

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes

La duración y el funcionamiento de una estructura o un proyecto de construcción dependen en una mayor parte de la estructura de los suelos en fundación. Los suelos que presentan materiales inestables llegan a crear inconvenientes significativos en las estructuras principalmente en las estructuras de obras viales.

La estabilización de suelos logra un cambio considerable de las características físico-mecánicas, estableciendo una resistencia y estabilidad a periodos tanto cortos como largos, particularmente mejora el comportamiento del suelo ante la acción del agua y genera ahorros en términos económicos. Actualmente en la construcción de caminos es primordial minimizar y compensar al máximo posible el movimiento de tierras debido a consideraciones económicas, ambientales y técnicas, por ello se debe realizar estudios de suelos y optar por el mejor estabilizador para mejorar las propiedades físicas y mecánicas de un suelo.

Condori (2018) en su trabajo de investigación para optar el título de ingeniero civil titulada “Análisis comparativo de la densidad y humedad de la subrasante natural y la subrasante utilizando producto Terrasil” sustentada en la Universidad Autónoma Juan Misael Saracho, la cual tuvo como objetivo general realizar la comparación entre material de subrasante natural e incluyendo Terrasil para evaluar su comportamiento relacionado con la densidad y humedad. El tipo de investigación fue experimental en la cual la muestra representativa fue extraída de la comunidad de Obrajes perteneciente a la provincia Cercado de la ciudad de Tarija, donde realiza calicatas cada 500 metros a lo largo del circuito de la vía en la zona de Obrajes, en el suelo ensayado se adicionó una dosificación gradual de Terrasil, dicha investigación concluye que la subrasante natural estabilizada con Terrasil mejora sus propiedades físicas y mecánicas.

La presente investigación pretende analizar y comparar la estabilización de una subrasante conformada por un suelo arcilloso con incorporación de los aditivos Terrasil y Zycobond, que efecto presentará el suelo combinando estos dos en el mencionado suelo, para ello se ha tomado como apoyo la investigación de Condori (2018), la cual obtuvo el porcentaje óptimo de Terrasil para estabilizar una subrasante natural, así poder referenciar los resultados de dicha investigación y comparar las resistencias que generan el aditivo Terrasil combinado con el aditivo Zycobond.

Con este proyecto de investigación se pretende dar una alternativa más para solucionar los problemas que causan las subrasantes de suelos arcillosos de baja resistencia, principalmente en las estructuras de carreteras.

1.2 Situación problemática

El mayor problema por tratar durante la construcción, se refiere a la calidad de los suelos in-situ, pues se debe garantizar su durabilidad, resistencia, manejabilidad y economía. De acuerdo a esto, en la mayoría de ocasiones los suelos no presentan las mejores características para su uso.

En nuestro medio existen muchos problemas de inestabilidad de suelos en subrasantes, las causas de este problema es que presenta un alto índice de plasticidad, baja capacidad portante y altos niveles de permeabilidad, dicho suelo necesitará ser mejorado o cambiado por otro material que cumpla los parámetros exigidos por la Administradora Boliviana de Caminos (ABC).

Las consecuencias de un suelo cohesivo con baja capacidad de soporte a nivel subrasante es que sufrirá un proceso de expansión que se debe a la absorción de agua produciendo un aumento de volumen y relajación de los esfuerzos, con un posible colapso.

El aumento de tráfico vehicular cada año se aumenta en las vías de la provincia y la creciente demanda de pavimentos resistentes, perdurables y auténticos han llevado a la investigación de nuevos materiales o la combinación de ellos para subrasantes, bases y sub-base, con novedosas metodologías de diseño y soluciones más ventajosas.

1.2.1 Problema

¿Se podrá lograr una mejora más eficiente en las propiedades de una subrasante natural estabilizada con los aditivos Terrasil y Zycobond?

1.3 Justificación

Los aditivos tienen gran importancia en la mejora o estabilización de los suelos, ya que se encargan de mejorar sus propiedades, existen numerosas investigaciones acerca del uso de diferentes tipos de aditivos y sus propiedades, sin embargo, específicamente del aditivo Zycobond y el Terrasil y cómo influye en la estabilización del suelo, no se cuenta con mucha información, es por esta razón que en la presente investigación se adicionará el aditivo Zycobond y analizar cómo influye combinar con el aditivo Terrasil, para comprobar sus beneficios.

Los tratamientos y estabilización de materiales son una solución muy interesante desde el punto de vista técnico-económico, tomando en cuenta que los tipos de suelos locales estabilizados generan menores costos que los importados de otras provincias.

Con la realización de este proyecto de investigación se desea obtener una noción clara de las ventajas y desventajas tanto técnicas y económicas del uso de estos aditivos, ya que los problemas frecuentes son la falta de información de estos entre suelos de subrasantes normales y subrasantes tratadas con dichos aditivos, utilizando muestras de la región.

1.4 Objetivos de investigación

1.4.1 Objetivo General

- Analizar y comparar las propiedades de una subrasante natural (suelo arcilloso) estabilizada con los aditivos Terrasil y Zycobond con cantidades suficientes para mejorar las propiedades y características del mismo y así obtener una alternativa de solución para utilizar los suelos arcillosos en subrasantes de carreteras.

1.4.2 Objetivos Específicos

- Identificar la zona de aplicación del proyecto.
- Caracterizar y clasificar el suelo natural.
- Determinar la capacidad portante del suelo en estado natural y con la adición de los aditivos Terrasil y Zycobond.

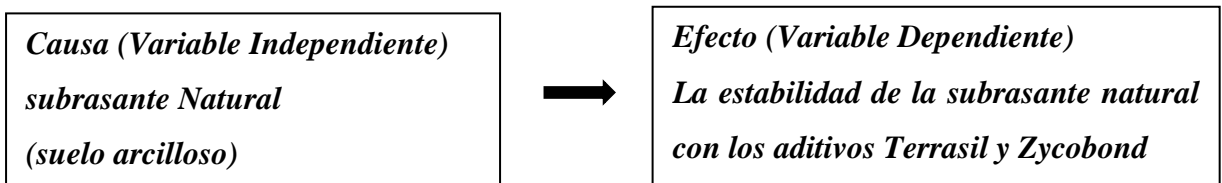
- Analizar la variación de la capacidad portante del suelo mezclado con los aditivos Terrasil y Zycobond a diferentes dosificaciones.
- Referenciar y comparar los resultados obtenidos entre la subrasante natural y la estabilizada con Terrasil y Zycobond
- Proponer las cantidades óptimas de aplicación de la mezcla de Terrasil y Zycobond para la estabilización de suelos arcillosos.

1.5 Hipótesis

Al utilizar la mezcla de aditivos Terrasil y Zycobond como aditivos estabilizantes para un suelo arcilloso a nivel subrasante se logra mejorar sus propiedades mecánicas, comprobados con los respectivos ensayos de laboratorio.

1.6 Operacionalización de las variables

De acuerdo al objeto de estudio mencionado anteriormente se puede identificar la principal característica de una investigación tipo explicativa, la cual debe de constar de una causa o variable independiente (los aditivitos Terrasil y Zycobond) el cual es manipulado y un efecto o variable dependiente (Estabilidad de la subrasante) el cual es comparado y analizado.



1.6.1 Variable Independiente

La subrasante natural (suelo arcilloso)

Tabla 1.2.1: Variable independiente

Variable independiente	Conceptualización	Operacionalización		
		Dimensión	Indicador	Valor /Acción
Subrasante natural (suelo arcilloso)	La subrasante es parte de la corteza terrestre que sirve de cimiento para una estructura de pavimento.	Granulometría	Porcentaje que pasa el tamiz 200	> 50
		Límites	Índice de plasticidad	> 10
		Clasificación	Identificación	A6
		Compactación	1,8-1,9 <i>gr/cm³</i>	1,8-1,9 <i>gr/cm³</i>
		CBR	Porcentaje	< 6

Fuente: Elaboración propia

1.6.2 Variable Dependiente

Tabla 1.2.2: Variable dependiente

Variable dependiente	Conceptualización	Operacionalización		
		Dimensión	Indicador	Valor /Acción
Estabilización de la subrasante con los aditivos Terrasil y Zycobond.	La estabilización de suelos es un término general que designa cualquier método físico, químico, mecánico o combinado para modificar un suelo natural con el fin de cumplir un objetivo de ingeniería.	CBR	Subrasante aceptable	6% - 10%
			Expansión	< 2 %

Fuente: Elaboración propia

1.7 Identificación del tipo de investigación

La investigación es del tipo explicativa y descriptiva ya que dicha investigación busca ampliar y analizar el conocimiento ya existente sobre algo de lo que se sabe poco o nada, en este caso ampliar y analizar la información sobre los aditivos en estudio.

1.7.1 Unidades de estudio y decisión muestral

La unidad de estudio es el ámbito donde se realiza la investigación de campo, es decir refiere a un acotamiento territorial y la decisión muestral es el instrumento con el que se cuenta para llegar a los individuos que son de interés de una forma objetiva y además permite asegurar que con los datos recolectados se pueda hacer inferencia estadística.

1.7.2 Unidad De Estudio

Estabilidad de una subrasante natural (suelo arcilloso).

1.7.3 Población

En el presente trabajo de investigación se delimita la población a un suelo arcilloso que existe en el tramo de estudio ubicado en la comunidad de Obrajes de la provincia Cercado Tarija, tramo que no está pavimentado y que se puede evidenciar las características del suelo.

1.7.4 Muestra

En la investigación usaremos un suelo arcilloso siendo este el más desfavorable o presenta deficiencia en su capacidad de carga, el cual se extrajo de la comunidad de Obrajes, se pudo evidenciar claramente la presencia de arcillas.

El tamaño de la muestra se obtuvo mediante la siguiente fórmula:

$$N = \frac{Z^2 * p * q}{e^2}$$

Donde:

N = Tamaño de la muestra.

Z^2 = Parámetro estadístico que depende del nivel de confianza.

e = Error de estimación máximo aceptado.

p = Probabilidad de que ocurra el evento estudiado (éxito).

$q = (1-p)$ = Probabilidad de que no ocurra el evento estudiado.

- Elegimos un grado de confiabilidad del 91%, entonces mi valor estandarizado $Z=1.7$ (de tabla 1.2.3).

Tabla 1.2.3: Valores para el nivel de confianza

Nivel de confianza	Parámetro estadístico que depende del NC (Z)
99.7%	3
99%	2.58
98%	2.33
97%	2.17
96%	2.05
95%	1.96
94%	1.88
93%	1.81
92%	1.75
91%	1.7
90%	1.645
85%	1.44
80%	1.28
50%	0.674

- Asumimos un error máximo del 10%.
- Porque se tiene estudios anteriores y se vio una alta probabilidad de que ocurra el evento estudiado adoptamos $p=99\%$ por lo tanto $q=1-p= 1-0.99=0.01$.

Reemplazando los valores en la ecuación se tiene:

$$N = \frac{1.96^2 * 0.99 * 0.01}{0.10^2} = 2.86 \approx 3$$

Para la obtención de resultados confiables se ensayarán 3 muestras para cada dosificación de aditivos Terrasil y Zycobond.

1.7.5 Selección de las técnicas de muestreo

Para seleccionar los elementos de la muestra se fijan una serie de características o condiciones representativas del estudio o análisis a realizar y se selecciona un determinado número de elementos que las cumplen, llamado tamaño de la muestra.

1.7.6 Muestreo intencional

La técnica de muestreo que se utilizará en esta investigación es la intencional.

1.8 Métodos y técnicas empleadas

1.8.1 Método empírico

La presente investigación se realizará con el método empírico, porque se va a manipular las variables para alterar las propiedades de la variable dependiente, dentro de las variables independientes encontramos a los aditivos Terrasil y Zycobond y como variable dependiente la estabilización de la subrasante natural.

1.8.2 Técnica de investigación de campo

La presente investigación utilizará como técnica la investigación de campo porque facilitan la observación directa del objeto de estudio, ya que se va a seleccionar, ver y registrar las características del suelo patrón de cada una de las calicatas de donde se haga la extracción de las muestras de suelo.

1.9 Proceso para el análisis y la interpretación de la información

Método del error experimental promedio

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.

$$\tilde{x} = x \frac{n + 1}{2}$$

Desviación Estándar

La desviación estándar mide la dispersión de una distribución de datos. Entre más dispersa este una distribución de datos, más grande es su desviación estándar.

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

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:

$$v = s^2$$

Coefficiente de variación

Cuando se quiere comparar el grado de dispersión de dos distribuciones que no vienen dadas en las mismas unidades o que las medias no son iguales se utiliza el coeficiente de variación de Pearson que se define como el cociente entre la desviación estándar y el valor absoluto de la media aritmética:

$$\%V = \frac{S^2}{X} * 100$$

Este coeficiente representa el porcentaje que la desviación estándar contiene a la media aritmética y por lo tanto cuanto mayor es CV mayor es la dispersión y menor la representatividad de la media.

1.10 Alcance de la investigación

Las muestras de suelos serán extraídas de la comunidad de Obrajes de la ciudad de Tarija, se analizó 5 puntos cada 500 metros, debido a que en el tramo se presenta una gran heterogeneidad en los suelos de subrasante que no permite definir uno como predominante, el diseño se basará en el más débil o desfavorable que se encuentre.

La investigación se basará en ensayos de laboratorio, tanto de la caracterización de las arcillas como el ensayo de compactación y el ensayo de CBR.

Lo primero que se hará es clasificar los suelos de los distintos puntos del tramo, se buscará y escogerá el suelo más desfavorable. Una vez encontrado dicho suelo se procede a realizar los ensayos compactación y CBR, luego se hacen las distintas dosificaciones de la combinación de Terrasil y Zycobond, se realizará un mínimo de 30 ensayos para límites de Atterberg, compactación y CBR para encontrar el porcentaje óptimo de la combinación de los aditivos mencionados, el cual cumpla con las necesidades requeridas en cuanto a plasticidad, expansión y resistencia.

Las dosificaciones consistirán en diferentes combinaciones, pero manteniendo constantes las dosificaciones de Terrasil las cuales serán: “0,5T – 0,75T - 1T - 2T” y para cada una de estas dosificaciones hacer variar las dosificaciones de Zycobond en proporciones mínimas, intermedias y máximas para cada una de las dosis propuestas para Terrasil. Se evaluarán el índice de plasticidad, las densidades mediante la compactación y el valor de CBR para cada una de las dosificaciones.

Una vez realizados los ensayos correspondientes se procederá a realizar un análisis para los resultados obtenidos de la estabilización del suelo natural con la combinación de los aditivos y luego realizar la comparación de como es el comportamiento del suelo al ser tratado con cada uno de los aditivos y también ver cómo influye combinar estos dos,

principalmente ver la influencia del aditivo Zycobond en el suelo al ser mezclado con el aditivo Terrasil.

Finalmente se realizará una comparación con otro producto químico que en este caso será la cal y determinar las ventajas y desventajas que presentan los aditivos en análisis y poder así recomendar su uso.

CAPÍTULO II
ESTABILIZACIÓN DE SUELOS
PARA SUBRASANTES

CAPÍTULO II

ESTABILIZACIÓN DE SUELO PARA SUBRASANTES

2. Definición de subrasante

Existen diversas definiciones de subrasante en una estructura de pavimentos, entre ellas las más conocidas son:

- La subrasante es la parte de corteza terrestre que sirve de cimiento para una estructura de pavimento.
- La subrasante es la superficie terminada de carretera a nivel de movimiento de tierras (corte y relleno), sobre la cual se coloca la estructura del pavimento o afirmado.

Es una parte esencial en el diseño de pavimentos. Tiene la particularidad de otorgar respuesta estructural y el comportamiento del pavimento en construcción y operación.

La subrasante puede estar constituida por suelos en su estado natural, o por estos con algún proceso de mejoramiento tal como la estabilización mecánica, estabilización fisicoquímica con aditivos como el cemento, la cal, el asfalto, entre otros. (Becerra, 2012).

Se consideran como materiales aptos para una subrasante a suelos con valor de CBR igual o mayor a 6%.

Tabla 2.1: Categorización de la subrasante

Categoría de la subrasante	CBR (%)
S0: Subrasante inadecuada	< 3
S1: Subrasante pobre	3 - 6
S2: Subrasante regular	6 -10
S3: Subrasante buena	10 - 20
S4: Subrasante muy buena	20 - 30
S5: Subrasante excelente	> 30

Fuente: Norma MTC, 2014

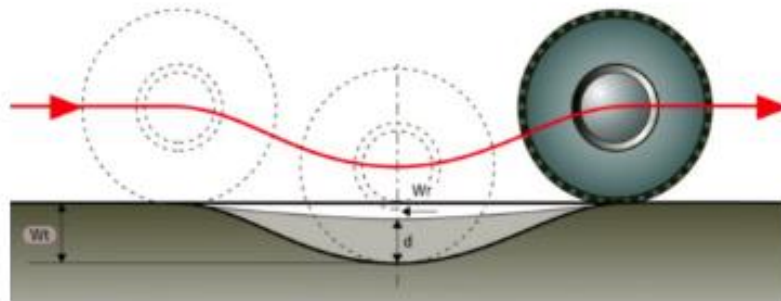
2.1 Funciones de la subrasante

Se pueden nombrar las siguientes funciones que deben cumplir una subrasante, independientemente del tipo de pavimento, estas son:

2.1.1 Resistencia

Debe ser resistente a los esfuerzos y deformaciones producidas por el tránsito y el intemperismo, proporcionando un valor de soporte mínimo a la estructura de pavimento en tal forma que limite las deflexiones a los valores tolerables. Las deflexiones causadas por una subrasante comprenden entre un 70% y un 90% de la deflexión total de la estructura.

Figura 2.1: Deformación producida por el tránsito vehicular



Fuente: Rovem, 2019

2.1.2 Terreno de fundación propiamente dicha

Debe proporcionar un soporte continuo, sin asentamientos significativos, ni diferenciales, evitando que se presente flujos de tipo plástico o desplazamiento lateral que atente contra la estabilidad de toda la estructura.

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

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

2.2 Estabilización de suelos

La respuesta estructural y el comportamiento de un pavimento dependen de las características de la subrasante. La subrasante puede estar constituida por un suelo en estado natural o por éstos con algún proceso de mejoramiento. El mejoramiento está referido a la implementación de soluciones ingenieriles, las cuales difieren a las usadas en la construcción original del camino. Este tiene como objeto incrementar la funcionalidad de la superficie existente, al igual que las actividades usadas para adecuar previamente la capacidad estructural del pavimento. (Fonseca, 2019).

Figura 2.2: Estabilización de un tramo carretero



Fuente: Pro Road, 2018

2.2.1 Definición de estabilización

Se entiende por estabilización de suelos a una serie de procesos mecánicos, físicos, físico-químicos y químicos que transforman las propiedades de los suelos que interesan en las aplicaciones de la ingeniería, obteniéndose un material apto para su estabilización.

La estabilización del suelo es el proceso de combinar y mezclar diferentes materiales para mejorar las propiedades de ingeniería del suelo. No solo ayuda a aumentar la resistencia

del suelo, sino que también permite detener su potencial de expansión, lo que permite una mejor transferencia de la tensión y, por lo tanto, evita fallas prematuras.

2.2.2 Propiedades de interés

En general, en la estabilización de suelos se busca mejorar las propiedades tales como: resistencia, durabilidad, plasticidad, permeabilidad, estabilidad volumétrica, compresibilidad, trabajabilidad y permanencia de las propiedades adquiridas.

2.2.2.1 Resistencia

Casi todos los métodos de estabilización producen grandes aumentos de resistencia en el suelo. Se exceptúan quizás los suelos con materia orgánica, lo que no deja de ser lamentable por cuanto la mayor parte de los problemas de resistencia ocurren precisamente en estos suelos.

2.2.2.2 Durabilidad

Toda capa estabilizada que haga parte integral de la estructura de un pavimento, debe presentar una adecuada resistencia a los agentes atmosféricos y al tránsito que deba soportar durante el periodo de diseño. Este aspecto es importante dentro del diseño de estabilización.

Nos referimos con durabilidad a la resistencia de un material de permanecer inalterable al paso del tiempo. Un material duradero debe resistir a los efectos del paso del tiempo, las heladas, los rayos solares, no debe alterarse su coloración y textura y debe estar libre de grietas, manchas, etc. En cuanto a resistencia, hablamos de la capacidad de un material para resistir esfuerzos y fuerzas aplicadas sin romperse, adquirir deformaciones permanentes o deteriorarse de algún modo.

2.2.2.3 Plasticidad

El tratamiento de la plasticidad de los suelos es una característica de gran importancia en todos los procesos de estabilización. La plasticidad influye directamente en el comportamiento del suelo ante los cambios de humedad. Los agentes estabilizantes tratan de disminuir la actividad plástica del suelo con el objeto de hacerlos más estables a los cambios volumétricos. Comúnmente, los tratamientos de estabilización químicos tienden a disminuir la plasticidad del suelo.

2.2.2.4 Estabilidad volumétrica

La estabilidad volumétrica de un suelo se refiere al apreciable cambio de volumen que sufren los suelos, debido al cambio de humedad y los esfuerzos internos afectados por el agua, un claro ejemplo es cuando un suelo saturado se seca, cambia su volumen (retracción).

Figura 2.3: Suelo afectado por el cambio volumétrico



Fuente: Journal, 2019

Esta propiedad es particularmente importante cuando se tratan los suelos expansivos. Los tratamientos de tipo químico y eléctrico transforman las arcillas en masas capaces de resistir presiones que pueden producir los aumentos en su contenido de agua. El tratamiento por medio de aditivos químicos es muy beneficioso sobre suelos que se encuentran cerca de la superficie, tal es el caso de las subrasantes, mientras que el tratamiento eléctrico es más aplicable en capas profundas, en trabajos de cimentación.

2.2.2.5 Compresibilidad

Un suelo es compresible cuando disminuye el volumen bajo el efecto de una carga, la compresibilidad aumenta a medida que crece la proporción de las partículas pequeñas esto ocurre en suelos de partículas finas como las arcillas y limos, la compresibilidad de los suelos arcillosos se puede relacionar con los siguientes parámetros; la relación de vacíos, límite líquido, contenido de agua y el peso unitario seco.

Los factores que afectan en la compresibilidad de los suelos arcillosos son las propiedades mineralógicas de la arcilla, su plasticidad y el porcentaje de arena y limo, estos factores

hacen que los suelos arcillosos sufran de asentamientos inmediatos debido a las deformaciones que sufren las partículas producto de las cargas verticales.

La compresibilidad es el grado en que una masa de suelo disminuye su volumen bajo el efecto de una carga, prácticamente todos los métodos de estabilización disminuyen la compresibilidad de los suelos.

2.2.2.6 Trabajabilidad

La trabajabilidad es un término amplio y subjetivo que describe cuán fácilmente se puede mezclar, transportar, colocar y compactar en este caso un suelo recién mezclado con algún agente estabilizante.

El tratamiento de un suelo con un agente estabilizante debe garantizar la trabajabilidad del material, de manera que facilite su aplicación, incorporación, mezclado y control. De esta manera, se garantiza que el agente se incorpora homogéneamente al suelo y se logre el proceso de estabilización buscado.

2.2.2.7 Permanencia de las propiedades adquiridas

La permanencia de las propiedades adquiridas en el proceso de estabilización de un suelo, es lo más importante para el ingeniero diseñador y el comportamiento de la obra ejecutada. Las estabilizaciones, independientemente del agente estabilizador, deben garantizar la permanencia de las propiedades; de ahí, la necesidad de experimentar primero en laboratorio y posteriormente en campo la permanencia de las propiedades del suelo tratado.

2.3 Tipos de estabilización

El primer problema que se plantea el ingeniero diseñador de pavimentos cuando no se dispone de materiales granulares adecuados para la construcción de las capas del pavimento es la decisión sobre el tipo de tratamiento de estabilización más adecuado para los suelos locales disponibles, con el fin de hacerlos aptos para la construcción de dichas capas.

Para resolver lo anterior, es necesario conocer los tipos de estabilización de suelos, los cuales son:

2.3.1 Estabilización mecánica

La estabilización mecánica se realiza por medio del proceso de compactación. La compactación mejora las propiedades del suelo y en particular la densificación del suelo, el aumento de resistencia y la capacidad de carga, así como reducir su compresibilidad y aptitud para absorber agua.

El proceso de compactación implica una rápida reducción de vacíos con aire, lo que trae como consecuencia una drástica reducción en el volumen de la masa de suelo. Por lo general, por medio de la compactación no es posible expulsar todo el aire encerrado en los poros del suelo, por lo que este se encontrará siempre en condición de parcialmente saturado.

2.3.2 Estabilización física

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

Por ejemplo, los suelos de grano grueso como las gravas y arenas tienen una alta fricción interna lo que hacen soportar grandes esfuerzos, pero esta cualidad no hace que sea estable como para ser firme de una carretera ya que al no tener cohesión sus partículas se mueven libremente y con el paso de los vehículos se pueden separar e incluso salirse del camino.

Las arcillas, por lo contrario, tienen una gran cohesión y muy poca fricción lo que provoca que pierdan estabilidad cuando hay mucha humedad. La mezcla adecuada de estos dos tipos de suelo puede dar como resultado un material estable en el que se puede aprovechar la gran fricción interna de uno y la cohesión del otro para que las partículas se mantengan unidas.

2.3.3 Estabilización química

La estabilización química del suelo es el proceso de mezclar el suelo con aditivos químicos para mejorar las propiedades de ingeniería del suelo. La eficiencia de la estabilización depende de la reacción entre el químico/estabilizador utilizado y la composición de las partículas del suelo.

La principal ventaja de usar aditivos químicos para la estabilización del suelo es que permite el uso de suelos y agregados in situ/localmente disponibles. Esto disminuye el esfuerzo y el tiempo requerido para transportar materiales de buena calidad desde las áreas de préstamo, lo que permite un uso eficiente de los recursos naturales. Esto da como resultado un costo de transporte minimizado, lo que reduce el costo de construcción.

2.3.4 Estabilización físico-química

Este tipo de estabilización se realiza en suelos finos tipo arenas y mediante la adición de un agente hidráulico, como es el caso del cemento Portland, que al mezclarse íntimamente con el suelo y al desarrollar su propiedad hidráulica desarrolla una reacción química, intercambio iónico y cementación. La resistencia del suelo y su estabilidad aumenta significativamente. (Elizondo, 2008).

2.4 Aditivo Terrasil

Terrasil es un aditivo líquido estabilizador de suelos a base de organosilanos nanométricos de comportamiento estable ante los rayos UV y el calor. Al ser soluble en agua, el mismo se incorpora al suelo a través del agua de compactación durante el proceso típico de construcción del camino.

Es un impermeabilizante a escala nanométrica, reactivo, permanente y soluble en agua que tiene su aplicación en el ámbito de la estabilización de suelos entendida como la mejora de las propiedades mecánicas e hidráulicas y el mantenimiento de las mismas frente al paso del tiempo y de la carga.

Se trata de un organosilano de quinta generación, reactivo a temperatura ambiente, soluble en agua y betún y estable hidrolíticamente. Proporciona una impermeabilización permanente a los áridos, al mismo tiempo que mejora la compactación incluso con menor humedad de compactación.

2.4.1 Principio de funcionamiento

Las moléculas de Terrasil se diluyen en agua a temperatura ambiente. Al entrar el agua con Terrasil en contacto con el suelo, las moléculas de este aditivo son atraídas por los grupos polares (Grupo silanol) del suelo y quedan adheridas hasta que el agua se evapora, momento en el que forman un enlace químico covalente por condensación. Ese enlace

(Siloxano) es extremadamente fuerte y no se revierte en condiciones de humedad, radiación ultravioleta o temperatura. Una vez que el árido queda recubierto por cientos de millones de moléculas hidrofóbicas, el suelo será repelente al agua, lo cual tiene un efecto muy importante sobre las características del suelo.

2.4.2 Efecto en la densidad máxima y compactación

Al añadir Terrasil al agua de compactación se produce una extraordinaria lubricación de las partículas del suelo, que presentan menor rozamiento entre ellas, mejorando la redistribución de las partículas y la eficiencia del esfuerzo de compactación.

Es habitual conseguir en condiciones de obra densidades de entre el 99%-103% de la densidad máxima conseguida en laboratorio incluso en condiciones de humedad ligeramente diferentes al óptimo de compactación.

La reorganización de las partículas derivada de la mayor lubricación inicial, la mayor densidad y el hecho de que la humedad no pueda propagarse con facilidad, produce incrementos importantes en la capacidad de soporte del suelo, demostrada en varios artículos y en múltiples ensayos, independientemente del método de medida utilizado.

2.4.3 El uso de Terrasil presenta los siguientes beneficios

- Mayores densidades de compactación.
- Mejora los valores de CBR%, manteniendo los valores en seco, aún en condiciones de inmersión.
- Restringe la expansividad del suelo y el hinchamiento por debajo del 5%.
- Mayor vida útil del camino.
- Resistencia al agua.
- Elimina el ascenso capilar.
- Evita congelar descongelar.
- Reduce el índice de plasticidad y la expansión.
- Diluible en agua y fácil de aplicar.
- Mejora la capacidad de carga.
- Respetuoso con el medio ambiente.

2.5 Aditivo Zycobond

Genera un aumento de la cohesión de las partículas de suelo, especialmente las finas, entregándole mayor resistencia y ductilidad al suelo estabilizado, aumentando los parámetros de resiliencia.

Es resistente a los rayos UV y estable en altas temperaturas, es un nano co-polímero acrílico modificador de suelo, este polímero tiene un tamaño nanométrico y se incorpora al suelo a través del agua de compactación, excelentes prestaciones para el control de polvo y resistencia a la erosión, resistencia al agua con una mejor adherencia entre partículas de suelo.

El uso de Zycobond presenta los siguientes beneficios:

- Incrementa la cohesión de las partículas del suelo, especialmente las finas, mediante enlaces mecánicos flexibles dentro de la estructura del mismo.
- Incrementa la Resiliencia y durabilidad del suelo.
- Reduce la emisión de polvo del camino.
- Mayor vida útil del camino.

Entre los pocos productos químicos disponibles para el control del polvo en las carreteras, Zycobond de Zydex es el mejor producto supresor de polvo de su clase que proporciona una fuerza de unión superior en las carreteras y control de la erosión. La tecnología de control de polvo Zycobond es una solución innovadora que, cuando se rocía sobre cualquier superficie, la vuelve dura y libre de polvo. También proporciona una excelente resistencia al agua, mitigando el daño por agua. Zycobond es un aglutinante nano acrílico catiónico altamente estable con una fuerte fuerza de unión que puede mitigar hasta el 95-98 % del polvo en carreteras, helipuertos, terrenos abiertos, etc.

Esta tecnología no solo es buena para las carreteras sino también para el ecosistema. Reduce la obstaculización de la vida vegetal y humana por la formación de polvo en caminos sin pavimentar (también conocidos como caminos de grava). La capacidad de las plantas para absorber la luz solar se reduce debido a la acumulación de polvo y su desarrollo se ve afectado. En los humanos, la respiración y otras funciones corporales se ven alteradas debido a las partículas de polvo en el aire. Los vehículos

experimentan patinaje y acumulación de suciedad, por lo tanto, más lavados de autos. De esto se encarga Zycobond . Por lo tanto, se vuelve crucial limitar la producción de polvo pegándolos a la superficie de la carretera.

2.6 Combinación de los aditivos Terrasil y Zycobond

Terrasil está diseñado para ser utilizado con Zycobond, un modificador de suelo reticulable y estable a los rayos UV y al calor que une químicamente las partículas del suelo en una red reticulada flexible. La unión química y el tamaño nanométrico del polímero conducen a una mejor capacidad de carga y flexibilidad de la subrasante del suelo.

Figura 2.4: Terrasil y Zycobond mezclados in situ para la compactación



Fuente: Zydex, 2015

2.6.1 Beneficios

- Mejora la capacidad de carga
- Diluible en agua y fácil de aplicar
- Imparte flexibilidad.

La estabilización del suelo con aditivos químicos se adopta no solo para detener su potencial de contracción e hinchazón, sino también para mejorar su resistencia, trabajabilidad y durabilidad, mejorando así su rendimiento general. El mayor rendimiento implica la reducción de los costos de mantenimiento, mejorando significativamente los costos generales del ciclo de vida del pavimento. También ofrece otras ventajas, como requisitos de desempolvado reducidos, cambios de volumen controlados en el suelo y mejor trabajabilidad.

El desempeño del suelo tratado depende de la capacidad de los aditivos para reaccionar con el suelo, lo que pone un gran énfasis en elegir el estabilizador más adecuado para un tipo particular de suelo, teniendo en cuenta, no solo la mejora de sus propiedades de ingeniería sino considerando también su impacto económico y ambiental. (Zydex, 2017).

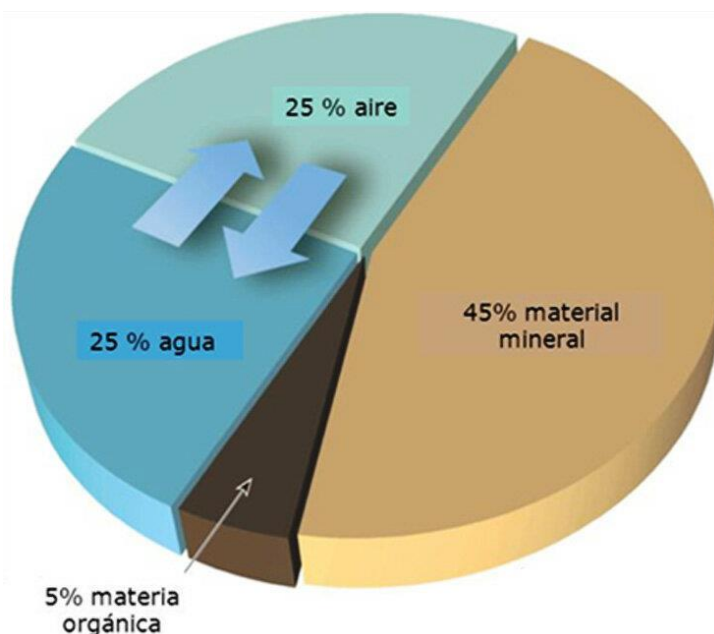
2.7 El suelo y su definición

El término suelo puede tener diferentes matices de significados dependiendo del contexto en el que se use. Para el geólogo, “suelo” describe las capas de material suelto sin consolidar que se extienden desde la superficie hasta la roca sólida, y que se han formado por el intemperismo y la desintegración de las propias rocas. Por otra parte, para el ingeniero, el concepto de “suelo” está relacionado con la obra que pueda hacer sobre él, con él o en él. Por consiguiente, para la ingeniería el término “suelo” se refiere al material que se puede utilizar sin necesidad de perforaciones o voladuras.

2.8 Composición mineral del suelo

La mayor parte de los suelos consiste en mezclas de partículas minerales inorgánicas con porciones de agua y aire. Por tanto, es conveniente concebir un modelo de suelo con 3 fases: sólida, líquida y gaseosa.

Figura 2.5: Composición mineral del suelo



Fuente: Infoagro, 2022

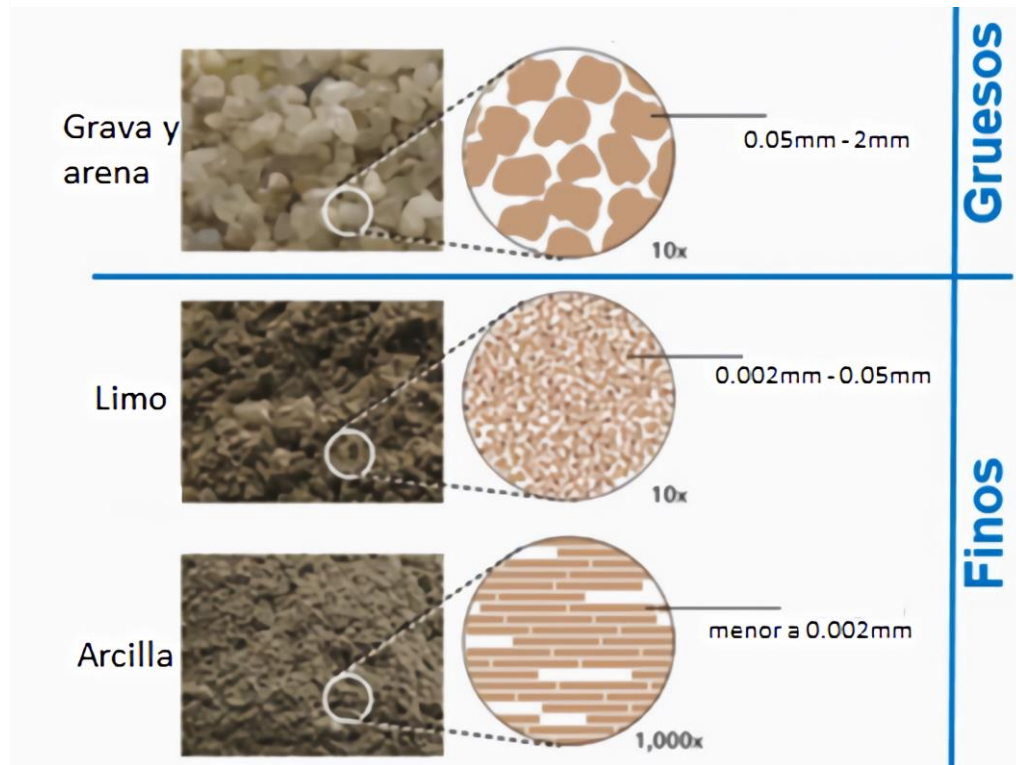
2.8.1 Fragmentos de roca

Son los trozos identificables de la roca madre que contienen diversos minerales. En general, los fragmentos de roca, a diferencia de los granos de mineral, son bastante grandes (>20 mm). La firmeza global de un suelo depende del grado de descomposición mineral diferencial en los fragmentos individuales. Por ejemplo, la presencia de fragmentos graníticos caolinizados afecta la resistencia a la trituración o a la resistencia al corte del suelo.

2.8.2 Granos minerales

Se trata de partículas separadas, cada una con mineral específico y una gran de tamaños desde grava (2 mm) hasta arcilla ($2\mu\text{m}$). Aun cuando algunos suelos contienen mezclas de diversos minerales, un gran número de ellos está formado por un solo mineral en forma casi exclusiva. Los mejores ejemplos de estos últimos se encuentran abundantemente en los depósitos de arena, donde el mineral predominante es el cuarzo, debido a sus ya mencionadas cualidades de resistencia. Por conveniencia, se dividen los suelos en 2 grupos principales: de grano grueso y de grano fino.

Figura 2.6: Clasificación general del suelo



Fuente: Boiero, 2019

- a) **Suelos de grano grueso:** Son aquellos que tienen tamaños de partícula mayores que 0,06 mm, es decir, arenas y gravas. Sus granos son redondeados o angulares y en general están constituidos por fragmentos de rocas, cuarzo o jaspe, con presencia frecuente de óxido de hierro, calcita y mica. La forma relativamente equidimensional es función de la estructura cristalina de los minerales y el grado de redondez depende de la cantidad de desgaste que ha tenido lugar.
- b) **Suelos de grano fino:** Tienen sus partículas menores que 0,06 mm y tienen forma típicamente escamosa, como los limos y las arcillas. Los óxidos y sulfuros muy finos, y a veces la materia orgánica, pueden estar presentes también. De la mayor importancia en el contexto de ingeniería es la escamación de los minerales arcillosos, que da lugar a áreas superficiales muy grandes.

2.8.3 Materia orgánica

La materia orgánica proviene de restos vegetales o animales cuyo producto final, conocido como el humus, es una mezcla compleja de compuestos orgánicos. La materia orgánica es

una de las características del suelo superficial que se presenta como tierra vegetal, con 0,5m de espesor y no más. Los depósitos de turba son predominantemente material orgánico fibroso. Desde el punto de vista de ingeniería, la materia orgánica tiene propiedades indeseables. Por ejemplo, es altamente compresible y absorbe grandes cantidades de agua, de modo que los cambios de carga o en el contenido de humedad producen cambios considerables en su volumen, planteando serios problemas de asentamiento. La materia orgánica también tiene una resistencia muy baja al esfuerzo cortante y, en consecuencia, baja capacidad de carga. La presencia de materia orgánica afecta al fraguado del cemento y, por tanto, presenta dificultades en la fabricación del concreto y la estabilización de los suelos.

2.8.4 Agua

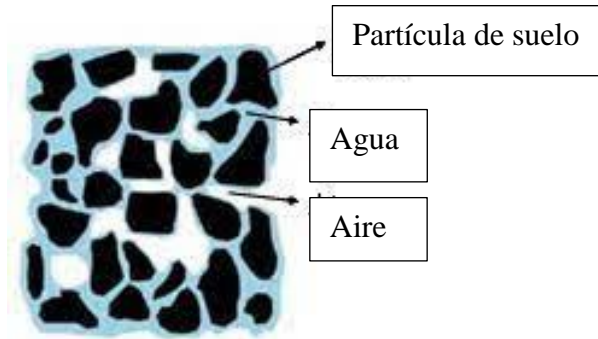
El agua es parte fundamental de los suelos naturales y de hecho su efecto sobre las propiedades ingenieriles es el más pronunciado de todos los constituyentes. El desplazamiento del agua a través de la masa del suelo debe estudiarse con gran detalle en lo que se refiere a los problemas de infiltración y permeabilidad y, además, con un enfoque algo diferente cuando se estudien los problemas de compresibilidad. El agua no tiene resistencia al corte, no es compresible y, por consiguiente, transmite la presión directamente. Por esta razón, las condiciones de drenaje en la masa de un suelo tienen gran importancia al estudiar su resistencia al corte. Además, el agua puede disolver y acarrear en solución un gran número de sales y otros compuestos, algunos de los cuales tienen efectos indeseables. Por ejemplo, la presencia de sulfato de calcio (y en menor grado, de sulfatos de sodio y magnesio) es muy común en muchos suelos arcillosos. La presencia de iones sulfatos tiene un efecto perjudicial serio sobre uno de los componentes del cemento portland y por lo tanto afectan a los cimientos y demás estructuras de concreto.

2.8.5 Aire

Desde un punto de vista práctico se puede considerar que los suelos están perfectamente secos o completamente saturados, o bien en una condición intermedia entre dos extremos. Sin embargo, para ser exactos, estos extremos no se presentan en realidad. En los suelos considerados como “secos” habrá vapor de agua presente, mientras que un suelo “completamente saturado” puede contener hasta el 2% de aire atrapado. El aire, desde

luego, es compresible, y el vapor de agua se puede congelar. Ambos fenómenos son importantes desde el punto de vista de la ingeniería.

Figura 2.7: Composición mineral del suelo



Fuente: UTC, 2018

2.9 Propiedades importantes de los minerales de arcilla

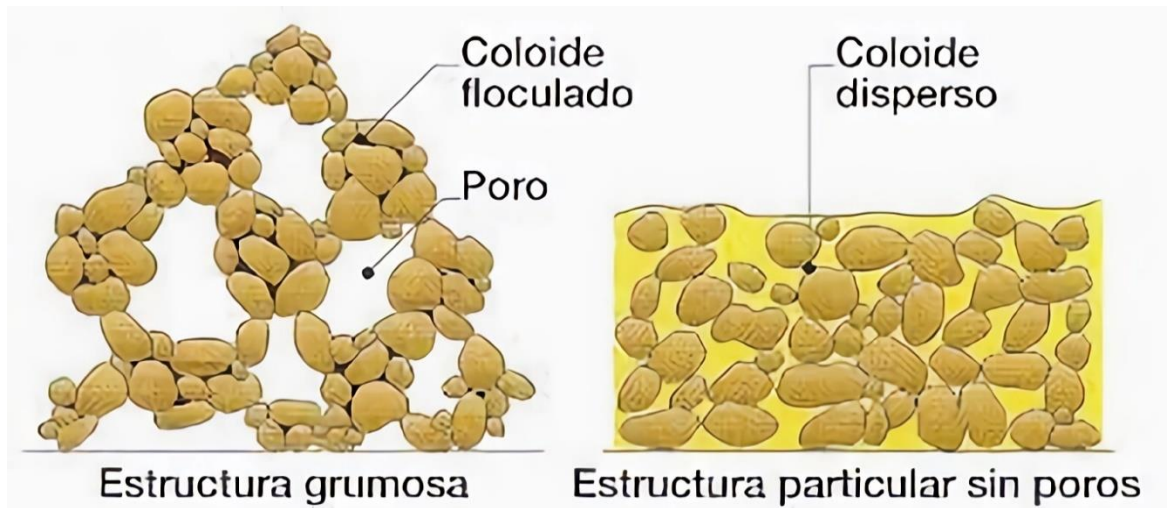
Desde el punto de vista de la ingeniería, la característica más importante de cualquier mineral arcilloso natural es su forma laminar típica. Varias propiedades ingenieriles importantes son directamente atribuibles a este factor, combinado con otros, tales como lo pequeño de sus partículas y su carga eléctrica negativa superficial. Las principales propiedades que deben considerarse en el contexto de ingeniería son: área superficial, carga superficial y adsorción, capacidad de intercambio básico, floculación y dispersión, expansión y contracción, plasticidad y cohesión.

2.9.1 Floculación y dispersión

Las interacciones que se desarrollan entre dos partículas próximas entre sí en una solución acuosa, serán afectadas por dos tipos de fuerzas:

- a) Atracción entre dos partículas debida a las fuerzas de enlace secundarios o de Van Der Waals.
- b) Fuerzas de repulsión debidas a la naturaleza de cargas negativas de la superficie de la partícula y de la capa adsorbida.

Figura 2.8: Coloide floculado y disperso



Fuente: Edafología, 2007

- c) Las fuerzas de atracción de Van De Waals se incrementan si las partículas se acercan, por ejemplo, esto sucede cuando el espesor de la capa adsorbida disminuye por el proceso de intercambio básico. En los suelos cuya capa adsorbida es gruesa, la repulsión será de mayor magnitud y las partículas permanecerán libres y dispersas. Cuando la capa adsorbida es lo suficientemente delgada para que dominen las fuerzas de atracción, se forman grupos de partículas, en los que dominan las fuerzas de atracción, se forman grupos de partículas, en los que se presentan contactos de superficies con aristas (positivo-negativo); en una suspensión, estos grupos se sedimentan en conjunto. A este proceso se le llama floculación, y a los suelos que presentan este fenómeno se les denomina suelos floculados. En las arcillas marinas que contienen capas altas concentraciones de cationes, las capas adsorbidas son delgadas, por lo que resultan estructuras floculadas, en tanto que las arcillas lacustres (agua dulce) tienden a presentar estructuras dispersas.

En las pruebas de suelos en el laboratorio, las estructuras floculadas pueden dispersarse, agregando cationes de una solución salina adecuada; por ejemplo, hexametáfosfato de sodio. Otro aspecto que conviene recordar es que los suelos floculados tienden a presentar límites líquidos elevados.

2.9.2 Expansión y contracción

La expansión del suelo corresponde al aumento de volumen que ocupa el material que conforma el suelo, causado por la absorción del agua (retención de agua en los poros), esta propiedad es la característica de las arcillas expansivas. La expansión sucede cuando las moléculas de agua quedan atrapadas en la red cristalina, entre las cadenas de silicatos de las arcillas que se encuentran unidos por enlaces débiles, pasando a ocupar mayor volumen inicial sin que ocurra reacción química.

Cuando la capa adsorbida se comprime, se produce una contracción y lo mismo sucede cuando un efecto de succión reduce el contenido de humedad.

2.9.3 Plasticidad y cohesión

La propiedad más característica de los suelos de arcilla es su plasticidad, esto es, su capacidad para adquirir y retener una nueva forma cuando se moldean. Nuevamente, son el tamaño y la forma de las partículas, en combinación con la naturaleza de la capa adsorbida, las que controlan esta propiedad. Los suelos con valores de superficie específica altas, son los más plásticos y los más compresibles.

La consistencia plástica de una mezcla de arcilla/agua, es decir, de un suelo arcilloso, depende en alto grado del contenido de humedad, que es la relación de masa de agua a masa sólida. Con contenidos de humedad bajos, el agua presente es predominantemente la que se sitúa en las capas adsorbidas, por lo que las partículas de arcilla desarrollan considerables fuerzas de atracción mutua. El efecto enlazante de esta succión produce un cierto tipo de tensión interna que se llama cohesión. A medida que se incrementa el contenido de humedad el efecto de la atracción interparticular se reduce y la cohesión disminuye. Cuando el agua presente es suficiente como para permitir que las partículas que las partículas resbalen unas sobre otras sin producir grietas de tensión interna (esto es sin desmoronarse), se dice que el suelo alcanza su límite plástico. Cuando el contenido de humedad se eleva hasta un punto tal que las fuerzas interpartículas/agua están en equilibrio, la mezcla se comporta como un líquido y se dice que está en su límite líquido. (Whitlow, 1994).

2.10 Distribución granulométrica

Tabla 2.2: Juego de tamices según la norma ASTM D-422

Abertura Gruesos		Abertura Finos	
Tamiz	Abertura (mm)	Tamiz	Abertura (mm)
3"	75	N° 4	4,75
2"	50	N° 10	2
1½"	37.5	N° 20	0,85
1"	25	N° 30	0,60
¾"	19	N° 40	0,425
½"	12.5	N° 60	0,25
⅜"	9.5	N° 100	0,15
¼"	6.3	N° 200	0,075
		BASE	

Fuente: ASTM, 2007

En cualquier masa de suelo, los tamaños de los granos varían en gran medida. Para clasificar apropiadamente un suelo, se debe conocer su distribución granulométrica. La distribución granulométrica de un suelo de grano grueso se determina por lo general mediante un análisis granulométrico con mallas. Para un suelo de grano fino, la distribución granulométrica se puede obtener por medio del método del lavado.

2.10.1 Análisis granulométrico por medio de tamices

Un análisis granulométrico con mallas se efectúa tomando una cantidad medida de suelo seco bien pulverizado y haciéndolo pasar a través de un apilo de mallas con aberturas cada vez más pequeñas que dispone de una charola en su parte inferior. Se mide la cantidad de suelo retenido en cada malla y se determina el porcentaje acumulado del suelo que pasa a través de cada una.

La Tabla 2.2 y Tabla 2.3 contiene una lista de los números de mallas utilizadas de acuerdo a las normas ASTM y AASHTO, y el tamaño correspondiente de sus aberturas. Estas mallas son de uso común para el análisis de suelos para fines de su clasificación.

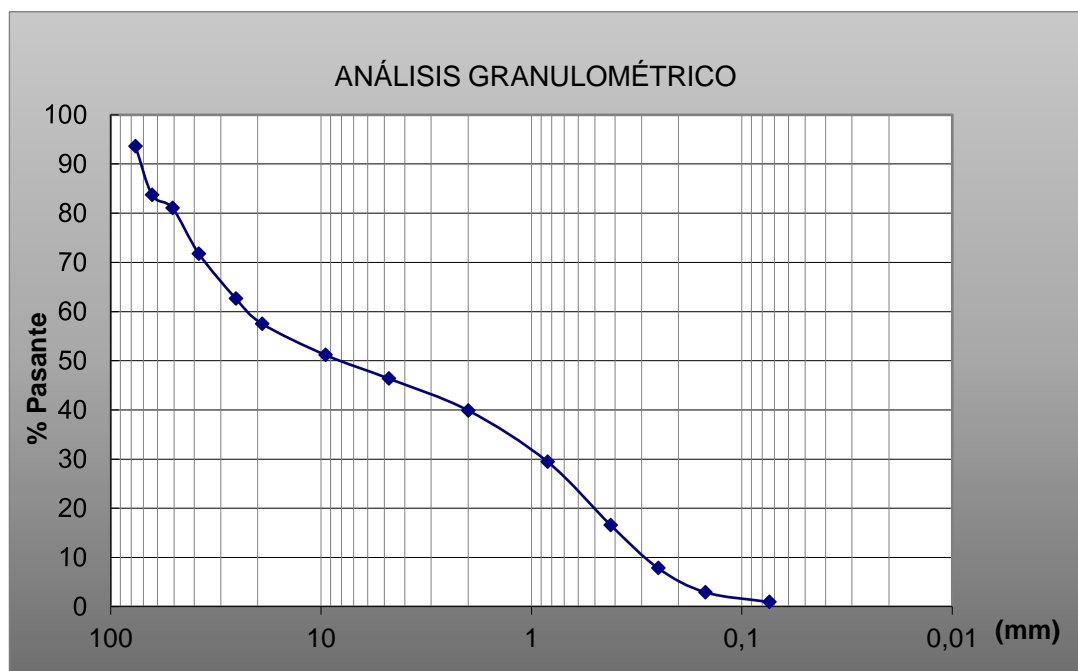
Tabla 2.3: Juego de tamices según la norma AASHTO T-27

Abertura Gruesos		Abertura Finos	
Tamiz	Abertura (mm)	Tamiz	Abertura (mm)
3"	75	N° 4	4,75
2"	50	N° 10	2
1½"	37.5	N° 40	0,85
1"	25	N° 200	0,075
¾"	19	BASE	
½"	12,5		
⅜"	9,5		

Fuente: AASHTO, 2007

El porcentaje en cada malla, determinado por un análisis con mallas, se traza en papel semilogarítmico, como se muestra en la figura 2.9. El diámetro de grano está trazado en la escala logarítmica y que el porcentaje de finos esta trazado en la escala aritmética.

Figura 2.9: Curva granulométrica de un suelo determinado



Fuente: Elaboración propia

Figura 2.10: Serie de tamices



Fuente: Elaboración propia

2.10.2 Análisis granulométrico por lavado

Este ensayo hace referencia a la repartición de partículas según el tamaño después de haberse lavado en el tamiz N° 200, para determinar la cantidad de material que quedaron retenidos y sobre todo identificar la cantidad aproximada de partículas de agregados grueso, finos y limos que hay en cada muestra.

Figura 2.11: Granulometría (método del lavado)

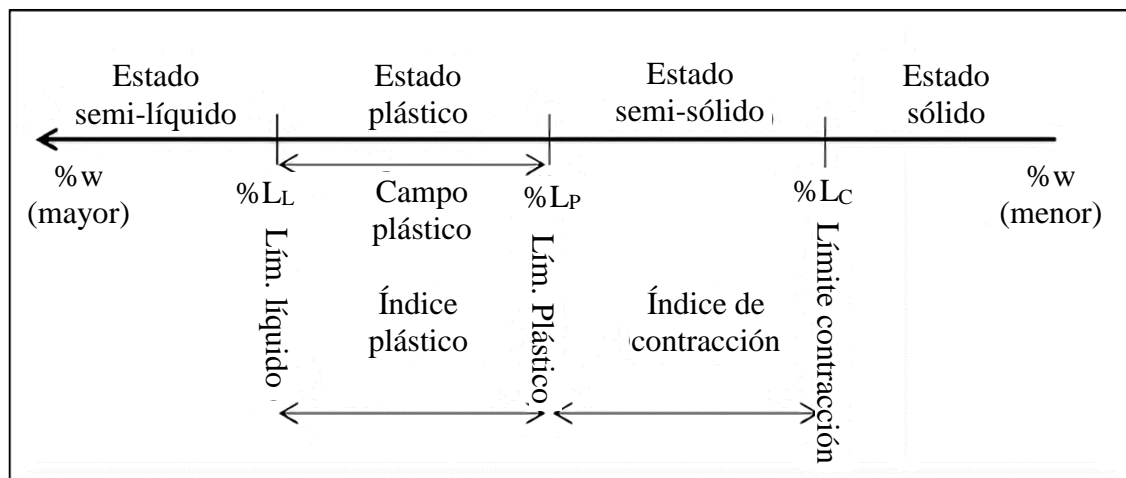


Fuente: Elaboración propia

2.11 Consistencia del suelo

Cuando los minerales de arcilla están presentes en el suelo de grano fino, el suelo se puede remover en presencia de algo de humedad sin que se desmorone. Esta naturaleza cohesiva se debe al agua adsorbida que rodea a las partículas de arcilla. En 1900, un científico sueco llamado Albert Mauritz Atterberg desarrolló un método para describir la consistencia de los suelos de grano fino con diferentes contenidos de humedad. Con un contenido de humedad muy bajo, el suelo se comporta más como un sólido quebradizo. Cuando el contenido de humedad es muy alto, el suelo y el agua pueden fluir como un líquido. Por lo tanto, sobre una base arbitraria, dependiendo del contenido de humedad, la naturaleza del comportamiento del suelo puede ser dividido en cuatro estados básicos: sólido, semisólido, plástico y líquido, como se muestra en la Figura 2.12.

Figura 2.12: Estados básicos que puede presentarse en el suelo



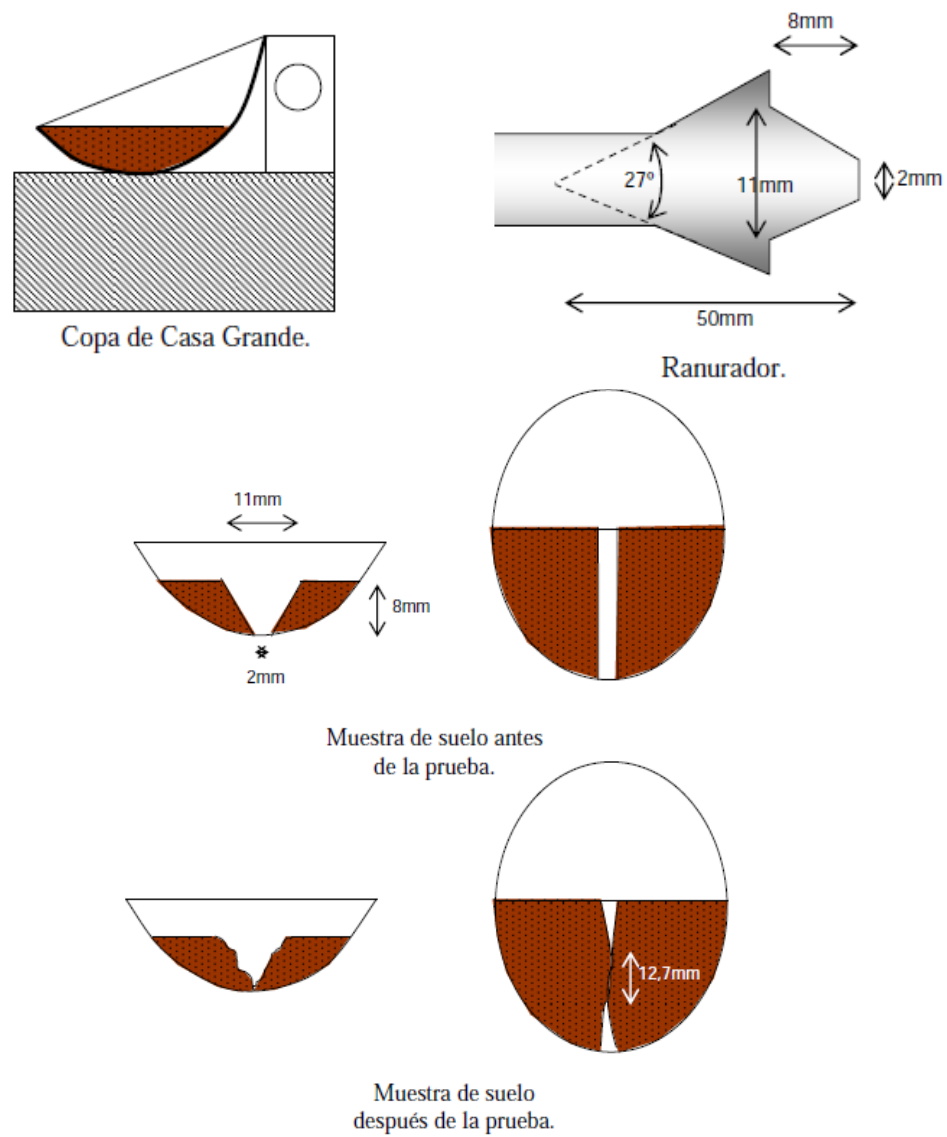
Fuente: Porto, 2015

El contenido de humedad, expresado en porcentaje, en el que se lleva a cabo la transición del estado sólido al estado semisólido se define como el límite de contracción. El contenido de humedad en el punto de transición del estado semisólido al estado plástico es el límite plástico, y del estado plástico al estado líquido es el límite líquido. Estos límites son también conocidos como límites de Atterberg.

El límite líquido de un suelo se determina utilizando la copa de Casagrande (designación de prueba D-4318 de la ASTM) y se define como el contenido de humedad en el que se cierra una ranura de 12,7 mm mediante 25 golpes.

Esta propiedad se mide en laboratorio mediante un procedimiento normalizado en que una mezcla de suelo y agua, capaz de ser moldeada, se deposita en la cuchara de Casagrande o copa de Casagrande, se golpea consecutivamente contra la base de la máquina, haciendo girar la manivela, hasta que el surco que previamente se ha recortado, se cierre en una longitud de 12 mm (1/2"). Si el número de golpes para que se cierre el surco es 25, la humedad del suelo (razón peso de agua/peso de suelo seco) corresponde al límite líquido. Dado que no siempre es posible que el surco se cierre en la longitud de 12 mm exactamente con 25 golpes.

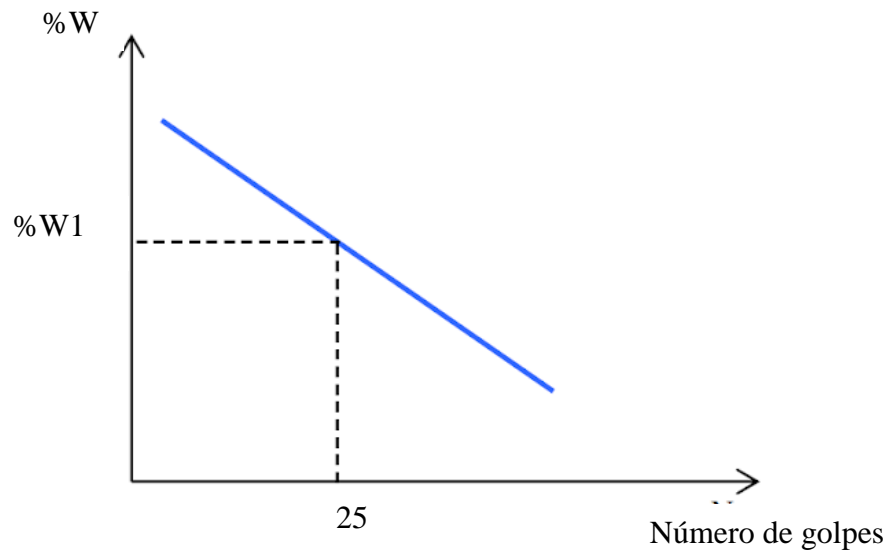
Figura 2.13: Método para determinar el límite líquido del suelo



Fuente: Porto, 2015

Existen dos métodos para determinar el límite líquido: trazar una gráfica con el número de golpes en coordenadas logarítmicas, contra el contenido de humedad correspondiente, en coordenadas normales, e interpolar para la humedad correspondiente a 25 golpes. La humedad obtenida es el límite líquido, según el método puntual, multiplicar por un factor (que depende del número de golpes) la humedad obtenida y obtener el límite líquido como el resultado de tal multiplicación.

Figura 2.14: Método gráfico para determinar el límite líquido



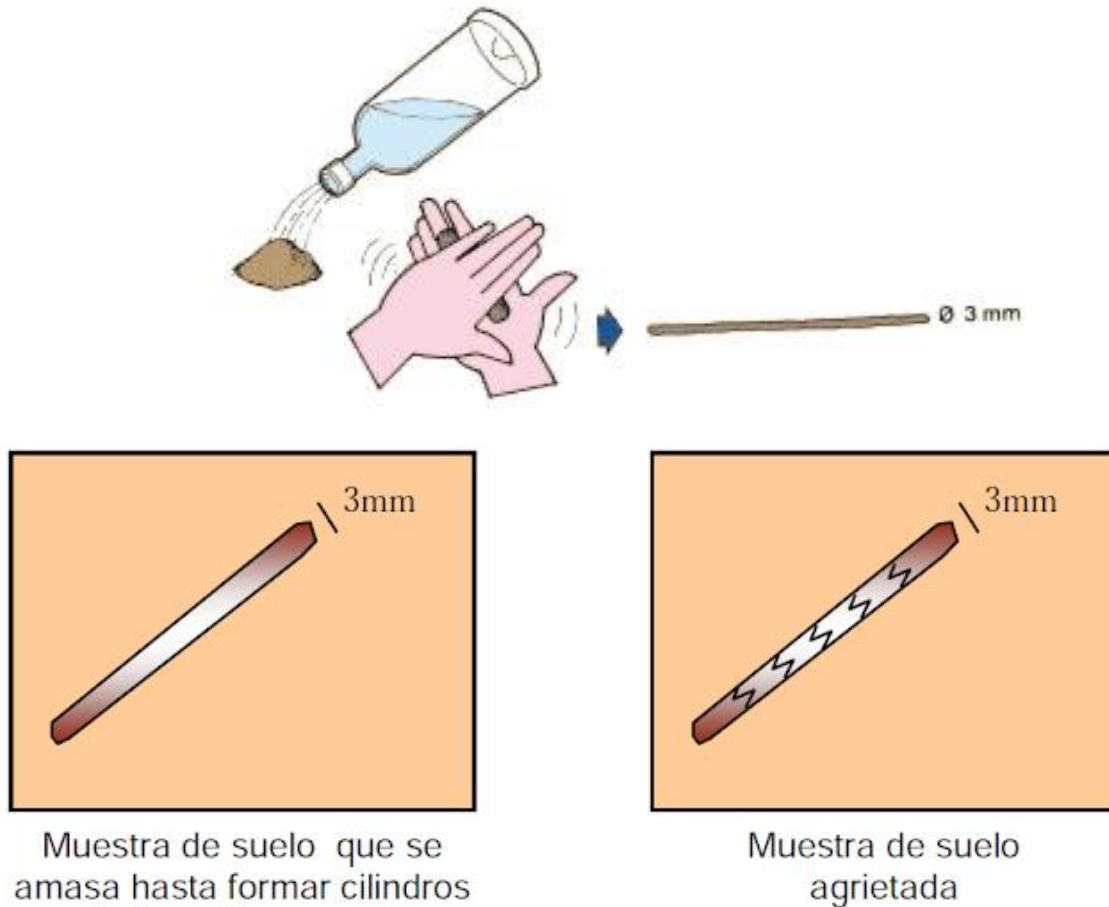
Fuente: Porto, 2015

El límite plástico se define como el contenido de humedad en el que el suelo se agrieta al formar un rollito de 3.18 mm de diámetro (designación de prueba D-4318 de la ASTM).

Esta propiedad se mide en laboratorio mediante un procedimiento normalizado pero sencillo consistente en medir el contenido de humedad para el cual no es posible moldear un cilindro de suelo, con un diámetro de 3 mm. Para esto, se realiza una mezcla de agua y suelo, la cual se amasa entre los dedos o entre el dedo índice y una superficie inerte (vidrio), hasta conseguir un cilindro de 3 mm de diámetro. Al llegar a este diámetro, se desarma el cilindro, y vuelve a amasarse hasta lograr nuevamente un cilindro de 3 mm. Esto se realiza consecutivamente hasta que no es posible obtener el cilindro de la dimensión deseada. Con ese contenido de humedad, el suelo se vuelve quebradizo (por pérdida de humedad) o se vuelve pulverulento. Se mide el contenido de humedad, el cual

corresponde al límite plástico. Se recomienda realizar este procedimiento al menos 3 veces para disminuir los errores de interpretación o medición.

Figura 2.15: Proceso para determinar el límite plástico



Fuente: Porto, 2015

El límite de contracción se define como el contenido de humedad en el que el suelo no experimenta ningún cambio adicional en su volumen con la pérdida de humedad (designación de prueba D-427 de la ASTM).

Índice de plasticidad

Se denomina índice de plasticidad a la diferencia numérica entre el límite líquido y el límite plástico de un suelo se define como el índice de plasticidad (IP):

$$IP = LL - LP$$

Tanto el límite líquido como el límite plástico dependen de la cantidad y tipo de arcilla del suelo; sin embargo, el índice plástico depende generalmente de la cantidad de arcilla del suelo.

Comparando el índice de plasticidad con el que marcan las especificaciones respectivas se puede decir si un determinado suelo presenta las características adecuadas para cierto uso.

Tabla 2.4: Valores usuales de IP para cada tipo de suelo

Tipo de suelo	Índice de plasticidad
Suelo desmenuzable	$IP < 1$
Suelo débilmente plástico	$1 < IP < 7$
Suelo medianamente plástico	$7 < IP < 15$
Suelo altamente plástico	$IP > 15$

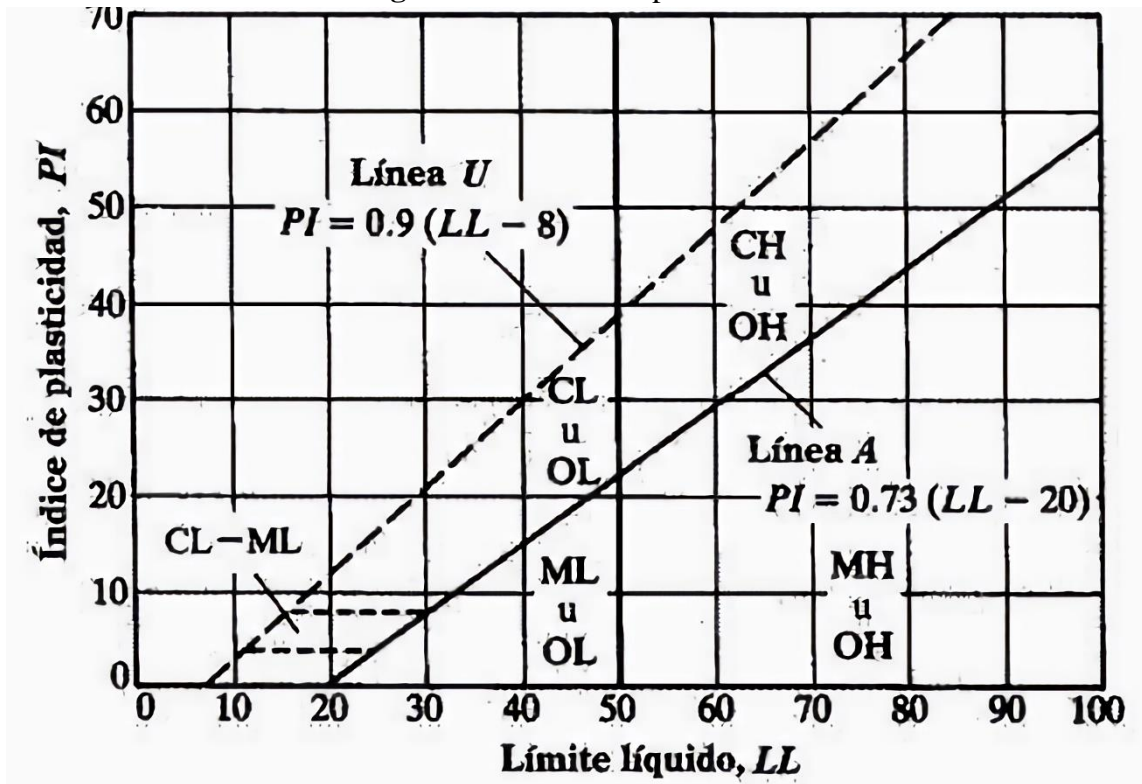
Fuente: Elaboración propia

Carta de plasticidad

Los límites líquido y plástico se determinan por pruebas de laboratorio relativamente sencillas que proporcionan información sobre la naturaleza de los suelos cohesivos. Las pruebas han sido utilizadas ampliamente por los ingenieros para correlacionar varios parámetros físicos del suelo, así como para la identificación del mismo. Casagrande (1932) estudió la razón del índice de plasticidad con el límite líquido de una amplia variedad de suelos naturales. Sobre la base de los resultados de la prueba, se propuso una carta de plasticidad como la que se muestra en la Figura 2.16. La característica importante de este cuadro es la línea A empírica que está dada por la ecuación:

$$IP = 0.73(LL - 20)$$

Figura 2.16: Carta de plasticidad



Fuente: Casagrande, 1932

La línea A separa las arcillas inorgánicas de los limos inorgánicos. Las gráficas de los índices de plasticidad contra límites líquidos de arcillas inorgánicas se encuentran por encima de la línea A, y las de limos inorgánicos se encuentran por debajo de esta línea.

Los limos orgánicos se grafican en la misma región (por debajo de la línea A y con LL que va de 30 a 50), como los limos inorgánicos de compresibilidad media. Las arcillas orgánicas parcela se grafican en la misma región que los limos inorgánicos de alta compresibilidad (por debajo de la línea A y LL mayor de 50). La información proporcionada en la carta de plasticidad es de gran valor y es la base para la clasificación de los suelos de grano fino en el Sistema de Clasificación Unificado de Suelos.

Considere que una línea llamada U se encuentra por encima de la línea A. La línea U es de aproximadamente el límite superior de la relación del índice de plasticidad al límite de líquido para cualquier suelo encontrado hasta ahora. La ecuación de la línea U se puede dar como:

$$IP = 0.9 * (LL - 8)$$

Tabla 2.5: Clasificación del suelo según su índice de plasticidad

Índice de plasticidad	Plasticidad	Caracterización
$IP > 20$	Alta	Suelos muy arcillosos
$7 < IP \leq 20$	Media	Suelos arcillosos
$IP < 7$	Baja	Suelos poco arcilloso
$IP = 0$	No plástico (NP)	Suelos exentos de arcilla

Fuente: Manual de suelos, geología, geotecnia y pavimentos. (MTC, 2014)

2.12 Clasificación de suelos

Dada la gran variedad de suelos que se presentan en la naturaleza, la mecánica de suelos ha desarrollado algunos métodos de clasificación de los mismos. Cada uno de estos métodos tiene, prácticamente, su campo de aplicación según la necesidad y uso que los haya fundamentado. Y así se tiene la clasificación de los suelos según el tamaño de sus partículas, la clasificación de la Asociación Americana de Funcionarios de Caminos Públicos (American Association State Highway Officials), la clasificación de la Administración de Aeronáutica Civil (C.A.A), el sistema Unificado de Clasificación de suelos (S.U.C.S.), etc. La cantidad de esta variedad de sistemas de clasificación de suelos se debe, posiblemente, al hecho de que tanto el ingeniero civil como el geólogo y el agrónomo analizan al suelo desde diferentes puntos de vista. Sin embargo, lo que es fundamental es el hecho de que cualquier clasificación que quiera abarcar las necesidades correspondientes debe estar basada en las propiedades mecánicas de los suelos, ya que estas son elementales en las variadas aplicaciones de la ingeniería.

En la actualidad, dos elaborados sistemas de clasificación que utilizan la distribución granulométrica y la plasticidad de los suelos son comúnmente utilizados para aplicaciones ingenieriles. Se trata del American Association of State Highway Officials (AASHTO) y el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos. En Estados Unidos, el sistema AASHTO es utilizado principalmente por los departamentos de carreteras estatales y del condado, mientras que los ingenieros geotécnicos normalmente prefieren utilizar el Sistema Unificado.

Para que resulte adecuado para este propósito básico, cualquier sistema de clasificación debe satisfacer las siguientes condiciones:

- Debe incorporar en forma descriptiva términos breves pero ilustrativos para el usuario.
- Las clases y subclases deben quedar definidas por parámetros razonables cuya medición cuantitativa sea relativamente fácil.
- Las clases y subclases deben permitir agrupar los suelos con características que impliquen propiedades de ingeniería similares.

2.12.1 Sistema de clasificación AASHTO

Este sistema de clasificación de suelos fue desarrollado en 1929 como el Sistema de Clasificación de Administración de Carreteras. Ha sido objeto de varias revisiones, con la actual versión propuesta por la Comisión de Clasificación de Materiales para los Tipos de Carreteras Subrasantes y Granulares de la Junta de Investigación de Carreteras en 1945 (Norma ASTM D-3282; método AASHTO M145). (Das, 2004).

El sistema de clasificación AASHTO utilizado actualmente se muestra en la tabla 1. De acuerdo con este sistema el suelo se clasifica en siete grupos principales: A-1 a A-7.

Los suelos que clasifican en los grupos A-1, A-2 y A-3 son materiales granulares, donde el 35% o menos de las partículas pasan a través del tamiz N° 200. Los suelos donde más de 35% pasa a través del tamiz núm. 200 se clasifican en los grupos A-4, A-5, A-6 y A-7. Éstos son principalmente limo y materiales del tipo de arcilla. El sistema de clasificación se basa en los siguientes criterios:

1. Tamaño de grano

Grava: fracción que pasa el tamiz de 75 mm y es retenida en el tamiz núm. 10 (2 mm).

Arena: fracción que pasa el tamiz núm. 10 (2 mm) y es retenida en el tamiz núm. 200

Limo y arcilla: fracción que pasa el tamiz núm. 200.

2. Plasticidad: el término limoso se aplica cuando las fracciones finas del suelo tienen un índice de plasticidad de 10 o menos. El término arcilloso se aplica cuando las fracciones finas tienen un índice de plasticidad de 11 o más.

Tabla 2.6: Sistema de clasificación según AASHTO

Clasificación general	Materiales granulares (35% o menos pasa por el tamiz N° 200)						Materiales limoso arcilloso (más del 35% pasa el tamiz N° 200)				
	A-1		A-3	A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7	A-4	A-5	A-6	A-7
Grupo:	A-1-a	A-1-b									A-7-5
Porcentaje que pasa: N° 10 (2mm) N° 40 (0,425mm) N° 200 (0,075mm)	50 máx. 30 máx. 15 máx.	- 50 máx. 25 máx.	- 51 mín. 10 máx.	- - 35 máx.			- - 36 min				
Características de la fracción que pasa por el tamiz N° 40 Límite líquido Índice de plasticidad	- 6 máx.		- NP (1)	40 máx. 10 máx.	41 mín. 10 máx.	40 máx. 11 mín.	41 mín. 11 mín.	40 máx. 10 máx.	41 mín. 10 máx.	40 máx. 11 mín.	41 mín. (2) 11 mín.
Constituyentes principales	Fragmentos de roca, grava y arena		Arena fina	Grava y arena arcillosa o limosa			Suelos limosos		Suelos arcillosos		
Características como subgrado	Excelente a bueno						Pobre a malo				

- (1): No plástico
 (2): El índice de plasticidad del subgrupo A-7-5 es igual o menor al LL menos 30
 El índice de plasticidad del subgrupo A-7-6 es mayor que LL menos 30

Fuente: Das, 2015

Para clasificar un suelo de acuerdo con la tabla, los datos de prueba se aplican de izquierda a derecha. Por proceso de eliminación, el primer grupo de la izquierda en la que quepan los datos de prueba es la clasificación correcta.

Grupo A-1: Son mezclas bien graduadas, compuestas por piedra, grava, arena y poco o casi nada de material fino.

Subgrupo A-1-a: Es bien graduado, predomina la piedra y grava, casi no tiene ligante.

Subgrupo A-1-b: Es bien graduado, predomina las arenas gruesas, casi no tiene ligante.

Grupo A-2: contiene menos del 35% de material fino.

Subgrupo A-2-4 y A-2-5: El contenido de material fino es menor o igual al 35%, la fracción que pasa el tamiz N° 40, se comporta igual a los grupos A-4 y A-5 respectivamente.

Son gravas y arenas (arenas gruesas), que contienen limo y arcilla en cantidades reducidas, cuya plasticidad es baja, pero excede al grupo A-1, también incluye la arena fina con limos no plásticos que se describirán en el grupo A-3.

Subgrupo A-2-6 y A-2-7: La única diferencia de los anteriores, es que la fracción que pasa el tamiz N°40, se comporta en plasticidad igual a los grupos A-5 y A-7.

Grupo A-3: Son arenas finas conteniendo limos no plásticos, algunas veces pueden contener poca grava y arena gruesa.

Material limo arcillosos, más del 35% del total pasa el tamiz N°200.

Grupo A-4: Son suelos limosos, poco o nada plásticos, puede contener más de un 75% del material que pasa el tamiz N°200.

Grupo A-5: Son muy similares al anterior, pero contiene un material micáceo, que hace que el límite líquido a veces sean elevados, además de aparecer una propiedad elástica rara en los suelos.

Grupo A-6: Predomina la arcilla, más del 75% del material pasa el tamiz N° 200, este suelo suele contener pequeños porcentajes de arena fina y limo cuyas características son absorbidas por el gran porcentaje de arcilla.

Grupo A-7: Se parecen mucho al grupo A-6. Pero estos tienen propiedades elásticas, además su límite líquido casi es siempre elevado.

Subgrupo A-7-5: Sus índices de plasticidad no son muy altos con respecto a sus límites líquidos.

Subgrupo A-7-6: Sus índices de plasticidad son muy elevados con respecto a sus límites líquidos, además presentan grandes cambios de volumen entre sus estados seco y húmedo.

Para la evaluación de la calidad de un suelo como un material de subrasante carretera, también se incorpora un número llamado índice de grupo (IG) a los grupos y subgrupos del suelo. Este número se escribe entre paréntesis después de la designación del grupo o subgrupo.

Índice de grupo

Es un factor de evaluación, que determina la calidad del suelo a través de características similares en grupos de suelos, el índice de grupo es muy importante en el diseño de espesores, inclusive un método lleva su nombre.

La siguiente fórmula determina el índice de grupo:

$$IG = 0,2a + 0,005ac + 0,01bd$$

Donde:

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

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

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

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

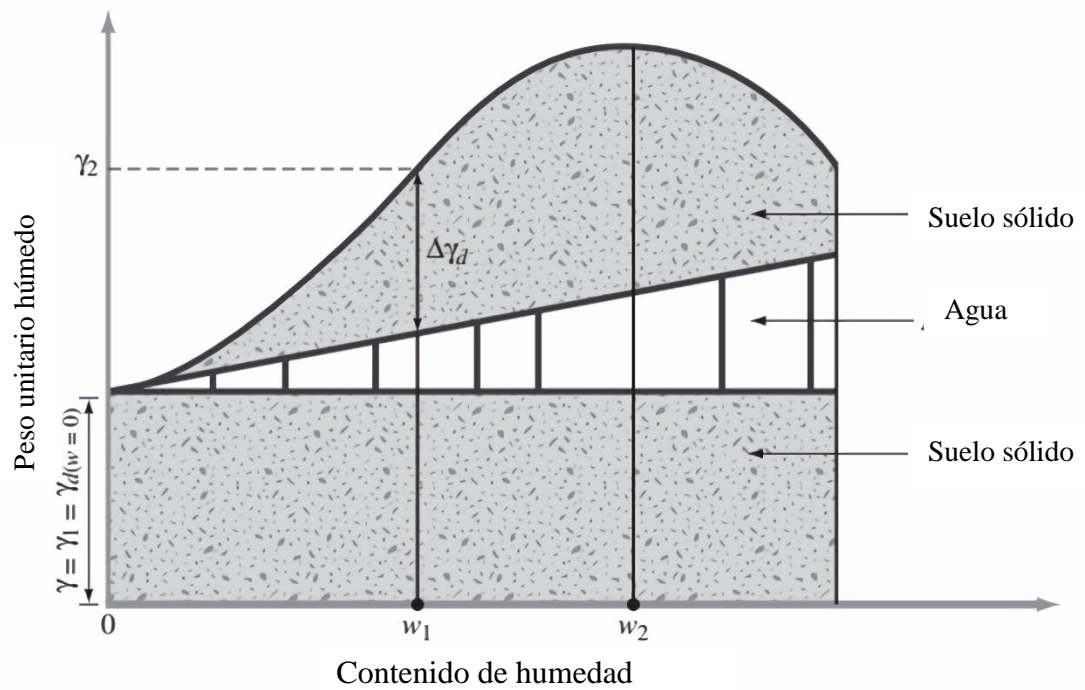
Condicionando que cualquier factor que pudiere salir negativo, este se asume con el valor de cero. Los máximos valores del índice de grupo se encuentran en la tabla de clasificación.

2.13 Compactación de suelos

En la construcción de terraplenes de carreteras, presas de tierra y muchas otras estructuras de ingeniería, los suelos sueltos deben ser compactados para aumentar sus pesos unitarios. La compactación aumenta las características de resistencia de los suelos, incrementando de este modo la capacidad de carga de las cimentaciones construidas sobre ellos y también reduciendo la compresibilidad de los mismos. La compactación también disminuye la cantidad de solución no deseada de las estructuras y aumenta la estabilidad de los taludes de los terraplenes. En el proceso de la compactación del suelo generalmente se utilizan rodillos de ruedas lisas, rodillos compactadores de suelo, rodillos neumáticos de goma y rodillos vibratorios. Los rodillos vibratorios se utilizan sobre todo para la densificación de los suelos granulares.

En todos los suelos, al incrementarse su humedad se aplica un medio lubricante entre sus partículas que permite un cierto acomodo de estas cuando se sujetan a un esfuerzo de compactación, se llega a obtener el mejor acomodo de las partículas del suelo, y por consecuencia el mayor peso volumétrico seco, con cierta humedad llamada humedad óptima. A esta humedad deberá procurarse siempre efectuar la compactación en el camino,

Figura 2.17: Curva de compactación para un suelo



Fuente: Das, 2004

calle o aeropuerto o lugar de que se trate, ya que facilita el acomodo de las partículas con el menor trabajo del equipo de compactación.

En general, la compactación es la consolidación del suelo por la eliminación de aire, lo que requiere energía mecánica. El grado de compactación de un suelo se mide en términos de su peso unitario seco. Cuando se añade agua a la tierra durante la compactación, ésta actúa como agente suavizante sobre las partículas del suelo. Éstas se deslizan una sobre la otra y se mueven en una posición densamente empaquetada. El peso unitario seco después de la compactación primero aumenta a medida que se incrementa el contenido de humedad. Tenga en cuenta que en un contenido de humedad $w = 0$, la unidad de peso húmedo (γ) es igual a la unidad de peso seco (γ_d)

$$\gamma = \gamma_d(w = 0) = \gamma_1$$

Cuando el contenido de humedad se aumenta gradualmente y el mismo esfuerzo compactador se utiliza para la compactación, el peso de los sólidos del suelo en una unidad de volumen aumenta gradualmente. Por ejemplo, con $w = w_1$, el peso unitario húmedo es igual a:

$$\gamma = \gamma_2$$

Sin embargo, el peso unitario seco para este contenido de humedad se da por:

$$\gamma_{d(w=w_1)} = \gamma_{d(w=0)} + \Delta\gamma_d$$

Más allá de cierto contenido de humedad $w = w_2$, cualquier aumento en éste tiende a reducir el peso unitario seco. Esto es debido a que el agua llena los espacios que han sido ocupados por las partículas sólidas. El contenido de humedad en el que se alcanza el peso unitario seco máximo generalmente se denomina contenido de humedad óptimo.

La prueba de laboratorio utilizada generalmente para obtener el peso unitario seco máximo de compactación y el contenido óptimo de humedad se denomina prueba Proctor de compactación (Proctor, 1933).

2.13.1 Prueba de Proctor estándar

En la prueba Proctor estandar, el suelo se compacta en un molde que tiene un volumen de $943,3 \text{ cm}^3$. El diámetro del molde es $101,6 \text{ mm}$. Durante la prueba de laboratorio el molde se une a una placa de base en la parte inferior y a una extensión en la parte superior. El suelo se mezcla con cantidades variables de agua y luego es compactado en tres capas iguales por un martillo que entrega 25 golpes a cada capa. El martillo pesa $24,4 \text{ N}$ (masa= $2,5 \text{ kg}$) y tiene una caída de $304,8 \text{ mm}$. Para cada prueba, el peso unitario húmedo de compactación se puede calcular como:

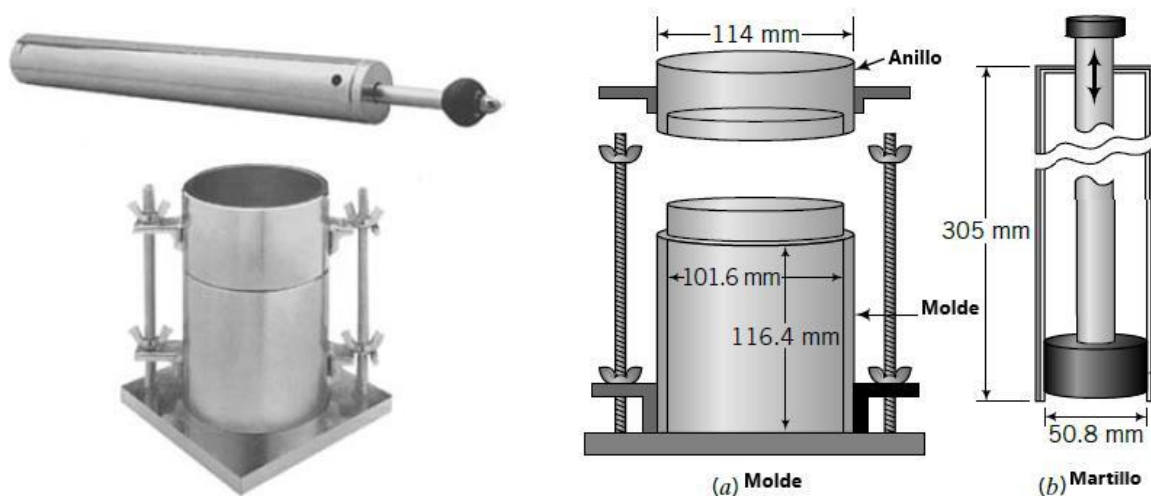
$$\gamma = \frac{W}{V_m}$$

Donde:

W = Peso del suelo compactado en el molde

V_m = Volumen del molde ($943,3 \text{ cm}^3$)

Figura 2.18: Equipo para la prueba Proctor estándar



Fuente: Das, 2004

Para cada prueba, el contenido de humedad del suelo compactado es determinado en el laboratorio. Si se conoce el contenido de humedad, el peso unitario seco puede calcularse como:

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

Donde:

W (%) = Porcentaje de contenido humedad.

Figura 2.19: Especificaciones para la prueba Proctor estándar

Concepto	Método A	Método B	Método C
Diámetro del molde	(101,6 mm)	(101,6 mm)	(152,4 mm)
Volumen del molde	943,3 cm^3	943,3 cm^3	2124 cm^3
Peso del pisón	5,5 lb (2.5 kg)	5,5 lb (2.5 kg)	5,5 lb (2.5 kg)
Altura de caída del pisón	304,8 mm	304,8 mm	304,8 mm
Número de golpes del pisón por capa de suelo	25	25	56
Número de capas de compactación	3	3	3
Energía de compactación	591,3 KN-m/ m^3	591,3 KN-m/ m^3	591,3 KN-m/ m^3
Suelo por usarse	Porción que pasa la malla N°4 (4,57mm). Puede usarse el 20% o menos por peso de material que es retenido en la malla N°4.	Porción que pasa la malla de 3/8 (9,5 mm). Puede usarse si el suelo retenido sobre la malla N°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 mm) Puede usarse si más de 20% es retenido en la malla de 3/8 (9,5 mm) y menos de 30% por peso es retenido en la malla 3/4 pulg (19,0 mm).

Fuente: ASTM 698-91

Factores que afectan la compactación

La sección anterior mostró que el contenido de humedad tiene una gran influencia en el grado de compactación conseguido por un suelo dado. Además del contenido de humedad, otros factores importantes que afectan la compactación son el tipo de suelo y esfuerzo de compactación (energía por unidad de volumen). La importancia de cada uno de estos dos factores se describe con más detalle en esta sección.

Efectos del esfuerzo de compactación

La energía de compactación por unidad de volumen “E”, usada en la prueba Proctor estándar, puede escribirse como:

$$E = \frac{(N) * (N_c) * (W_{mart}) * (h_{mart})}{V_m}$$

Donde:

N = Número de golpes por capa.

N_c = Número de capas.

W_{mart} = Peso del martillo.

h_{mart} = Altura del martillo

V_m = Volumen del molde.

Si se cambia el esfuerzo de compactación por unidad de volumen de suelo, la curva de peso unitario húmedo también cambiará. En base a lo mencionado podemos llegar a dos conclusiones:

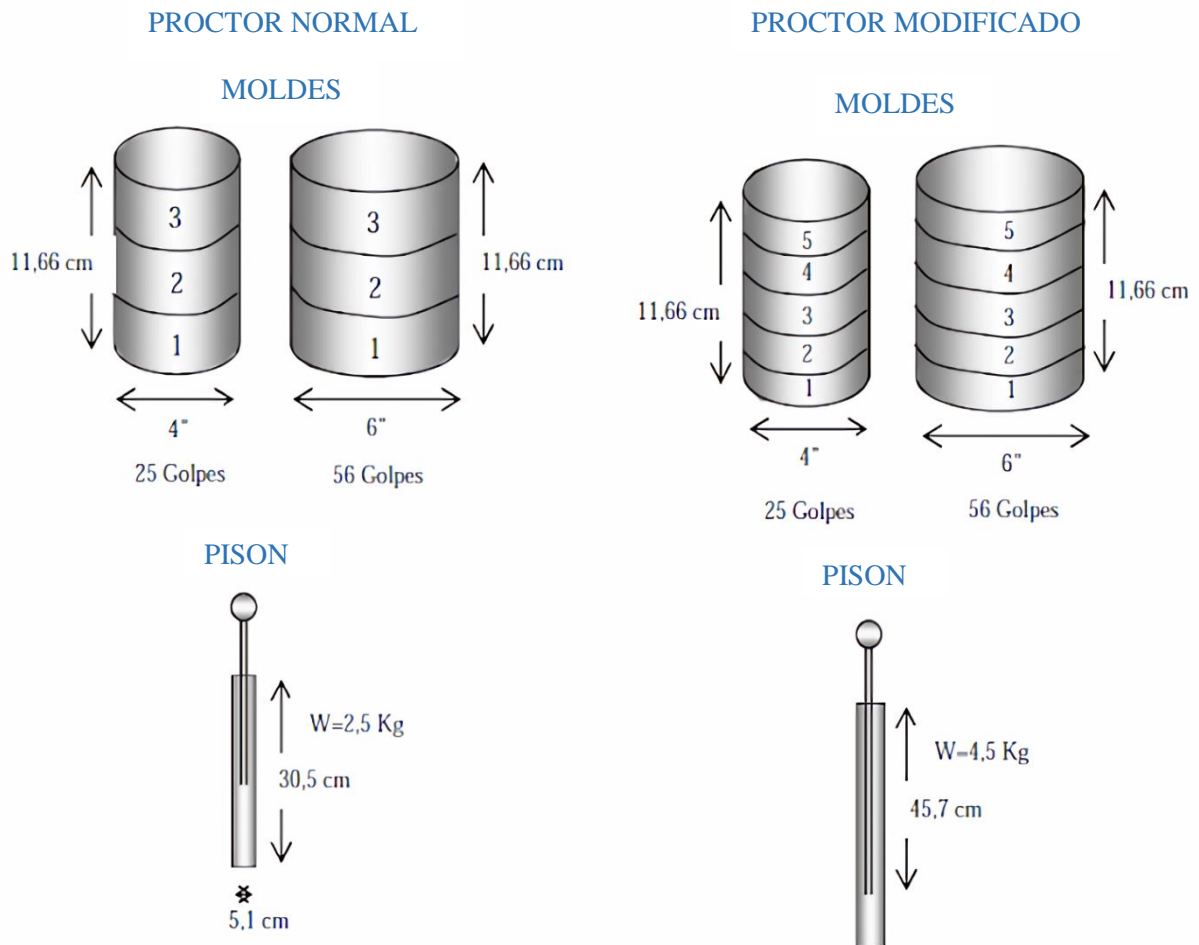
1. A medida que aumenta el esfuerzo de compactación, el peso unitario seco máximo de compactación también se incrementa.
2. A medida que aumenta el esfuerzo de compactación, el contenido óptimo de humedad se reduce en cierta medida.

Las declaraciones anteriores son verdaderas para todos los suelos. Sin embargo, tener en cuenta que el grado de compactación no es directamente proporcional al esfuerzo de compactación.

2.13.2 Prueba Proctor modificada

Con el desarrollo de rodillos pesados y su uso en la compactación en campo, la prueba Proctor estándar fue modificada para representar mejor las condiciones de campo. Esto se refiere a veces como la prueba Proctor modificada (Norma ASTM D-1557 y Norma AASHTO T 180). Para la realización de la prueba Proctor modificada se utiliza el mismo molde, con un volumen de $943,3 \text{ cm}^3$, como en el caso de la prueba Proctor estándar. Sin embargo, el suelo es compactado en cinco capas por un martillo que pesa $44,5 \text{ N}$ (masa = $4,536 \text{ kg}$) y tiene una caída de $457,2 \text{ mm}$. El número de golpes de martillo para cada capa se mantiene en 25, como en el caso de la prueba Proctor estándar. La Figura 2.20 muestra los martillos utilizados para las pruebas Proctor estándar y modificada.

Figura 2.20: Diferencias entre la prueba Proctor estándar y modificado



Fuente: Das, 2015.

Tabla 2.7: Especificaciones para la prueba Proctor modificado

Concepto	Método A	Método B	Método C
Diámetro del molde	(101,6 mm)	(101,6 mm)	(152,4 mm)
Volumen del molde	943,3 cm^3	943,3 cm^3	2124 cm^3
Peso del pisón	44,5 N	44,5 N	44,5 N
Altura de caída del pisón	457,2 mm	457,2 mm	457,2 mm
Número de golpes del pisón por capa de suelo	25	25	56
Número de capas de compactación	5	5	5
Energía de compactación	2696 KN-m/ m^3	2696 KN-m/ m^3	2696 KN-m/ m^3
Suelo por usarse	Porción que pasa la malla N°4 (4,57 mm). Puede usarse el 20% o menos por peso de material que es retenido en la malla N°4.	Porción que pasa la malla de 3/8 (9,5 mm). Puede usarse si el suelo retenido sobre la malla N°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 (9,5 mm) y menos de 30% por peso es retenido en la malla 3/4 pulg (19,0 mm).

Fuente: ASTM 698-91

Generalmente el esfuerzo de compactación imparte al suelo:

1. Un incremento en la resistencia al corte pues ella es en función de la densidad.
2. Un incremento en el potencial de expansión.
3. Un incremento en la densidad.
4. Una disminución de la contracción.
5. Una disminución de la permeabilidad.
6. Una disminución de la compresibilidad.

De esta lista de propiedades afectadas por la compactación, se ve claramente que el problema de especificar la compactación es algo más que simplemente el requerimiento de incrementar la densidad del suelo.

2.14 Relación de soporte de california (CBR).

El ensayo de relación de soporte de California se desarrolló por parte de la División de Carreteras de California en 1929 como una forma de clasificación de la capacidad de un suelo para ser utilizado como subrasante o material de subbase o base en construcción de carreteras. Durante la segunda guerra mundial, el cuerpo de ingenieros de los Estados Unidos adoptó este ensayo para utilizarlo en la construcción de aeropuertos.

El ensayo CBR (la ASTM denomina el ensayo simplemente un ensayo de relación de soporte) mide la resistencia al corte de un suelo bajo condiciones de humedad y densidad controladas. El ensayo permite obtener un número de la relación de soporte, pero de la aseveración anterior es evidente que este número no es constante para un suelo dado, sino que se aplica solo al estado en el cual se encontraba el suelo durante el ensayo.

El número CBR (o simplemente, CBR) se obtiene como la relación de la carga unitaria necesaria para lograr una cierta profundidad de penetración del pistón de penetración (con un área de 19,4 cm²) dentro de la muestra compactada de suelo a un contenido de humedad y densidad dadas con respecto a la carga unitaria patrón requerida para obtener la misma profundidad de penetración en una muestra estándar de material triturado. En forma de ecuación esto es:

$$CBR = \frac{\text{Carga unitaria del ensayo}}{\text{Carga unitaria patrón}} * 100 (\%)$$

De esta ecuación se puede ver que el número de CBR es un porcentaje de la carga unitaria patrón.

El número CBR usualmente se basa en la relación de carga para una penetración de 2,5 mm. Sin embargo, si el valor de CBR a una penetración de 5 mm es mayor, en ensayo debería repetirse (ordinariamente). Si un segundo ensayo produce nuevamente un valor de CBR mayor que 5 mm de penetración, dicho valor debe aceptarse como valor final del ensayo.

Los ensayos de CBR se hacen usualmente sobre muestras compactadas al contenido de humedad óptimo para el suelo específico, determinado utilizando el ensayo de compactación estándar o modificado.

Figura 2.21: Ensayo de CBR realizado en laboratorio



Fuente: Elaboración propia

Antes de determinar la resistencia a la penetración, generalmente los moldes se saturan durante 96 horas para simular las condiciones de trabajo más desfavorables, con una sobrecarga aproximadamente igual al peso del pavimento que se utilizará en el campo, pero en ningún caso el peso de la sobrecarga será menor de 4,5 kg. Es necesario durante este periodo tomar registros de expansión para instantes escogidos arbitrariamente y al final del periodo de saturación se hace la penetración para obtener el valor de CBR para el suelo en condición de saturación completa.

En general se confeccionan 3 moldes como mínimo, las que poseen distintas energías de compactación (lo usual es con 56, 25 y 12 golpes). El suelo al cual se aplica el ensayo, debe contener una pequeña cantidad de material que pase por el tamiz de 50 mm y quede retenido en el tamiz de 19 mm. Se recomienda que esta fracción no exceda del 20%.

En ambos ensayos de penetración para determinar los valores de CBR se coloca una sobrecarga sobre la muestra de la misma magnitud de la que se utilizó durante el ensayo de expansión. El ensayo sobre la muestra saturada cumple dos propósitos:

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

El ensayo de penetración se lleva a cabo en una máquina de compresión utilizando una tasa de deformación unitaria de 1,27 mm/min. Se toman lecturas de carga contra penetración a cada 0,5 mm de penetración hasta llegar a un valor de 5 mm a partir del cual se toman lecturas con incrementos de 2,5 mm hasta obtener una penetración total de 12,7mm. (ABC, 2008).

El valor de CBR se utiliza para establecer una relación entre el comportamiento de los suelos principalmente con fines de utilización como base y sub-rasante bajo pavimentos de carreteras y aeropistas. La siguiente tabla se indican rangos de valores de CBR, con una clasificación y posibles usos como material de construcción.

Tabla 2.8: Clasificación y uso del suelo según el valor de CBR

CBR	Clasificación cualitativa del suelo	Uso
2-5	Muy mala	Sub-rasante
5-8	Mala	Sub-rasante
8-20	Regular – Buena	Sub-rasante
20-30	Excelente	Sub-rasante
30-60	Buena	Sub-base
60-80	Buena	Base
80-100	Excelente	Base

Fuente: ASSIS A. 1988

CAPÍTULO III

DESARROLLO EXPERIMENTAL

CAPÍTULO III

DESARROLLO EXPERIMENTAL

3. Inspección visual del sitio de levantamiento de muestras

Antes de la extracción de las muestras de suelos se procedió a una inspección visual de la zona de estudio localizado en la comunidad de Obrajes, ubicando así el tramo y los puntos a estudiar.

La visita tiene la finalidad de localizar los sitios probables de donde serán extraídas las muestras, sin embargo, en estos puntos de levantamiento los tipos de suelos deben tener ciertas características como el de carácter fino debido a la delimitación del tema que es trabajar con este tipo de suelo, que son los que más deficiencias en cuanto a resistencia como para ser utilizado en alguna obra de ingeniería.

3.1 Extracción de muestras

3.1.1 Suelo a estudiar

El suelo a estudiar será el suelo más desfavorable o débil en cuanto a resistencia que presenta el tramo en estudio y este suelo será un suelo del tipo A-6, según estudios ya realizados en el tramo, dicho tramo presenta tres puntos de este tipo de suelo y por ende se extraerán muestras de estos puntos para su debido estudio y validación de datos.

3.1.2 Ubicación de la zona de muestreo

La zona de muestreo del proyecto se ubica en la provincia de Cercado, del Departamento de Tarija, se encuentra entre $21^{\circ}30'43.87''$ de latitud sud, $64^{\circ}46'12.10''$ de longitud Oeste y una altura promedio de 1975 m.s.n.m, la zona de muestreo tiene una longitud aproximada de 3 kilómetros.

Figura 3.1: Ubicación del tramo en estudio



Fuente: Google Earth

3.1.3 Realización del muestreo

Para el análisis del suelo el muestreo se realizó a través de cortes o excavaciones, llegando a obtener muestras que son representativas para los fines que tiene la investigación. Con la profundidad a la que se hicieron las excavaciones que fueron de 100 cm aproximadamente, para extraer muestras que no contengan algún resto de material como basura o vegetación, lo cual se hizo con herramientas comunes como ser barreno, picota y pala.

Se obtuvieron las muestras de los 3 puntos ya especificados a lo largo del tramo en estudio, la cantidad de muestra que se extrajo está en función de la cantidad de ensayos que se realizó para la caracterización del suelo natural y a diferentes dosificaciones, que en este caso fueron 30 ensayos tomando en cuenta un solo tipo de suelo el cual es el más desfavorable o débil del tramo.

Ya clasificado el suelo de los 3 puntos en estudio se escogió el suelo que buscábamos y con este suelo se realizaron los 30 ensayos a diferentes dosificaciones de Terrasil y Zycobond, buscando así la dosificación óptima para una buena estabilización del tramo. Las muestras extraídas fueron colocadas en bolsas de nylon para conservar la humedad natural hasta el laboratorio de la Universidad para el respectivo ensayo de contenido de humedad.

Muestreo de la calicata 3+000

La ubicación de este punto se encuentra entre las coordenadas latitud 21°30'50.33"S longitud 64°45'57.95"O.

Muestreo de la calicata 3+500

La ubicación de este punto se encuentra entre las coordenadas latitud 21°30'59.94"S longitud 64°46'7.63"O.

Muestreo de la calicata 4+500

La ubicación de este punto se encuentra entre las coordenadas latitud 21°30'59.62"S longitud 64°46'33.88"O.

Para los 3 puntos de muestreo se procedió a recoger el material realizando por excavación a una profundidad aproximada de 1 m, verificando que el suelo esté 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 bolsas de yute para los ensayos posteriores debido a que se trabajará con muestras secas. En las siguientes figuras se observan la extracción de las muestras de cada calicata del tramo.

Figura 3.3: Muestreo calicata 3+000



Fuente: Elaboración propia

Figura 3.2: Muestreo calicata 3+500



Fuente: Elaboración propia

Figura 3.4: Muestreo calicata 4+500



Fuente: Elaboración propia

3.2 Caracterización de los materiales

Los estudios de caracterización son de vital importancia para conocer al material a tratar, así también es importante conocer las propiedades del material que se adicionarán, por lo tanto, se recurre a pruebas de laboratorio para conocer las características del suelo natural y del producto Terrasil, materiales que componen este estudio, para así tener un criterio más amplio del comportamiento de un suelo tratado.

Por lo tanto, para la caracterización de los materiales (suelos) son necesarios los siguientes tipos de caracterización: física, mecánica. Para la caracterización son necesarios los ensayos de contenido de humedad, análisis granulométrico por tamizado, determinación del límite líquido, determinación del límite plástico e índice de plasticidad, compactación y capacidad portante CBR.

3.3 Ensayos de caracterización en suelos naturales

Se refiere a los ensayos físico-mecánicos y químicos para la caracterización del suelo sin tratar es decir el suelo sin agente estabilizador (sin los aditivos Terrasil y Zycobond) y se realizará los siguientes ensayos:

Tabla 3.1: Ensayos para caracterizar el suelo

Caracterización	Ensayo	Normativa
Física	Contenido de humedad	ASTM D2216
	Análisis Granulométrico por tamizado	ASTM D422 - AASHTO T88
	Determinación del límite líquido	ASTM D4318 AASHTO T89
	Determinación del límite plástico e índice de plasticidad	ASTM D4318 AASHTO T90
Mecánica	Ensayo de compactación (método Proctor Modificado)	ASTM D1557 AASHTO T180
	Determinación de la relación del valor de soporte del suelo (CBR)	ASTM D1883 AASHTO T193

Fuente:Elaboración propia

3.3.1 Contenido de humedad de la muestra (ASTM D2216)

El método tradicional de determinación de la humedad del suelo en laboratorio, es por medio del secado a horno, donde la humedad de un suelo es la relación expresada en porcentaje entre el peso del agua existente en una determinada masa de suelo y el peso de las partículas sólidas.

$$w(\%) = \frac{W_w}{W_{ss}} * 100$$

Donde:

$W(\%)$ = Contenido de humedad (%).

W_1 = Peso de la muestra húmeda más la cápsula.

W_2 = Peso de la muestra seca más la cápsula.

W_c = Peso de la cápsula o tara.

$W_w = (W_1 - W_2)$ = Peso del agua presente en el suelo.

$W_{ss} = (W_2 - W_c)$ = Peso del suelo después de secado al horno.

Figura 3.5: Determinación del contenido de humedad



Fuente: Elaboración propia

Resultados del contenido de humedad del suelo natural

Tabla 3.2: Resultados del contenido de humedad del suelo natural

N° Muestra	Progresiva	Contenido de humedad (%)
1	3+000	9
2	3+500	3
3	4+500	7

Fuente: Elaboración propia

3.3.2 Análisis granulométrico por tamizado (ASTM D422 - 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 2000 gr como peso total, se procede a realizar el lavado por la malla número 200 de acuerdo a la norma AASHTO-T88. Después que el suelo está seco se pesa y se procede al tamizado por la malla N°4, N°10, N° 40 y 200. 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.

Figura 3.6: Proceso para la granulometría del suelo (método lavado)



Fuente: Elaboración propia

Resultados:

Tabla 3.3: Resultados de la granulometría del suelo natural

Progresivas N°	3+000	3+500	4+500
Tamiz N°	% Que pasa	% Que pasa	% Que pasa
3"	100,00	100,00	100,00
2"	100,00	100,00	100,00
1 1/2"	100,00	100,00	100,00
1"	100,00	100,00	100,00
3/4"	100,00	100,00	100,00
1/2"	100,00	100,00	100,00
3/8"	100,00	100,00	100,00
N° 4	98,58	98,46	98,98
N° 10	96,34	96,64	96,88
N° 40	91,88	94,39	94,67
N° 200	81,60	84,58	77,17

Fuente: Elaboración propia

3.3.3 Determinación del límite líquido

Se determina mediante el método de la cuchara de casa grande. 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 150 g 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.

Figura 3.7: Proceso para determinar el límite líquido del suelo



Fuente: Elaboración propia

3.3.4 Determinación del límite plástico e índice de plasticidad

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 g. de muestra seca y filtrada a través del tamiz N°40, como en el caso anterior.

La diferencia entre el límite líquido y el límite plástico 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 Figura 3,8 se puede observar parte del desarrollo del ensayo del límite líquido y plástico.

Figura 3.8: Proceso para determinar el límite plástico del suelo



Fuente: Elaboración propia

Resultados:

Tabla 3.4: Resultados para los límites de consistencia del suelo

Progresivas N°	Límites de Atterberg		
	Límite Líquido (%)	Límite plástico (%)	Índice de plasticidad (%)
3+000	31	17	14
3+500	36	19	17
4+500	31	18	12

Fuente: Elaboración propia

3.3.5 Clasificación del suelo

En función a la granulometría, límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad se determina la clasificación del suelo en base a la normativa sistema de clasificación AASHTO.

Resultados:

Tabla 3.5: Resultados para la clasificación de los suelos en estudio

Progresivas	Clasificación AASHTO	Descripción
3+000	A-6 ₍₁₀₎	Arcilla inorgánica de baja a media plasticidad.
3+500	A-6 ₍₁₁₎	Arcilla inorgánica de baja a media plasticidad.
4+500	A-6 ₍₉₎	Arcilla inorgánica de baja a media plasticidad.

Fuente: Elaboración propia

3.3.6 Ensayo de compactación, método modificado (ASTM-1557 - AASHTO-T99)

El procedimiento de ensayo consiste en apisonar en 5 capas consecutivas una cantidad aproximadamente de 3 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.

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 25 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”.

Figura 3.9: Proceso para realizar el ensayo de compactación



Fuente: Elaboración propia

Resultados:

Tabla 3.6: Resultados de la compactación para los suelos en análisis

Progresiva N°	Prueba Próctor modificado	
	Densidad máxima del suelo seco (gr/cm ³)	Humedad óptima (%)
3+000	1,88	13,73
3+500	1,83	14,38
4+500	1,91	13,07

Fuente: Elaboración propia

3.3.7 Determinación de la relación de soporte del suelo en laboratorio

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.

Figura 3.10: Proceso para realizar el ensayo de CBR



Fuente: Elaboración propia

Resultados

Tabla 3.7: Resultados del ensayo de CBR para el suelo en análisis

Progresiva	C.B.R 100% de D. máx. (%)	C.B.R 95% de D. máx. (%)	Expansión (%)
3+500	3,52	2,70	4,41

Fuente: Elaboración propia

3.4 Especificaciones técnicas para la conformación de una subrasante

Los materiales para la conformación de la subrasante deben de tener ciertas características específicas, de modo a permitir la construcción de un macizo estable y adecuado soporte de pavimento.

Tabla 3.8: Especificaciones técnicas respecto al CBR y expansión

CBR mínimo requerido (%)	4
Expansión máxima requerida (%)	3

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.9: Clasificación y uso del suelo según el valor de CBR

CBR	Clasificación cualitativa del suelo	Uso
2-5	Muy mala	Sub-rasante
5-8	Mala	Sub-rasante
8-20	Regular - Buena	Sub-rasante
20-30	Excelente	Sub-rasante
30-60	Buena	Sub-base
60-80	Buena	Base
80-100	Excelente	Base

Fuente: Assis A. 1988

Consideraciones

De acuerdo a la Tabla 3.8 que establece valores mínimos y máximos de CBR y expansión, para suelos que puedan ser utilizables en subrasantes, se verifica según resultados obtenidos de los suelos en su estado natural que el mismo no es apto para ser utilizados, se aprecia también que los suelos entran en una clasificación “Muy mala” de acuerdo a tabla 21 clasificación de la subrasante (AASHTO), sacando conclusiones que el suelo necesita ser mejorado para que cumplan especificaciones técnicas en subrasantes.

3.5 Aplicación práctica

En este capítulo se realizará la aplicación de la investigación propuesta haciendo el uso de los aditivos Terrasil y Zycobond, luego de la selección de la muestra que fue elegida, que según AASHTO responde a la clasificación A-6, siendo este suelo el más desfavorable del tramo. El producto Terrasil y Zycobond tiene ya asignado sus porcentajes óptimos, pero con el propósito de analizar y encontrar la dosificación más óptima aplicados a suelos que tenemos en el medio local se determinó trabajar con distintas dosificaciones partiendo de un rango patrón establecido por la empresa que nos brindó los productos.

Luego de definir las distintas dosificaciones que serán añadidas, a las muestras estabilizadas se le ensayaron los siguientes ensayos límites de consistencia, determinación de la humedad óptima, densidad máxima y relación soporte california (CBR), para finalizar con un análisis y comentar si las propiedades se mantienen, disminuyen o sufrieron un incremento, es decir cuánto incrementaron o disminuyeron comparadas a las muestras sin estabilizar y verificar si después de ser estabilizadas cumplen con la normativa local como para ser utilizadas en una subrasante.

3.6 Referencia de resultados de la investigación realizada por Condori (2018)

Para corroborar que los datos o resultados de los cuales servirá como referencia para realizar esta investigación sean confiables se realizó la validación para 2 dosificaciones de Terrasil-suelo, el cual se trabajó con las dosificaciones que presentan resultados óptimos en dicha tesis. (Condori, 2018).

Tabla 3.10: Resultados de los valores para la validación de resultados

Suelo + Terrasil (kg/m³)	LL (%)	LP (%)	IP (%)	Clasificación AASHTO	D. Máx. (gr/cm³)	C.H.O. (%)	CBR (%)	Exp. (%)
Suelo natural	36,10	18,97	17,42	A-6 ₍₁₁₎	1,826	14,38	2,70	4,41
Suelo + 0,5T	35,73	19,57	16,16	A-6 ₍₁₀₎	1,833	14,15	3,00	3,80
Suelo + 0,75T	35,74	19,98	15,75	A-6 ₍₁₀₎	1,858	14,08	3,40	3,29
Suelo + 1T	33,90	18,61	15,11	A-6 ₍₁₀₎	1,865	13,85	5,49	3,06
Suelo + 2T	34,77	20,98	13,79	A-6 ₍₁₀₎	1,845	13,25	6,35	2,04

Fuente: Elaboración propia

3.7 Estudio de suelo - aditivos Terrasil y Zycobond

Una vez determinado las características del suelo natural, se desarrolló el estudio de la mezcla “suelo Terrasil – Zycobond” el cual es analizado a partir de los ensayos de límites de consistencia, compactación y CBR (Relación de Soporte de California).

Por lo tanto, lo que se busca es mejorar ciertas propiedades de la subrasante, lograr compactaciones dentro de la norma con menos pasadas mejorando el manejo del suelo para rangos más amplios de humedad óptima de compactación, reducción de expansión del suelo, reteniendo finos a largo plazo lo que produce menos grietas y baches, en dosis adecuadas puede incrementar los valores de CBR.

Para esto se someterá a la muestra con 12 diferentes dosificaciones de la combinación de Terrasil y Zycobond para determinar cómo varia su evolución entre una y otra prueba y con el análisis de todas las mezclas realizadas determinar un valor óptimo.

3.8 Proceso de dosificación para los aditivos Terrasil y Zycobond

Para mejorar de las capacidades estructurales del suelo, conforme a los parámetros mencionados anteriormente, los productos Terrasil y Zycobond se aplican como cualquier otra estabilización por vía húmeda, añadiendo los aditivos al agua usada para la compactación.

El proceso de dosificación será el siguiente:

1. Definir el contenido de Terrasil y Zycobond a aportar al suelo (kg/m^3).

C_t = contenido de Terrasil por metro cúbico).

Este parámetro suele ser de $0,3 \text{ kg}/\text{m}^3$ a $2 \text{ kg}/\text{m}^3$

Ejemplo: $C_t = 0,4 \text{ kg}/\text{m}^3$

2. Calcular el agua a aportar en cada momento al suelo (diferencia entre el contenido óptimo de humedad para la compactación y el contenido de humedad in situ.

H_a = Humedad de aporte por m^3

Ejemplo: Humedad óptima = 14%.

Humedad in-situ = 8%

Humedad a aportar = 14% - 8% = 6% = H_a %

Densidad máxima = $2000 \text{ kg}/\text{m}^3 = d$

$$Ha = HA\% * d = 6\% * 2000 \text{ kg/m}^3 = 120 \text{ litros}$$

3. Calcular el ratio de disolución del aditivo en el agua de compactación:

$$\text{Ratio} = Ha/ct = 120 / 0,4 = 300$$

Es decir, se añade en el depósito 1 litro de aditivo por cada 300 litros de agua, este ratio suele estar entre 1:50 y 1:600.

3.9 Evaluación del suelo Terrasil – Zycobond

La evaluación se la realiza en base a los siguientes ensayos:

Tabla 3.11: Ensayos para evaluar el suelo con adición de los aditivos en análisis

Ensayo	Normativa
Determinación del límite líquido	ASTM D4318 AASHTO T89
Determinación del límite plástico e índice de plasticidad	ASTM D4318 AASHTO T90
Ensayo de compactación (método Proctor Modificado)	ASTM D422 AASHTO T272
Determinación de la relación del valor de soporte del suelo (CBR)	ASTM D1883 AASHTO T193

Fuente: ASTM y AASHTO

3.10 Resultados del suelo estabilizado con los aditivos Terrasil y Zycobond

3.10.1 Ensayo de límites de consistencia

Para determinar los ensayos de límites de consistencia se sigue el mismo procedimiento que se utilizó en la caracterización de las muestras de suelos naturales, con la única diferencia de que se añade los aditivos a diferentes dosificaciones.

A continuación, se presenta la tabla de resultados del suelo en estudio estabilizado con los aditivos Terrasil y Zycobond, las dosificaciones se dividieron en 3 grupos manteniendo constante las dosis de Terrasil (0,5T-0,75T-1T-2T) y haciendo variar la dosis del aditivo Zycobond:

Tabla 3.12: Resultados para los límites de consistencia para dosis máx. y mín. de zy

Dosis (suelo+Zycobond) (kg/m³)	LL (%)	LP (%)	IP (%)
Suelo + 0,25Zy	36,23	19,44	16,79
Suelo + 1,5Zy	34,84	19,72	15,12

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.13: Resultados del ensayo límite de consistencia para las dosis de T+Zy

Dosificación	Suelo + Terrasil y Zycobond (kg/m³)	LL (%)	LP (%)	IP (%)
1.T+Z	Suelo + 0,5T+0,25Zy	35,36	19,49	16,66
2.T+Z	Suelo + 0,75T+0,25Zy	34,74	20,72	14,02
3.T+Z	Suelo + 1T+0,25Zy	33,94	20,55	13,39
4.T+Z	Suelo + 2T+0,25Zy	31,31	18,84	12,94
5.T+Z	Suelo + 0,5T+0,75Zy	34,39	19,10	15,29
6.T+Z	Suelo + 0,75T+0,75Zy	34,01	20,21	13,80
7.T+Z	Suelo + 1T+0,75Zy	34,23	20,92	13,66
8.T+Z	Suelo + 2T+0,75Zy	32,58	19,07	13,51
9.T+Z	Suelo + 0,5T+1,5Zy	34,12	19,95	13,67
10.T+Z	Suelo + 0,75T+1,5Zy	32,47	20,37	12,10
11.T+Z	Suelo + 1T+1,5Zy	34,25	20,86	13,23
12.T+Z	Suelo + 2T+1,5Zy	33,17	20,58	12,59

Fuente: Elaboración propia

3.10.2 Resultados del ensayo de compactación a diferentes dosis de T y Zy

Tabla 3.14: Resultados del ensayo de compactación para dosis mín. y máx. de Zy

Dosis (suelo+zycobond) (kg/m ³)	Densidad (gr/cm ³)	Humedad Ópt. (%)
Suelo + 0,25Zy	1,832	14,54
Suelo + 1,5Zy	1,830	14,26

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.15: Resultados del ensayo de compactación para distintas dosis de T y Zy

Dosificación	Suelo + Terrasil y Zycobond (kg/m ³)	Densidad (gr/cm ³)	Hum. Ópt. (%)
1.T+Z	Suelo + 0,5T+0,25Zy	1,845	13,48
2.T+Z	Suelo + 0,75T+0,25Zy	1,873	13,26
3.T+Z	Suelo + 1T+0,25Zy	1,881	13,59
4.T+Z	Suelo + 2T+0,25Zy	1,854	13,83
5.T+Z	Suelo + 05T+0,75Zy	1,859	13,56
6.T+Z	Suelo + 0.75T+0,75Zy	1,869	13,14
7.T+Z	Suelo + 1T+0,75Zy	1,864	13,50
8.T+Z	Suelo + 2T+0,75Zy	1,848	13,57
9.T+Z	Suelo + 0,5T+1,5Zy	1,841	12,67
10.T+Z	Suelo + 0,75T+1,5Zy	1,859	12,74
11.T+Z	Suelo + 1T+1,5Zy	1,849	13,35
12.T+Z	Suelo + 2T+1,5Zy	1,844	12,28

Fuente: Elaboración propia

3.10.3 Resultados del ensayo CBR para las diferentes dosis de T y Zy.

Tabla 3.16: Resultados del ensayo CBR para dosis mín. y máx. de Zy

Dosis (suelo+Zycobond) (kg/m³)	CBR (%)	Expansión (%)
Suelo + 0,25Zy	2,87	4,02
Suelo + 1,5Zy	3,32	3,85

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.17: Resultados del ensayo CBR para distintas dosis de T y Zy

Dosificación	Suelo + Terrasil y Zycobond (kg/m³)	CBR (%)	Expansión (%)
1.T+Z	Suelo + 0,5T+0,25Zy	4,19	3,60
2.T+Z	Suelo + 0,75T+0,25Zy	5,71	2,74
3.T+Z	Suelo + 1T+0,25Zy	7,88	2,24
4.T+Z	Suelo + 2T+0,25Zy	7,78	2,54
5.T+Z	Suelo + 0,5T+0,75Zy	3,85	3,41
6.T+Z	Suelo + 0,75T+0,75Zy	4,95	2,20
7.T+Z	Suelo + 1T+0,75Zy	7,53	2,01
8.T+Z	Suelo + 2T+0,75Zy	5,94	1,95
9.T+Z	Suelo + 0,5T+1,5Zy	3,48	2,99
10.T+Z	Suelo + 0,75T+1,5Zy	4,70	1,77
11.T+Z	Suelo + 1T+1,5Zy	6,60	1,80
12.T+Z	Suelo + 2T+1,5Zy	6,24	1,60

Fuente:Elaboración propia

CAPÍTULO IV
ANÁLISIS Y COMPARACIÓN
DEL SUELO ESTABILIZADO CON
LOS ADITIVOS TERRASIL Y
ZYCOBOND

CAPÍTULO IV

ANÁLISIS Y COMPARACIÓN DEL SUELO ESTABILIZADO CON LOS ADITIVOS TERRASIL Y ZYCOBOND

4. Análisis de resultados

4.1 Análisis y comprobación de resultados para el suelo tratado con Terrasil

Se realizará un análisis para ver si los valores obtenidos del suelo tratado con Terrasil presenta variación con respecto a los valores de apoyo que se están tomando como referencia.

Tabla 4.1: Resultados para el suelo tratado con Terrasil y Zycobond

Dosificación	LL (%)	LP (%)	IP (%)	Clasificación AASHTO	D. Máx. (gr/cm ³)	C.H.O. (%)	CBR (%)	Exp. (%)
SN	36,10	18,97	17,42	A-6 ₍₁₁₎	1,83	14,4	2,7	4,4
0,5T	35,73	19,57	16,16	A-6 ₍₁₀₎	1,83	14,2	3,0	3,8
0,75T	35,74	19,98	15,75	A-6 ₍₁₀₎	1,86	14,1	3,4	3,3
1T	33,90	18,61	15,11	A-6 ₍₁₀₎	1,87	13,8	5,5	3,1
2T	34,77	20,98	13,79	A-6 ₍₁₀₎	1,84	13,3	6,4	2,0

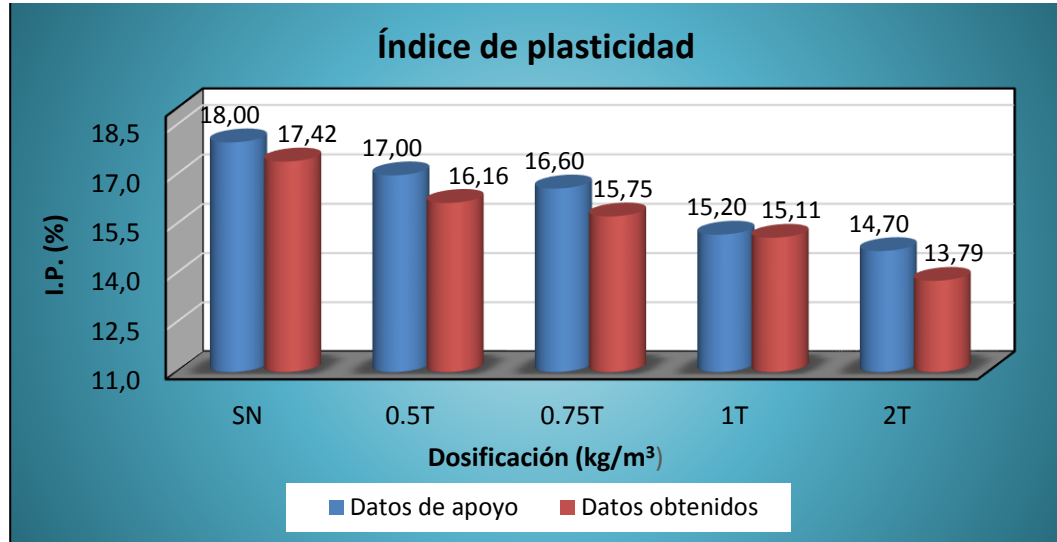
Fuente: Elaboración propia

Tabla 4.2: Datos obtenidos del trabajo de investigación de apoyo

Dosificación	LL (%)	LP (%)	IP (%)	Clasificación AASHTO	D. Máx. (gr/cm ³)	C.H.O. (%)	CBR (%)	Exp. (%)
SN	36,30	18,30	18,00	A-6 ₍₁₁₎	1,81	14,5	2,4	3,9
0,5T	37,20	20,20	17,00	A-6 ₍₁₀₎	1,82	14,2	3,2	3,4
0,75T	35,80	19,20	16,60	A-6 ₍₁₀₎	1,82	13,8	3,7	3,0
1T	34,60	19,50	15,20	A-6 ₍₁₀₎	1,83	13,5	5,5	2,6
2T	35,10	20,40	14,70	A-6 ₍₁₀₎	1,84	12,9	6,2	2,4

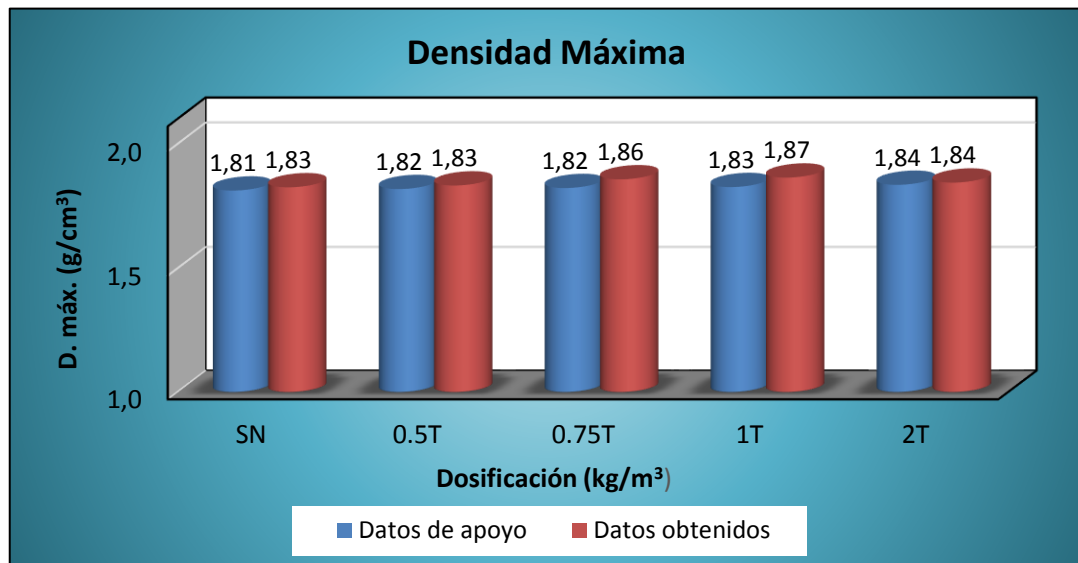
Fuente: Condori, (2018)

Figura 4.1: Comparación de los valores de I.P. obtenidos con los valores de apoyo



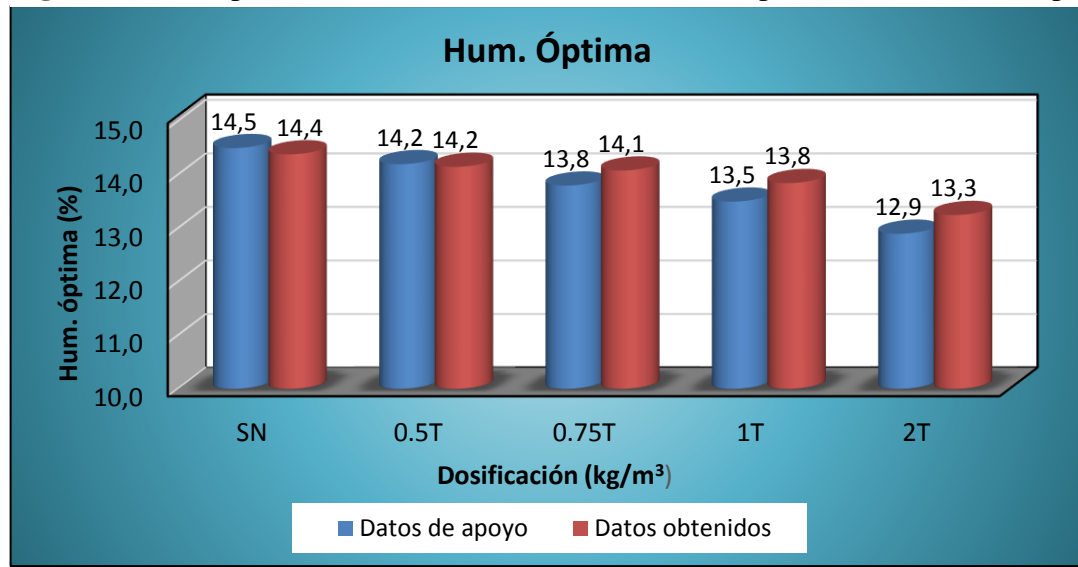
Fuente: Elaboración propia

Figura 4.2: Comparación de los valores de densidad obtenidos con los datos de apoyo



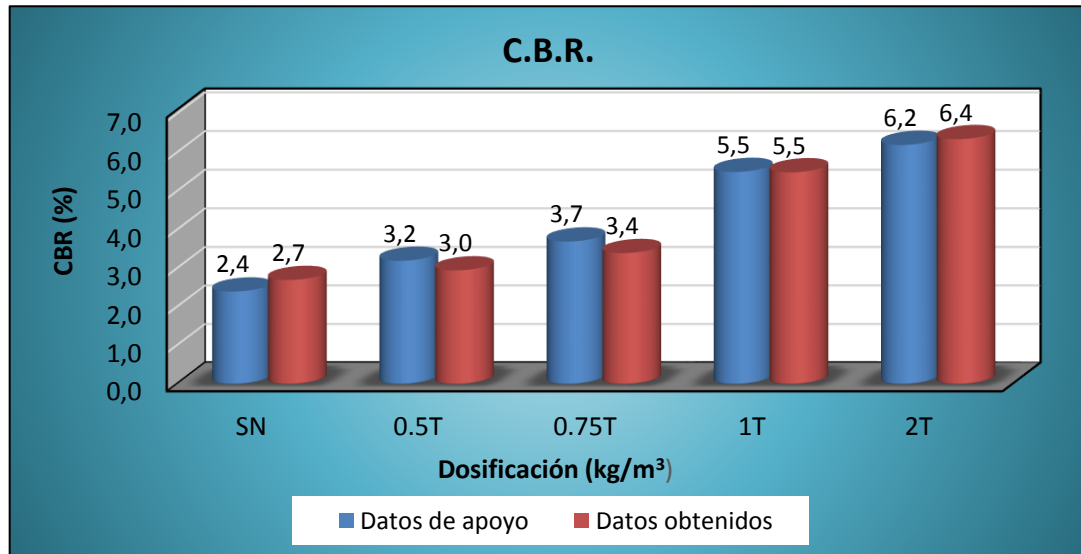
Fuente: Elaboración propia

Figura 4.3: Comparación de los valores obtenidos de H. ópt. con los valores de apoyo



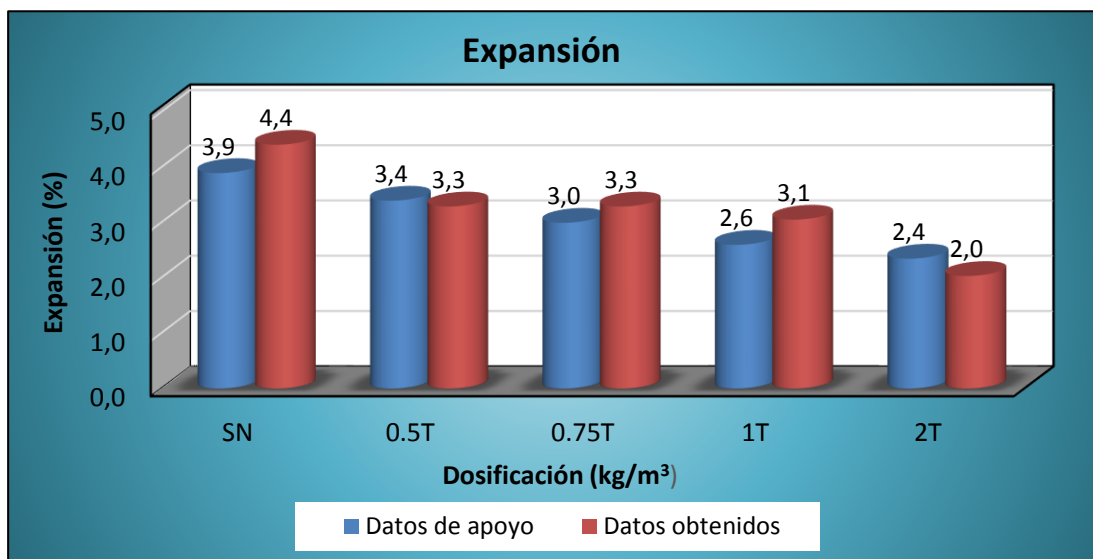
Fuente: Elaboración propia

Figura 4.4: Comparación de los valores obtenidos de C.B.R. con los valores de apoyo



Fuente: Elaboración propia

Figura 4.5: Comparación de valores obtenidos para exp. con los valores de apoyo



Fuente: Elaboración propia

En las Figura 4.1, 4.2, 4.3, 4.4 y 4.5 se puede ver como los datos obtenidos en laboratorio no varían mucho con respecto a los datos con los cuales nos estamos apoyando para realizar esta investigación, de esta manera comprobamos que estos valores son confiables para realizar este trabajo de investigación y así proceder a realizar las distintas combinaciones con el aditivo Zycobond.

4.2 Análisis de resultados de valores obtenidos para las distintas combinaciones

Después de presentar los resultados de los ensayos realizados a la muestra de suelo sin estabilizar y estabilizada, se presentan ahora una tabla general de los resultados obtenidos para cada uno de los ensayos realizados para proceder a su respectivo análisis en cuanto a los cambios producidos en la muestra estudiada al ser mezclada con dichos aditivos.

4.3 Resultados del suelo estabilizado con diferentes dosificaciones

Tabla 4.3: Representación de las distintas dosificaciones para las gráficas

Dosificación	Suelo + Terrasil y Zycobond (kg/m ³)
SN	Suelo natural
0,25Zy	Suelo + 0,25Zy
1,5Zy	Suelo + 1,5Zy
1.T+Z	Suelo + 0,5T+0,25Zy
2.T+Z	Suelo + 0,75T+0,25Zy
3.T+Z	Suelo + 1T+0,25Zy
4.T+Z	Suelo + 2T+0,25Zy
5.T+Z	Suelo + 0,5T+0,75Zy
6.T+Z	Suelo + 0,75T+0,75Zy
7.T+Z	Suelo + 1T+0,75Zy
8.T+Z	Suelo + 2T+0,75Zy
9.T+Z	Suelo + 0,5T+1,5Zy
10.T+Z	Suelo + 0,75T+1,5Zy
11.T+Z	Suelo + 1T+1,5Zy
12.T+Z	Suelo + 2T+1,5Zy

Fuente: Elaboración propia

Tabla 4.4: Resultados obtenidos para las distintas dosificaciones

Dosificación	LL (%)	LP (%)	IP (%)	Clasificación	Densidad (gr/cm³)	C.H.O. (%)	CBR (%)	Exp. (%)
SN	36,05	18,97	17,42	A6 ₍₁₁₎	1,826	14,38	2,70	4,41
0,25Zy	36,23	19,44	16,79	A6 ₍₁₁₎	1,832	14,54	2,87	4,02
1,5Zy	34,84	19,72	15,12	A6 ₍₁₀₎	1,830	14,26	3,32	3,85
1.T+Z	35,36	19,49	16,66	A6 ₍₁₀₎	1,845	13,48	4,19	3,60
2.T+Z	34,74	20,72	14,02	A6 ₍₁₀₎	1,873	13,26	5,71	2,74
3.T+Z	33,94	20,55	13,39	A6 ₍₉₎	1,881	13,59	7,88	2,24
4.T+Z	31,31	18,84	12,94	A6 ₍₉₎	1,854	13,83	7,78	2,54
5.T+Z	34,39	19,10	15,29	A6 ₍₁₀₎	1,859	13,56	3,85	3,41
6.T+Z	34,01	20,21	13,80	A6 ₍₁₀₎	1,869	13,14	4,95	2,20
7.T+Z	34,23	20,92	13,66	A6 ₍₉₎	1,864	13,50	7,53	2,01
8.T+Z	32,58	19,07	13,51	A6 ₍₉₎	1,848	13,57	5,94	1,95
9.T+Z	34,12	19,95	13,67	A6 ₍₁₀₎	1,841	12,67	3,48	2,99
10.T+Z	32,47	20,37	12,10	A6 ₍₁₀₎	1,859	12,74	4,70	1,77
11.T+Z	34,25	20,86	13,23	A6 ₍₉₎	1,849	13,35	6,60	1,80
12.T+Z	33,17	20,58	12,59	A6 ₍₉₎	1,844	12,28	6,24	1,60

Fuente: Elaboración propia

4.4 Análisis de resultados de las propiedades del suelo natural

El suelo en estudio que corresponde a la progresiva 3+500 procedente del tramo de la comunidad de Obrajes, realizado todos los ensayos correspondientes para la caracterización del suelo nos indica que es un suelo arcilloso con material fino con muy poca presencia de arena y por lo tanto no tiene nada de material granular.

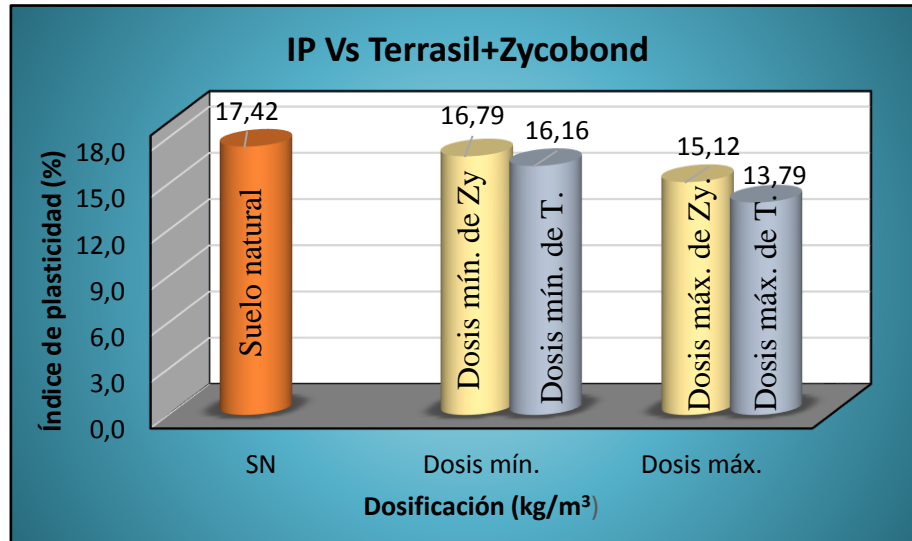
En función al índice plasticidad, la granulometría e índice de grupo se clasificó el suelo con la designación A-6₍₁₁₎, según la clasificación AASHTO.

Realizando el ensayo de C.B.R. para este tipo de suelo arcilloso el resultado fue un valor muy bajo el cual no cumple con las especificaciones para ser utilizada para una subrasante en el paquete de pavimentos, por el cual se pretende mejorar a través de la estabilización con los aditivos Terrasil y Zycobond.

4.5 Análisis de resultados de la influencia de los aditivos en el suelo natural

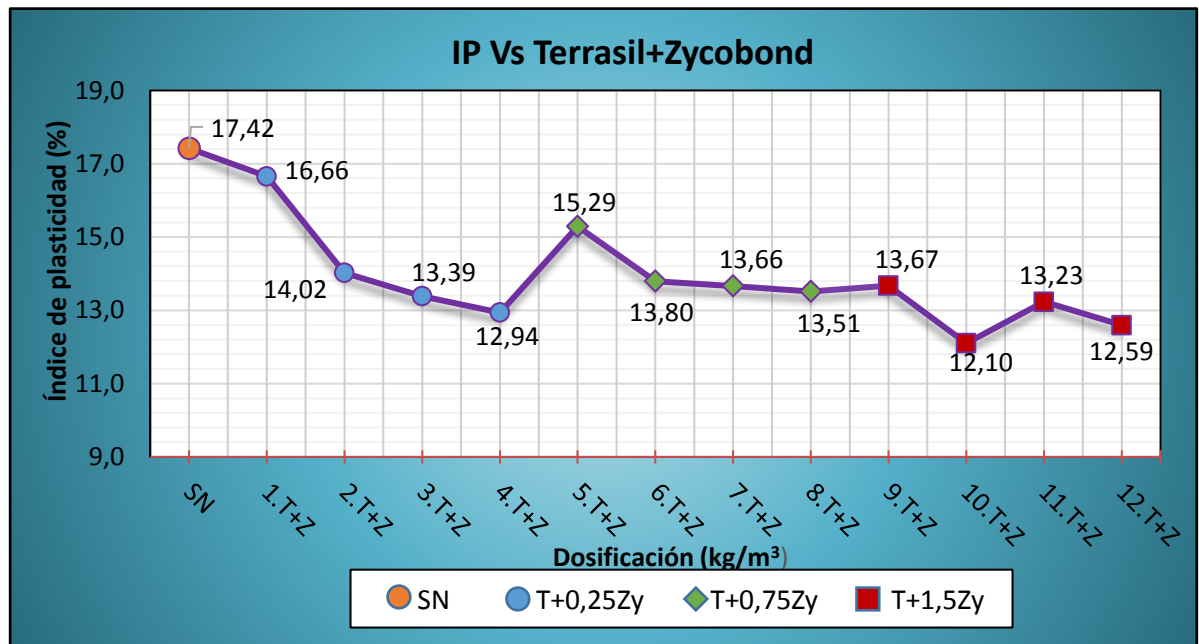
4.5.1 Índice de plasticidad

Figura 4.6: Variación del IP para dosis máx. y mín. de T y Zy



Fuente: Elaboración propia

Figura 4.7: Variación del índice de plasticidad para diferentes dosis de Zy



Fuente: Elaboración propia

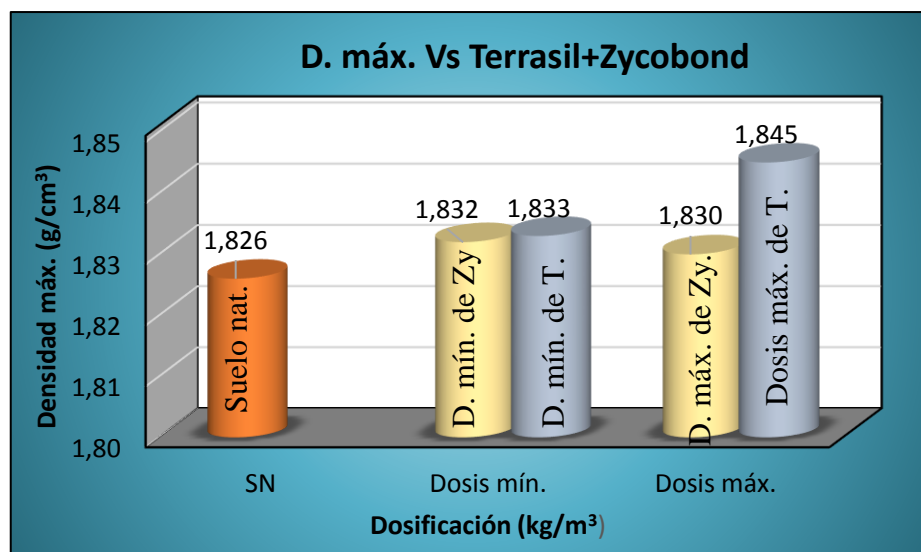
En la Figura 4.6 se puede observar que el suelo al ser estabilizado solo con el aditivo Zycobond presenta una leve disminución en el índice de plasticidad y comparado con solo estabilizar el suelo con Terrasil se observa que dicho aditivo disminuye más el índice de plasticidad.

La Figura 4.7 presenta el comportamiento del suelo estabilizado con combinaciones de Terrasil y Zycobond en dosis mínimas (marcador azul), intermedias (marcador verde) y máximas (marcador rojo) de Zycobond para cada dosis de Terrasil correspondiente a dosis de 0,5 – 0,75 - 1 y 2 kg/m³. En los tres grupos se muestra una disminución gradual mientras se van aumentando las dosis de los aditivos.

De manera general de acuerdo a la Tabla 4.4 se puede ver que a medida que se aumenta las dosificaciones el límite líquido reduce, mientras que el límite plástico aumenta provocando así que el índice de plasticidad presente una disminución entre 4% y 30% respecto al suelo natural, lo cual indica que el suelo cambia a un estado menos plástico, provocando que también el suelo presente cambios volumétricos menores en comparación con el suelo natural ante la presencia de agua. Estos resultados significarían a menor índice de plasticidad mayor CBR y menor expansión ayudando mejor al comportamiento de la subrasante en campo.

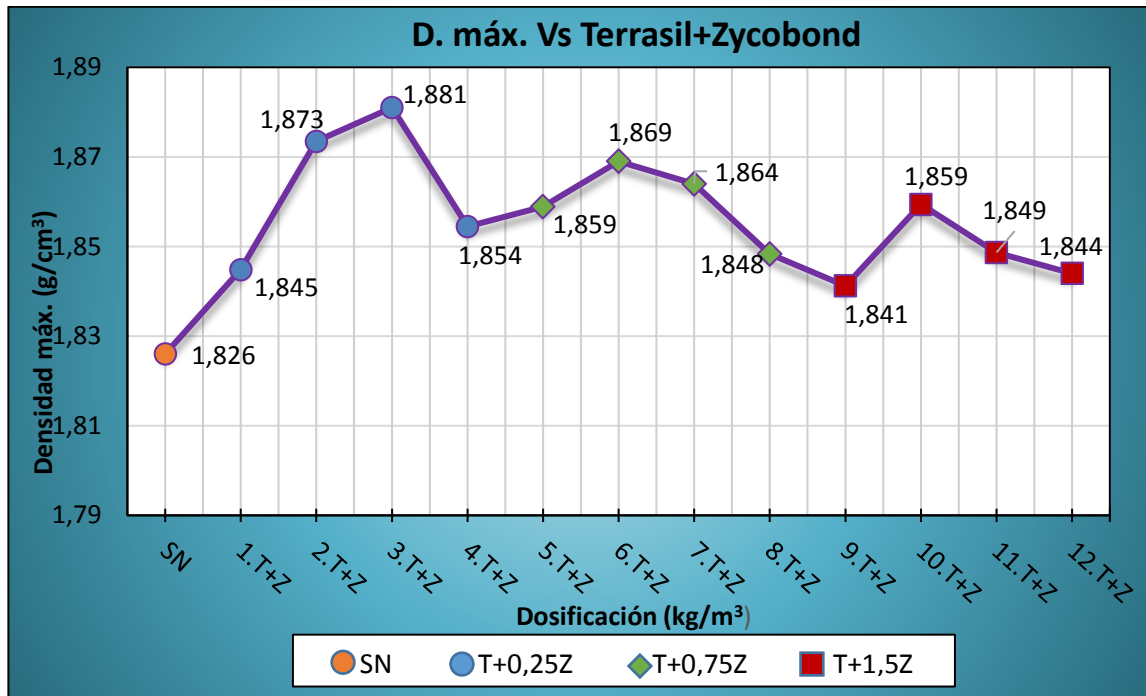
4.5.2 Densidad y humedad óptima

Figura 4.8: Variación de la densidad para dosis mín. y máx. de Zycobond



Fuente: Elaboración propia

Figura 4.9: Variación de la densidad para distintas dosis de Zy



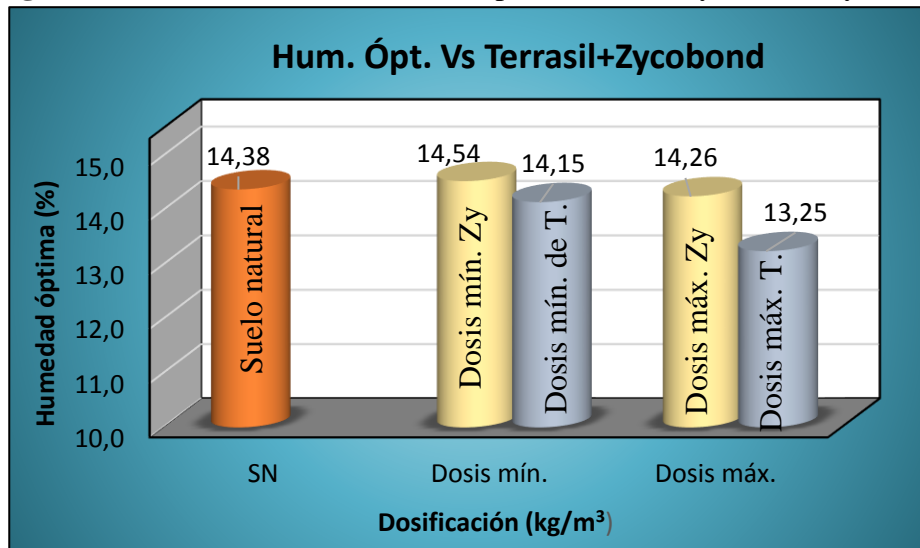
Fuente: Elaboración propia

En la Figura 4.8 que muestra el comportamiento del suelo en cuanto a densidades con dosis mínimas y máximas de Zycobond se puede ver que las densidades presentan un leve aumento respecto al suelo natural. Comparado con solo estabilizar con el aditivo Terrasil se puede notar que el suelo presenta mejores resultados.

En la Figura 4.9 se muestra el comportamiento del suelo para dosis variables de Terrasil en combinación con dosis mínimas, intermedias y máximas de Zycobond, se puede observar que a medida que se incrementan las dosis las densidades tienden a aumentar y de la misma manera para dosis de mayor proporción de ambos aditivos presentan una disminución de la densidad, esto puede ser debido a la floculación que sufre el suelo al ser sometido a dosis de gran proporción de aditivos.

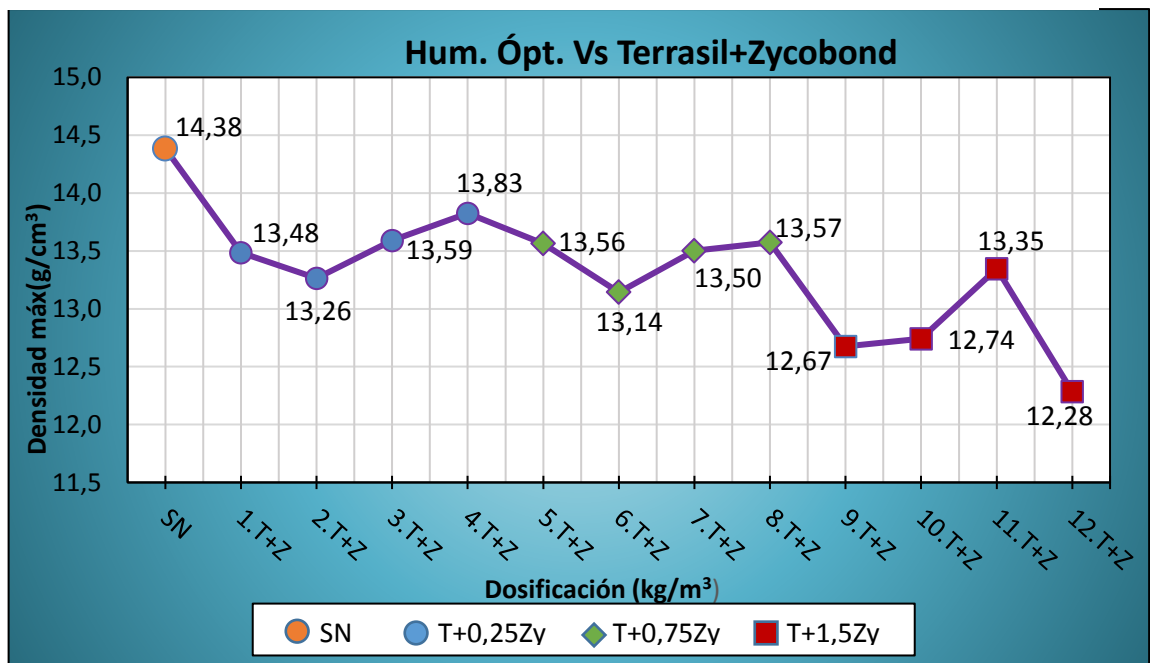
Humedad óptima:

Figura 4.10: Variación de la humedad para dosis mín. y máx de Zy



Fuente: Elaboración propia

Figura 4.11: Variación de la humedad para distintas dosis de Zy



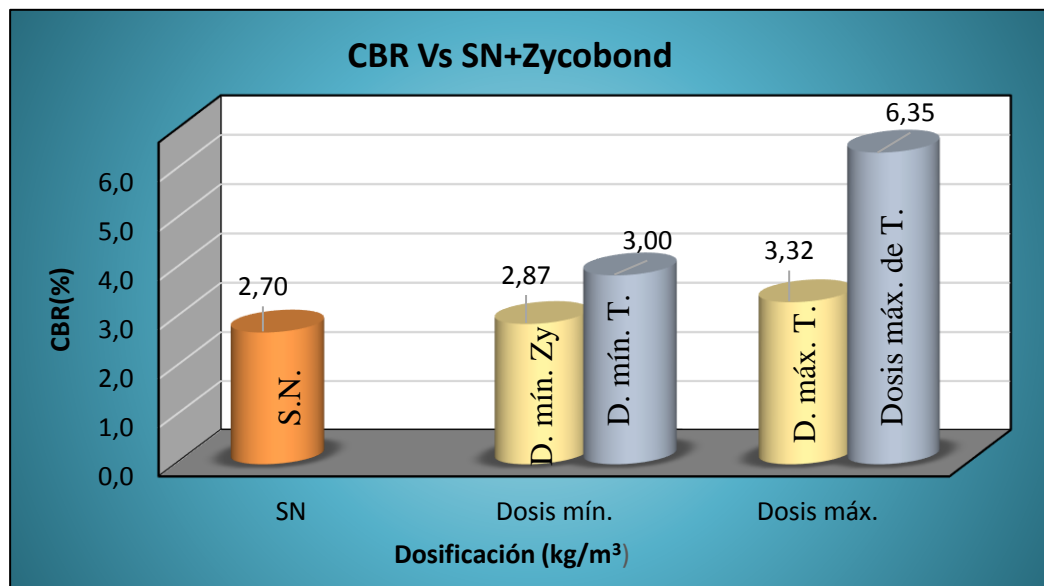
Fuente: Elaboración propia

En la Figura 4.10 que muestra el comportamiento del suelo en cuanto a humedades estabilizado con dosis mínimas y máximas de Zycobond, se puede ver para el primer caso un aumento leve de la humedad y para el segundo caso presenta una disminución leve, haciendo notar que para dosis mínimas de Zycobond presenta un aumento en cuanto a la humedad y para dosis máximas presenta una disminución de la misma. Para dosis mínimas y máximas de Terrasil en comparación con las dosis mínimas y máximas de Zycobond se puede notar que el Terrasil provoca una disminución más notable de la humedad.

En la Figura 4.11 se muestra el comportamiento del suelo estabilizado con la combinación de Terrasil y dosis mínimas, intermedias y máximas de Zycobond, se puede ver de manera general que a medida que van aumentando las dosificaciones las humedades tienden a disminuir respecto al suelo natural. Se puede notar que a medida que aumenta la densidad las humedades disminuyen, lo cuales son resultados positivos para la estabilización.

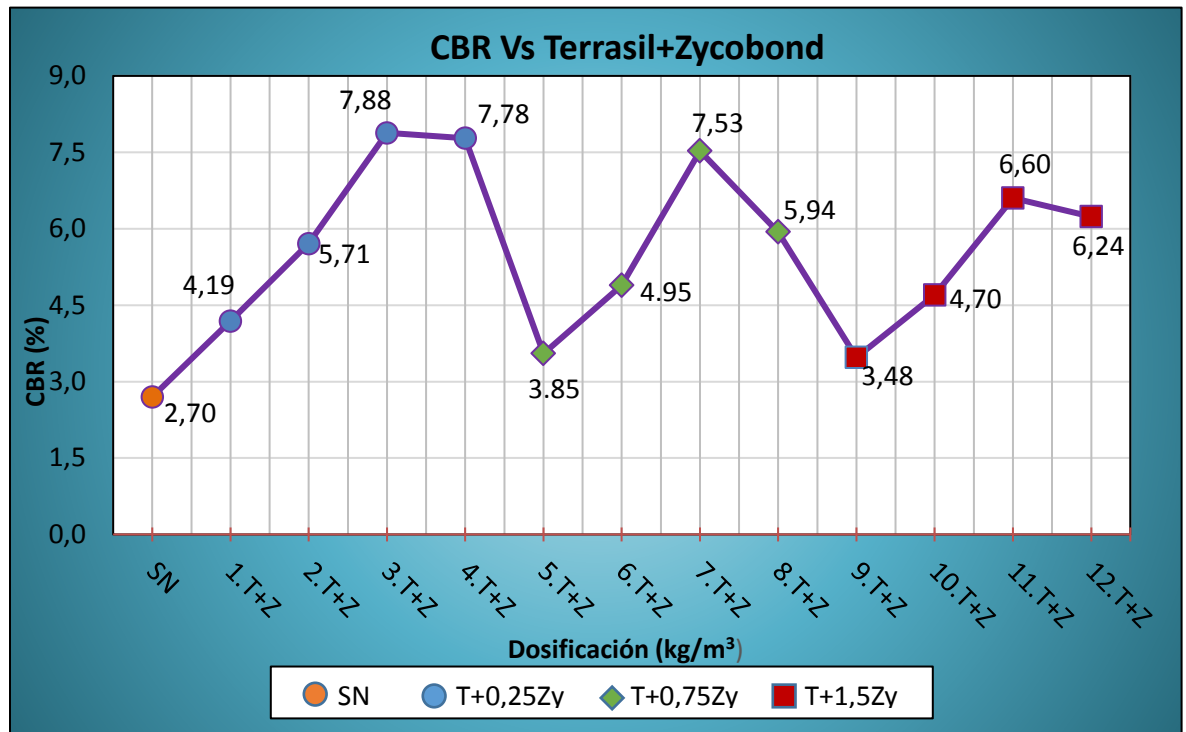
4.5.3 Capacidad de soporte de carga (CBR)

Figura 4.12: Variación del valor del CBR con dosis mín y máx de Zy



Fuente: Elaboración propia

Figura 4.13: Variación del valor del CBR con distintas dosis de Zy ante el T



Fuente: Elaboración propia

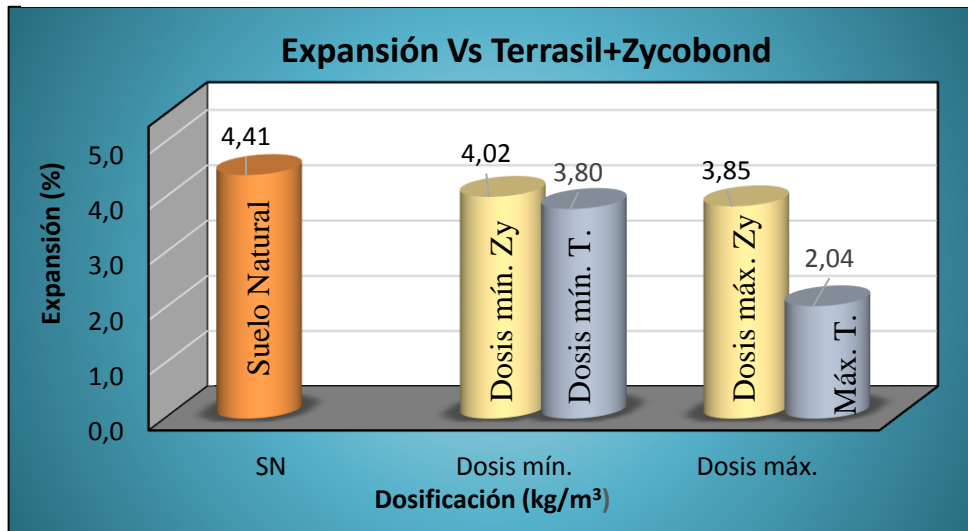
En la Figura 4.12 que muestra el comportamiento del suelo tratado con dosis mínimas y máximas de Zycobond, se observa que presenta un aumento leve en la capacidad portante del suelo confirmando así la teoría de que solo trabajar con Zycobond no obtendremos resultados positivos.

En la Figura 4.13 se muestra el comportamiento del suelo tratado con la combinación de Terrasil y Zycobond con dosis mínimas, intermedias y máximas, se observa que a medida que vamos aumentando las dosis el valor de CBR tiende a aumentar respecto al suelo natural. Pero también se puede notar que al aumentar la proporción de los aditivos de manera exagerada el valor de CBR tiende a disminuir.

De manera general se puede apreciar que mientras vamos aumentando la dosificación el valor de soporte va aumentando hasta un 190% el valor inicial del suelo natural, alcanzando así un valor aceptable de CBR para ser aplicado el suelo para una subrasante según normativa local.

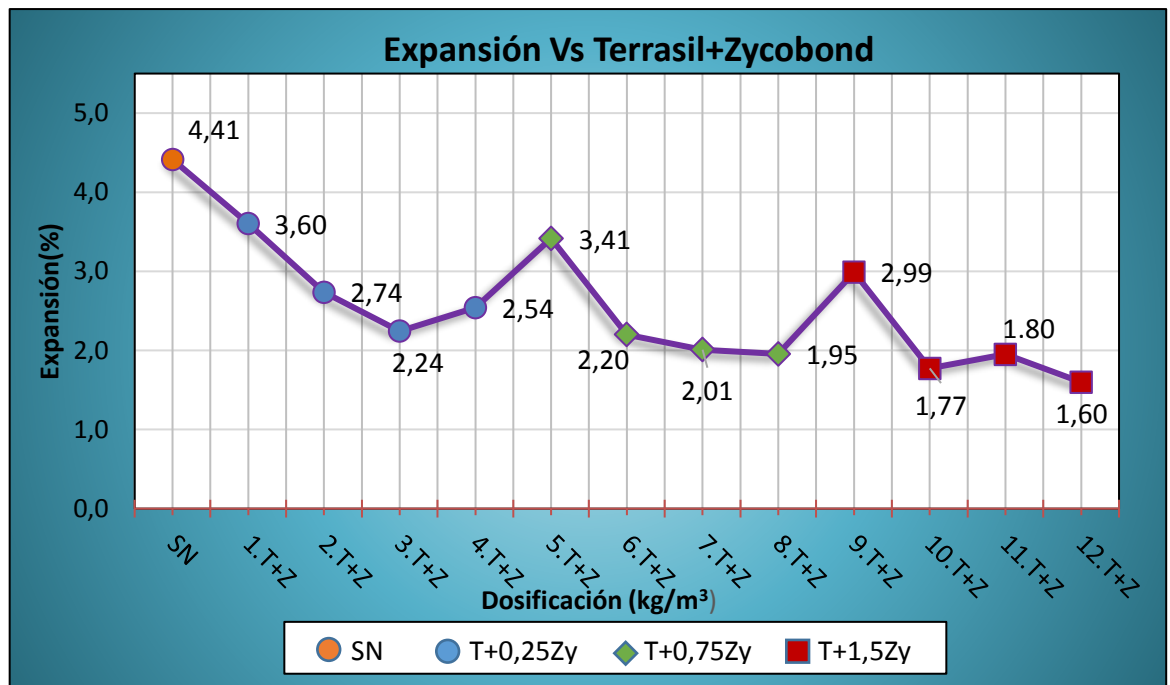
4.5.4 Expansión

Figura 4.14: Variación de la expansión con dosis mín y máx de Zy



Fuente: Elaboración propia

Figura 4.15: Variación de la expansión con dosis mín. int. y máx. de Zy



Fuente: Elaboración propia

En la Figura 4.14 que muestra el comportamiento del suelo tratado con dosis mínima y máxima de Zycobond, se observa una leve disminución de la expansión a medida que se incrementa la dosis de dicho aditivo. También se muestra el comportamiento del suelo tratado con dosis mínimas y máximas de Terrasil y se observa que presenta resultados más favorables con respecto a tratar el suelo con Zycobond.

En la Figura 4.15 muestra el comportamiento del suelo tratado con la combinación de aditivos Terrasil y Zycobond en dosis ya mencionadas, se observa una disminución considerable en la expansión del suelo. De igual manera para dosis intermedias y máximas de Zycobond combinado con Terrasil se puede ver una disminución de la expansión a medida que se incrementan las proporciones de Terrasil, estas disminuciones en expansión son debido a que el suelo al entrar en contacto con los aditivos forma una capa impermeabilizante lo cual evita el ingreso del agua a la estructura del suelo.

4.6 Influencia del aditivo Zycobond en el aditivo Terrasil

Para realizar un análisis más detallado de los aditivos (en especial del aditivo Zycobond) se cambiará el orden de las dosificaciones con el fin de comparar la influencia del producto Zycobond en el suelo y Terrasil.

4.6.1 Índice de plasticidad

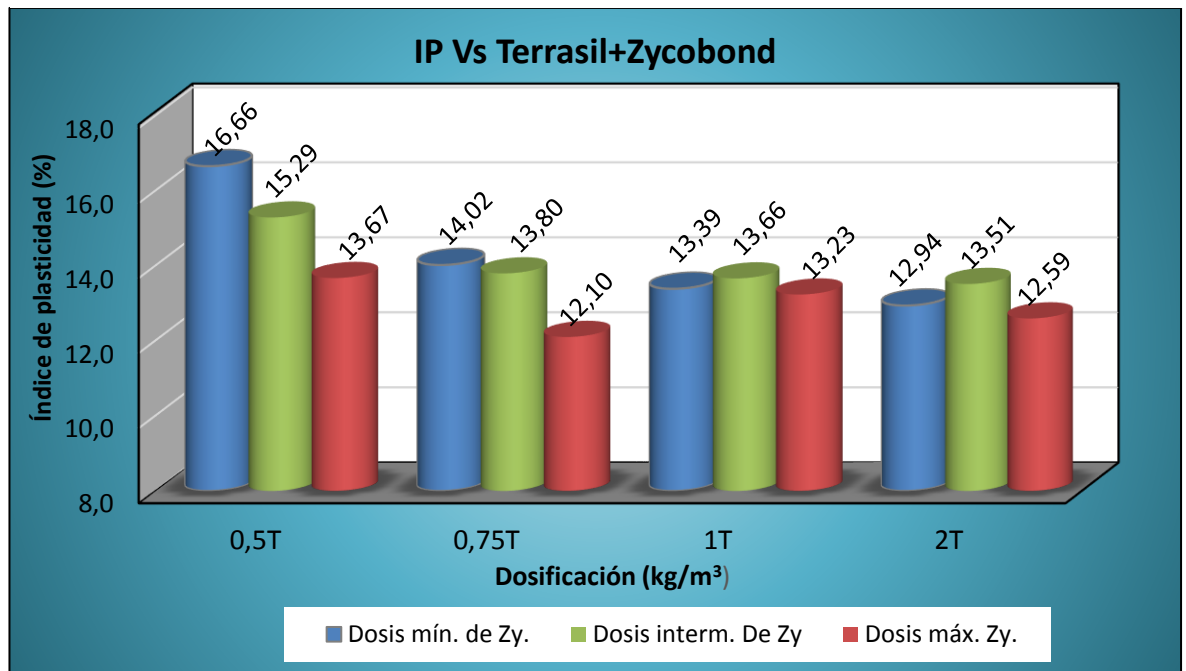
La presente tabla muestra la reagrupación que se realizó con el fin de analizar la influencia del aditivo Zycobond en la mezcla suelo-Terrasil, las dosificaciones de Zycobond se las realiza para dosis mínimas y máximas del mismo:

Tabla 4.5: Identificación para cada grupo a analizar en las gráficas

Designación	Suelo + Terrasil y Zycobond (kg/m³)
0.5T	Suelo + 0,5T+0,25Zy
	Suelo + 0,5T+0,75Zy
	Suelo + 0,5T+1,5Zy
0.75T	Suelo + 0,75T+0,25Zy
	Suelo + 0,75T+0,75Zy
	Suelo + 0,75T+1,5Zy
1T	Suelo + 1T+0,25Zy
	Suelo + 1T+0,75Zy
	Suelo + 1T+1,5Zy
2T	Suelo + 2T+0,25Zy
	Suelo + 2T+0,5Zy
	Suelo + 2T+1,5Zy

Fuente: Elaboración propia

Figura 4.16: Variación del IP con dosis mín. interm. y máx. de Zy



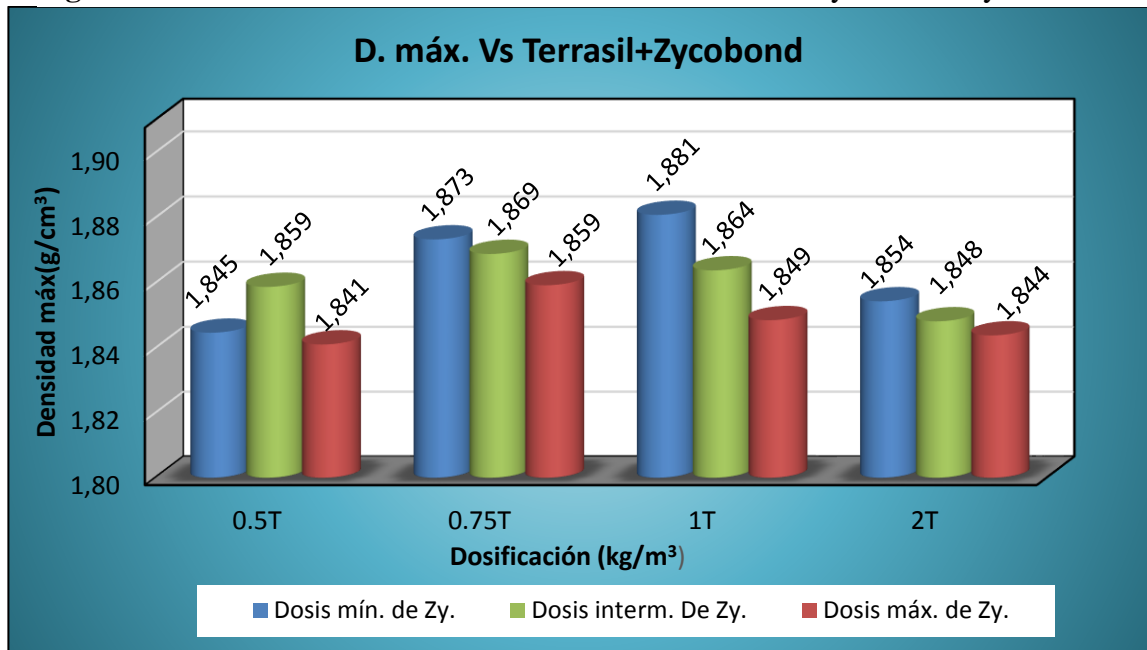
Fuente: Elaboración propia

En la Figura 4.16 se puede observar que a dosificaciones mayores de Zycobond dan mejores resultados respecto a las dosificaciones menores e intermedias de Zycobond, ya que este presenta una disminución mayor del índice de plasticidad.

Se puede notar también que la dosificación “0,75T+1,5Zy” es la que redujo más el índice de plasticidad con respecto al suelo natural, nos da a entender que la mejor combinación es que el Terrasil tenga menor proporción que el Zycobond.

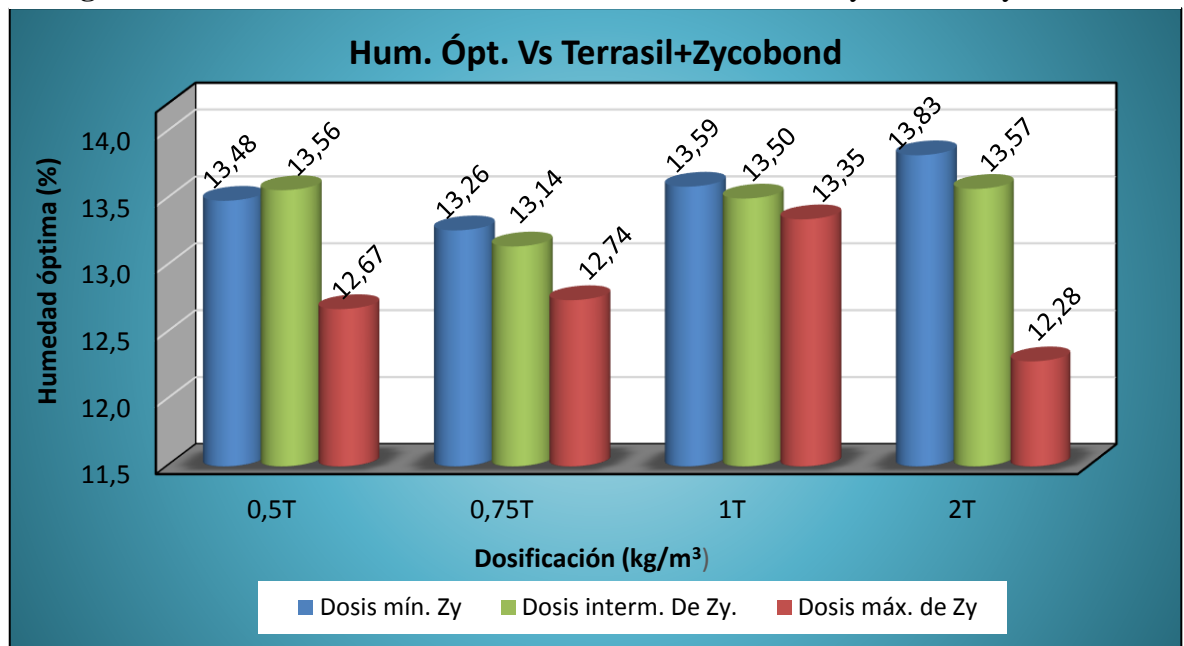
4.6.2 Densidad máxima y humedad óptima

Figura 4.17: Variación de la densidad con dosis mín. interm. y máx. de Zy ante el T



Fuente: Elaboración propia

Figura 4.18: Variación de la humedad con dosis mín. interm. y máx. de Zy ante el T



Fuente: Elaboración propia

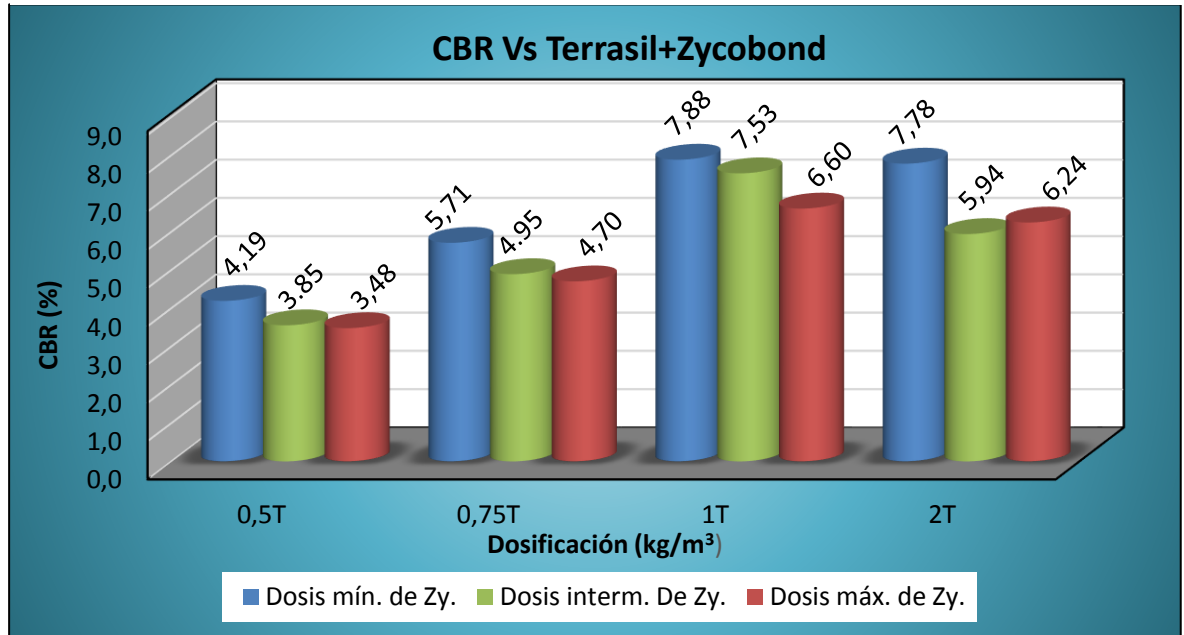
En la Figura 4.17 se puede evidenciar que las dosificaciones mínimas de Zycobond dan buenos resultados en las densidades, ya que casi en todos los casos las densidades correspondientes a dosificaciones mínimas de Zycobond tienden a aumentar con respecto a las dosificaciones intermedias y máximas de Zycobond.

En la Figura 4.18 se observa el gráfico de la variación de las humedades, se puede notar que a dosificaciones mínimas de Zycobond la humedad tiende a aumentar con respecto a las dosificaciones intermedias y máximas del mismo, la explicación que se puede dar para esta tendencia de aumento de humedad es que hubo una demanda creciente de agua por parte de varios cationes y partículas del suelo arcilloso para someterse a la hidratación. La ventaja del aumento de la humedad óptima del suelo es que permite lograr una fácil compactación con el suelo húmedo, por lo tanto, hay menos necesidad de secar el suelo para reducir el contenido de humedad antes de la compactación en campo. Pero con respecto a la humedad del suelo natural tiende a disminuir las humedades para cada dosificación.

En el caso donde el suelo a dosificaciones máximas de Zycobond, presenta densidades menores con respecto a las dosificaciones mínimas de Zycobond, se debe a que las partículas de arcilla floculadas y aglomeradas ocupan espacios más grandes, lo que conduce a una disminución correspondiente en la densidad seca.

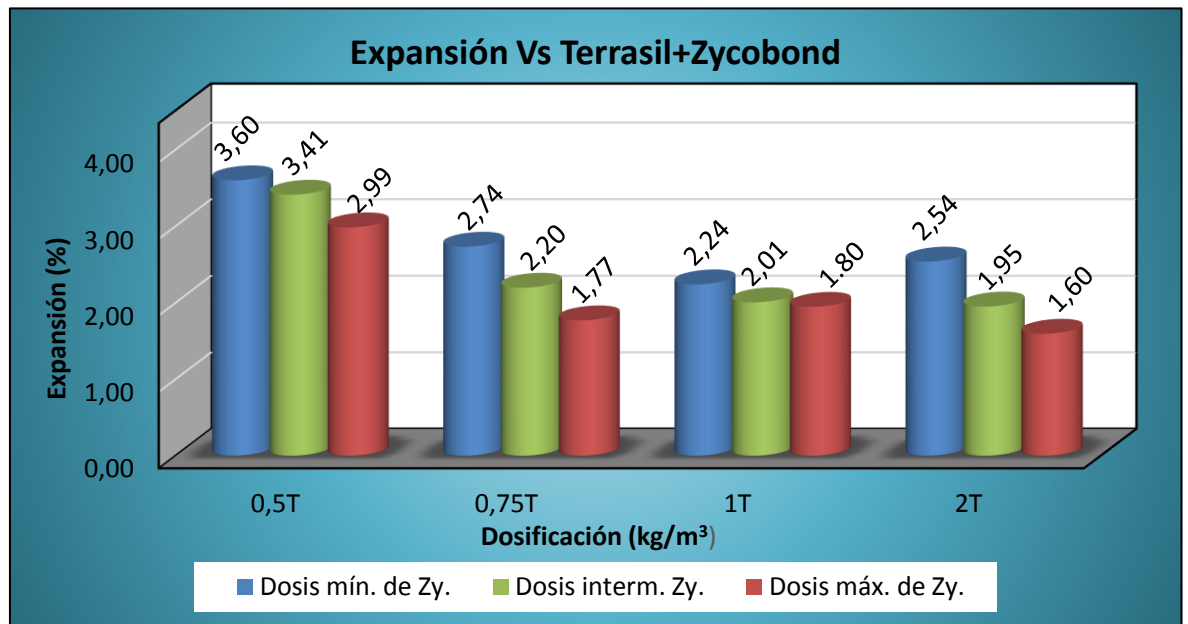
4.6.3 CBR y expansión

Figura 4.19: Valor de CBR con dosis mín. interm. y máx. de Zy ante el T



Fuente: Elaboración propia

Figura 4.20: Variación de la expansión con dosis mín. y máx. de Zy



Fuente: Elaboración propia

En la Figura 4.19 muestra una comparación de usar dosis mínimas intermedias y máximas de Zycobond combinado con dosis ascendentes de Terrasil, en la gráfica se observa que el grupo de dosis mínimas de Zycobond presenta resultados más favorables con respecto a las dosificaciones máximas de Zycobond

En la Figura 4.20 se puede ver que a dosificaciones de mayor proporción de Zycobond el suelo presenta mejores resultados respecto a su expansión, esto debido a que el Zycobond ayuda repeler el agua y por ende reduce la expansión.

4.7 Comparación de la influencia del Zycobond en el aditivo Terrasil

De acuerdo a los valores obtenidos para la estabilización del suelo se hizo la comparación de cuanto aumenta o disminuye las propiedades del suelo con respecto a solo utilizar el Terrasil para la estabilización o incluir el aditivo Zycobond.

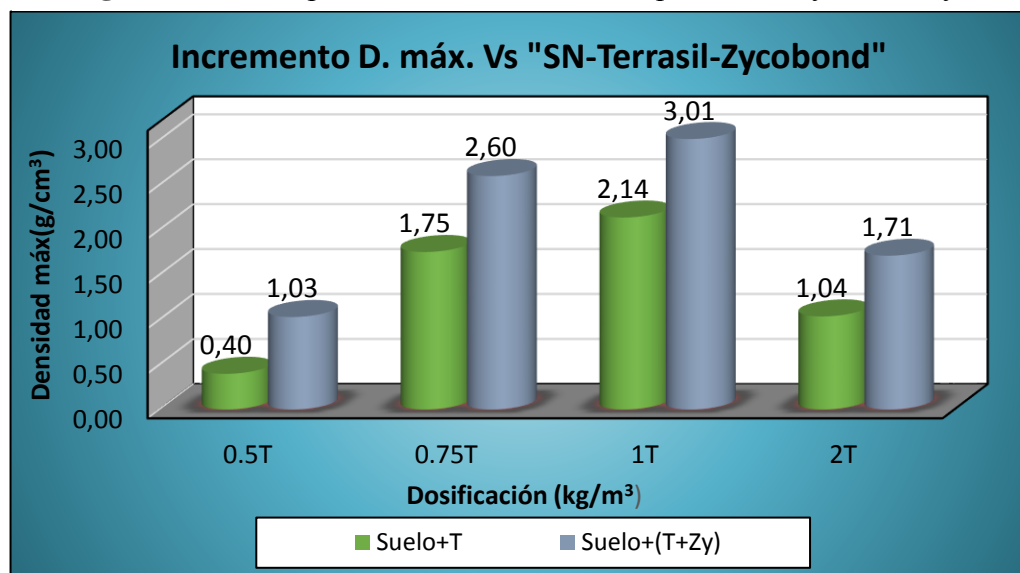
Determinación del incremento del valor de la densidad debido a la influencia del Zycobond en el Terrasil

Tabla 4.6: Comparación del tratamiento “S+T” y “S+T+Zy”

Suelo-Terrasil			Suelo-Terrasil-Zycobond		
Dosificación (kg/m ³)	Densidad (g/cm ³)	Incremento (%)	Dosificación (kg/m ³)	Densidad (g/cm ³)	Incremento (%)
SN	1,826	0,00	SN	1,826	0,00
0,5T	1,833	0,40	0,5T+0,25Zy	1,845	1,03
0,75T	1,858	1,75	0,75T+0,25Zy	1,873	2,60
1T	1,865	2,14	1T+0,25Zy	1,881	3,01
2T	1,845	1,04	2T+1,5Zy	1,844	1,71

Fuente: Elaboración propia

Figura 4.21: Comparación de las densidades para “S+T” y “S+T+Zy”



Fuente: Elaboración propia

En la Figura 4.21 se observa de manera clara como el incluir el aditivo Zycobond en la mezcla suelo-Terrasil influye mucho en la mejora de las propiedades del suelo natural, en este caso vemos que en términos de porcentajes aumentó los beneficios en cuanto a densidad.

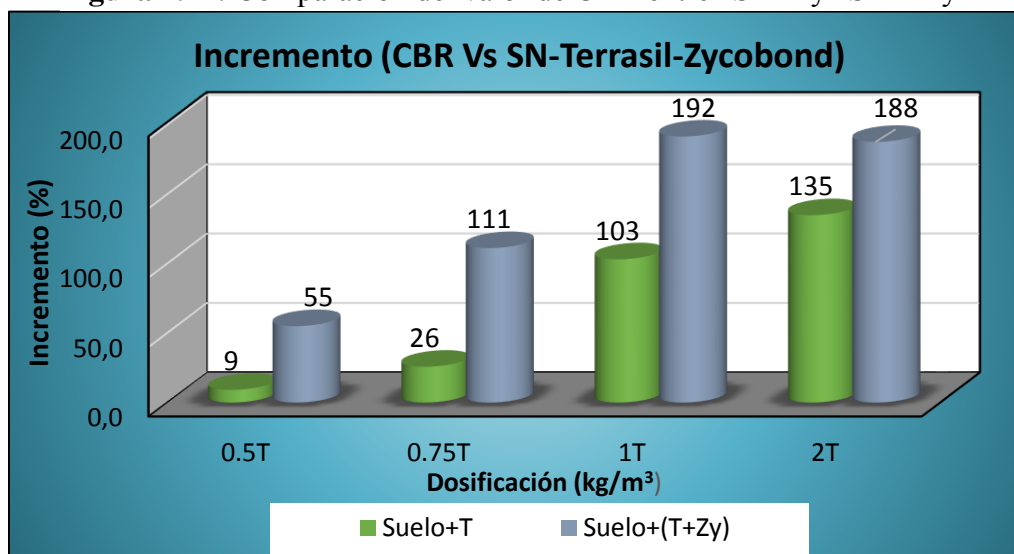
Determinación del incremento del valor del CBR debido a la influencia del Zycobond en el Terrasil

Tabla 4.7: Comparación del valor de CBR para “S+T” y “S+T+Zy”

Suelo-Terrasil			Suelo-Terrasil-Zycobond		
Dosificación (kg/m³)	CBR (%)	Incremento (%)	Dosificación (kg/m³)	CBR (%)	Incremento (%)
SN	2,70	0.00	SN	2,70	0.00
0,5T	2,95	9	0,5T+0,25Zy	4,19	55
0,75T	3,40	26	0,75T+0,25Zy	5,71	111
1T	5,49	103	1T+0,25Zy	7,88	192
2T	6,35	135	2T+0,25Zy	7,78	188

Fuente: Elaboración propia

Figura 4.22: Comparación del valor de CBR entre “S+T” y “S+T+Zy”



Fuente: Elaboración propia

En la Figura 4.22 se observa también que el Zycobond al ser mezclado con el Terrasil mejora más aun la resistencia del suelo en comparación con el suelo estabilizado solo con Terrasil, esto debido a la propiedad impermeabilizante y generadora de cohesión del Zycobond ayuda a la resistencia del suelo.

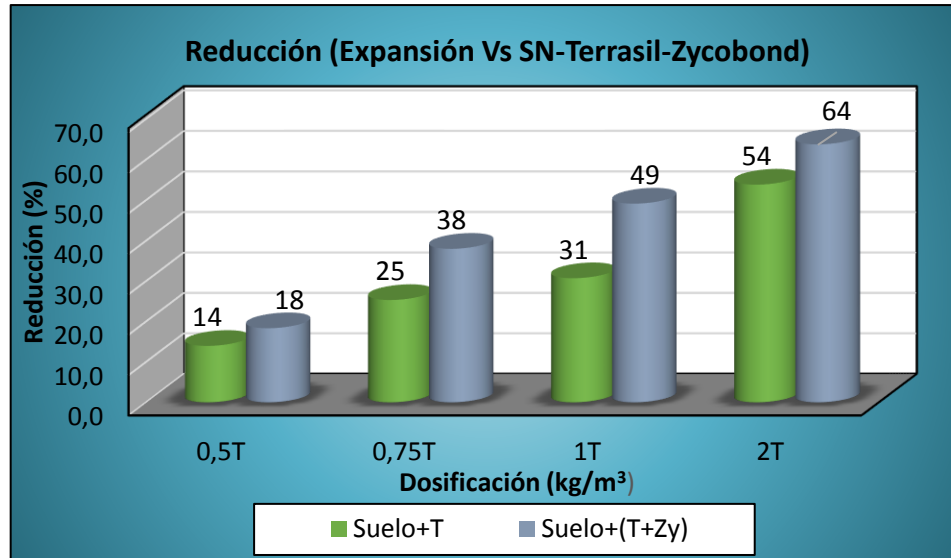
Determinación del incremento del valor de la expansión debido a la influencia del aditivo Zycobond en el Terrasil

Tabla 4.8: Comparación de la expansión entre el tto. “S+T” y “S+T+Zy”

Suelo-Terrasil			Suelo-Terrasil-Zycobond		
Dosificación (kg/m³)	Expansión (%)	Reducción (%)	Dosificación (kg/m³)	Expansión (%)	Reducción (%)
SN	4,41	0,00	SN	4,41	0,00
0,5T	3,80	14	0,5T+0,25Zy	3,60	18
0,75T	3,29	25	0,75T+0,25Zy	2,74	38
1T	3,06	31	1T+0,25Zy	2,24	49
2T	2,04	54	2T+1,5Zy	1,60	64

Fuente: Elaboración propia

Figura 4.23: Comparación de la expansión del suelo con diferentes tratamientos

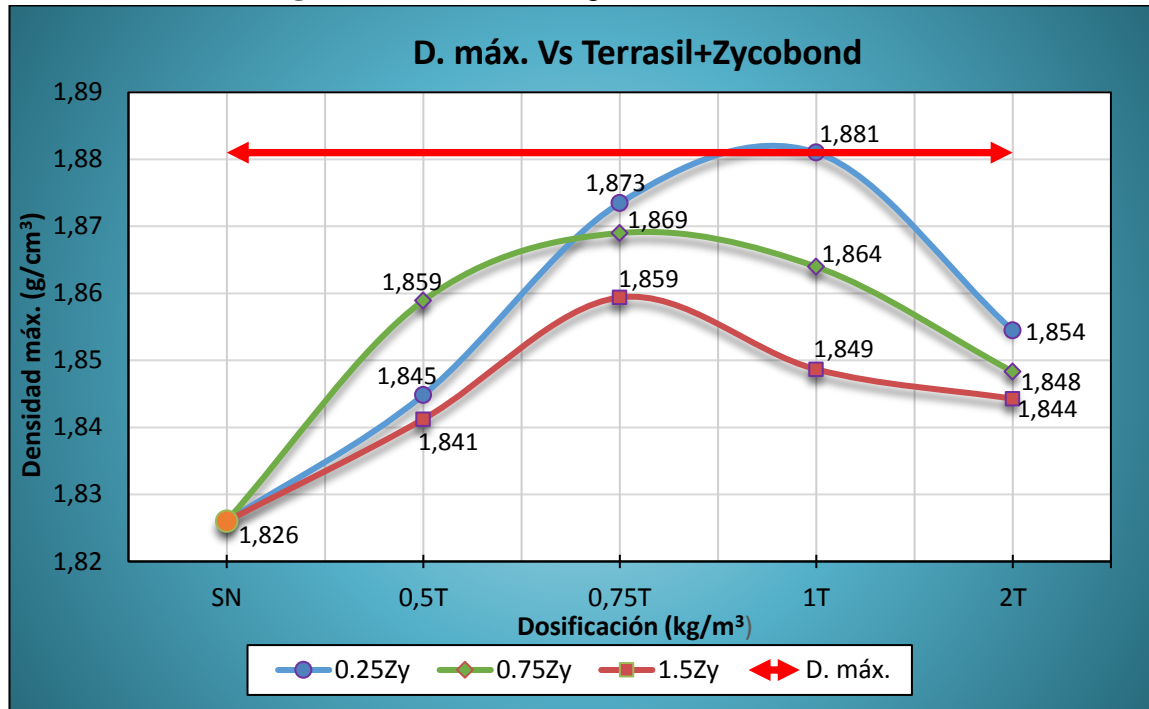


Fuente: Elaboración propia

Para el caso de la expansión se puede observar en la Figura 4.23 que también presenta mejoras con respecto a solo utilizar el aditivo Terrasil en el tratamiento del suelo, las mejoras son considerables porque aumentan desde un 14% a 26% con respecto al suelo tratado solo con Terrasil.

4.8 Determinación del % óptimo de la combinación de los aditivos T y Zy

Figura 4.24: Resultados generales de densidades



Fuente: Elaboración propia

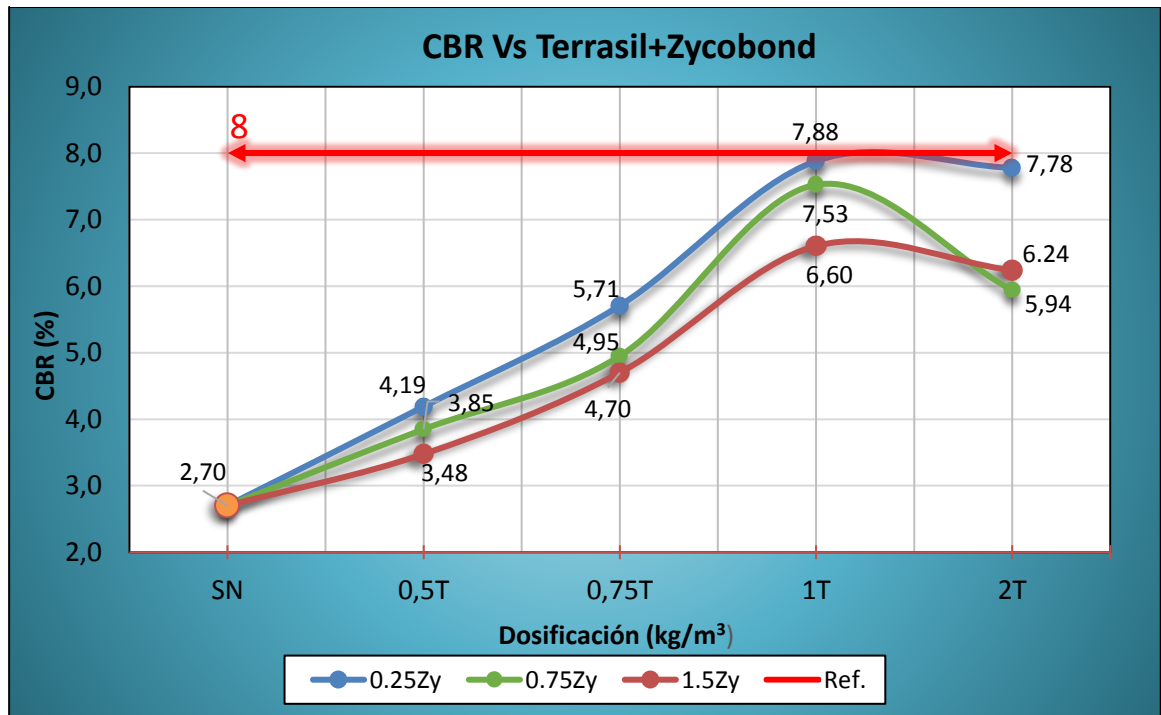
La Figura 4.24 muestra los resultados generales de todas las dosificaciones planteadas tanto de la combinación de Terrasil con dosis mínimas de Zycobond que se muestran en la línea de color azul, como también de la combinación de Terrasil con dosis intermedias que se representa con la línea verde y también la combinación de Terrasil con dosis máximas de Zycobond que se representa en la línea de color rojo. La combinación que consiste en la combinación de “1T+0,25Zy”, presenta un resultado más sobresaliente respecto a las otras, lo cual indica que dicha combinación logra el mejor reacomodo de las partículas de suelo logrando así que el mismo aumente su densidad y por ende su resistencia.

Tabla 4.9: Clasificación cualitativa del suelo según valores de CBR

CBR	Clasificación cualitativa del suelo	Uso
2-5	Muy mala	Sub-rasante
5-8	Mala	Sub-rasante
8-20	Regular - Buena	Sub-rasante
20-30	Excelente	Sub-rasante
30-60	Buena	Sub-base
60-80	Buena	Base
80-100	Excelente	Base

Fuente: Elaboración propia

Figura 4.25: Resultados generales para el valor de CBR

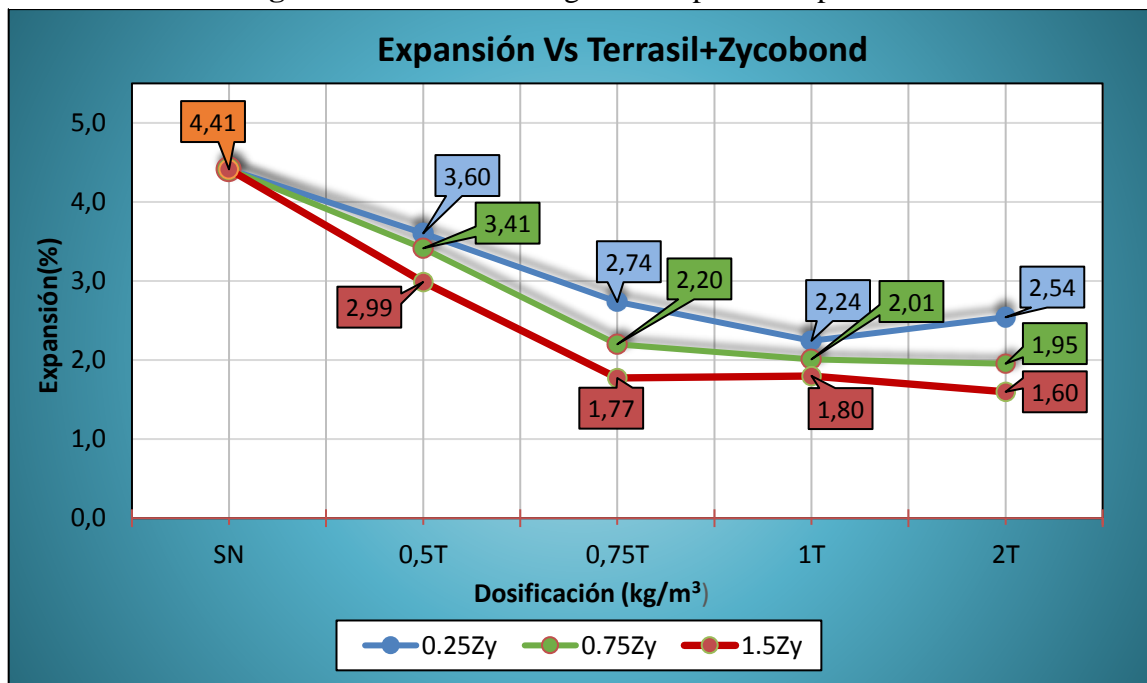


Fuente: Elaboración propia

La Figura 4.25 muestra los resultados generales de todas las dosificaciones planteadas tanto de la combinación de Terrasil con dosis mínimas de Zycobond que se muestran en

la línea de color azul, como también de la combinación de Terrasil con dosis intermedias de Zycobond que se muestra en la línea de color verde y la combinación de Terrasil con dosis máximas de Zycobond representada en la línea de color rojo. De igual manera que para la densidad se observa que la dosificación “1T+0,25Zy” presenta un resultado más favorable para el suelo respecto a las otras dosificaciones, aumentando el valor del CBR de 2,7% a 7,88% y de este modo provoca que la subrasante pase de una clasificación de “muy mala” a “regular” según la Tabla 4.9, esto resulta muy favorable ya que la norma exige que el valor mínimo de CBR del suelo para ser aplicado a una subrasante sea de 4% y el suelo analizado llega casi al 8%.

Figura 4.26: Resultados generales para la expansión



Fuente: Elaboración propia

En cuanto a la expansión también la dosificación “1T+0,25T” presenta resultados favorables para el suelo reduciendo el valor de la expansión de 4,41% a 2,24% esto debido a la propiedad impermeabilizante que presentan los aditivos.

De acuerdo al análisis realizado se puede concluir que la dosificación óptima es la “1T+0,25Zy”, que consiste en aplicar 1 kg/m³ de Terrasil combinado con 0,25 kg/m³ de Zycobond para un metro cúbico de suelo expresado en peso, esta combinación provoca el

mejor reacomodo de las partículas del suelo resultando así una estructura más densa, resistente y con una reducción en la expansión.

4.9 Comparación de los aditivos T y Zy con otro producto estabilizante (cal)

Para la comparación de los aditivos en estudio con otro producto que en este caso será la cal, se realizará un análisis evaluando la trabajabilidad y el costo que conlleva trabajar con uno u otro producto.

4.9.1 Estabilización de la subrasante tratado con Terrasil y Zycobond

Proceso constructivo sobre subrasante existente:

Paso 1: Escarificación a una profundidad de 15 cm del suelo existente a estabilizar, para ello se hará el uso de una motoniveladora.

Figura 4.27: Proceso de escarificación



Fuente: ECOROAD S.A

Paso 2: Llenado de agua al tanque de almacenamiento de la cisterna y aportación de los aditivos diluido en agua a la dosificación calculada. Las posibles pérdidas de esta agua por evaporación en la manipulación y tiempo de trabajo, e infiltración, podrá ser adicionada en la dilución o en forma separada

Figura 4.28: Llenado de agua a la cisterna junto con los aditivos



Fuente: ECOROAD S.A.

Paso 3: Regado de la disolución de agua, Terrasil y Zycobond sobre el suelo previamente escarificado.

Figura 4.29: Regado del tramo a estabilizar



Fuente: ECOROAD S.A.

Paso 4: Mezclado del suelo a estabilizar.

El mezclado debe ser homogéneo, en toda la superficie, en un espesor constante y ejecutado en un tiempo tal, que permita lograr la compactación, para la cual se dispone de un tiempo previamente determinado, dadas por la reacción de endurecimiento de la mezcla al producirse la reacción química.

Figura 4.30: Mezclado del suelo con el aditivo



Fuente: ECOROAD

Paso 4: Nivelación y perfilación, formación de bombeos y cunetas naturales.

Figura 4.31: Nivelación y perfilación



Fuente: ECOROAD

Paso 5: Compactación

Se realiza la compactación hasta alcanzar la densidad del proyecto, el equipo adecuado para la compactación es el rodillo liso vibratorio, se puede emplear también el rodillo “pata de cabra”, dependiendo de las características del suelo.

Figura 4.32: Compactación del suelo



Fuente: ECOROAD

Paso 6: Cuidado de la estabilización

Durante los primeros días siguientes a la estabilización, se debe cuidar que el suelo tratado no varíe su humedad, de tal forma que, si se produce evaporación superficial del suelo estabilizado químicamente, deberá hacerse riego de agua con o sin aditivo, por un período determinado.

En el caso que se tenga un aumento de la humedad superficial, por ejemplo, por precipitaciones, se deberá especificar claramente las limitaciones y cuidados en la construcción y restricciones de tránsito por un cierto periodo de tiempo.

4.9.2 Estabilización de la subrasante natural tratado con cal

Proceso constructivo sobre subrasante existente:

Paso 1: Escarificación

La subrasante puede ser escarificada a la profundidad y ancho especificados y luego pulverizarse parcialmente. Es deseable remover los materiales que no sean suelos y que sean mayores que 3 pulgadas, como troncos, raíces, césped y piedras.

Figura 4.33: Escarificación del tramo a estabilizar



Fuente: ECOROAD

Paso 2: Aplicación de la cal

La cal debe ser uniformemente extendida en el porcentaje especificado desde camiones adecuadamente equipados. La cal hidratada seca no debería ser extendida en condiciones de viento debido al polvo excesivo.

Para envíos en camión, los camiones con tanques autodescargables son los más eficientes para transportar y esparcir la cal porque no se requiere ningún manejo adicional. La descarga se realiza neumáticamente o por uno o varios transportadores de tornillo.

Figura 4.34: Aplicación de la cal



Fuente: Manual de estabilización de suelos, 2016

Paso 3: Mezcla preliminar y aplicación de agua

Se requiere una mezcla preliminar para distribuir la cal dentro del suelo y para pulverizar inicialmente el suelo para preparar la adición de agua que inicie la reacción química para la estabilización. Esta mezcla puede iniciar con la escarificación. La escarificación puede realizarse aún sin mezcladoras modernas. Durante este proceso o inmediatamente después, el agua deberá agregarse.

Figura 4.35: Mezcla del suelo con la cal



Fuente: Manual de estabilización de suelos, 2016

Figura 4.36: Incorporación del agua en el porcentaje óptimo



Fuente: Manual de estabilización de suelos, 2016

Las estabilizadoras de suelos (Ej. CAT SS-250B) pueden ser utilizadas para asegurar la mezcla cuidadosa de la cal, el suelo, y el agua. Con muchas estabilizadoras de suelos, el agua puede añadirse al tambor de mezcla durante el proceso. Este es el método óptimo de adición de agua a la cal (cal viva o hidratada) y al suelo secos, durante la mezcla preliminar y la etapa de riego.

Figura 4.37: Estabilizador de suelos



Fuente: Maquinter, 2018

Independientemente del método usado para la adición de agua, es esencial que la cantidad de agua agregada sea la adecuada para asegurar la completa hidratación y llevar el contenido de humedad del suelo 3% arriba del óptimo, antes de la compactación.

En donde están siendo estabilizadas arcillas muy plásticas, generalmente es necesario mezclar la capa de arcilla y cal en dos etapas, permitiendo un lapso de 24 a 48 horas de período de fraguado. Durante este período de fraguado, la arcilla se hace friable de modo que la pulverización pueda ser fácilmente lograda durante la mezcla final.

Después de que se completa la mezcla, la capa tratada con cal debe ser afinada y compactada ligeramente con un Rodo para reducir al mínimo la pérdida por evaporación o mojado excesivo debido a posibles lluvias durante el fraguado.

Equipo: Estabilizadora de suelos, camión de agua y “rodo patas de cabras” o compactador neumático.

Paso 4: Periodo de fraguado

La mezcla de suelo y cal debería fraguar suficientemente para permitir la reacción química que cambia las propiedades del material. La duración de este período de fraguado debería basarse en el juicio de ingeniería y depende del tipo de suelo. El período de fraguado, comúnmente, es de 1 a 7 días. Después del fraguado, el suelo deberá ser mezclado, de nuevo, antes de la compactación. Para suelos con Índice de Plasticidad bajos, o cuando el objetivo es el secado o la modificación, por lo general, el fraguado no es necesario.

Paso 5: Mezcla y pulverización

Para alcanzar la estabilización completa, es esencial una adecuada pulverización final de la fracción arcillosa y la completa distribución de la cal dentro del suelo. La mezcla y la pulverización deberían continuar hasta que el 100 por ciento de material pase el tamiz de 1 pulgada y al menos el 60 por ciento de material pase el tamiz No. 4.

Figura 4.38: Mezcla y pulverización del suelo con la cal



Fuente: Manual de estabilización de suelos, 2016

Se puede requerir agua adicional durante la mezcla de final (antes de la compactación) para llevar el suelo a un 3 por ciento arriba del contenido de humedad óptima del material tratado.

Si hay certeza que los requerimientos de pulverización se pueden completar durante la mezcla preliminar, entonces los pasos de fraguado y mezcla final (pasos 4 y 5) pueden eliminarse.

Paso 6: Compactación

La mezcla suelo-cal deberá ser compactada a la densidad requerida por la especificación, comúnmente, al menos, al 95 por ciento de la densidad máxima obtenida en el ensayo AASHTO T99 (Proctor estándar). El valor de densidad deberá basarse en la curva Proctor de una muestra representativa de la mezcla de suelo-cal y no del suelo sin tratar.

La compactación deberá iniciar inmediatamente después de la mezcla final. Si esto no es posible, los retrasos de hasta cuatro días no deberían ser un problema si la mezcla es ligeramente compactada y se mantiene húmeda mientras se lleva a cabo la compactación. Para demoras más largas, puede ser necesario incorporar una pequeña cantidad adicional de cal en el suelo.

Equipo: para asegurar una compactación adecuada, el equipo deberá adaptarse a la profundidad de la capa. La compactación puede lograrse utilizando compactador pesado de neumáticos o rodo vibratorio o una combinación de la “pata de cabra” y un compactador ligero” de almohadilla”. Comúnmente, la superficie final de compactación se completa utilizando un rodo liso.

Figura 4.39: Compactadores rodillo liso y “pata de cabra”



Fuente: Soil compactor, 2019

Paso 7: Curado final

Antes de la colocación de la siguiente capa de subbase (o capa de base), se debe permitir que la subrasante compactada (o subbase) se endurezca hasta que camiones pesados operen sin ahueillar la superficie. Durante este tiempo, la superficie de suelo tratado con cal deberá mantenerse húmeda para ayudar al incremento de resistencia. Esto se conoce como "curando" y puede hacerse de dos maneras: (a) curado húmedo, que consiste en mantener la superficie en una condición húmeda a través de un rociado leve y compactándolo cuando sea necesario, y (b) curado con membrana, que implica el sellado de la capa compactada con una emulsión bituminosa, ya sea en una o varias aplicaciones. Una dosificación típica de aplicación es de 0,12 a 0,30 galones por metro cuadrado.

4.9.3 Análisis de precios unitarios para la subrasante estabilizada con T y Zy

Se tomó como referencia la investigación realizada por Aleman Ramirez Nelvi, la cual hizo el análisis de un suelo del tipo A6 estabilizado con cal cuyo porcentaje óptimo fue del 4%.

Tabla 4.10: Comparación de la subrasante estabilizada con T+Z y cal

Terrasil + Zycobond				Cal			
Dosis óptima (kg/m ³)	D. máx. (gr/cm ³)	Hum. Ópt. (%)	CBR (%)	Dosis óptima (%)	D. máx. (gr/cm ³)	Hum. Ópt. (%)	CBR (%)
Suelo Natural	1,83	14,38	2,70	Suelo Natural	1,88	12,97	4,91
1T + 0,25Zy	1,88	13,59	7,86	4%	1,77	14,43	19,87

Fuente: Elaboración propia

Determinación del peso del suelo natural:

Unidad: m³

$$\text{Densidad máx.} = 1,827 \text{ gr/cm}^3 = 1827 \text{ kg/m}^3$$

Peso = Volumen * Peso volumétrico seco máx.

$$\text{Peso del suelo} = 1827 \text{ kg}$$

$$\text{Porcentaje de Terrasil óptimo} = 1 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{Peso de Terrasil} = 1 \text{ kg} \quad \text{Para 1 m}^3 \text{ de suelo}$$

$$\text{Porcentaje de Zycobond óptimo} = 0,25 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{Peso de Zycobond} = 0,25 \text{ kg} \quad \text{Para 1 m}^3 \text{ de suelo}$$

Determinación de la cantidad de agua

Unidad: m³

$$\text{CHO suelo-Terrasil-Zycobond} = 13,59 \%$$

$$\text{Peso del agua} = 243,21 \text{ kg}$$

$$\text{Volumen de agua} = 0,243 \text{ m}^3$$

Resumen de materiales:

$$\text{Peso del suelo} = 1827 \text{ kg}$$

$$\text{Peso de Terrasil} = 1 \text{ kg}$$

$$\text{Peso de Zycobond} = 0,25 \text{ kg}$$

$$\text{Peso del agua} = 0,243 \text{ m}^3$$

Análisis de precios unitarios

Actividad: Conformación de capa subrasante.

Proyecto: Estabilización de suelo arcilloso.

Unidad: m³

Moneda: Bolivianos.

DESCRIPCIÓN	UND	CANT.	PRECIO PROD.	COSTO TOTAL
1.- MATERIALES				
Terrasil	kg	1,000	125,000	125,000
Zycobond	kg	0,250	53,000	13,250
TOTAL MATERIALES				138,250
2.- MANO DE OBRA				
Capatáz	hr.	0,008	24,000	0,192
Ayudante	hr.	0,003	16,250	0,049
Operador de equipo pesado	hr.	0,006	20,000	0,122
Operador de equipo liviano	hr.	0,006	16,250	0,091
Peón	hr.	0,006	13,500	0,082
SUBTOTAL MANO DE OBRA				0,536
CARGAS SOCIALES = (% DEL SUBTOTAL DE M.O)			71,18%	0,382
IMPUESTOS IVA MANO DE OBRA			14,94%	0,137
TOTAL MANO DE OBRA				1,017
3. EQUIPO, MAQUINARIA Y HERRAMIENTAS				
Compactador de rodillo liso	hr	0,009	320,000	2,912
Camión cisterna CAP 10000 Lt.	hr	0,008	150,000	1,200
Motoniveladora CAT 120	hr	0,0167	320,000	5,344
HERRAMIENTAS = (% DEL TOTAL DE M. O.)			5,00%	0,053
TOTAL EQUIPO, MAQUINARIA Y HERRAMIENTAS				9,509
4. GASTOS GENERALES Y ADMINISTRATIVOS				
GASTOS GENERALES = % DE 1 + 2 + 3			10,00%	14,881
TOTAL GASTOS GENERALES Y ADMINISTRATIVOS				14,881
5. UTILIDAD				
UTILIDAD = % DE 1 + 2 + 3 + 4			10,00%	16,365
TOTAL UTILIDAD				16,365
6. IMPUESTOS				
IMPUESTOS IT = % DE 1 + 2 + 3 + 4 + 5			3,09%	5,564
TOTAL IMPUESTOS				5,564
TOTAL PRECIO UNITARIO				185,628

4.9.4 Análisis de precios unitarios para suelos tratados con cal

Determinación del peso del suelo natural:

Unidad: m³

$$\text{Densidad máx.} = 1,827 \text{ gr/cm}^3 = 1827 \text{ kg/m}^3$$

Peso = Volumen * Peso volumétrico seco máximo

$$\text{Peso del suelo} = 1827 \text{ kg}$$

$$\text{Porcentaje de cal óptimo} = 4 \%$$

$$\text{Peso de la cal} = 4\% * 1827 = 73,10 \text{ kg} \quad \text{Para 1 m}^3 \text{ de suelo}$$

Determinación de la cantidad de agua:

Unidad: m³

$$\text{CHO suelo-cal} = 16,59 \%$$

más 3% del óptimo por evaporación.

$$\text{Peso del agua} = 298,10 \text{ kg}$$

$$\text{Volumen de agua} = 0,298 \text{ m}^3$$

Resumen de materiales:

$$\text{Peso del suelo} = 1827 \text{ kg}$$

$$\text{Peso de la cal} = 73,10 \text{ kg}$$

$$\text{Volumen de agua} = 0,298 \text{ m}^3$$

Análisis de precios unitarios

Actividad: Conformación de capa subrasante.

Proyecto: Estabilización de suelo arcilloso con cal.

Unidad: m³

Moneda: Bolivianos.

DESCRIPCIÓN	UND	CANT.	PRECIO PROD.	COSTO TOTAL
1.- MATERIALES				
Cal	kg	73	1,7	124,168
TOTAL MATERIALES				124,168
2.- MANO DE OBRA				
Capatáz	hr.	0,0049	24	0,118
Chofer	hr.	0,0148	16,25	0,240
Operador de equipo pesado	hr.	0,0148	20	0,295
Operador de equipo liviano	hr.	0,0049	16,25	0,080
Peón	hr.	0,0197	13,50	0,266
SUBTOTAL MANO DE OBRA				0,999
CARGAS SOCIALES = (% DEL SUBTOTAL DE M. OB.)			71,18%	0,711
IMPUESTOS IVA MANO DE OBRA			14,94%	0,255
TOTAL MANO DE OBRA				1,965
3. EQUIPO, MAQUINARIA Y HERRAMIENTAS				
Cargador frontal CAT 930 cuch. 2 m3	hr	0,003	380	1,140
Compactador "pata de cabra"	hr	0,0049	320	1,574
Volqueta CAP 10 m3	hr	0,002	130	0,260
Camión cisterna CAP 10000 Litros	hr	0,0098	150	1,476
Motoniveladora CAT 120	hr	0,0049	320	1,574
HERRAMIENTAS = (% DEL TOTAL DE M. DE OB.)			5%	0,095
TOTAL EQUIPO, MAQUINARIA Y HERRAMIENTAS				6,123
4. GASTOS GENERALES Y ADMINISTRATIVOS				
GASTOS GENERALES = % DE 1 + 2 + 3			10%	13,226
TOTAL GASTOS GENERALES Y ADMINISTRATIVOS				13,226
5. UTILIDAD				
UTILIDAD = % DE 1 + 2 + 3 + 4			10%	14,548
TOTAL UTILIDAD				14,548
6. IMPUESTOS				
IMPUESTOS IT = % DE 1 + 2 + 3 + 4 + 5			3,09%	4,945
TOTAL IMPUESTOS				4,945
TOTAL PRECIO UNITARIO				164,975

Costo para un tramo de 1 kilómetro estabilizada con los distintos estabilizantes (cal y la combinación de Terrasil y Zycobond)

DATOS:

Longitud de tramo =	1000	m
Ancho de vía =	7	m
Espesor de la estabilización =	0,20	m
Volumen de suelo a estabilizar =	1000*7*0,20	
Volumen de suelo a estabilizar =	1400	m ³

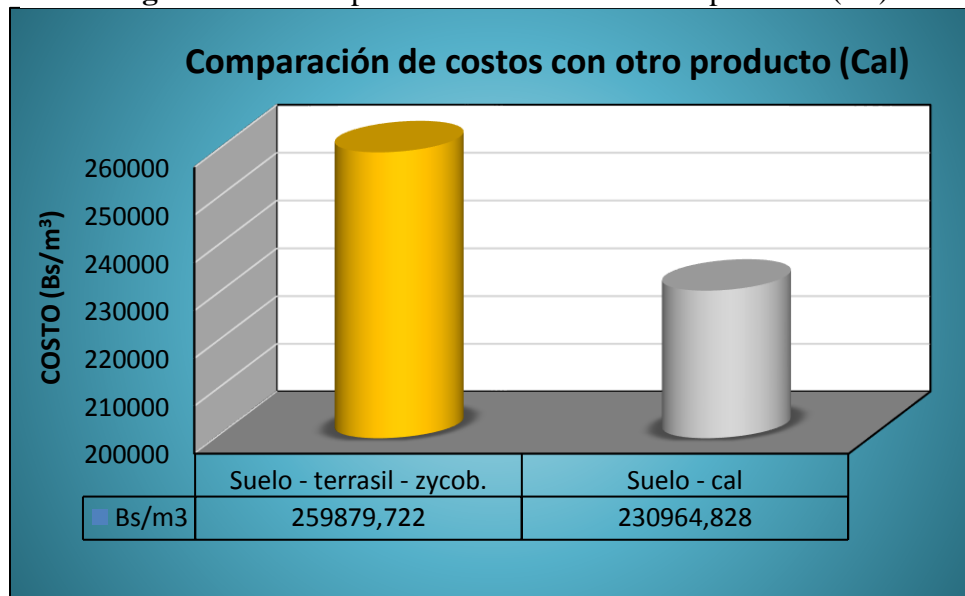
Costo de subrasante estabilizada con Terrasil y Zycobond

$$\text{Costo subrasante} = \frac{1400 * 185,628}{1} = 259879,72 \quad \text{Bs/km}$$

Costo de subrasante estabilizada con cal

$$\text{Costo subrasante} = \frac{1400 * 164,975}{1} = 230964,83 \quad \text{Bs/km}$$

Figura 4.40: Comparación de costos con otro producto (cal)



Fuente: Elaboración propia

Realizado el análisis de costos mediante la elaboración de precios unitarios para la conformación de una subrasante estabilizada con la combinación de Terrasil y Zycobond, así también para la subrasante estabilizada con cal, se puede notar que resulta más económico realizar la estabilización de la subrasante con los productos Terrasil y Zycobond, ya que presenta un decremento de costos respecto a la subrasante estabilizada con cal.

Desde el punto de vista de la trabajabilidad de acuerdo al proceso de constructivo de una subrasante estabilizada con los productos en análisis se puede ver que la estabilización con la cal conlleva un trabajo más arduo de realizar a comparación de la estabilización con los productos Terrasil y Zycobond ya que para trabajar con estos últimos se lo realiza mediante métodos tradicionales de estabilización.

Ha sido una práctica común utilizar la cal para la estabilización del suelo, debido a su notable efecto de reducción de la plasticidad, expansión y contracción, así como el aumento de su capacidad portante. Sin embargo, existen ciertas limitaciones en el uso de estos aditivos. La estabilización de suelos que contienen minerales de sulfato cuando se tratan con cal causa reacciones químicas adversas y la formación de un mineral cristalino expansivo, lo que provoca levantamiento y otras molestias en el pavimento. La exposición de suelos tratados con cal a ciclos de humectación y secado da como resultado la pérdida de cohesión entre el suelo y las partículas de cal. Se sabe que la cal aplicados en forma de polvo quemar a los trabajadores desprotegidos y también causan efectos ambientales. Además, con el agotamiento de los recursos, el enfoque en las prácticas de construcción sostenible ha ido en aumento. Se prefieren métodos nuevos y mejorados, ya que son rentables y permiten la construcción de carreteras duraderas de alto rendimiento con un consumo de material reducido.

Es por eso que se analiza la aplicación de nuevas tecnologías como los aditivos químicos Terrasil y Zycobond, se enfocan a los métodos tradicionales de estabilización para resolver los problemas de expansión y contracción, así para mejorar la capacidad de carga y las densidades de compactación de los suelos pobres, sin efectos nocivos para el medio ambiente y la salud. La principal ventaja de usar estos aditivos para la estabilización de suelos es que permite el uso de suelos y agregados in situ. Esto disminuye el esfuerzo y el

tiempo requerido para transportar materiales de buena calidad desde las áreas de préstamo, lo que permite un uso eficiente de los recursos naturales. Esto da como resultado un costo de transporte minimizado, lo que reduce el costo de construcción.

4.10 Análisis estadístico

Tabla 4.11: Análisis estadístico para datos de IP Vs suelo-Terrasil-Zycobond

Dosificación	Suelo + Terrasil y Zycobond (kg/m ³)	LL (%)	LP (%)	IP (%)
1.T+Z	Suelo + 0,5T+0,25Zy	35,36	19,49	16,66
2.T+Z	Suelo + 0,75T+0,25Zy	34,74	20,72	14,02
3.T+Z	Suelo + 1T+0,25Zy	33,94	20,55	13,39
4.T+Z	Suelo + 2T+0,25Zy	31,31	18,84	12,94
5.T+Z	Suelo + 0,5T+0,75Zy	34,39	19,10	15,29
6.T+Z	Suelo + 0,75T+0,75Zy	34,01	20,21	13,80
7.T+Z	Suelo + 1T+0,75Zy	34,23	20,92	13,66
8.T+Z	Suelo + 2T+0,75Zy	32,58	19,07	13,51
9.T+Z	Suelo + 0,5T+1,5Zy	34,12	19,95	13,67
10.T+Z	Suelo + 0,75T+1,5Zy	32,47	20,37	12,10
11.T+Z	Suelo + 1T+1,5Zy	34,25	20,86	13,23
12.T+Z	Suelo + 2T+1,5Zy	33,17	20,58	12,59
Media aritmética		33,87	20,05	13,58
Mediana		33,90	20,15	13,20
Desviación estándar		1,16	0,61	1,18
Varianza		1,34	0,38	1,39
Coeficiente de variación (%)		3,42	3,06	8,70

Fuente: Elaboración propia

Media aritmética

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

$$x = 13,58$$

Mediana

$$\tilde{x} = x \frac{n + 1}{2}$$

$$\tilde{x} = 13,20$$

Este valor nos indica que el 50% de los valores están por encima de 13.20 y el otro 50% están por debajo.

Desviación estándar

$$S = \sqrt{\frac{\sum(X - \tilde{x})}{n - 1}}$$

$$S = 1,18$$

Este valor permite conocer la ubicación de nuestros datos con respecto a la media, en este caso nos muestra que nuestros datos no están dispersos con respecto a la media.

Varianza

$$S^2 = \frac{\sum(X - \tilde{x})^2}{n - 1}$$

$$S^2 = 1,39$$

La varianza es una medida de cuan dispersos están nuestros datos.

Coefficiente de variación

$$CV = \frac{S}{\bar{X}}$$

$$CV = 8,70$$

Un coeficiente de variación de 8.7% nos indica que existe una baja dispersión entre datos, por estar por debajo de 30% que recomienda la estadística, por lo tanto, se podría decir que nuestros datos de las muestras son relativamente homogéneos.

Tabla 4.12: Análisis estadísticos para densidad máx. Vs suelo-T-Z

Dosificación	Suelo + Terrasil y Zycobond (kg/m ³)	Densidad (gr/cm ³)
1.T+Z	Suelo + 0,5T+0,25Zy	1,845
2.T+Z	Suelo + 0,75T+0,25Zy	1,873
3.T+Z	Suelo + 1T+0,25Zy	1,881
4.T+Z	Suelo + 2T+0,25Zy	1,854
5.T+Z	Suelo + 0,5T+0,75Zy	1,859
6.T+Z	Suelo + 0,75T+0,75Zy	1,869
7.T+Z	Suelo + 1T+0,75Zy	1,864
8.T+Z	Suelo + 2T+0,75Zy	1,848
9.T+Z	Suelo + 0,5T+1,5Zy	1,841
10.T+Z	Suelo + 0,75T+1,5Zy	1,859
11.T+Z	Suelo + 1T+1,5Zy	1,849
12.T+Z	Suelo + 2T+1,5Zy	1,844
Media aritmética		1,853
Mediana		1,854
Desviación estándar		0,079
Varianza		0,0063
Coeficiente de variación (%)		0,43

Fuente: Elaboración propia

Media aritmética

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

$$x = 1,853$$

Mediana

$$\tilde{x} = x \frac{n+1}{2}$$

$$\tilde{x} = 1,854$$

Este valor nos indica que el 50% de los valores están por encima de 1,854 y el otro 50% están por debajo.

Desviación estándar

$$S = \sqrt{\frac{\sum(X - \tilde{x})}{n - 1}}$$

$$S = 0,079$$

Este valor permite conocer la ubicación de nuestros datos con respecto a la media, en este caso nos muestra que nuestros datos no están dispersos con respecto a la media.

Varianza

$$S^2 = \frac{\sum(X - \tilde{x})^2}{n - 1}$$

$$S^2 = 0,063$$

La varianza es una medida de cuan dispersos están nuestros datos.

Coefficiente de variación

$$CV = \frac{S}{\bar{X}}$$

$$CV = 0,43$$

Un coeficiente de variación de 0,43% nos indica que existe una mínima dispersión entre datos, por estar por debajo de 30% que recomienda la estadística, por lo tanto, se podría decir que nuestros datos de las muestras son relativamente homogéneos.

Tabla 4.13: Análisis estadístico para Hum. Ópt. Vs Suelo+T-Zy

Dosificación	Suelo + Terrasil y Zycobond (kg/m ³)	Hum. Ópt. (%)
1.T+Z	Suelo + 0,5T+0,25Zy	13,48
2.T+Z	Suelo + 0,75T+0,25Zy	13,26
3.T+Z	Suelo + 1T+0,25Zy	13,59
4.T+Z	Suelo + 2T+0,25Zy	13,83
5.T+Z	Suelo + 0,5T+0,75Zy	13,56
6.T+Z	Suelo + 0,75T+0,75Zy	13,14
7.T+Z	Suelo + 1T+0,75Zy	13,50
8.T+Z	Suelo + 2T+0,75Zy	13,57
9.T+Z	Suelo + 0,5T+1,5Zy	12,67
10.T+Z	Suelo + 0,75T+1,5Zy	12,74
11.T+Z	Suelo + 1T+1,5Zy	13,35
12.T+Z	Suelo + 2T+1,5Zy	12,28
Media aritmética		13,26
Mediana		13,41
Desviación estándar		0,54
Varianza		0,29
Coeficiente de variación (%)		4,06

Fuente: Elaboración propia

Media aritmética

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

$$x = 13,26$$

Mediana

$$\tilde{x} = x \frac{n+1}{2}$$

$$\tilde{x} = 13,41$$

Este valor nos indica que el 50% de los valores están por encima de 13,41 y el otro 50% están por debajo.

Desviación estándar

$$S = \sqrt{\frac{\sum(X - \bar{x})^2}{n - 1}}$$

$$S = 0,54$$

Este valor permite conocer la ubicación de nuestros datos con respecto a la media, en este caso nos muestra que nuestros datos no están dispersos con respecto a la media.

Varianza

$$S^2 = \frac{\sum(X - \bar{x})^2}{n - 1}$$

$$S^2 = 0,29$$

La varianza es una medida de cuan dispersos están nuestros datos.

Coefficiente de variación

$$CV = \frac{S}{\bar{X}}$$

$$CV = 4,06$$

Un coeficiente de variación de 4,06% nos indica que existe una baja dispersión entre datos, por estar por debajo de 30% que recomienda la estadística, por lo tanto, se podría decir que nuestros datos de las muestras son relativamente homogéneos.

Tabla 4.14: Análisis estadístico de los datos de CBR Vs suelo+T+Zy

Dosificación	Suelo + Terrasil y Zycobond (kg/m ³)	CBR (%)
1.T+Z	Suelo + 0,5T+0,25Zy	4,19
2.T+Z	Suelo + 0,75T+0,25Zy	5,71
3.T+Z	Suelo + 1T+0,25Zy	7,88
4.T+Z	Suelo + 2T+0,25Zy	7,78
5.T+Z	Suelo + 0,5T+0,75Zy	3,85
6.T+Z	Suelo + 0,75T+0,75Zy	4,95
7.T+Z	Suelo + 1T+0,75Zy	7,53
8.T+Z	Suelo + 2T+0,75Zy	5,94
9.T+Z	Suelo + 0,5T+1,5Zy	3,48
10.T+Z	Suelo + 0,75T+1,5Zy	4,70
11.T+Z	Suelo + 1T+1,5Zy	6,60
12.T+Z	Suelo + 2T+1,5Zy	6,24
Media aritmética		5,59
Mediana		5,47
Desviación estándar		1,51
Varianza		2,28
Coeficiente de variación (%)		27,01

Fuente: Elaboración propia

Media aritmética

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

$$x = 5,59$$

Mediana

$$\tilde{x} = x \frac{n+1}{2}$$

$$\tilde{x} = 5,47$$

Este valor nos indica que el 50% de los valores están por encima de 5,47 y el otro 50% están por debajo.

Desviación estándar

$$S = \sqrt{\frac{\sum(X - \tilde{x})}{n - 1}}$$

$$S = 1,51$$

Este valor permite conocer la ubicación de nuestros datos con respecto a la media, en este caso nos muestra que nuestros datos no están dispersos con respecto a la media.

Varianza

$$S^2 = \frac{\sum(X - \tilde{x})^2}{n - 1}$$

$$S^2 = 2,28$$

La varianza es una medida de cuan dispersos están nuestros datos.

Coefficiente de variación

$$CV = \frac{S}{\bar{X}}$$

$$CV = 27,01$$

Un coeficiente de variación de 27,01% nos indica que existe una media a baja dispersión entre datos, por estar por debajo de 30% que recomienda la estadística, por lo tanto, se podría decir que nuestros datos de las muestras son relativamente homogéneos.

Tabla 4.15: Análisis estadístico de los datos de expansión Vs suelo-T+Zy

Dosificación	Suelo + Terrasil y Zycobond (kg/m³)	Expansión (%)
1.T+Z	Suelo + 0,5T+0,25Zy	3,60
2.T+Z	Suelo + 0,75T+0,25Zy	2,74
3.T+Z	Suelo + 1T+0,25Zy	2,24
4.T+Z	Suelo + 2T+0,25Zy	2,54
5.T+Z	Suelo + 0,5T+0,75Zy	3,41
6.T+Z	Suelo + 0,75T+0,75Zy	2,20
7.T+Z	Suelo + 1T+0,75Zy	2,01
8.T+Z	Suelo + 2T+0,75Zy	1,95
9.T+Z	Suelo + 0,5T+1,5Zy	2,99
10.T+Z	Suelo + 0,75T+1,5Zy	1,77
11.T+Z	Suelo + 1T+1,5Zy	1,80
12.T+Z	Suelo + 2T+1,5Zy	1,60
Media aritmética		2,63
Mediana		2,85
Desviación estándar		0,63
Varianza		0,39
Coeficiente de variación (%)		24,10

Fuente: Elaboración propia

Media aritmética

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

$$x = 2,63$$

Mediana

$$\tilde{x} = x \frac{n+1}{2}$$

$$\tilde{x} = 2,85$$

Este valor nos indica que el 50% de los valores están por encima de 2,85 y el otro 50% están por debajo.

Desviación estándar

$$S = \sqrt{\frac{\sum(X - \tilde{x})}{n - 1}}$$

$$S = 0,63$$

Este valor permite conocer la ubicación de nuestros datos con respecto a la media, en este caso nos muestra que nuestros datos no están dispersos con respecto a la media.

Varianza

$$S^2 = \frac{\sum(X - \tilde{x})^2}{n - 1}$$

$$S^2 = 0,39$$

La varianza es una medida de cuan dispersos están nuestros datos.

Coefficiente de variación

$$CV = \frac{S}{\bar{X}}$$

$$CV = 24,10$$

Un coeficiente de variación de 24,10% nos indica que existe una baja dispersión entre datos, por estar por debajo de 30% que recomienda la estadística, por lo tanto, se podría decir que nuestros datos de las muestras son relativamente homogéneos.

CAPÍTULO V
CONCLUSIONES Y
RECOMENDACIONES

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5. Conclusiones y recomendaciones

5.1 Conclusiones

- Se llegó a cumplir el objetivo principal de la investigación, es decir se hizo el análisis y la comparación de las propiedades mejoradas con los aditivos Terrasil y Zycobond.
- Para la prueba de límite de consistencia, se lo realizó a diferentes dosificaciones lo cual se evidenció que a medida que se aumentan las dosificaciones de los aditivos el límite líquido y el límite plástico disminuye provocando que también disminuya el índice de plasticidad lo cual indica que el suelo cambia a un estado menos plástico con la adición de los químicos estabilizantes Terrasil y Zycobond.
- En el análisis de resultados se pudo ver que las densidades en dosificaciones mínimas de Zycobond aumenta su densidad máxima y también aumenta su humedad óptima, la explicación que se puede dar para esta tendencia de aumento de la humedad es debido a que hubo una demanda creciente de agua por parte de varios cationes y partículas del suelo arcilloso para someterse a la hidratación. La ventaja del aumento de la humedad óptima del suelo es que permite lograr una fácil compactación con el suelo húmedo, por lo tanto, hay menos necesidad de secar el suelo para reducir el contenido de humedad antes de la compactación en campo.
- En el caso donde el suelo a dosificaciones máximas de Zycobond, presenta densidades menores con respecto a las dosificaciones con mínimas de Zycobond, se debe a que las partículas de arcilla floculadas y aglomeradas ocupan espacios más grandes, lo que conduce a una disminución correspondiente en la densidad seca.
- En general, la estabilización de la subrasante con la mezcla o combinación de los aditivos Terrasil y Zycobond mejoró las propiedades mecánicas, como ser las densidades y capacidad de carga del mismo, además ayudó a reducir el índice de plasticidad y la expansión de suelo analizado.

- Aunque esta investigación se basa en materiales obtenidos del tramo correspondiente a la comunidad de Obrajes de la ciudad de Tarija, brinda información útil para estabilizar un suelo similar disponible en otros sectores.
- La estabilización de la subrasante con la combinación de los aditivos Terrasil y Zycobond es favorable para dicha subrasante ya que presenta un incremento en las mejoras de las propiedades del suelo con respecto al suelo tratado solo con Terrasil.
- Para el suelo en estudio que era una arcilla de media plasticidad que tiene una baja capacidad portante, esta capacidad por lo general mejoró con un aumento en la aplicación de las dosificaciones, pero cabe recalcar que en promedio con las dosificaciones mínimas de Zycobond el suelo se comporta mejor presentando resistencias más favorables que las que se les agrega mayor dosificación de Zycobond. Entonces de acuerdo al análisis realizado anteriormente se llega a la conclusión de que la dosificación óptima de Terrasil y Zycobond es la dosis 3.
- La muestra estabilizada con la combinación de Terrasil y Zycobond tienen un valor de 7,8 el cual se aproxima al valor propuesto por la norma, que dice que un CBR con valor de 8 es adecuado para una subrasante.
- Comparando los resultados obtenidos del suelo tratados con la combinación de Terrasil y Zycobond, con el suelo tratado solo con Terrasil, se pudo notar que depende mucho de la dosificación de cada uno de los químicos, pero si presenta mejoras con respecto al suelo tratado solo con Terrasil.
- En la comparación con otro producto que es la cal se pudo notar que trabajar con cal resulta más barato a comparación de los aditivos Terrasil y Zycobond pero trabajar con cal conlleva varios factores que lo ponen en desventaja con las nuevas tecnologías de aditivos como ser Terrasil y Zycobond los cuales son más fáciles de aplicar en la estabilización de suelos sin efectos nocivos para la salud y el medio ambiente.
- Se llega a la conclusión de que el uso de una combinación de los aditivos Terrasil y Zycobond como agentes estabilizantes de suelo en este caso a nivel subrasante presenta una mejora definitiva en las propiedades de ingeniería y el valor de soporte de carga (CBR).

5.2 Recomendaciones

- Este estudio se limita a un suelo arcilloso de clasificación A-6 según AASHTO, por lo cual el estudio puede extenderse más y llevarse a cabo sobre otros tipos de suelos como ser limos, arena, suelo aluvial, etc, que es un área virgen en lo que respecta a la combinación de los aditivos Terrasil y Zycobond.
- En la estabilización de suelos no es recomendable proponer grandes cantidades para las dosificaciones del aditivo Zycobond en combinación con el aditivo Terrasil.
- Si las resistencias alcanzadas para la combinación suelo-Terrasil-Zycobond no son las deseadas o no cumplen con el requerimiento mínimo según normas entonces se recomienda combinar estos aditivos con cemento para aumentar significativamente sus valores de resistencia.
- Para los datos obtenidos es recomendable realizar la teoría de errores para así aumentar la confiabilidad de los resultados.