4.29	1.10
Varianza			111.31	52.29	18.44	1.20
Coefficiente de variación			36.18	39.69	39.26	11.91
N. TERMINAL	A-6	S.N.	29.7	16.9	12.8	9
	A-4	3	26.7	16.4	10.2	8
	A-4	5	23.3	14.6	8.7	8
	A-4	10	15.3	11.1	4.1	8
	A-4	12	13.3	8.6	4.7	8
Media			21.66	13.52	8.1	8.2
Mediana			23.3	14.6	8.7	8
D. estándar			7.13	3.57	3.69	0.45
Varianza			50.77	12.74	13.61	0.20
Coefficiente de variación			32.90	26.40	45.54	5.45
B. FORTALEZA	A-6	S.N.	32.4	16.4	16	10
	A-6	3	28.3	15.5	12.8	9
	A-4	5	20.8	15.3	5.4	8
	A-4	10	17.3	13.9	3.3	8
	A-4	12	11.2	10.4	0.7	8
Media			22	14.3	7.64	8.6
Mediana			20.8	15.3	5.4	8
D. estándar			8.49	2.36	6.49	0.89
Varianza			72.01	5.56	42.13	0.80
Coefficiente de variación			38.57	16.48	84.96	10.40

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 4.27 Estadística para la H.O. y la densidad

LUGAR	CLASIFICACIÓN	%	H.O.	DENSIDAD (g/cm ³)		
				90%	95%	100%
CHAPACOS	A-7-6	S.N.	10.6	1.733	1.829	1.925
	A-6	3	11.9	1.731	1.827	1.923
	A-6	5	12.5	1.729	1.825	1.921
	A-4	10	12.7	1.727	1.823	1.919
	A-4	12	14.5	1.724	1.819	1.915
Media			12.44	1.7288	1.8246	1.9206
Mediana			12.5	1.729	1.825	1.921
D. estándar			1.41	0.00	0.00	0.00
Varianza			2.00	0.00	0.00	0.00
Coefficiente de variación			11.36	0.20	0.21	0.20
LOS OLIVOS	A-7-5	S.N.	12.2	2.025	2.137	2.25
	A-6	3	13.8	1.99	2.1	2.211
	A-6	5	14.5	1.906	2.012	2.118
	A-6	10	15.2	1.904	2.01	2.115
	A-4	12	15.8	1.843	1.945	2.047
Media			14.3	1.9336	2.0408	2.1482
Mediana			14.5	1.906	2.012	2.118
D. estándar			1.39	0.07	0.08	0.08
Varianza			1.94	0.01	0.01	0.01
Coefficiente de variación			9.74	3.78	3.77	3.79
N. TERMINAL	A-6	S.N.	11.2	1.761	1.859	1.956
	A-4	3	13.1	1.756	1.854	1.951
	A-4	5	13.5	1.65	1.742	1.833
	A-4	10	14.5	1.631	1.721	1.812
	A-4	12	17.3	1.627	1.717	1.807
Media			13.92	1.685	1.7786	1.8718
Mediana			13.5	1.65	1.742	1.833
D. estándar			2.24	0.07	0.07	0.08
Varianza			5.00	0.00	0.01	0.01
Coefficiente de variación			16.07	4.02	4.03	4.02
B. FORTALEZA	A-6	S.N.	12.4	1.732	1.829	1.925
	A-6	3	13.5	1.704	1.798	1.893
	A-4	5	15	1.698	1.792	1.886
	A-4	10	15.5	1.694	1.788	1.882
	A-4	12	15.7	1.689	1.783	1.877
Media			14.42	1.7034	1.798	1.8926
Mediana			15	1.698	1.792	1.886
D. estándar			1.42	0.02	0.02	0.02
Varianza			2.02	0.00	0.00	0.00
Coefficiente de variación			9.85	0.99	1.01	1.01

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 4.28 Estadística para la expansión y el C.B.R.

LUGAR	CLASIFICACIÓN	%	EXPANSIÓN		C.B.R.		
			95%	100%	90%	95%	100%
CHAPACOS	A-7-6	S.N.	4	2.9	1.8	2.2	2.6
	A-6	3	3.2	1.7	1.7	2.6	3.4
	A-6	5	2.7	1.3	1.7	2.9	4.1
	A-4	10	2.3	1.5	2	3.4	4.9
	A-4	12	2.2	0.5	1.4	3.8	6.2
Media			2.88	1.58	1.72	2.98	4.24
Mediana			2.7	1.5	1.7	2.9	4.1
D. estándar			0.74	0.87	0.22	0.63	1.39
Varianza			0.55	0.75	0.05	0.40	
Coefficiente de variación			25.68	54.88	12.60	21.28	
LOS OLIVOS	A-7-5	S.N.	3.4	2.2	1.7	2.4	3.2
	A-6	3	2.8	1.6	1.4	3	4.5
	A-6	5	1.9	1.3	2.9	3.3	3.7
	A-6	10	1.7	1.6	2.7	4	5.4
	A-4	12	1.4	1.3	3.1	4.2	5.3
Media			2.24	1.6	2.36	3.38	4.42
Mediana			1.9	1.6	2.7	3.3	4.5
D. estándar			0.83	0.37	0.76	0.74	0.97
Varianza			0.69	0.13	0.58	0.54	0.94
Coefficiente de variación			37.16	22.96	32.21	21.78	21.90
N. TERMINAL	A-6	S.N.	2.7	2.5	2.3	3	3.7
	A-4	3	2.4	1.6	2.2	3.7	5.2
	A-4	5	1.6	1.4	2	4.2	6.4
	A-4	10	1.5	1.4	3.3	5.5	7.6
	A-4	12	1.2	1.1	3.2	6.3	9.4
Media			1.88	1.6	2.6	4.54	6.46
Mediana			1.6	1.4	2.3	4.2	6.4
D. estándar			0.64	0.53	0.60	1.34	2.19
Varianza			0.41	0.29	0.37	1.80	4.79
Coefficiente de variación			33.93	33.37	23.24	29.58	33.87
B. FORTALEZA	A-6	S.N.	2.5	1.7	2.2	2.6	3
	A-6	3	2.3	1.4	1	3.2	5.5
	A-4	5	2.1	0.9	1.1	3.6	6
	A-4	10	1.4	1	1.6	4.5	7.4
	A-4	12	1.2	0.9	1.3	5	8.7
Media			1.9	1.18	1.44	3.78	6.12
Mediana			2.1	1	1.3	3.6	6
D. estándar			0.57	0.36	0.48	0.97	2.15
Varianza			0.33	0.13	0.23	0.94	4.61
Coefficiente de variación			30.00	30.20	33.52	25.68	35.07

Fuente: Elaboración Propia

4.4.2 Tratamiento estadístico para la mezcla suelo-yeso

Tabla 4.29 Estadística para los LI, LP, IP, IG

LUGAR	CLASIFICACIÓN	%	L.L.	L.P.	IP.	I.G.
CHAPACOS	A-7-6	S.N.	44.8	23.8	21.1	13
	A-6	3	51.6	29.9	21.7	15
	A-6	5	40.7	13.4	27.3	15
	A-4	10	63.6	29	34.6	20
	A-4	12	73.9	26.9	47	20
Media			54.92	24.6	30.34	16.6
Mediana			51.6	26.9	27.3	15
D. estándar			13.70	6.69	10.78	3.21
Varianza			187.81	44.70	116.24	10.30
Coefficiente de variación			24.95	27.18	35.54	19.33
LOS OLIVOS	A-7-5	S.N.	44.6	30.4	14.2	11
	A-6	3	47.2	20.8	26.3	16
	A-6	5	53.2	25.6	27.6	18
	A-6	10	57.6	18.4	39.2	20
	A-4	12	43.1	16.4	26.7	15
Media			49.14	22.32	26.8	16
Mediana			47.2	20.8	26.7	16
D. estándar			6.10	5.67	8.85	3.39
Varianza			37.23	32.19	78.36	11.50
Coefficiente de variación			12.42	25.42	33.03	21.19
N. TERMINAL	A-6	S.N.	32.4	16.4	16	10
	A-4	3	33.8	15.9	17.9	11
	A-4	5	35.6	14	21.6	13
	A-4	10	32.6	12	20.6	12
	A-4	12	39	11	28	15
Media			34.68	13.86	20.82	12.2
Mediana			33.8	14	20.6	12
D. estándar			2.73	2.36	4.58	1.92
Varianza			7.45	5.57	20.99	3.70
Coefficiente de variación			7.87	17.02	22.01	15.77
B. FORTALEZA	A-6	S.N.	29.7	16.9	12.8	9
	A-6	3	37.3	15.3	22	13
	A-4	5	40.4	25.6	14.8	10
	A-4	10	37.2	20.6	16.6	11
	A-4	12	38.6	11.4	27.3	15
Media			36.64	17.96	18.7	11.6
Mediana			37.3	16.9	16.6	11
D. estándar			4.09	5.40	5.90	2.41
Varianza			16.72	29.14	34.82	5.80
Coefficiente de variación			11.16	30.06	31.56	20.76

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 4.30 Estadística para la H.O. y la densidad

LUGAR	CLASIFICACIÓN	%	H.O.	DENSIDAD (g/cm ³)		
				90%	95%	100%
CHAPACOS	A-7-6	S.N.	10.6	1.733	1829	1925
	A-6	3	14.1	1730	1826	1922
	A-6	5	14.3	1709	1804	1899
	A-4	10	14.7	1543	1628	1714
	A-4	12	15.4	1535	1620	1706
Media			13.82	1303.7466	1741.4	1833.2
Mediana			14.3	1543	1804	1899
D. estándar			1.87	733.46	107.64	112.95
Varianza			3.49	537970.50	11586.80	12757.70
Coefficiente de variación			13.51	56.26	6.18	6.16
LOS OLIVOS	A-7-5	S.N.	12.2	2.025	2.137	2.25
	A-6	3	12.4	1.968	2.077	2187
	A-6	5	13.2	1.962	2.071	2180
	A-6	10	13.4	1.95	2.059	2167
	A-4	12	14.1	1.947	2.055	2163
Media			13.06	1.9704	2.0798	1739.85
Mediana			13.2	1.962	2.071	2167
D. estándar			0.77	0.03	0.03	971.40
Varianza			0.60	0.00	0.00	943610.49
Coefficiente de variación			5.92	1.61	1.60	55.83
N. TERMINAL	A-6	S.N.	11.2	1761	1859	1.956
	A-4	3	12.6	1623	1713	1803
	A-4	5	13.4	1579	1667	1754
	A-4	10	14.5	1576	1663	1751
	A-4	12	14.8	1553	1639	1725
Media			13.3	1618.4	1708.2	1406.9912
Mediana			13.4	1579	1667	1751
D. estándar			1.47	83.64	88.45	785.94
Varianza			2.15	6995.80	7823.20	617708.41
Coefficiente de variación			11.02	5.17	5.18	55.86
B. FORTALEZA	A-6	S.N.	12.4	1.732	1829	1925
	A-6	3	13.5	1569	1656	1743
	A-4	5	13.6	1567	1654	1741
	A-4	10	15.4	1576	1664	1751
	A-4	12	16.5	1574	1661	1749
Media			14.28	1257.5464	1692.8	1781.8
Mediana			13.6	1569	1661	1749
D. estándar			1.64	702.03	76.24	80.16
Varianza			2.70	492847.56	5812.70	6425.20
Coefficiente de variación			11.50	55.83	4.50	4.50

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 4.31 Estadística para la expansión y el C.B.R.

LUGAR	CLASIFICACIÓN	%	EXPANSIÓN		C.B.R.		
			95%	100%	90%	95%	100%
CHAPACOS	A-7-6	S.N.	4	2.9	1.8	2.2	2.6
	A-6	3	4	1.5	1.8	2.5	3.2
	A-6	5	3.3	2.1	1.8	2.7	3.6
	A-4	10	2.9	1.7	0.6	3.1	5.7
	A-4	12	2.4	1.7	1.4	3.3	5.1
Media			3.32	1.98	1.48	2.76	4.04
Mediana			3.3	1.7	1.8	2.7	3.6
D. estándar			0.70	0.56	0.52	0.44	1.31
Varianza			0.49	0.31	0.27	0.20	
Coefficiente de variación			21.02	28.21	35.24	16.12	
LOS OLIVOS	A-7-5	S.N.	3.4	2.2	1.7	2.4	3.2
	A-6	3	2.9	2.5	1.4	2.8	4.1
	A-6	5	2.1	1.8	2.3	3	3.7
	A-6	10	2	1.8	1.3	3.5	5.7
	A-4	12	1.9	1.6	2.5	3.7	4.9
Media			2.46	1.98	1.84	3.08	4.32
Mediana			2.1	1.8	1.7	3	4.1
D. estándar			0.66	0.36	0.54	0.53	0.99
Varianza			0.43	0.13	0.29	0.28	0.98
Coefficiente de variación			26.75	18.35	29.17	17.09	22.94
N. TERMINAL	A-6	S.N.	2.7	2.5	2.3	3	3.7
	A-4	3	2.5	2.4	2.7	3.3	3.9
	A-4	5	2.2	2.2	2.7	3.6	4.5
	A-4	10	2.1	1.8	3.7	4.5	5.4
	A-4	12	1.6	1.6	3.7	4.8	5.8
Media			2.22	2.1	3.02	3.84	4.66
Mediana			2.2	2.2	2.7	3.6	4.5
D. estándar			0.42	0.39	0.64	0.78	0.92
Varianza			0.18	0.15	0.41	0.60	0.84
Coefficiente de variación			18.95	18.44	21.25	20.22	19.70
B. FORTALEZA	A-6	S.N.	2.5	1.7	2.2	2.6	3
	A-6	3	2.4	1.2	1.6	2.9	4.2
	A-4	5	1.7	1.7	1.4	3.2	5.1
	A-4	10	1.7	1	2.7	4	5.3
	A-4	12	1.4	0.8	2.3	4.4	6.5
Media			1.94	1.28	2.04	3.42	4.82
Mediana			1.7	1.2	2.2	3.2	5.1
D. estándar			0.48	0.41	0.53	0.76	1.31
Varianza			0.23	0.17	0.28	0.57	1.71
Coefficiente de variación			24.88	31.93	26.08	22.11	27.11

Fuente: Elaboración Propia

4.5 Costos

Haciendo el costo para la subrasante normal se tiene un precio de 68.133 Bs.

Para la subrasante con mezcla de sulfato de calcio se tiene un costo de 72.175 Bs al porcentaje óptimo del 12%.

Para la subrasante estabilizada con yeso cocido se tiene un costo de 78.103 Bs al porcentaje óptimo del 12%.

Comparando con una subrasante estabilizada con cal hidratada al 12%, se tiene un costo de 105.136 Bs.

5.1. Conclusiones

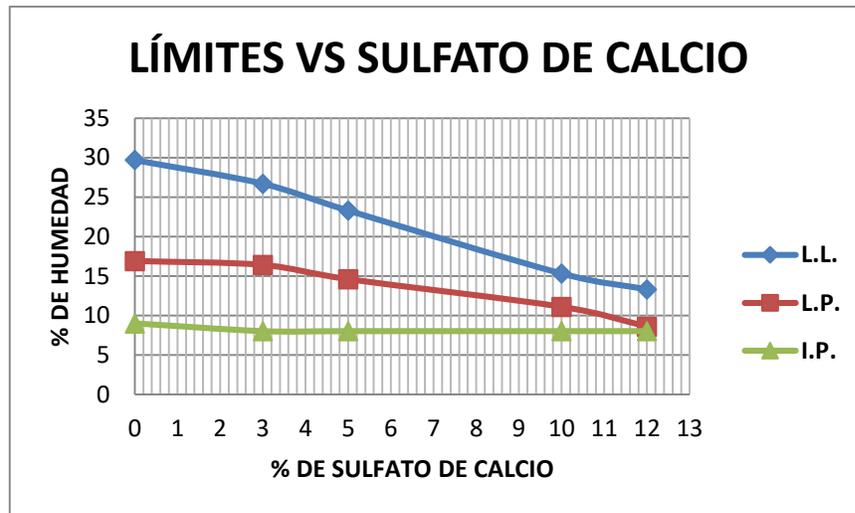
- ✓ Se logró evaluar la estabilización de suelos arcillosos con mineralizadores que contienen sulfato de calcio y yeso, con cantidades del 3%, 5%, 10% y 12% que mejoren las propiedades físicas y mecánicas.
- ✓ Se identificó las zonas de aplicación del proyecto las cuales son: Barrio Los Chapacos, Los Olivos, La Nueva Terminal y el barrio Fortaleza ya que contienen suelos arcillosos para estabilizar con sulfato de calcio y yeso.
- ✓ Se caracterizó cuatro tipos de suelos arcillosos naturales logrando su clasificación, mediante límites líquidos, límites plásticos, granulometría por el método del lavado logrando clasificar a los suelos como arcillas plásticas como se observa en la tabla, los índices de plasticidad son mayores a 10, poseen un alto contenido de material fino que pasa el tamiz 200.

Zona de estudio	Nº1	Nº2	Nº3	Nº4
Límite Líquido (L.L.) %	44.80	44.6	29.7	32.4
Límite Plástico (L.P.)%	23.8	30.4	16.9	16.4
Índice de Plasticidad (I.P.)%	21.10	14.2	12.8	16
Índice de Grupo (I.G.)	13	11	9	10
Clasificación AASHTO	A-7-6	A-7-5	A-6	A-6

- ✓ Los resultados de los ensayos en los suelos naturales muestran que los C.B.R.s son de baja resistencia al 95% de su densidad máxima como se ve en la gráfica.

Zona de estudio	Nº1	Nº2	Nº3	Nº4
CBR 95 % de D _{máx}	2.2	2.4	3.0	2.6
CBR 100 % de D _{máx}	2.6	3.2	3.7	3.0
Expansión 95(%)	4	3.4	2.7	2.5
Expansión 100(%)	2.9	2.2	2.5	1.7

- ✓ Se realizó los límites líquidos, el límite plástico con las diferentes mezclas de sulfato de calcio y yeso, se observó que su índice de plasticidad va reduciendo a medida que se aumenta los porcentajes, lo propio ocurre con el índice de grupo esto hace que el suelo se vuelva menos plástico como se observa en la gráfica para la Nueva Terminal y la tabla.



LUGAR	CLASIFICACIÓN	%	L.L.	L.P.	I.P.	I.G.
CHAPACOS	A-7-6	0	44.8	23.8	21.1	13
	A-6	3	37.6	19.9	17.7	11
	A-6	5	26.6	14.8	11.7	9
	A-4	10	21.8	13.9	7.9	8
	A-4	12	10.4	8.8	1.6	8
OLIVOS	A-7-5	0	44.6	30.4	14.2	11
	A-6	3	31.3	18.6	12.7	9
	A-6	5	28	15.7	12.3	9
	A-6	10	26.7	14.6	12.1	9
	A-4	12	15.2	11.8	3.4	8
N. TERMINAL	A-6	0	29.7	16.9	12.8	9
	A-4	3	26.7	16.4	10.2	8
	A-4	5	23.3	14.6	8.7	8
	A-4	10	15.3	11.1	4.1	8
	A-4	12	13.3	8.6	4.7	8
B. FORTALEZA	A-6	0	32.4	16.4	16	10
	A-6	3	28.3	15.5	12.8	9
	A-4	5	20.8	15.3	5.4	8
	A-4	10	17.3	13.9	3.3	8
	A-4	12	11.2	10.4	0.7	8

✓ En cambio haciendo la mezcla con yeso se vió que los límites se incrementan volviéndolos arcillas de alta plasticidad como en la siguiente tabla.

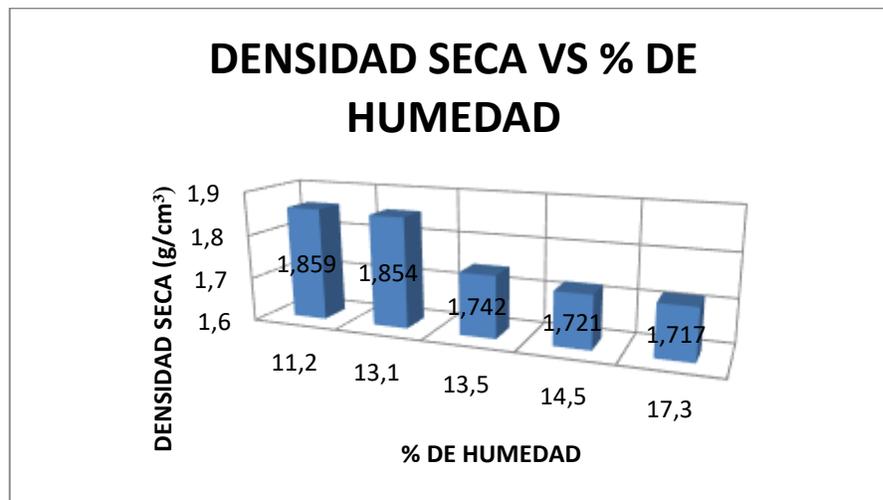
LUGAR	CLASIFICACIÓN	%	L.L.	L.P.	I.P.	I.G.
CHAPACOS	A-7-6	0	44.8	23.8	21.1	13
	A-6	3	51.6	29.9	21.7	15
	A-6	5	40.7	13.4	27.3	15
	A-6	10	63.6	29	34.6	20
	A-6	12	73.9	26.9	47	20
OLIVOS	A-7-5	0	44.6	30.4	14.2	11
	A-6	3	47.2	20.8	26.3	16
	A-6	5	53.2	25.6	27.6	18
	A-6	10	57.6	18.4	39.2	20
	A-4	12	43.1	16.4	26.7	15
N. TERMINAL	A-6	0	32.4	16.4	16	10
	A-6	3	33.8	15.9	17.9	11
	A-6	5	35.6	14	21.6	13
	A-4	10	32.6	12	20.6	12
	A-4	12	39	11	28	15
B. FORTALEZA	A-6	0	29.7	16.9	12.8	9
	A-6	3	37.3	15.3	22	13
	A-6	5	40.4	25.6	14.8	10
	A-4	10	37.2	20.6	16.6	11
	A-4	12	38.6	11.4	27.3	15

- ✓ Se hizo la compactación a los suelos naturales, se sacó las humedades óptimas de cada suelo y las densidades máximas, como se muestra en la tabla.

Zona de estudio	N°1	N°2	N°3	N°4
Densidad máxima al 95% (kg/m ³)	1829	2137	1859	1829
Humedad Óptima (%)	10.6	12.2	11.2	12.4

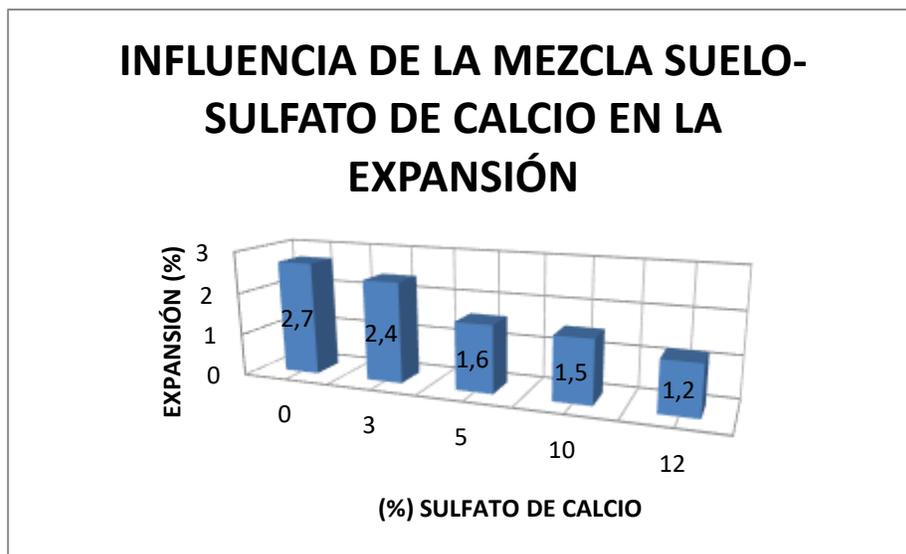
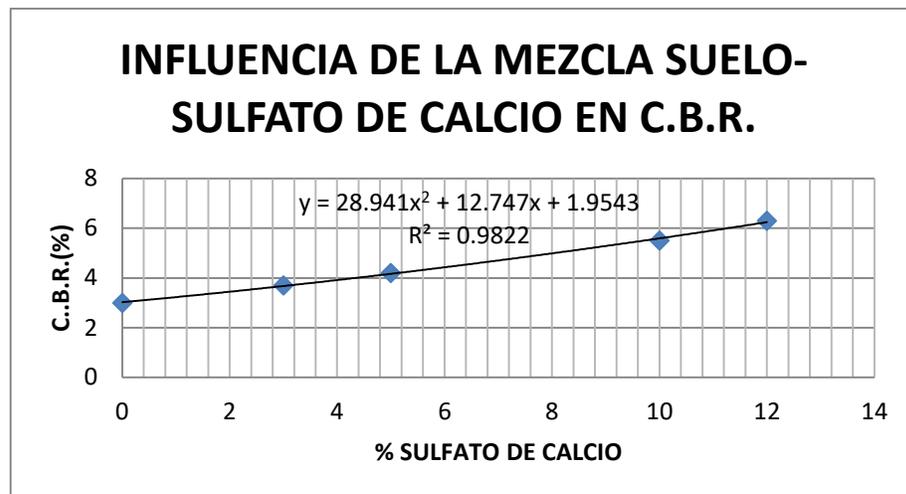
- ✓ Se compacto a los 4 suelos con los diferentes porcentajes de sulfato de calcio y yeso donde se observó que las humedades óptimas van aumentando respecto a la del suelo natural y las densidades disminuyen como se observa en el ejemplo de la Nueva Terminal, este comportamiento se demuestra en la gráfica densidad seca vs % de humedad. Lo mismo pasa con el yeso.

Porcentaje %	Humedad Óptima	Densidad (g/cm ³)		
		90%	95%	100%
3	12.6	1623	1713	1803
5	13.4	1579	1667	1754
10	14.5	1576	1663	1751
12	14.8	1553	1639	1725



- ✓ Haciendo los C.B.R.s para las cuatro muestras con el sulfato de calcio y el yeso se observó que a cada porcentaje van de manera creciente, siendo los más favorables los suelos estabilizados con el sulfato de calcio de calcio, como se ve en la tabla. Este comportamiento se observa en la gráfica C.B.R. vs % sulfato de calcio, la expansión disminuye respecto al suelo natural.

Porcentaje %	Expansión		C.B.R.		
	95%	100%	90%	95%	100%
3	2.4	1.6	2.2	3.7	5.2
5	1.6	1.4	2	4.2	6.4
10	1.5	1.4	3.3	5.5	7.6
12	1.2	1.1	3.2	6.3	9.4



- ✓ Se observó también que el suelo que mejor comportamiento tiene para el óptimo C.B.R. es el A-6(9) de la Nueva Terminal, siendo este el más adecuado para una subrasante ya que presenta un mejor resultado que los otros suelos siendo el C.B.R. de 6.3% al máximo porcentaje de 12% de sulfato de calcio.
- ✓ Observando el comportamiento de los suelos naturales respecto a los estabilizados con sulfato de calcio y yeso se observa que las propiedades físicas y mecánicas cambian esto da cumplimiento a la hipótesis.

- ✓ Haciendo el costo para la subrasante normal se tiene un precio de 68.133 Bs, para la subrasante con mezcla de sulfato de calcio se tiene un costo de 72.175 Bs al porcentaje óptimo del 12%, para la subrasante estabilizada con yeso cocido se tiene un costo de 78.103 Bs al porcentaje óptimo del 12%, comparando con una subrasante estabilizada con cal hidratada al 12%, se tiene un costo de 105.136 Bs.

5.2 Recomendaciones

- ✓ La determinación del óptimo contenido de sulfato de calcio debe garantizar, la capacidad de soporte (C.B.R.) requerida para una subrasante.
- ✓ Se recomienda utilizar un 12% de sulfato de calcio para la estabilización de una subrasante siendo este el valor óptimo que se logró para el C.B.R.
- ✓ Se recomienda seguir con las investigaciones para la estabilización de suelos arcillosos plásticos con sulfato de calcio y yeso.
- ✓ No se recomienda estabilizar con yeso cocido ya que este a la larga se vuelve soluble en el agua.