

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes.

Algo que es de conocimiento técnico en Tarija es que, los suelos que predominan en el municipio de Cercado corresponde a suelos finos con presencia de arcilla en su composición y es precisamente esta arcilla que le da la cohesión y plasticidad a los suelos, haciendo que, cuando se presentan estas propiedades en gran medida en un suelo hacen que estos sean inestables y malos en especial cuando hay presencia de agua su comportamiento es muy complejo, pues se ablandan y su resistencia disminuye considerablemente, situación que es muy desfavorable para la fundación de obras civiles. (Baldiviezo, T. 2022. Ciencia Sur).

Es importante destacar que el valor del CBR de ciertos suelos puede incrementarse significativamente mediante la adición de aditivos que mejoran sus propiedades originales. Por ejemplo, estudios han demostrado que los suelos arcillosos tratados con cal, presentan un comportamiento diferenciado tras alcanzar su esfuerzo máximo. En el caso específico de la ciudad de Tarija, se ha observado que los valores de expansión del CBR son considerablemente elevados, lo cual sugiere la presencia de suelos altamente plásticos. (Irahola, 2010).

Por otro lado, en el proyecto de investigación que lleva por título “Establecer el CBR en la sub rasante de la carretera afirmada Mullupujio - Surpaylla usando pavimento rígido reciclado y graduado – Puno 2021”, se hace un análisis del CBR en la sub rasante de la carretera afirmada Mullupujio - Surpaylla usando pavimento rígido reciclado, el cual presenta mejoras en el CBR de una subrasante. (Limachi, K 2021)

Se puede ver que en el manual de suelos, geología, geotecnia y pavimentos (2014), se da rangos en donde la calidad de la subrasante está clasificada según el porcentaje de CBR que esta posea, yendo desde valores del 3% a un máximo de 30%, tomando en cuenta que son recomendaciones provenientes de norma, en las que se estudió el funcionamiento aceptable de dicha capa. Además, Pacheco Núñez (2017) ofrece un texto guía para la estabilización de materiales para carreteras.

1.2 Situación problemática.

La estabilización de suelos es un método por el cual se busca mejorar las propiedades físicas del suelo mediante la incorporación de diferentes materiales, ya sean de origen químico, natural o sintéticos. Con el fin de subsanar alguna propiedad del suelo para su posterior uso.

Al estabilizar un suelo cohesivo mediante la incorporación de materiales que provengan del desecho de construcciones, se busca mejorar las propiedades físicas que este posee, con el fin de lograr un mayor aprovechamiento del suelo y los materiales de desecho en la construcción de capas sub rasantes para carreteras.

Si no se tiene bien definido que la incorporación de este tipo de materiales puede funcionar en un proceso de estabilización de un suelo arcilloso, se debe recurrir al uso de materiales ya conocidos para estabilizar este tipo de suelos, como ser: cal, cemento, lechadas, etc. Lo cual en algunas situaciones resulta en gastos elevados y perjuicios al medio ambiente en su ejecución.

Es necesario analizar a mayor profundidad que cantidades de materiales que provienen del desecho de construcciones, son idóneos para mejorar las propiedades físicas de un suelo arcilloso y establecer una relación de costo versus calidad, para su posterior uso en campo.

1.2.1 Problema.

¿Cómo afecta la combinación de suelos cohesivos con agregados de desecho de construcciones, en el análisis de su estabilización por medio de pruebas físicas y mecánicas?

1.2.2 Relevancia y factibilidad del problema.

En la actualidad la gestión adecuada de los desechos de materiales de construcción se ha vuelto una prioridad en el contexto actual de desarrollo sostenible. Su reincorporación en procesos constructivos, particularmente en la mejora de suelos, representa una oportunidad tanto ambiental como técnica, ya que, se tiene una buena disponibilidad de los materiales y la metodología para su estudio es sostenible.

1.2.3 Delimitación temporal y espacial del problema.

Los datos obtenidos en el desarrollo de esta investigación seguirán siendo útiles, siempre y cuando la capa subrasante no sufra ninguna modificación.

Los tipos de suelos utilizados para esta investigación son: A-4 y A-6.

El aditivo está conformado principalmente por ladrillo y hormigón.

1.3 Justificación.

Al momento de seleccionar una metodología afectiva y a su vez que sea la más económica dentro del tema de la estabilización de suelos, si bien comprende un rango muy amplio de opciones, muchas de estas no cumplen con ambas condiciones, por tal motivo el presente trabajo de investigación busca proporcionar una alternativa al uso de materiales cementantes como es el concreto y materiales cerámicos como lo es el ladrillo, en un uso combinado para estabilizar suelos cohesivos, que los comprenden generalmente los suelos finos. Ya que se sabe que las arcillas se comportan bien al momento de ser estabilizadas con materiales, como ser el cemento, la cal, etc., pero muchas veces aplicar solamente estos productos representa una desventaja en el tema económico que es una parte importante en la etapa de diseño de una carretera.

A su vez se propone una alternativa la cual sea de fácil aplicación en la estabilización de suelos para sub rasantes, la cual cumpla con las condiciones que deba poseer la misma, para que esta se desempeñe de una manera óptima una vez que sea puesta en obra y que también sea económicamente factible, ya que muchas ocasiones estos costos se elevan en gran medida.

Con esta investigación se dio a conocer un nuevo uso para estos materiales en los procesos constructivos de una subrasante, con el fin de que se mejoren sus propiedades y se las pueda aplicar en la construcción de carreteras, además de poder generar futuras fuentes laborales en el ámbito de la venta de los mismos, su acopio y procesamiento para futuras aplicaciones no solamente en la estabilización de subrasantes, sino también en otros usos que se pueda encontrar.

1.4 Objetivos.

1.4.1 Objetivo general.

Analizar la estabilización de suelos cohesivos; combinándolos con diferentes porcentajes de agregados de desechos de construcciones; con el fin de aprovechar al máximo sus propiedades y cantidades, para verificar como afectan estos materiales a las propiedades físicas y mecánicas de estos suelos, para su uso en la estabilización de sub rasantes.

1.4.2 Objetivos específicos.

- Determinar las áreas potenciales de muestreo.
- Analizar las condiciones iniciales de las muestras.
- Aplicar la metodología propuesta para el estudio de la estabilización.
- Realizar los ensayos de compactación y CBR haciendo variar los diferentes porcentajes de combinación, para obtener diferentes resultados del proceso de estabilización.
- Analizar estadísticamente los resultados obtenidos.
- Determinar el porcentaje óptimo de mezcla de los agregados de desecho de construcciones

1.5 Hipótesis.

La combinación de suelos cohesivos con agregados de desechos de construcciones, mejora su estabilidad, presentando mejorías en sus propiedades físicas y mecánicas.

1.6 Operacionalización de variables.

- Variable dependiente: Propiedades físicas y mecánicas del suelo.
- Variable independiente: La cantidad de agregados de desecho.

1.6.1 Variable dependiente.

Tabla 1 variable independiente

Variable	Conceptualización	Dimensión	Indicador	Valor/Acción
----------	-------------------	-----------	-----------	--------------

Propiedades físicas y mecánicas del suelo.	Verificación del desempeño de la combinación suelo-agregados, con especificaciones para suelos de sub rasante	Granulometría	Porcentaje [%]	Obtenido mediante la caracterización de la combinación.
		Limites	Porcentaje [%]	Valor extraído del estudio de límites de ATTERBERG
		Humedad optima	Porcentaje [%]	Obtenido de la curva de compactación.
		Densidad	[g/cm ³]	Obtenido de la curva de compactación.
		Prueba CBR	Porcentaje [%]	Valor obtenido de la prueba de CBR de la combinación en laboratorio

Fuente: Elaboración propia

1.6.2 Variable independiente.

Tabla 2 variable independiente

Variable	Conceptualización	Dimensión	Indicador	Valor/Acción
	Referido a las cantidades de	Masa del agregado	Gramos [g]	Preparación de las cantidades a

Cantidad de agregados de desecho	agregados provenientes del desecho de construcciones, que se emplearan el proceso de estabilización del suelo.			emplear en el proceso.
		Humedad del agregado	Porcentaje [%]	Humedad de la muestra de agregado a emplear
		Combinación suelo-agregado	Gramos [g]	Realizado según los porcentajes para el mesclado

Fuente: Elaboración propia

1.7 Identificación del tipo de investigación.

Esta investigación se trata del análisis de la estabilización de suelos cohesivos combinándolos con materiales de desecho de construcciones, tratándose así de una investigación del tipo “explicativa” con un grado mayor de manipulación de variables.

1.8 Unidades de estudio y decisión muestral.

1.8.1 Unidad de estudio.

La unidad de estudio de esta investigación es el análisis de la estabilización de suelos cohesivos combinándolos con agregados de desecho de construcciones.

1.8.2 Población.

La población tomada en cuenta para la presente investigación son los suelos cohesivos presentes en la zona norte dentro de la segunda circunvalación de la ciudad de Tarija.

1.8.3 Muestra.

Para el desarrollo de esta investigación se tomó las muestras de cinco puntos de la zona norte de la segunda circunvalación. Tomando en cuenta las características propias de la zona durante la extracción de las muestras.

1.8.4 Selección de las técnicas de muestreo.

En la presente investigación se realizó un muestreo no probabilístico, el cual fue intencional.

Para el muestreo se recolectó muestras de suelos cohesivos en la subrasante de la Segunda Circunvalación de la ciudad de Tarija, por medio de calicatas y llevando un registro de cada una de ellas.

1.9 Métodos y técnicas empleadas.

1.9.1 Métodos.

Para el análisis de esta investigación se utilizó un método empírico, en donde se intervino sobre los suelos cohesivos al combinarlos con diferentes porcentajes de agregados de desecho de construcciones.

1.9.2 Técnicas.

La técnica empleada fue la de una investigación de campo, mediante la cual se recurrió a la experimentación de las muestras de suelos cohesivos combinándolos con agregados de desecho de construcciones dentro del laboratorio de suelos.

1.10 Procesamiento de la información.

Durante el desarrollo de esta investigación se realizó la caracterización de los suelos cohesivos y de los agregados de desecho de construcciones, con el fin de conocer las propiedades con las que cuentan cada uno de ellos.

Se pudo determinar en su mayoría dos tipos de suelos; un A-4 y A-6, los cuales no presentaban buenas propiedades para ser utilizados para la construcción de una capa subrasante.

Seguido de la compactación, con los distintos porcentajes de combinación para poder determinar la densidad máxima y humedad óptima para cada caso, para de esta manera poder realizar los ensayos de CBR, donde se observó como los agregados de desecho de construcciones mejoran las propiedades de los suelos cohesivos.

Para el procesamiento de la información obtenida se utilizó estadística descriptiva e inferencial para poder determinar el rango de confianza de los resultados obtenidos y verificar si la hipótesis del presente trabajo de investigación es correcta, comparando los resultados obtenidos con los valores propuestos de CBR por la norma boliviana de carreteras para subrasantes.

1.11 Alcance de la investigación.

La investigación se enfocó en analizar el efecto que tienen los agregados de desecho de construcciones al combinarlos con suelos cohesivos. Esta investigación se propuso utilizar suelos provenientes de la zona norte de la segunda circunvalación de la ciudad de Tarija, destacando principalmente el uso de suelos del tipo A-4 y A-6, verificando como se comportó el aditivo frente a estos tipos de suelos.

Para los agregados de desecho de construcciones se planteó trabajar con concreto y ladrillos provenientes del trabajo de mampostería, con un tamaño máximo de $\frac{3}{4}$ de pulgada en su composición con el fin de facilitar su triturado, puesta en obra y en su análisis en estudios de laboratorio. En su composición se tomó como referencia un estudio hecho en España, y con el fin de utilizar al máximo estos desechos, se utilizó una combinación de 50% de concreto y 50% de ladrillo para poder determinar la efectividad del aditivo propuesto.

Además de los ensayos de caracterización, se realizaron ensayos de compactación y CBR para el suelo en su estado natural, con el fin de ver en qué condiciones se encuentra el suelo. A su vez también se realizaron ensayos de CBR en donde se propuso trabajar con porcentajes de combinación suelo-aditivo del 5%, 10% y 15% en donde se pudo determinar en qué medidas estos afectan a las propiedades de los suelos A-4 y A-6 presentes en esta investigación.

Para garantizar que el proceso de estabilización es factible se recurrió a la norma boliviana de carreteras para poder estimar un parámetro dentro del cual el aditivo sea adecuado para la estabilización de una capa sub rasante y tenga las garantías de ser económicamente factible, por lo cual se determinó un porcentaje óptimo dentro del cual se satisfaga estos dos puntos.

CAPÍTULO II

CBR EN SUBRASANTES

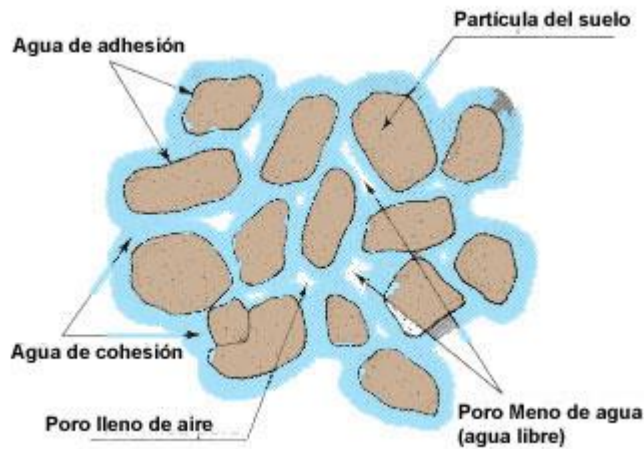
CAPÍTULO II

CBR EN SUBRASANTES

2.1 Suelo

El suelo, desde el punto de vista de la ingeniería civil, es un material natural no consolidado formado por partículas minerales y materia orgánica, que puede ser excavado sin voladuras y se utiliza como base o soporte para estructuras. Sus propiedades mecánicas, como la resistencia al corte, la compresibilidad y la permeabilidad, determinan su comportamiento en proyectos de construcción. (Braja Das,2010).

Figura 1. Composición de los suelos



Fuente: FAO 2020.

El suelo está compuesto por tres fases distintas: la fase sólida, constituida por partículas minerales y materia orgánica; la fase líquida, que corresponde principalmente al agua contenida en los poros; y la fase gaseosa, que es el aire presente en los vacíos no ocupados por agua. Estas fases coexisten en diferentes proporciones dependiendo del tipo de suelo y sus condiciones de humedad, y su estudio es fundamental para analizar propiedades como la permeabilidad, la compresibilidad y la resistencia al corte. (Coduto D.P. 2001).

2.2 Suelos cohesivos

Los suelos cohesivos son aquellos en los que las fuerzas de atracción entre partículas (principalmente finas como las arcillas) proporcionan una resistencia significativa a la deformación, incluso en ausencia de esfuerzos normales. Estos suelos tienen una plasticidad apreciable, baja permeabilidad, y tienden a retener agua. Su comportamiento está influenciado por el contenido de humedad y la estructura interna del material. (Holtz, R. D., Kovacs, W. D., & Sheahan, T. C. 2011).

Una de las teorías más comunes para explicar este proceso se presenta a continuación.

La superficie de cada partícula de suelo posee carga eléctrica negativa, según se desprende de la estructura iónica. La intensidad de carga depende de la estructuración y composición de la arcilla. Así la partícula atrae a los iones positivos del agua y a cationes de diferentes elementos químicos. Lo anterior conduce, en primer lugar, al hecho de que cada partícula individual de arcilla se ve rodeada de una capa de moléculas de agua orientadas en forma definida y ligadas a su estructura (agua absorbida).

Las moléculas de agua son polarizadas, es decir, en ellas no coinciden los centros de gravedad de sus cargas negativas y positivas, sino que funcionan como pequeños dipolos permanentes; al ligarse a la partícula por su carga (+), el polo de la carga (-) queda en posibilidad de actuar como origen de atracción para otros cationes positivos. Los propios cationes atraen moléculas de agua gracias a la naturaleza polarizada de estas, de modo que cada catión está en posibilidad de poseer un volumen de agua en torno a él. El agua absorbida por cada catión aumenta con la carga eléctrica de este y con su radio iónico. Por lo anterior, cuando las partículas del suelo atraen a los cationes, se ve reforzada la película de agua ligada a la partícula. El espesor de la película de agua absorbida por el cristal de suelo es así su función, no solo de la naturaleza del mismo, sino también del tipo de cationes atraídos. (Juárez Badillo., 2005).

2.3 Propiedades físicas y mecánicas de los suelos

2.3.1 Propiedades físicas de los suelos

Se refieren a las características naturales y estructurales del suelo, es decir, cómo está compuesto y distribuido, sin tener en cuenta fuerzas externas.

Principales propiedades físicas:

- a) Textura: proporción relativa de arena, limo y arcilla. Define la “personalidad” del suelo.
- b) Humedad natural: cantidad de agua contenida en el suelo en su estado original.
- c) Densidad:
 - Densidad húmeda: masa total por unidad de volumen (incluye agua).
 - Densidad seca: masa de sólidos por unidad de volumen (sin agua).
- d) Porosidad: porcentaje del volumen total que corresponde a espacios vacíos (poros).
- e) Grado de saturación: qué tanto están llenos de agua esos poros.
- f) Consistencia: describe el comportamiento del suelo cuando está seco, húmedo o saturado.
- g) Color y estructura: pueden sugerir procesos químicos o biológicos presentes.

(Braja Das, 2010).

2.3.2 Propiedades mecánicas de los suelos

Estas propiedades determinan cómo responde el suelo ante cargas y esfuerzos externos. Son cruciales para el diseño de cimentaciones, estabilidad de taludes, túneles, presas, etc.

Principales propiedades mecánicas:

- a) Resistencia al corte: capacidad del suelo para resistir fuerzas tangenciales. Depende de la fricción interna y la cohesión.
- b) Compresibilidad: tendencia a disminuir de volumen bajo carga. Relacionada con asentamientos.

- c) Elasticidad: capacidad del suelo para recuperar su forma original después de ser deformado.
- d) Plasticidad: habilidad de cambiar de forma sin fracturarse (medida con los límites de Atterberg).
- e) Permeabilidad: facilidad con que el agua fluye a través del suelo.
- f) Capacidad de carga: máxima carga que puede soportar el suelo sin fallar.
- g) Expansividad: capacidad de ciertos suelos (como las arcillas) de hincharse al absorber agua.

(Holtz, R. D., Kovacs, W. D., & Sheahan, T. C. 2011).

2.4 Estudios de los suelos

2.4.1 Granulometría

La granulometría es el análisis que permite determinar la distribución porcentual de los tamaños de las partículas que componen un suelo, ya sea por tamizado (para partículas gruesas) o por sedimentación (para partículas finas). Esta propiedad es fundamental para clasificar el suelo y predecir su comportamiento mecánico, como la permeabilidad, la compactación y la resistencia. (Braja Das, 2010).

Si bien el análisis granulométrico es suficiente para gravas y arenas, cuando se trata de arcillas y limos, turbas y margas se debe completar el estudio con ensayos que definan la plasticidad del material.

El análisis granulométrico al cuál se somete un suelo es de mucha ayuda para la construcción de proyectos, tanto estructuras como carreteras, porque con este se puede conocer la permeabilidad y la cohesión del suelo. El análisis granulométrico por tamizado se realiza a las partículas con diámetros superiores a 0,075 mm.

2.4.2 Límites de Atterberg

Los límites de Atterberg son contenidos de humedad que definen las fronteras entre los distintos estados de consistencia de los suelos finos. Estos límites: El límite líquido y el límite plástico; se determinan mediante ensayos de laboratorio estandarizados y permiten

clasificar el suelo según su plasticidad y comportamiento mecánico frente a cambios en su contenido de agua. (Braja Das, 2010).

Estos límites son:

- Límite líquido (LL): Representa el contenido de humedad a partir del cual el suelo pasa del estado plástico al estado líquido. A este nivel, el suelo pierde su forma y fluye fácilmente. Se determina en laboratorio usando el aparato de Casagrande o mediante el método de la cuchara.

- Límite plástico (LP): Es el contenido de humedad por debajo del cual el suelo pasa de un estado plástico a un estado semisólido. En este punto, el suelo ya no puede moldearse sin que se agriete. Se determina enrollando hilos de suelo hasta que se desintegren a un diámetro de aproximadamente 3 mm.

A partir de estos límites, se calcula el índice de plasticidad ($IP = LL - PL$), que refleja la cantidad de humedad con la que el suelo se comporta de manera plástica. Este valor es clave para clasificar los suelos en la Carta de Plasticidad de Casagrande, la cual permite determinar si un suelo es, por ejemplo, una arcilla de alta plasticidad (CH) o un limo de baja plasticidad (ML).

2.4.3 Compactación

La compactación del suelo es un proceso de mejora artificial del terreno, en el cual se aplica energía mecánica para aumentar la densidad del suelo mediante la expulsión del aire contenido entre las partículas. El objetivo principal de la compactación es incrementar la capacidad portante del suelo, reducir su compresibilidad, mejorar su resistencia al corte y disminuir su permeabilidad, factores críticos en el diseño y la ejecución de obras civiles. (Coduto D.P, 2001).

2.4.3.1 Teoría de Proctor (1933).

Al compactar un suelo relativamente seco se crea una mayor fricción que se opone a las fuerzas de compactación, al añadir cierta cantidad de agua se genera mayor lubricación con lo que las partículas de suelo se reorganizan con mayor facilidad y aumente de esta manera la densidad del suelo.

A partir de esto desarrolló dos procedimientos para el control de calidad de la compactación de un terreno, estos son Proctor estándar y Proctor modificado los cuales se diferencian en la cantidad de energía utilizada en el proceso.

2.4.3.2 Proctor estándar

En esta prueba se compacta una muestra de suelo la cual se mezcla con diferentes cantidades de suelo y que luego es compactada en 3 capas iguales dando 25 golpes con un martillo que pesa 24.4 N; todo esto en un molde de 101.6 mm de diámetro y un volumen de 943.3 cm³. Este procedimiento debe repetirse hasta poder crear una curva que relacione las distintas humedades con los respectivos pesos unitarios secos con el fin de determinar la humedad óptima y el peso unitario seco máximo. (INVIAS, 2013)

Figura2. Molde y martillo Proctor estándar



Fuente: Elaboración propia

* Proctor modificado: Se diferencia del Proctor estándar ya que utiliza un martillo más pesado, de 44.5 N y la muestra de suelo se compacta en 5 capas con 25 golpes en cada una. Debido a que el esfuerzo de compactación aumenta, también lo hace el peso unitario seco máximo, pero se disminuye el contenido óptimo de humedad al reducir la cantidad de vacíos. (INVIAS, 2013)

Figura 3. Martillo utilizado en el ensayo Proctor T-180



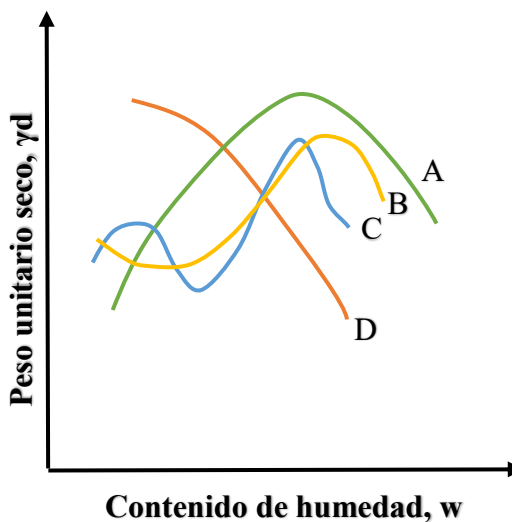
Fuente: Elaboración propia

2.4.3.3 Factores que afectan la compactación

a) Tipo de suelo

De acuerdo con los estudios de Lee y Suedkamp se distinguen 4 tipos de curvas de compactación influenciadas por el tipo de suelo, debido a su granulometría, la forma de las partículas y presencia de finos.

Figura 4. Curvas de compactación de diferentes tipos de suelos



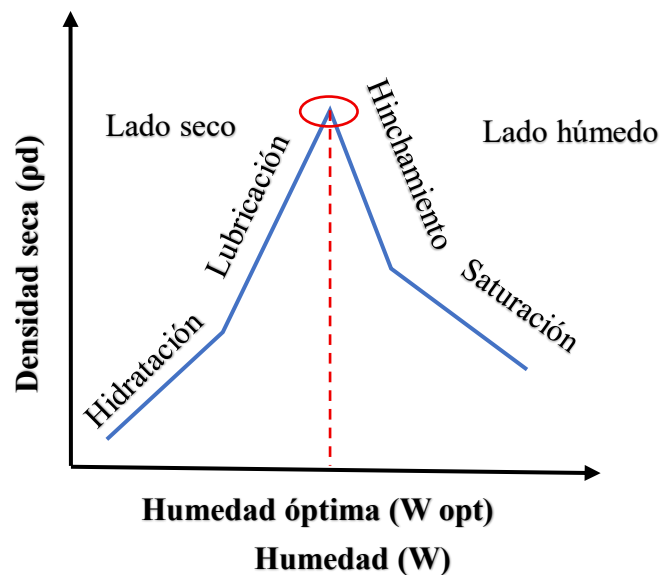
Fuente: Das, 2013

Por ejemplo, para la gráfica tipo A, de un solo pico se pueden tener suelos limo arenosos, el tipo B y C de doble pico se pueden dar al tener arenas bien gradadas. Y el tipo D se puede obtener al hacer los ensayos de Proctor con arenas mal gradadas.

b) Porcentaje de humedad

El porcentaje de humedad influye directamente en la eficiencia del proceso de compactación del suelo. Existe un contenido de humedad específico; llamado humedad óptima, en el cual el suelo alcanza su máxima densidad seca bajo una energía de compactación determinada. Si el suelo está demasiado seco, las partículas no se acomodan eficientemente, y si está demasiado húmedo, el exceso de agua ocupa los espacios que deberían ser expulsados como aire, reduciendo la densidad lograda.

Figura 5. Influencia del porcentaje de humedad



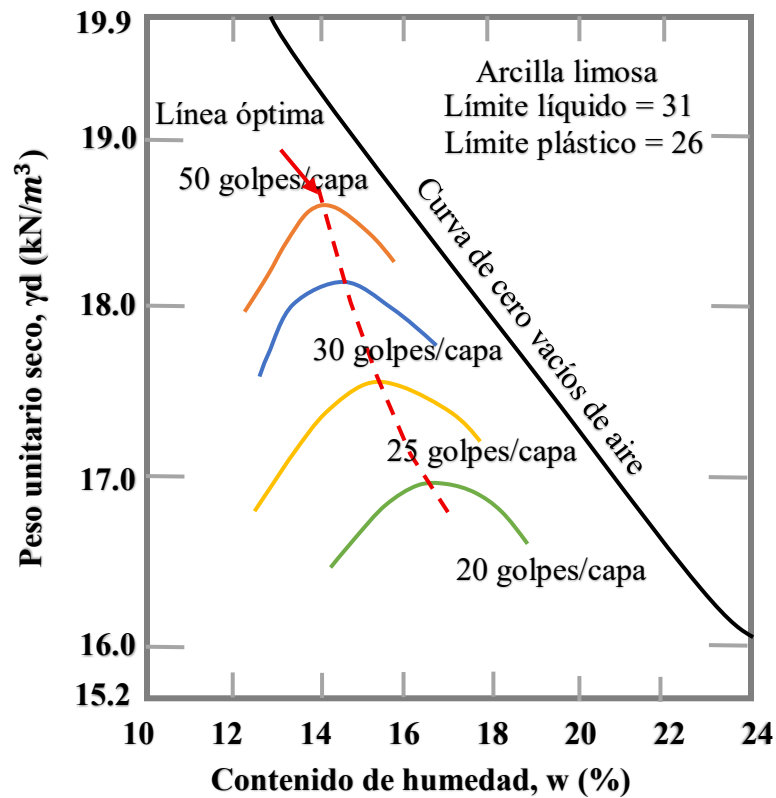
Fuente: Proctor, 1933

c) Energía de compactación

Al comparar el ensayo de Proctor estándar y el Proctor modificado se dejó claro que su diferencia se centra en la energía de compactación usada generando un aumento en el peso unitario seco máximo y una disminución de la humedad óptima.

Es importante conocer la energía de compactación con el fin de disminuir la degradación de las partículas de suelo en el laboratorio y evitar obtener un peso unitario aparente que no es representativo (INVIAS, 2013) (Das, 2013)

Figura 6. Efecto de los cambios en la energía de compactación



Fuente: Das, 2013

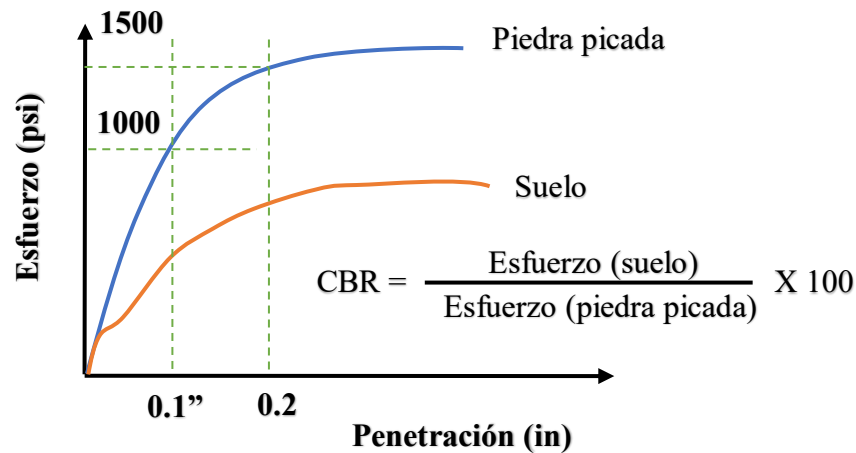
En la imagen 10 se puede observar como la línea punteada indica la disminución de la humedad y de igual manera el aumento en el peso unitario seco a medida que se aplica una mayor cantidad de golpes por capa.

2.4.4 Estudio de CBR

El CBR (California Bearing Ratio) es un ensayo de laboratorio utilizado para evaluar la capacidad de soporte de un suelo, especialmente en el diseño de pavimentos para caminos, aeropuertos y plataformas. Consiste en medir la resistencia del suelo a la penetración de un pistón estándar bajo condiciones controladas de humedad y compactación, y se expresa

como un porcentaje comparado con un material patrón (piedra triturada). (Braja Das, 2010)

Figura 7. Relación del CBR



Fuente: RAMCODES, 2012

Por cada espécimen de suelo se calculan dos valores de CBR, uno a 0.1" de penetración, y el otro a 0.2" de penetración. La pregunta de siempre es ¿cuál de los dos es el CBR que se reporta? ASTM dice que el que se reporta es el de 0.1" mientras este sea menor que el de 0.2". En el caso en el que el valor de CBR para 0.1" fuera mayor que el de 0.2" habría que repetir el ensayo para ese espécimen (La norma en inglés dice «rerun», que traducimos como volver a hacer el ensayo, pero no aclara si hay que volver a fabricar el espécimen o si se puede utilizar la opción de voltearlo y ensayarlo por el otro extremo). (RAMCODES,2012)

Los valores de CBR cercanos a 0% representan a suelos de pobre calidad, mientras que los más cercanos a 100% son indicativos de la mejor calidad.

2.5 La estabilización del suelo

La estabilización de un suelo mejora o controla su estabilidad volumétrica, aumenta su resistencia y el módulo esfuerzo-deformación, mejora su permeabilidad y durabilidad y reduce su susceptibilidad al agua (Víctor Yepes Piqueras, 2016).

En muchos de los proyectos de ingeniería de obras civiles, el suelo nativo no cumple con los requisitos de diseño y por lo tanto es necesario realizar procesos de modificación, estabilización o sustitución para proporcionar a la obra un material de construcción mejorado.

En el caso de la construcción de una estructura vial no siempre se encuentra el suelo adecuado que garantice la estabilidad y durabilidad de una explanada. Si se une a ello la creciente importancia medioambiental y la presión social por minimizar la apertura de nuevos préstamos y vertederos necesarios para el movimiento de tierras de una infraestructura, es evidente el esfuerzo necesario en utilizar materiales calificados como tolerables, marginales e incluso inadecuados. La estabilización permite reemplazar un suelo de baja calidad por otro estabilizado y mejorado. Se trata de una de las técnicas más antiguas y utilizadas en bases y sub bases para uso vial.

2.5.1 Materiales utilizados en a estabilización de suelos

Los procesos de estabilización de suelos más simples que se han implementado son la compactación y el drenaje de suelos; sin embargo, estas dos técnicas en algunos casos no son suficientes para lograr una buena estabilización de los terrenos, por lo que se recurre a la mejora de la gradación del tamaño de las partículas del suelo, siendo uno de los procesos de estabilización de suelos más utilizados, y se puede lograr agregando aglutinantes (Makusa, 2013). La aplicación de aglutinantes se conoce como estabilización química de suelos, esta metodología utiliza materiales cementantes universales como el cemento Portland y la Cal, aunque también en aplicaciones específicas se han implementado sales como el cloruro de sodio (NaCl) o impermeabilizantes como los productos asfálticos (Hall et al., 2012).

Siendo el cemento Portland uno de los materiales más utilizados en el sector de la construcción en diferentes aplicaciones, entre estas como se mencionó anteriormente, la estabilización de suelos. Debido a que la producción de este ha sido íntimamente relacionada con el calentamiento global asociado a las altas temperaturas utilizadas en el proceso de producción, el excesivo consumo energético y de recursos naturales (Damtoft et al., 2008), se han desarrollado materiales alternativos que puedan reducir la huella de carbono y además conservar las propiedades aglutinantes del cemento Portland. De ahí,

han surgido los materiales activados alcalinamente o también llamados geo polímeros, los cuales se producen por la interacción química de un material tipo aluminosilicatos con una solución alcalina activante (Provis; Bernal, 2014; Shi; Fernández-Jiménez; Palomo, 2011). Los principales materiales utilizados como fuente de aluminosilicatos son cenizas volantes, escorias siderúrgicas y meta caolín. En estudios recientes se han utilizado otros materiales como desechos de demolición, residuos de ladrillo y residuos de vidrios, entre otros (Rivera; Cuarán-Cuarán; Vanegas-Bonilla; Mejía de Gutiérrez, 2018; Robayo-Salazar; Rivera; Mejía de Gutiérrez, 2017; Robayo; Mulford; Munera; Mejía de Gutiérrez, 2016).

A diferencia del cemento portland, la producción de materiales activados alcalinamente no consume grandes cantidades de energía, ya que se realiza a temperaturas bajas, ofreciendo una alternativa más ecológica.

2.5.2 Tipos de estabilización

a) Estabilización física

Este tipo de estabilización se utiliza para mejorar el suelo produciendo cambios físicos en el mismo. Hay varios métodos como lo son:

- Combinación de Suelos: este tipo de estabilización es de amplio uso, pero por sí sola no logra producir los efectos deseados, necesitándose siempre de por lo menos la compactación como complemento.

Por ejemplo, los suelos de grano grueso como las grava-arenas tienen una alta fricción interna lo que lo 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 combinación 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.

b) Estabilización química

Se refiere principalmente a la utilización de ciertas sustancias químicas patentizadas y cuyo uso involucra la sustitución de iones metálicos y cambios en la constitución de los suelos involucrados en el proceso.

- Cal: disminuye la plasticidad de los suelos arcillosos y es muy económica.
- Cemento Portland: aumenta la resistencia de los suelos y se usa principalmente para arenas o gravas finas.
- Productos Asfálticos: es una emulsión muy usada para material triturado sin cohesión.
- Cloruro de Sodio: impermeabilizan y disminuyen los polvos en el suelo, principalmente para arcillas y limos.
- Cloruro de Calcio: impermeabilizan y disminuyen los polvos en el suelo, principalmente para arcillas y limos.
- Escorias de Fundición: este se utiliza comúnmente en carpetas asfálticas para darle mayor resistencia, impermeabilizarla y prolongar su vida útil.
- Polímeros: este se utiliza comúnmente en carpetas asfálticas para darle mayor resistencia, impermeabilizarla y prolongar su vida útil.
- Hule de Neumáticos: este se utiliza comúnmente en carpetas asfálticas para darle mayor resistencia, impermeabilizarla y prolongar su vida útil.
- Estabilización Mecánica: Es aquella con la que se logra mejorar considerablemente un suelo sin que se produzcan reacciones químicas de importancia.
- Compactación: este mejoramiento generalmente se hace en la subbase, base y en las carpetas asfálticas.

2.5.3 Propiedades físico-químicas

Las importantes aplicaciones industriales de este grupo de minerales radican en sus propiedades físico-químicas. Dichas propiedades derivan, principalmente, de:

- Su extremadamente pequeño tamaño de partícula (inferior a 2 mm).
- Su morfología laminar (filosilicatos).

Las sustituciones isomórficas, que dan lugar a la aparición de carga en las láminas y a la presencia de cationes débilmente ligados en el espacio interlaminar.

Como consecuencia de estos factores, presentan, por una parte, un valor elevado del área superficial y, a la vez, la presencia de una gran cantidad de superficie activa, con enlaces no saturados. Por ello pueden interaccionar con muy diversas sustancias, en especial compuestos polares, por lo que tienen comportamiento plástico en combinación arcilla-agua con elevada proporción sólido/líquido y son capaces en algunos casos de hinchar, con el desarrollo de propiedades reológicas en suspensiones acuosas. (Suarez Mercedes, universidad de Salamanca, pag.5).

a) Resistencia

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

b) Durabilidad

Suelen involucrarse en este concepto aquellos factores que se refieren a la resistencia al intemperismo, a la erosión o a la abrasión del tráfico; de esta manera, los problemas de durabilidad en las vías terrestres suelen estar muy asociados a suelos situados relativamente cerca de la superficie de rodamiento. En rigor, estos problemas pueden

afectar tanto a los suelos naturales como a los estabilizados, si bien en estos últimos los peores comportamientos suelen ser consecuencia de diseños inadecuados, tales como una mala elección del agente estabilizador o un serio error en su uso, tal como podría ser el caso cuando se ignora la bien conocida susceptibilidad de los suelos arcillosos estabilizados con cemento a la presencia de sulfatos.

c) Estabilidad volumétrica

Se refiere por lo general a los problemas relacionados con los suelos expansivos por cambio de humedad, relacionado con variaciones estacionales o con la actividad del ingeniero. La estabilización suele ofrecer una alternativa de tratamiento para estos suelos, diferente del uso de cargas, capas permeables, introducción de agua, etc., que forma la gama de líneas de acción más usual.

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

d) Permeabilidad

No suele ser muy difícil modificar sustancialmente la permeabilidad de formaciones de suelo por métodos tales como la compactación, la inyección, etc. En materiales arcillosos, el uso de floculantes (por ejemplo, polifosfatos) puede reducir la permeabilidad también significativamente; el uso de floculantes muchas veces hidróxido de cal o yeso) aumenta correspondientemente el valor de la permeabilidad.

En la actualidad se va disponiendo de algunas sustancias que introducidas en el suelo en forma de emulsión pueden reducir mucho su permeabilidad, si bien el uso de estas sustancias ha de ser cuidadosamente analizado, pues no es raro que ejerzan efectos desfavorables en la resistencia al esfuerzo cortante de los suelos.

e) Compresibilidad

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

2.6 Sub rasante

La subrasante es el apoyo incondicional de la estructura en la carretera con la cual va a resistir los diferentes puntos de cargas verticales y deformaciones, es preferible clasificar los tipos de suelos a existir y en la cual se deberá tratar en forma química y mejorar sus característica física y mecánicas para el cual deberá cumplir los requisitos mínimos para la construcción de la vía.

Es la parte exterior terminada de la carretera a nivel de movimiento de tierra (corte y relleno), donde va el afirmado. Es un banco directamente relacionado con el afirmado y es parte del prisma de la carretera que estas entre el suelo natural o aplanado y el pavimento, es la parte exterior del terraplén o fondo de las excavaciones del terreno (MTC EM 115), MTC, 2013.

2.6.1 CBR en la subrasante

El ensayo CBR es para evaluar la calidad de un material de suelo con base en su resistencia, medida a través del ensayo de placa a escala, su significado en español radica en la relación de soporte California, por las siglas en idioma inglés de California Bearing Ratio. Llanos y Reyes (2017 pág. 25). El CBR en la sub rasante viene siendo una característica fundamental en los suelos, debido a que este componente mecánico determinar la resistencia del suelo, para ello es necesario contar con el índice de plasticidad, limite plástico, limite líquido y Proctor modificado, para generar este valor.

Generalmente los límites aceptables del CBR en capas sub rasantes van desde el 3% a valores mayores o iguales al 30%, tomando en cuenta que son recomendaciones provenientes de norma, en las que se estudió un funcionamiento aceptable de dicha capa.

La capa sub rasante comúnmente se encuentra compuesta por suelo natural, que en nuestro medio se compondrá principalmente por arcillas, las cuales en muchas ocasiones no cuentan con valores aceptables de CBR.

Tabla 3. Categorías de sub rasantes

Categorías de Sub rasante	CBR
S0: Sub rasante Inadecuada	$CBR < 3\%$
S1: Sub rasante Insuficiente	De $CBR \geq 3\%$ A $CBR < 6\%$
S2: Sub rasante Regular	De $CBR \geq 6\%$ A $CBR < 10\%$
S3: Sub rasante Buena	De $CBR \geq 10\%$ A $CBR < 20\%$
S4: Sub rasante Muy Buena	De $CBR \geq 20\%$ A $CBR < 30\%$
S5: Sub rasante Excelente	$CBR \geq 30\%$

Fuente: Manual de suelos, Geología, geotecnia y Pavimentos (2014)

2.7 Agregados de desecho

La generación de residuos de Construcción y Demolición está íntimamente ligada a la actividad del sector de la construcción, como consecuencia de la demolición de edificaciones e infraestructuras que han quedado obsoletas, así como de la construcción de otras nuevas.

Se consideran residuos de construcción y demolición aquellos que se generan en el entorno urbano y no se encuentran dentro de los comúnmente conocidos como Residuos Sólidos Urbanos (residuos domiciliarios y comerciales, fundamentalmente), ya que su composición es cuantitativa y cualitativamente distinta. Se trata de residuos, básicamente inertes, constituidos por: tierras y áridos mezclados, piedras, restos de hormigón, restos de pavimentos asfálticos, materiales refractarios, ladrillos, cristal, plásticos, yesos, ferrallas, maderas y, en general, todos los desechos que se producen por el movimiento de tierras y construcción de edificaciones nuevas y obras de infraestructura, así como los generados por la demolición o reparación de edificaciones antiguas.(residuos de construcción y demolición, master ingeniería ambiental 2006-07).

- Composición: La composición de los agregados de desecho de construcciones, varía en función del tipo de infraestructuras de que se trate y refleja en sus componentes

mayoritarios, el tipo y distribución porcentual de las materias primas que utiliza el sector, si bien hay que tener en cuenta que éstas pueden variar de un país a otro en función de la disponibilidad de los mismos y los hábitos constructivos.

Los materiales minoritarios dependen en cambio, de un número de factores mucho más amplio como pueden ser el clima del lugar, el poder adquisitivo de la población, los usos dados al edificio etc.

Por otro lado, la composición de las edificaciones varía a lo largo del tiempo y con ello también cambia la composición de los agregados de desecho de construcciones, según sea la; edad del edificio o estructura que es objeto de demolición.

En la tabla siguiente se detalla la composición general de estos agregados de desecho:

Tabla 4. Composición de los agregados de desecho.

Material	% en volumen
Ladrillos, azulejos y otros cerámicos	54
Hormigón	12
Piedra	5
Arena, grava y otros áridos	4
Madera	4
Vidrio	0.5
Plásticos	1.5
Metales	2.5
Asfalto	5
Yeso	0.2
Papel	0.3
Basura	7
Otros	4

Fuente: Informe Symonds

- Clasificación: La Unión Europea está orientando la política de gestión de los desechos de construcciones hacia un reciclaje masivo de los mismos, por esta razón, un posible agrupamiento de los desechos de construcciones podría realizarse en base a su

composición, relacionándolos con asuntos tales como la separación selectiva, la recogida selectiva (demolición selectiva) y también la peligrosidad de parte de los mismos.

En este sentido de los residuos de construcción y demolición podrían clasificarse en:

- RCD no inertes que justifican una separación y recogida selectiva.
- Existen materiales y productos cuya separación selectiva se justifica en función del valor económico que pueden presentar.
- RCD inertes que justifican una separación y recogida selectiva. La

justificación principal para la separación selectiva de materiales inertes contenidos en la corriente destinada a machaqueo es económica. Los metales presentan un valor de reventa bien establecido y en algunas zonas y determinados momentos, materiales tales como ladrillos y tejas presentan una demanda considerable. Lo mismo puede decirse de los ladrillos refractarios que mayoritariamente son reciclables para la producción de nuevos refractarios.

- RCD peligrosos y potencialmente peligrosos

CAPÍTULO III
DESARROLLO
EXPERIMENTAL

CAPÍTULO III

DESARROLLO EXPERIMENTAL

3.1 Ubicación del proyecto

El departamento de Tarija está ubicado al sur de la República de Bolivia, limita al norte con el departamento de Chuquisaca, al sur con Argentina al este con Paraguay y el oeste con Chuquisaca y Potosí. Tiene una extensión de 37,623 km² y una población de 534.346 habitantes (según el Censo INE 2024).

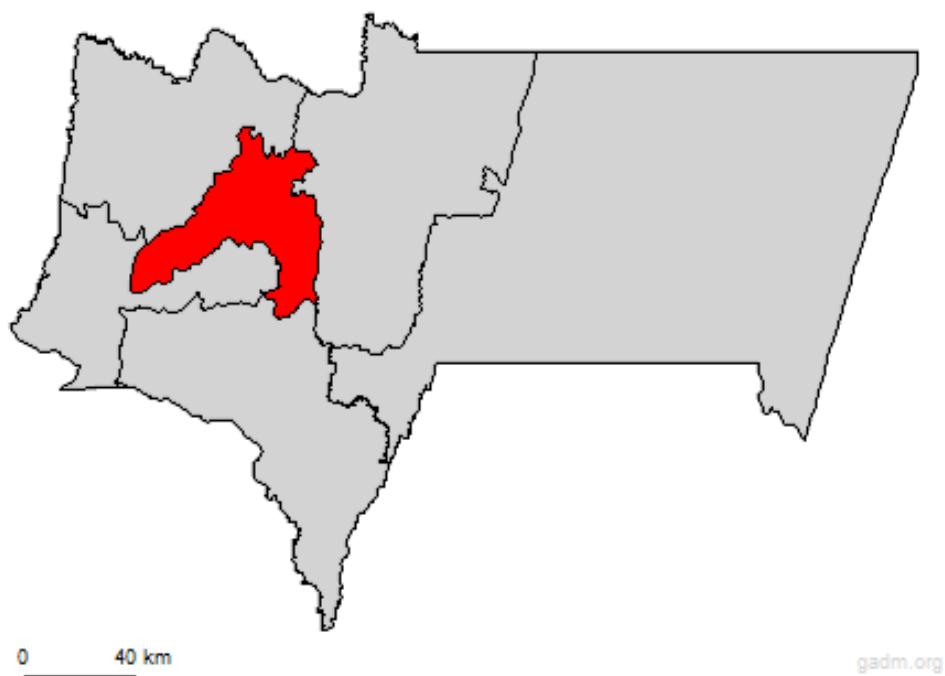
Figura 8. Ubicación geográfica del departamento de Tarija



Fuente. Instituto Nacional de Estadística

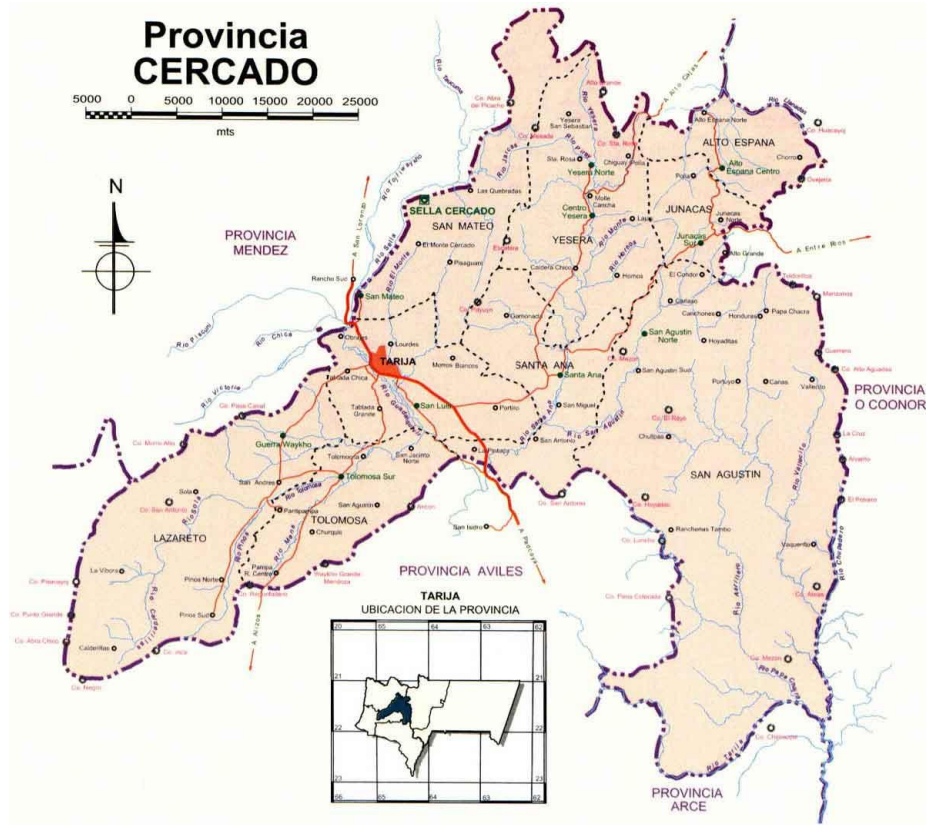
La capital del departamento es la ciudad de Tarija (1866 msnm) situada entre los 21° 32' 00" de latitud sur y los 64° 47' 00" de longitud oeste del meridiano de Greenwich, tiene una extensión de 37 623 km² y su población es de aproximadamente 200 000 habitantes, cuenta con 6 provincias y 157 cantones.

Figura 9. Ubicación del estudio a nivel departamental



Fuente. Instituto Nacional de Estadística

Figura 10. Ubicación del estudio a nivel provincial



Fuente: Tarijaurbana

El presente estudio se encuentra ubicado en la zona urbana de la ciudad de Tarija, provincia cercada del departamento de Tarija, específicamente en las zonas de Alto san mateo y fray quebracho.

Figura 11. Ubicación de las zonas de estudio



Fuente: Google earth

Tabla 5. Zonas de estudio

zonas de estudio	coordenadas	
	Coordenada Este	Coordenada Sur
B/ Alto san mateo	319311.82 m E	7622060.98 m S
B/ Santa fe	319775.16 m E	7622393.24 m S
B/ 15 de junio	319389.28 m E	7621055.16 m S
B/ Chapacos 2	319715.09 m E	7621607.18 m S
B/ Fray quebracho	320321.59 m E	7621408.48 m S

Fuente. Elaboración propia

3.2 Características de la zona de estudio

La zona de estudio se encuentra ubicada en la parte norte de la ciudad de Tarija. Se ha decidido analizar esta área debido al acelerado crecimiento de la mancha urbana, lo cual está generando una rápida ocupación del territorio. Como consecuencia, se prevé la necesidad de implementar obras viales que acompañen y faciliten su desarrollo integral.

Esta región se caracteriza por la presencia predominante de suelos arcillosos, con clasificaciones variadas, típicos del entorno geológico de la ciudad de Tarija. La cobertura superficial incluye matorrales y pequeños árboles, aunque en algunas áreas también se observan signos evidentes de erosión y resequedad, especialmente durante la temporada seca, lo que permite identificar agregados pétreos en la composición del terreno.

Durante la época de lluvias, el suelo, al entrar en contacto con el agua, adquiere una elevada plasticidad. Esta condición resulta frecuentemente problemática para la zona, ya que el barro generado puede dificultar, e incluso impedir, el acceso y tránsito por el lugar.

Figura 12. Subrasante segunda circunvalación



Fuente: Elaboración propia

Figura 13. Subrasante de calles aledañas



Fuente: Elaboración propia

La selección de las muestras fue de manera aleatoria intencional, los puntos considerados son los siguientes:

- **Zona B/ Chapacos 2 – P1**

Tabla 6. Zona chapacos 2


Zona B/ Chapacos 2	Coordenadas	
	Coordenada Este	Coordenada Norte

		
	319715.09 m E	7621607.18 m S
Identificación de muestra	P1	

Fuente: Elaboración propia

- Zona B/ Fray quebracho – P2**


Tabla 7. Zona fray quebracho.

Zona B/ Fray quebracho	Coordenadas	
	Coordenada Este	Coordenada Norte
	320321.59 m E	7621408.48 m S
Identificación de muestra	P2	

Fuente: Elaboración propia

- **Zona B/ Alto san mateo – P3**

Tabla 8. Zona alto san mateo.

Zona B/ Alto san mateo	Coordenadas	
	Coordenada Este	Coordenada Norte
	319311.82 m E	7622060.98 m S
Identificación de muestra	P3	

Fuente: Elaboración propia

- **Zona B/ 15 de junio – P4**


Tabla 9. Zona 15 de junio

Zona B/ 15 de junio	Coordenadas	
	Coordenada Este	Coordenada Norte
	319389.28 m E	7621055.16 m S
Identificación de muestra	P4	

Fuente: Elaboración propia

- **Zona B/ Santa fe – P5**

Tabla 10. Zona santa fe

Zona B/ Santa fe	Coordenadas	
	Coordenada Este	Coordenada Norte
	319775.16 m E	7622393.24 m S
Identificación de muestra	P5	

Fuente: Elaboración propia

3.3 Caracterización preliminar de las muestras

Tabla 11. Caracterización preliminar de las muestras.

Planilla resumen									
Zona	Muestra	% H	% pasa N°200	L.L.	L.P.	I.P.	IG	AASHTO	SUCS
Barrios chapacos 2	P1	6.5	89.44	27	16	11	9	A-6(9)	CL
		6.6	88.57	26.7	15.7	11	9		
Barrio Fray Quebracho	P2	16.35	88.17	27.8	18.7	9.1	8	A-4(8)	ML
		16.2	87.15	28	18.4	9.6	8		
Barrio Alto San Mateo	P3	13.21	89.44	30.7	21.1	9.6	8	A-6(8)	CL
		13.3	91.50	30.3	20.9	9.4	8		
Barrio 15 de junio	P4	6.14	94.27	32.4	20.6	11.8	9	A-6(9)	CL
		6.1	94.78	32.6	20.5	12.1	9		
Barrio Santa FE	P5	5.5	60.61	18.6	15.9	2.7	6	A-4(6)	ML
		6.1	63.59	18.1	16.2	1.9	6		

Fuente. Elaboración propia

Se puede apreciar que P1, P3 y P4 son tipos de suelos similares dentro de la zona de estudio, además P2 y P5 cuentan con propiedades diferentes al de los demás, por tal motivo se elige a P4 ya que presenta un mayor límite líquido que los demás lo que implica que tendrá una mayor plasticidad lo que lo hace el caso más desfavorable al momento de usar este tipo de suelo en obra. Por el contrario, P5 muestra un menor límite líquido por lo tanto estos dos puntos serán seleccionados para el análisis, viendo en qué casos el aditivo se desempeña mejor para una estabilización.

De tal manera los puntos de estudio para el presente trabajo quedan de la siguiente forma:

Tabla 12. Puntos seleccionados

Planilla resumen									
Zona	Muestra	% H	% pasa N°200	L.L.	L.P.	I.P.	IG	AASHTO	SUCS
Barrio 15 de junio	P4	6.14	94.27	32.4	20.6	11.8	9	A-6(9)	CL
		6.1	94.78	32.6	20.5	12.1	9		
Barrio Santa FE	P5	5.5	60.61	18.6	15.9	2.7	6	A-4(6)	ML
		6.1	63.59	18.1	16.2	1.9	6		

Fuente. Elaboración propia

De esta manera se podrá analizar cómo se desempeñan los agregados de desecho de construcciones dentro de este tipo de suelos cohesivos, viendo en qué tipo de suelos se presenta una mejor opción en su estabilización.

3.4 Metodología empleada

Para la estabilización de suelos cohesivos combinándolos con agregados de desecho de construcciones, se aplicó la siguiente metodología:

Para la identificación de los bancos de préstamo se procedió a identificar los tipos de suelo que se tiene en la zona de estudio, obteniendo así de cinco lugares diferentes muestras de suelo fino, los cuales serán usados para clasificarlos y ver que métodos son los más óptimos para su estudio. Además, se propone trabajar con 3 diferentes porcentajes de combinación suelo-aditivo los cuales irán en porcentajes del 5%, 10% y 15% de combinación con el suelo natural, siguiendo los diferentes criterios:

3.5 Caracterización de la muestra

Para la caracterización de la muestra se realizaron diferentes ensayos de aplicación con el fin de conocer las propiedades del suelo natural dentro de la zona de estudio.

En la caracterización de la muestra se realizaron los siguientes ensayos:

- Contenido de humedad
- Granulometría
- Límites de Atterberg
- Compactación T-180
- CBR

Figura 14. Caracterización de la muestra



Fuente: Elaboración propia

3.5.1 Determinación del contenido de humedad del suelo (ASTM D2216)

Objeto

Este método cubre la determinación de laboratorio del contenido de humedad del suelo, roca, y mezclas de suelo-agregado por peso.

El contenido de agua del material se define como la relación, expresada en porcentaje, entre la masa de agua que llena los poros, en una masa de material, y la masa de las partículas sólidas de material.

Para la realización de este ensayo se utilizó el método del horno.

Figura 15. Ensayo de contenido de humedad



Fuente Elaboración propia

Tabla resumen del contenido de humedad

Tabla 13 contenido de humedad

CONTENIDO DE HUMEDAD		
Zona	Muestra	% humedad
Barrio 15 de junio	P4	6.14
		6.1
Barrio santa fe	P5	5.5
		6.1

Fuente: Elaboración propia

3.5.2 Análisis granulométrico por tamizado (ASTM D422 – AASHTO T88)

Objeto

Este método permite, mediante tamizado, determinar la distribución por tamaños de las partículas mayores que 0,075 mm, de una muestra de suelo.

Para la realización de este ensayo se utilizó el método de lavado

Figura 16. Ensayo de granulometría



Fuente Elaboración propia

Tabla resumen de granulometría

Tabla 14. Granulometría

GRANULOMETRÍA		
Zona	Muestra	% que pasa del total N°200
Barrio 15 de junio	P4	94.27
		94.78
Barrio santa fe	P5	60.61
		63.59

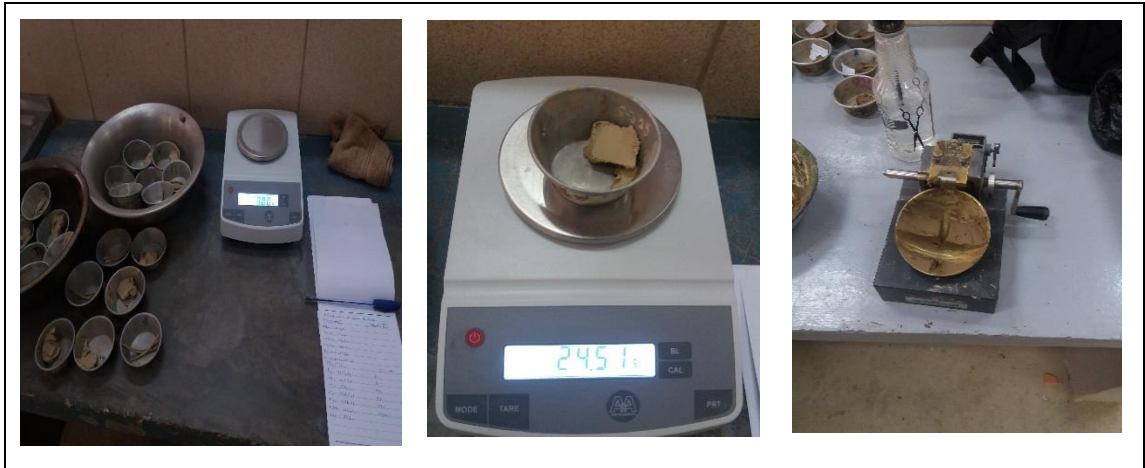
Fuente: Elaboración propia

3.5.3 Determinación del límite líquido de los suelos (ASTM D4318 - AASHTO T89)

Objeto

Este método establece el procedimiento para determinar el límite líquido de los suelos, mediante la máquina Casagrande.

Figura 17. Ensayo de limite liquido



Fuente Elaboración propia

3.5.4 Determinación del límite plástico e índice de plasticidad (ASTM D4318 AASHTO T90)

Objeto

Este método establece el procedimiento para determinar el Límite Plástico y el Índice de Plasticidad de los suelos.

Figura 18. Ensayo de limite plástico



Fuente Elaboración propia

Tabla resumen límites de Atterberg

Tabla 15. Límites de ATTERBERG

LÍMITES DE ATTERBERG					
Zona	Muestra	LL	LP	IP	IG
Barrio 15 de junio	P4	32.4	20.6	11.8	9
		32.6	20.5	12.1	9
Barrio santa fe	P5	18.6	15.9	2.7	6
		18.1	16.2	1.9	6

Fuente: Elaboración propia

3.5.5 Clasificación de suelos (método AASHTO)

Objeto

Clasificar los suelos en grupos de comportamientos semejantes, con propiedades geotécnicas similares.

Tabla 16. Caracterización de suelos

CARACTERIZACIÓN DE SUELOS						
Zona	Muestra	% que pasa del total N°200	LL	LP	IP	Clasificación
Barrio 15 de junio	P4	94.27	32.4	20.6	11.8	A-6(9)
		94.78	32.6	20.5	12.1	A-6(9)
Barrio santa fe	P5	60.61	18.6	15.9	2.7	A-4(6)
		63.59	18.1	16.2	1.9	A-4(6)

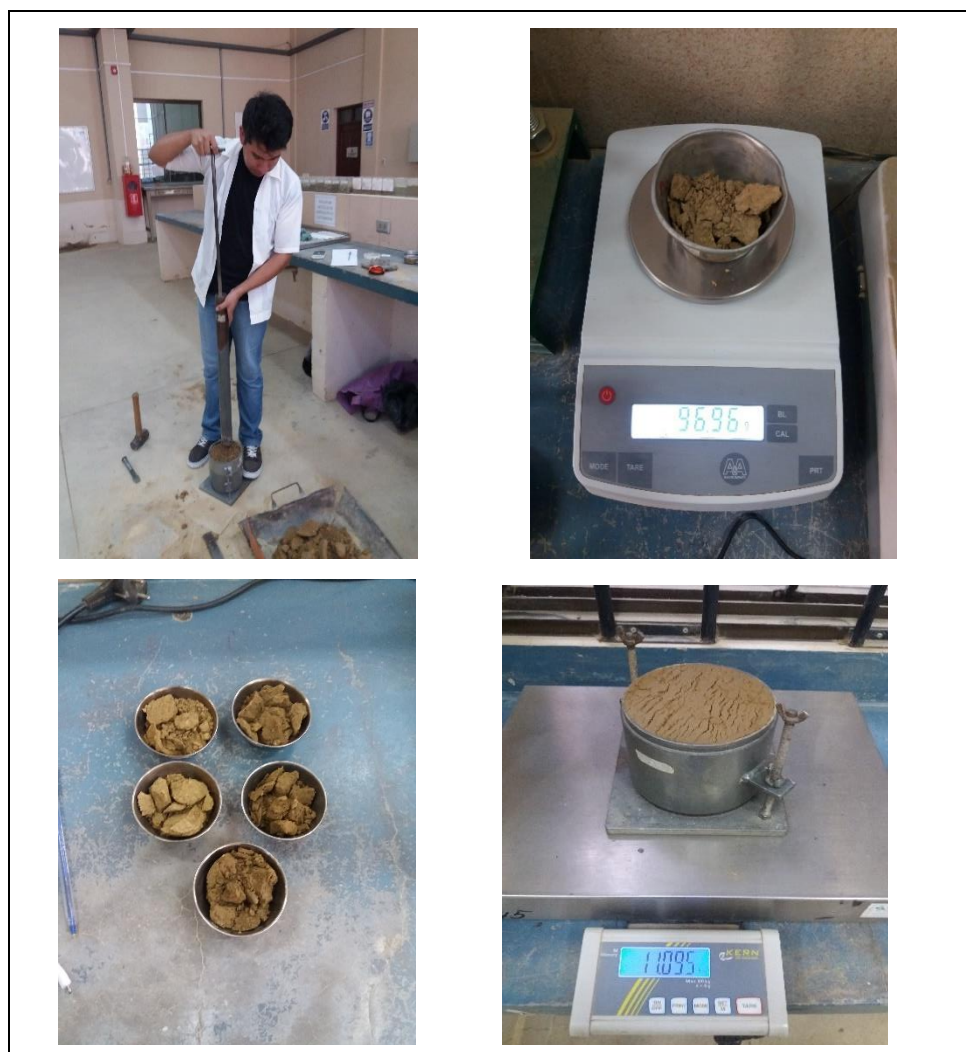
Fuente: Elaboración propia

3.5.6 Relaciones de peso unitario – humedad en los suelos – método modificado (ASTM D422 - AASHTO T180)

Objeto

Este método establece el procedimiento para determinar la relación entre la humedad y la densidad de un suelo, compactado en un molde normalizado, mediante un pisón de 4,5 Kg. En caída libre, desde una altura de 460 mm.

Figura 19. Compactación Proctor T-180



Fuente Elaboración propia

Tabla resumen compactación T-180

Tabla 17. Compactación T-180

COMPACTACIÓN T-180			
Zona	Muestra	Densidad máxima (g/cm ³)	Humedad optima (%)
Barrio 15 de junio	P4	2.05	10.69
		2.05	10.23
Barrio santa fe	P5	2.1	9.5
		2.12	9.17

Fuente: Elaboración propia

3.5.7 Determinación de la relación de soporte del suelo en el laboratorio (CBR de laboratorio) (ASTM D1883 - AASHTO T193)

Objeto

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

Figura 20. Ensayo CBR



Fuente Elaboración propia

Tabla resumen CBR suelo natural

Tabla 18. CBR suelo natural

CBR			
Zona	Muestra	CBR 95% D. Max	CBR 100% D. Max
Barrio 15 de junio	P4	2	2
		3	3
Barrio santa fe	P5	3	3
		3	3

Fuente: Elaboración propia

3.6 Caracterización del aditivo

Para la caracterización del aditivo, si bien no se tenían ensayos específicos, se realizaron ensayos de aplicación centrados en conocer las propiedades de los agregados para hormigones y asfaltos, los cuales se basan en la norma ASTM y se comparó los resultados obtenidos con los parámetros establecidos para estos ensayos.

En la caracterización del aditivo se realizaron los siguientes ensayos:

- Granulometría
- Peso específico – Agregado fino
- Peso específico – Agregado grueso
- Desgaste de los ángeles

Figura 21. Caracterización del aditivo



Fuente: Elaboración propia

3.6.1 Análisis granulométrico por tamizado

Objeto

Este método permite, mediante tamizado, determinar la distribución por tamaños de las partículas mayores que 0,075 mm.

Figura 22. Granulometría del aditivo



Fuente: Elaboración propia

Tabla resumen de la granulometría del aditivo

Tabla 19. Granulometría del aditivo

GRANULOMETRÍA DEL ADITIVO		
Aditivo	Muestra	% que pasa del total N°200
Ladrillo y hormigón	A1	0.81
		0.84
		0.99

Fuente: Elaboración propia

3.6.2 Peso específico y absorción del agregado fino

Objeto

El ensayo tiene por objeto la determinación del peso específico aparente y del peso específico a granel, lo mismo que la cantidad de agua que absorbe el agregado fino cuando se sumerge en agua por un periodo de 24 horas, expresada como un porcentaje en peso.

Figura 23. Peso específico del agregado fino



Fuente: Elaboración propia

Tabla resumen del peso específico de agregado fino

Tabla 20. Peso específico agregado fino

PESO ESPECÍFICO AGREGADO FINO					
Aditivo	Muestra	Peso específico a granel (g/cm ³)	Peso específico s.s.s (g/cm ³)	Peso específico aparente (g/cm ³)	% de absorción
Ladrillo y hormigón	A1	1.92	2.14	2.46	11.41
		1.93	2.15	2.47	11.43
		1.85	2.06	2.34	11.33
	Promedio	1.9	2.11	2.42	11.39

Fuente: Elaboración propia

3.6.3 Peso específico y absorción del agregado grueso

Objeto

El ensayo tiene por objeto la determinación del peso específico aparente y del peso específico a granel, lo mismo que la cantidad de agua que absorbe el agregado grueso

cuando se sumerge en agua por un periodo de 24 horas, expresada como un porcentaje en peso.

Figura 24. Peso específico del agregado grueso



Fuente: Elaboración propia

Tabla resumen del peso específico de agregado grueso

Tabla 21. Peso específico agregado grueso

PESO ESPECÍFICO AGREGADO GRUESO					
Aditivo	Muestra	Peso específico a granel (g/cm ³)	Peso específico s.s.s (g/cm ³)	Peso específico aparente (g/cm ³)	% de absorción
Ladrillo y hormigón	A1	3.04	3.37	4.56	10.94
		3.05	3.37	4.51	10.66
		3.13	3.47	4.75	10.91
	Promedio	3.07	3.41	4.61	10.84

Fuente: Elaboración propia

3.6.4 Determinación del porcentaje de desgaste del agregado grueso por medio de la máquina de los ángeles

Objeto

Este ensayo tiene por objeto determinar la resistencia de los agregados a la abrasión y al impacto, simulando las condiciones de desgaste que ocurren en la construcción de carreteras y otras aplicaciones donde los materiales pétreos están expuestos a fuerzas de fricción y rozamiento.

Figura 25. Desgaste de los ángeles del aditivo



Fuente: Elaboración propia

Tabla resumen del porcentaje de desgaste

Tabla 22. Desgaste de los ángeles

% DE DESGASTE DE LOS ÁNGELES		
Aditivo	Muestra	% de desgaste
Ladrillo y hormigón	A1	43.29
		43.40
		43.35

Fuente: Elaboración propia

3.7 Caracterización de la muestra combinada con el aditivo

Para la caracterización de la muestra de suelo combinada con el aditivo se emplearon ensayos de aplicación que reflejen la efectividad del aditivo para ser empleados en una subrasante, para lo cual se realizaron los siguientes ensayos:

- Compactación T-180
- CBR

3.7.1 Relaciones de peso unitario – humedad en los suelos – método modificado (ASTM D422 - AASHTO T180)

Objeto

Este método establece el procedimiento para determinar la relación entre la humedad y la densidad de un suelo, compactado en un molde normalizado, mediante un pisón de 4,5 Kg. En caída libre, desde una altura de 460 mm.

Figura 26. Compactación T-180



Fuente: Elaboración propia

Tabla resumen compactación T-180 del suelo natural combinado con el aditivo

Tabla 23. Compactación suelo-aditivo

COMPACTACIÓN T-180		5%		10%		15%	
zona	muestra	densidad máxima (g/cm3)	humedad optima (%)	densidad máxima (g/cm3)	humedad optima (%)	densidad máxima (g/cm3)	humedad optima (%)
Barrio 15 de junio	P4	2.01	11.34	2.04	11.34	1.99	11.55
		2	11.82	1.98	11.38	2	11.2
		1.99	11.38	1.96	11.42	1.99	11.33
Barrio santa fe	P5	2.12	9.64	2.1	9.2	2.09	9.34
		2.06	10.19	2.06	10.51	2.05	10.11
		2.05	10.44	2.05	10.44	2.04	10.59

Fuente: Elaboración propia

Tabla resumen compactación T-180 muestra P5 con el porcentaje óptimo del aditivo A-1

Tabla 24. Compactación suelo-%óptimo de aditivo

COMPACTACIÓN T-180		2.3%	
Zona	Muestra	Densidad máxima (g/cm3)	Humedad optima (%)
Barrio santa fe	P5	2.08	9.04
		2.07	8.66
		2.09	8.87

Fuente: Elaboración propia

3.7.2 Determinación de la relación de soporte del suelo en el laboratorio (CBR de laboratorio) (ASTM D1883 - AASHTO T193)

Objeto

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

Figura 27. Ensayo CBR



Fuente: Elaboración propia

Tabla resumen CBR suelo natural combinado con el aditivo

Tabla 25. CBR suelo-aditivo

CBR		5%		10%		15%	
Zona	Muestra	CBR 95% D. Max	CBR 100% D. Max	CBR 95% D. Max	CBR 100% D. Max	CBR 95% D. Max	CBR 100% D. Max
Barrio 15 de junio	P4	2	2	3	4	6	6
		3	3	4	4	6	6
Barrio santa fe	P5	9	10	14	15	14	15
		9	9	11	12	14	15

Fuente: Elaboración propia

Tabla resumen CBR suelo natural combinado con ladrillo

Tabla 26. CBR suelo-ladrillo

CBR-LADRILLO		5%		10%		15%	
Zona	Muestra	CBR 95% D. Max	CBR 100% D. Max	CBR 95% D. Max	CBR 100% D. Max	CBR 95% D. Max	CBR 100% D. Max
Barrio 15 de junio	P4	3	3	3	3	5	5
Barrio santa fe	P5	10	10	10	10	9	10

Fuente: Elaboración propia

Tabla resumen CBR suelo natural combinado con hormigón

Tabla 27. CBR suelo-hormigón

CBR-HORMIGÓN		5%		10%		15%	
Zona	Muestra	CBR 95% D. Max	CBR 100% D. Max	CBR 95% D. Max	CBR 100% D. Max	CBR 95% D. Max	CBR 100% D. Max
Barrio 15 de junio	P4	2	3	6	6	9	9
Barrio santa fe	P5	10	11	13	14	12	13

Fuente: Elaboración propia

Tabla resumen CBR muestra P5 combinada con el porcentaje óptimo del aditivo

Tabla 28. CBR porcentaje óptimo de aditivo

CBR-PORCENTAJE ÓPTIMO		2.3%	
Zona	Muestra	CBR 95% D. Max	CBR 100% D. Max
Barrio santa fe	P5	6	7
		6	7
		8	8
		9	9
		7	7
		8	8
		7	8

		8	8
		7	7
		7	7
		9	8
		8	8
		9	8
		8	8
		8	7
		8	7
		8	8
		8	7

Fuente: Elaboración propia

Tabla 29. Resumen de resultados

Zona	Muestra	% de humedad	% que pasa N° 200	LL	LP	IP	Densidad natural	Densidad combinada			% CBR natural	% CBR combinado		
								5%	10%	15%		5%	10%	15%
Barrio 15 de junio	P4	6.14	94.27	32.4	20.6	11.8	2.05	2.01	2.04	1.99	2	2	4	6
		6.1	94.78	32.6	20.5	12.1	2.05	2	1.98	2		3	4	6
		6.1	94.78	32.6	20.5	12.1	2.05	1.99	1.96	1.99	3	3	4	6
Barrio santa fe	P5	5.5	60.61	18.6	15.9	2.7	2.1	2.12	2.1	2.09	3	10	15	15
		6.1	63.59	18.1	16.2	1.9	2.12	2.06	2.06	2.05		9	12	15
		6.1	63.59	18.1	16.2	1.9	2.12	2.05	2.05	2.04	3	9	12	15

Fuente: Elaboración propia

Tabla 30. Resumen de resultados del aditivo

Aditivo	Muestra	% que pasa del total N°200	% de desgaste de los ángeles	Peso específico agregado grueso				Peso específico agregado fino			
				peso específico a granel (g/cm3)	peso específico s.s.s (g/cm3)	peso específico aparente (g/cm3)	% de absorción	peso específico a granel (g/cm3)	peso específico s.s.s (g/cm3)	peso específico aparente (g/cm3)	% de absorción
ladrillo y hormigón	A1	0.81	43.29	3.04	3.37	4.56	10.94	1.92	2.14	2.46	11.41
		0.84	43.40	3.05	3.37	4.51	10.66	1.93	2.15	2.47	11.43
		0.99	43.35	3.13	3.47	4.75	10.91	1.85	2.06	2.34	11.33
			Promedio	3.07	3.41	4.61	10.84	1.9	2.11	2.42	11.39

Fuente: Elaboración propia

CAPÍTULO IV

ANÁLISIS Y COMPARACIÓN DE RESULTADOS

CAPÍTULO IV

ANÁLISIS Y COMPARACIÓN DE RESULTADOS

4.1 Introducción

Para el análisis de los resultados obtenidos de los ensayos de CBR realizados a las muestras de suelo P4 y P5 provenientes de las zonas 15 de junio y santa fe respectivamente, siendo suelos arcillosos finos con diferentes propiedades cabe resaltar que el aditivo empleado no se comportó de la misma manera con estas muestras de suelo. Además, el aditivo al estar compuesto por ladrillo y hormigón, surge la idea de analizar el comportamiento de estos materiales por separado, por lo cual se hizo el análisis para tres condiciones distintas en la que el aditivo empleado se pudiera utilizar dentro de obra y luego hacer una comparación que indique para que tipo de suelo el aditivo propuesto se desempeña de la mejor manera para su uso en la estabilización de subrasantes para carreteras.

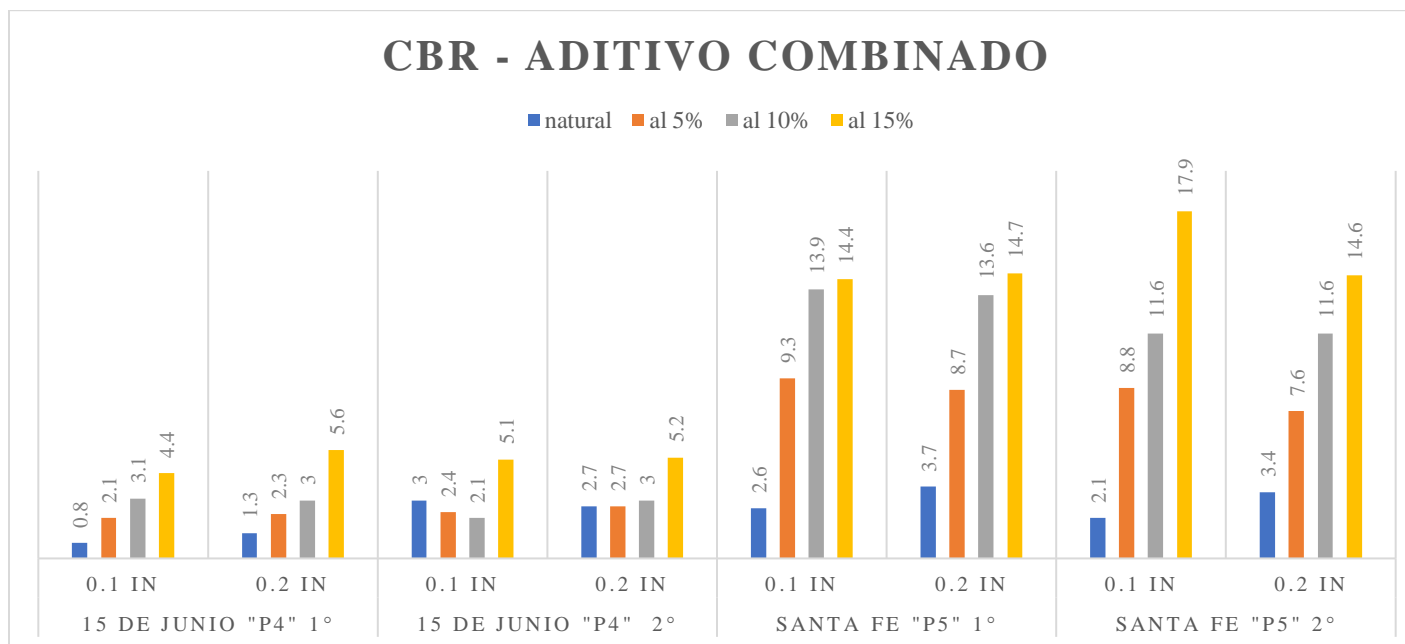
4.2 Análisis de los valores de CBR a 0.1 y 0.2 pulgadas de penetración

Se realizo este tipo de análisis de los resultados de los ensayos de CBR con el fin de verificar el comportamiento del aditivo propuesto, verificando si existiera un proceso de compactación adicional cuando se aumenta la carga de penetración del pistón en los ensayos CBR.

Estos resultados sirvieron para analizar el comportamiento más cercano que tendría este tipo de estabilización en condiciones reales.

4.2.1 CBR para sub rasante P4 y P5, con aditivo compuesto por 50% de concreto y 50% de ladrillo.

Figura 28. Valores CBR - combinado



Fuente: elaboración propia.

La figura 28 muestra, que al ser P4 y P5 muestras de suelos finos, pero de diferente tipo, el comportamiento de estos suelos es diferente con la presencia del aditivo propuesto, el cual este compuesto por 50% de hormigón y 50% de ladrillo. Con lo cual se analizó cada caso por separado.

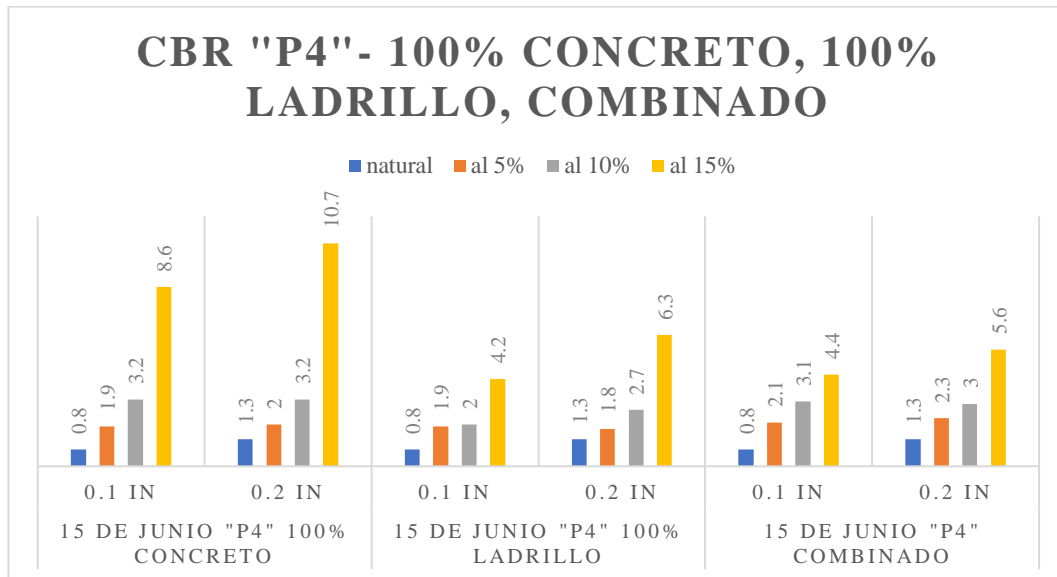
- Al hacer el análisis de los datos obtenidos de CBR para la muestra de suelo P4, zona 15 de junio, se ve que los resultados en los valores de CBR, tanto en los valores de 0.1 in (2.5mm) y 0.2 in (5mm) de penetración, en los porcentajes de combinación suelo-aditivo del 5% y 10%, tienden a bajar levemente los valores de CBR con respecto al suelo natural, el cual tiene un valor promedio de CBR igual a 2%. Pero con un porcentaje de combinación suelo-aditivo del 15% este valor de CBR presenta una mejoría significativa con respecto a los anteriores porcentajes de combinación, con lo cual indicaría que al tratarse de un tipo de suelo A-6(9) aun este no alcanzó una estabilidad con ese porcentaje de aditivo, esto indicaría que se necesitaría más del 15% de aditivo para que este se estabilice, lo cual haría que un posible valor de porcentaje óptimo de aditivo para este suelo, este por encima del 15% de combinación aditivo-suelo, haciendo que se tenga mayores costos para su puesta en obra.

- Viendo la figura 28, los valores de CBR en P5, zona santa fe, presenta una gran mejoría respecto a los valores de CBR de suelo natural, se puede hacer resaltar que en un porcentaje de combinación suelo-aditivo de 10% ya se tendría una leve estabilidad con respecto al 15% de combinación suelo-aditivo. Al tratarse de un suelo A-4(6) lo cual indica que no posee una gran plasticidad, haciendo que este no requiera de porcentajes elevados de adición de aditivos para mejorar sus condiciones iniciales. Esto se puede apreciar más claramente, ya que en un porcentaje de combinación suelo-aditivo del 5% se tiene un valor promedio de CBR de 8.15% a 0.2 in (5mm), esto indicaría una mejoría de las condiciones de CBR en casi un 250% respecto al CBR natural.

Cabe resaltar además que, con los porcentajes de combinación suelo-aditivo de 10% y 15% ya se alcanzaría una estabilidad en sus valores de CBR para este tipo de suelo, con lo cual indicaría que un porcentaje óptimo de aditivo se encuentra dentro de este rango, haciendo que su aplicación en campo no resulte muy costosa de ponerla en marcha.

4.2.1.1 CBR para subrasante P4, análisis del comportamiento del suelo

Figura 29. Comparación de valores CBR P4



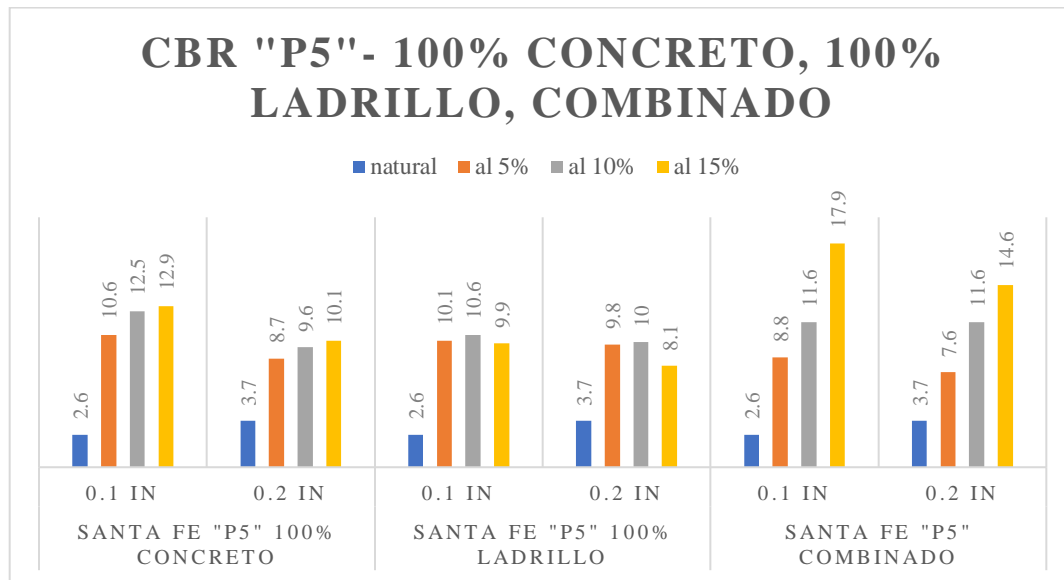
Fuente: elaboración propia

Como se puede apreciar en la figura 29, la muestra de suelo P4, al tratarse de un suelo A-6(9), muestra un mejor comportamiento al ser combinado con un aditivo que este compuesto al 100% de concreto, esto era de esperarse ya que los suelos finos al contener grandes cantidades de arcilla, al momento de ser estabilizados muestran mejores condiciones si se combinan con materiales cementantes como ser cemento, cal, etc. cómo es bien sabido por otros estudios previos de estabilización usando estos materiales como aditivos. Se ve que un aditivo compuesto al 100% de concreto en un porcentaje de combinación suelo-aditivo del 15%, mejora casi un 800% el valor de CBR con respecto al natural. En el caso de emplear 100% de ladrillo como aditivo en un porcentaje de combinación suelo-aditivo del 15%, se mejora casi en 500% el valor de CBR a 0.2 in con respecto al natural y al usar el aditivo propuesto se tiene una mejoría del 400% del valor de CBR a 0.2in con respecto al valor de CBR de suelo natural.

La tendencia del suelo es la misma que en los casos anteriores, presentando una leve mejoría del valor de CBR en porcentajes de combinación de 5% y 10% y presentando mejores resultados en porcentajes de combinación superiores al 15%. Esto indicaría que en cualquiera de los 3 casos un porcentaje óptimo del aditivo se encontraría en rangos mayores al 15%, lo cual generaría costos más elevados para su aplicación.

4.2.1.2 CBR para subrasante P5, análisis del comportamiento del suelo

Figura 30. Comparación de valores CBR P5



Fuente: elaboración propia

La figura 30 muestra el comportamiento del suelo P5, que al tratarse de un suelo A-4(9), presenta mejores condiciones de CBR al ser combinada con el aditivo combinado propuesto, alcanzando un valor de CBR de 14.6% a 0.2 in (5mm), lo cual indicaría una mejoría del valor de CBR con respecto del natural en casi un 400%, además se puede ver que alcanza una leve estabilidad en los valores de combinación suelo-aditivo de 10% y 15%, lo cual indicaría que el porcentaje óptimo para una aplicación en campo estaría entre estos valores de combinación propuestos.

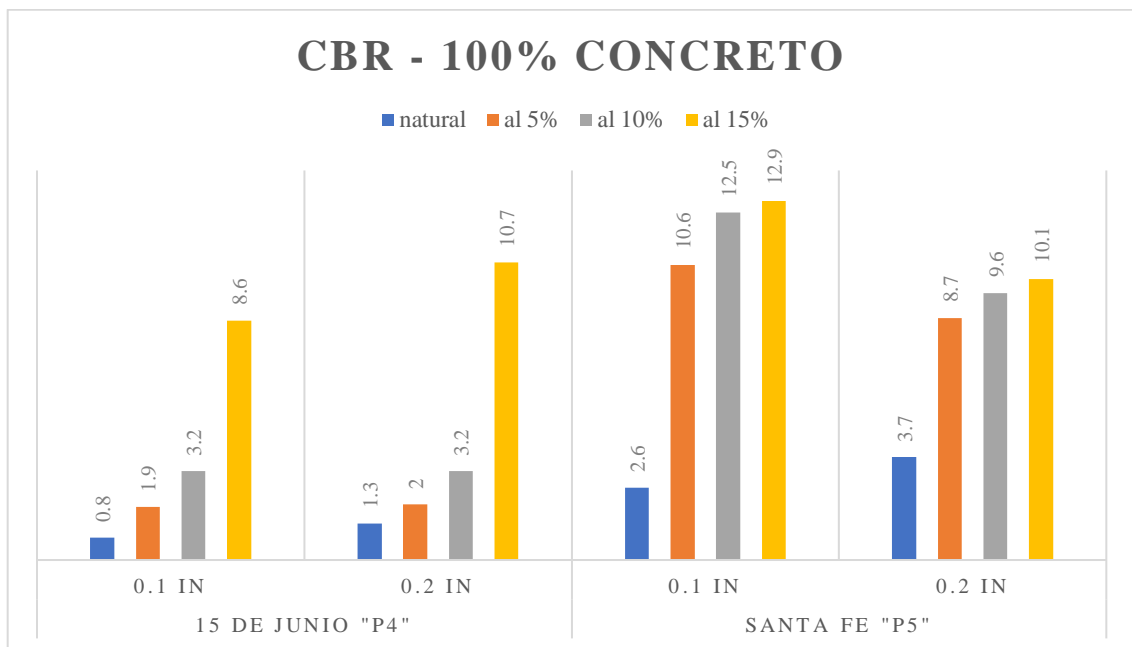
Este suelo, también al tratarse de un suelo fino no es indiferente a la tendencia de reaccionar de mejor manera con un aditivo compuesto por materiales cementantes, ya que presenta mejores condiciones en el valor de CBR con respecto a usar un aditivo compuesto al 100% de ladrillo.

Se puede ver que usando un aditivo compuesto al 100% de concreto en una combinación de suelo aditivo del 15% alcanza un valor de CBR de 10.1% a 0.2 in (5mm), lo que indicaría una mejoría de casi 300% con respecto al CBR natural.

Si bien el ladrillo al 100% empleado como aditivo, de igual manera funciona al contacto con este tipo de suelos, no lo hace de la misma manera que el combinado, pero al alcanzar una estabilidad en sus resultados desde una combinación de suelo-aditivo desde el 5%, hace pensar que se necesitara una menor cantidad de este aditivo como un porcentaje óptimo para su aplicación.

4.2.2 CBR para subrasante en P4 y P5, con aditivo compuesto en un 100% de concreto

Figura 31. Valores CBR-puro concreto



Fuente: elaboración propia

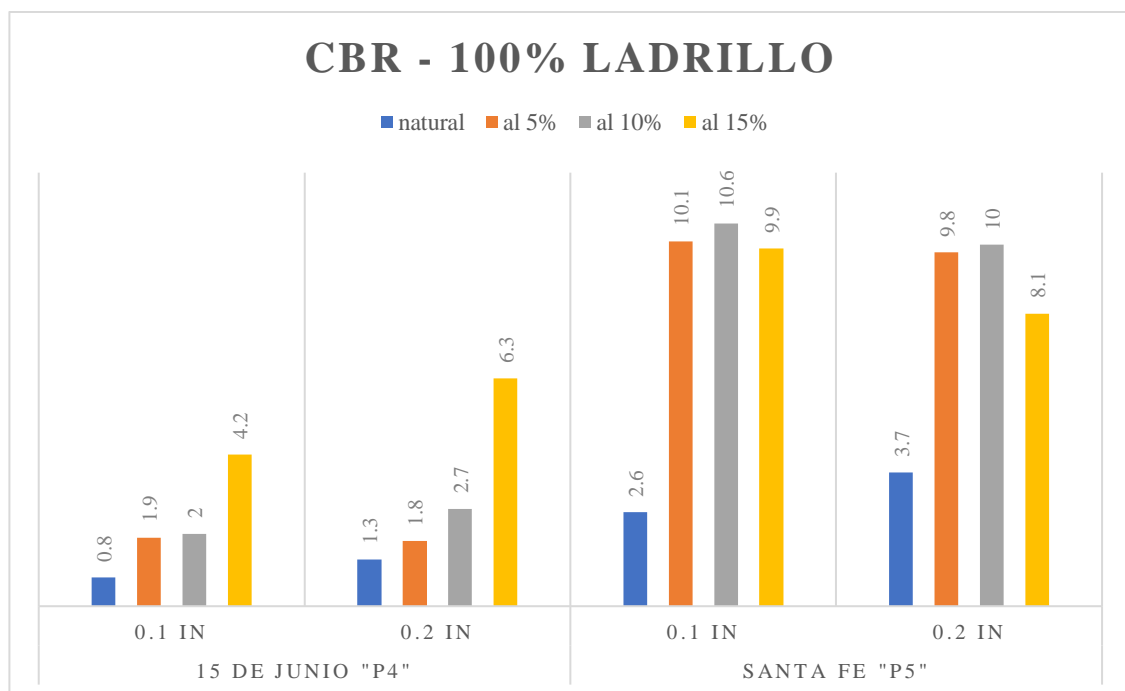
- En la figura 31 se puede apreciar más claramente que para la muestra P4 (zona 15 de junio), que al tratarse de un suelo A-6 (9), tiene una muy buena reacción ante un aditivo compuesto al 100% de hormigón en especial en un porcentaje de combinación del 15%, alcanzando valores de CBR de 8.6% a una penetración de 0.1 in (2.5mm) y 10.7% a una penetración de 0.2 in (5mm).

Esto denota una tendencia del suelo a mejorar su valor de CBR con un mayor porcentaje de combinación con este aditivo compuesto al 100% de hormigón.

- Analizando la incidencia que tiene el aditivo compuesto al 100% de hormigón, en un suelo A-4 (6) como lo es la muestra P5 (zona santa fe), resalta un comportamiento más estable de los valores de CBR que se tiene en los diferentes porcentajes de combinación (5%, 10% y 15%), siendo que al 15% de combinación con el aditivo ya se alcanza una estabilidad respecto al 10% de combinación, alcanzando valores máximos de 12.9% a una penetración de 0.1 in (2.5mm) y 10.1% a una penetración de 0.2 in (5mm).

4.2.3 CBR para subrasante en P4 y P5, con aditivo compuesto en un 100% de ladrillo

Figura 32. Valores CBR – puro ladrillo



Fuente: elaboración propia

- En la figura 32 se ve que en la muestra P4 (zona 15 de junio), el aditivo compuesto por 100% de ladrillo tiene un comportamiento mucho mejor en un porcentaje de combinación del 15% alcanzando valores de CBR de 4.2% a 0.1 in (2.5mm) y 6.3% a 0.2 in (5mm), lo cual comparado con porcentajes menores de combinación aditivo-suelo se obtiene una gran mejoría en cuanto al CBR, con lo cual se podría esperar que a porcentajes de combinación suelo-aditivo mayores al 15% se tendría quizá mejores resultados.

- Por otro lado, al analizar los resultados de CBR obtenidos para la muestra de suelo P5 (zona santa fe), que la tratarse de un suelo más limoso, este tipo de aditivo se desempeña mejor ya que alcanza una estabilidad por así decirlo, en un porcentaje de combinación suelo-aditivo del 10%, con lo cual este alcanzaría valores de CBR máximos de 10.6% a 0.1 in (2.5mm) y 10% a 0.2 in (5mm).

4.2.4 Análisis del porcentaje óptimo de aditivo a emplear

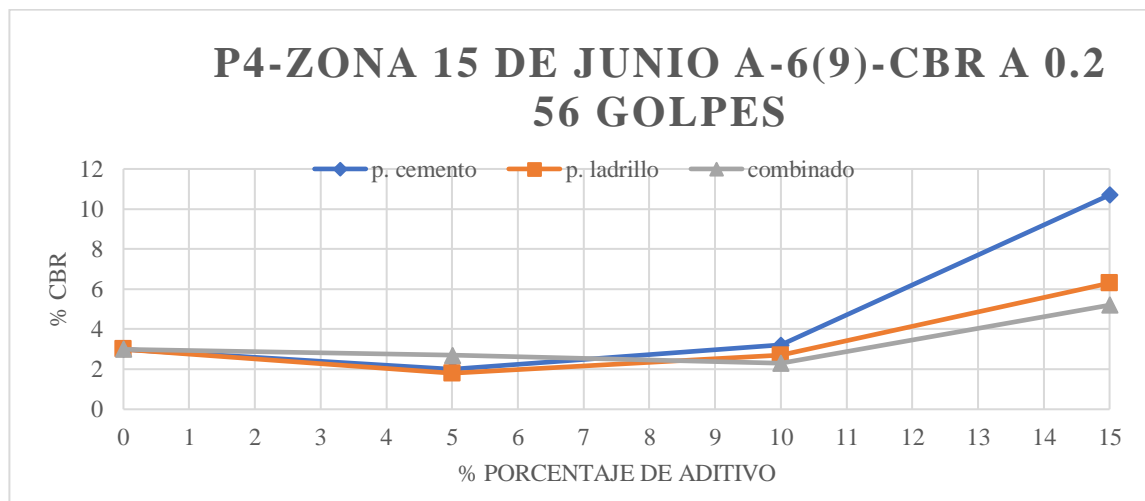
Procedimiento:

Se trabajará con los datos resultantes de CBR en moldes de 56 golpes a una penetración de 0.2in (5mm), para que de esta manera los resultados obtenidos tengan una base para fines de diseño.

Se analizará los datos de CBR a 0.2 in (5mm) obtenidos de los diferentes porcentajes de combinación suelo-aditivo (5%, 10% y 15%) para los casos en donde se empleó 100% de concreto, 100% de ladrillo y combinado, como aditivos.

Se empleará criterios de selección en donde se muestre un correcto desempeño de una sub rasante, para la selección del porcentaje óptimo del aditivo propuesto (50% de concreto más 50% de ladrillo), a emplear para satisfacer las condiciones requeridas para esa sub rasante.

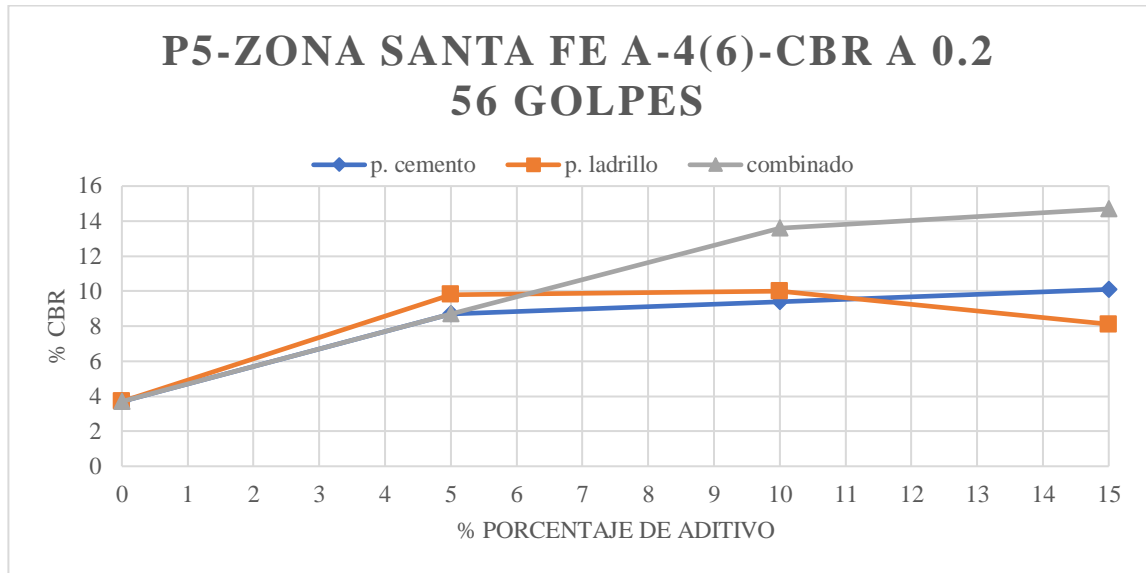
Figura 33. Análisis de CBR-P4 zona 15 de junio.



Fuente: elaboración propia

En la figura 33 se puede apreciar que para P4, el CBR máximo obtenido por parte de la combinación suelo-aditivo del 15%, con el aditivo combinado, es de 5.2% a 0.2 in (5mm).

Figura 34. Análisis de CBR -P5 zona santa fe



Fuente: elaboración propia

Según la figura 34, la muestra de suelo P5 se tiene mejores condiciones de CBR en los distintos casos de combinación suelo-aditivo, usando el aditivo combinado al 50% de concreto y 50% de ladrillo, ya que se obtuvo un CBR máximo de 14.7% a 0.2 in (5mm).

Análisis de resultados

Debido a que los resultados máximo obtenidos de CBR son:

Tabla 31. Análisis de resultados

Porcentaje de combinación	P4	P5
	0.2	0.2
0%	3	3.7
5%	2.7	8.7
10%	2.3	13.6
15%	5.2	14.7

Fuente: Elaboración propia

Se puede ver que la muestra de suelo P4 al 15% de combinación suelo-aditivo, alcanza un valor de CBR de 5.2%, lo que haría que esta subrasante se catalogada como una

subrasante insuficiente según las categorías de sub rasantes proporcionadas por el manual de suelos, Geología, geotecnia y Pavimentos.

Por otra parte, la muestra de suelo P5, en un porcentaje de combinación suelo-aditivo de 15% se logra un CBR de 14.7%, que según las categorías de sub rasantes proporcionadas por el manual de suelos, Geología, geotecnia y Pavimentos, haría que esta sea una sub rasante buena.

4.2.4.1 Obtención del porcentaje óptimo

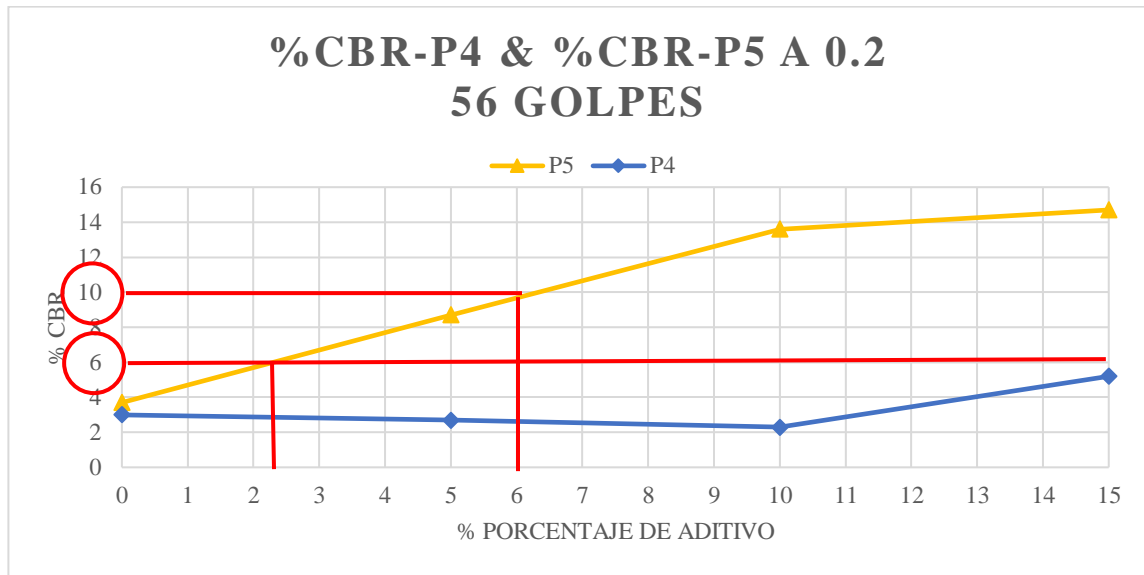
Para definir un correcto desempeño de la capa sub rasante, se opta por elegir una categoría de sub rasante regular, ya que, en esta condición y la aplicación del aditivo propuesto, se podría lograr que esta condición se cumpla para ambas muestras P4 y P5.

Tabla 32. Categorías de sub rasantes

Categorías de Sub rasante	CBR
S0: Sub rasante Inadecuada	CBR < 3%
S1: Sub rasante Insuficiente	De CBR \geq 3% A CBR < 6%
S2: Sub rasante Regular	De CBR \geq 6% A CBR < 10%
S3: Sub rasante Buena	De CBR \geq 10% A CBR < 20%
S4: Sub rasante Muy Buena	De CBR \geq 20% A CBR < 30%
S5: Sub rasante Excelente	CBR \geq 30%

Fuente: Manual de suelos, Geología, geotecnia y Pavimentos (2014)

Figura 35. Aplicación de la condición de CBR para una sub rasante regular



Fuente: elaboración propia

Como se indica en la figura 35, para que P4 alcance una condición de sub rasante regular, se necesitara de una combinación de aditivo-suelo mayor al 15% ocasionando que se eleven en gran medida los gastos para su puesta en marcha, por lo tanto, no se puede determinar un porcentaje óptimo de combinación sin que este sea un valor antieconómico.

Para que P5 alcance la condición de sub rasante regular se tiene 2 casos:

- Que con un valor de CBR mínimo, que es 6% se tendrá que emplear 2.3% de aditivo compuesto de 50% de concreto y 50%de ladrillo.
- Para un valor de CBR máximo del 10%, se necesitará emplear 6% de aditivo compuesto de 50% de concreto y 50%de ladrillo.

Ya que el objetivo de este estudio es analizar la estabilización de suelos cohesivos combinándolos con agregados de desecho para sub rasantes, se empleará la condición mínima en donde se satisface de manera sustancial el objetivo del proyecto y su aplicación para sub rasantes, en donde no represente un mayor costo aplicar esta metodología. Por lo tanto, se define como un porcentaje óptimo de **2.3%** de aditivo compuesto en un 50% de concreto y 50% de ladrillo.

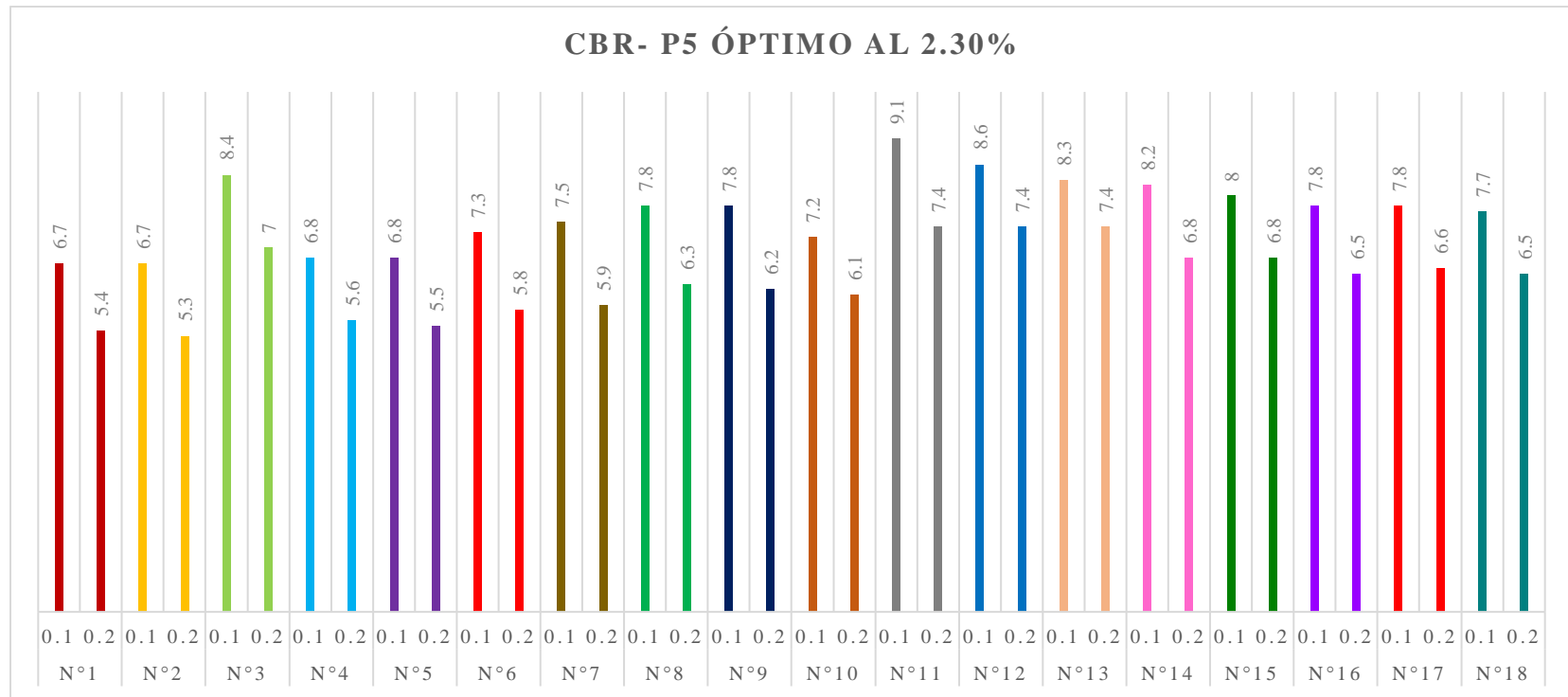
4.2.4.2 Análisis de CBR – P5 con 2.3% de aditivo

Tabla 33. Valores de CBR óptimo.

Ensayo	Porcentaje óptimo	%CBR - P5	
		0.1	0.2
1	2.30%	6.7	5.4
2		6.7	5.3
3		8.4	7
4		6.8	5.6
5		6.8	5.5
6		7.3	5.8
7		7.5	5.9
8		7.8	6.3
9		7.8	6.2
10		7.2	6.1
11		9.1	7.4
12		8.6	7.4
13		8.3	7.4
14		8.2	6.8
15		8	6.8
16		7.8	6.5
17		7.8	6.6
18		7.7	6.5

Fuente: elaboración propia

Figura 36. CBR óptimo P5



Fuente: elaboración propia

De los 18 ensayos de CBR realizados a la muestra de suelo P5 con un porcentaje óptimo de combinación suelo-aditivo del 2.3%, usando el aditivo compuesto por 50% de concreto y 50% de ladrillo, se obtuvieron resultados los cuales reflejan valores promedios de 7.69% de CBR a 0.1 in y un CBR de 6.36% a 0.2in. dichos resultados cumplen con las condiciones de una sub rasante regular para este tipo de combinación suelo-aditivo.

4.3 Análisis estadístico

4.3.1 Estadística descriptiva

En esta sección se presenta un análisis estadístico descriptivo de los valores de CBR obtenidos de la combinación del porcentaje óptimo del aditivo con el suelo P5.

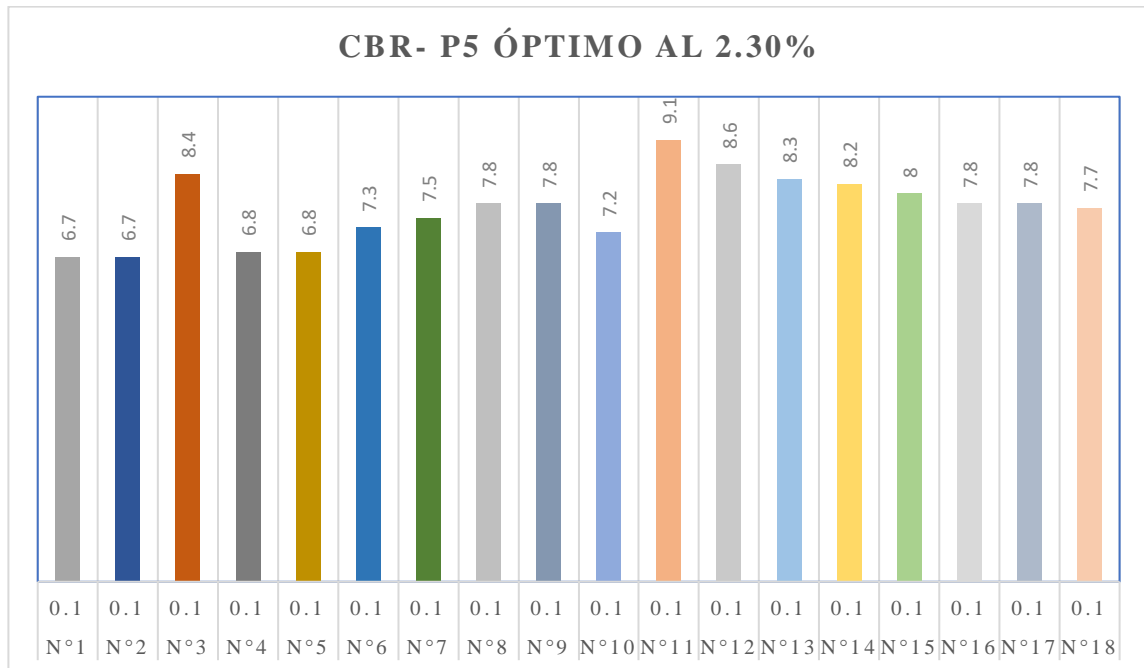
- **CBR a 0.1 in.:** donde se tiene los siguientes resultados obtenidos del valor de CBR:

Tabla 34. Resultados de CBR

Ensayo	Porcentaje óptimo	%CBR - P5
		0.1
1	2.30%	6.7
2		6.7
3		8.4
4		6.8
5		6.8
6		7.3
7		7.5
8		7.8
9		7.8
10		7.2
11		9.1
12		8.6
13		8.3
14		8.2
15		8
16		7.8
17		7.8
18		7.7

Fuente: Elaboración propia

Figura 37. CBR óptimo a 0.1 in.



Fuente: Elaboración propia

La figura 37 muestra que los resultados tienen patrones similares en cuanto a su comportamiento, alcanzando valores más altos que los esperados.

Además, se calcularon los valores de la media y desviación estándar de los resultados:

Tabla 35. Estadística descriptiva

Media	7.69
Desviación estándar	0.69
valor máximo	9.1
valor mínimo	6.7

Fuente: Elaboración propia

Para describir la tendencia que siguen los datos obtenidos se determinaron las curvas de distribución de frecuencias relativas y acumuladas, donde se podrá apreciar con más claridad si los mismos siguen una tendencia normal:

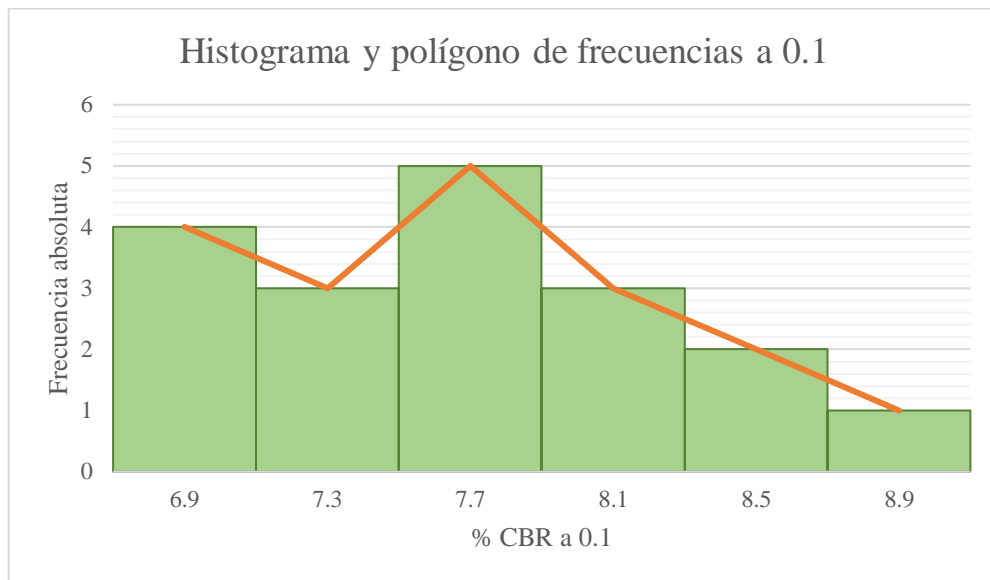
Tabla 36. Frecuencias relativa y acumulada

Intervalo de clase		Marca de clase	Frecuencia absoluta	Frecuencia acumulada	Frecuencia relativa	Frecuencia relativa acumulada
6.7	7.1	6.9	4	4	22.22	22.22
7.1	7.5	7.3	3	7	16.67	38.89
7.5	7.9	7.7	5	12	27.78	66.67
7.9	8.3	8.1	3	15	16.67	83.33
8.3	8.7	8.5	2	17	11.11	94.44
8.7	9.1	8.9	1	18	5.56	100
			18			

Fuente: Elaboración propia

Graficando el histograma y polígono de frecuencias:

Figura 38. Histograma para 0.1 in

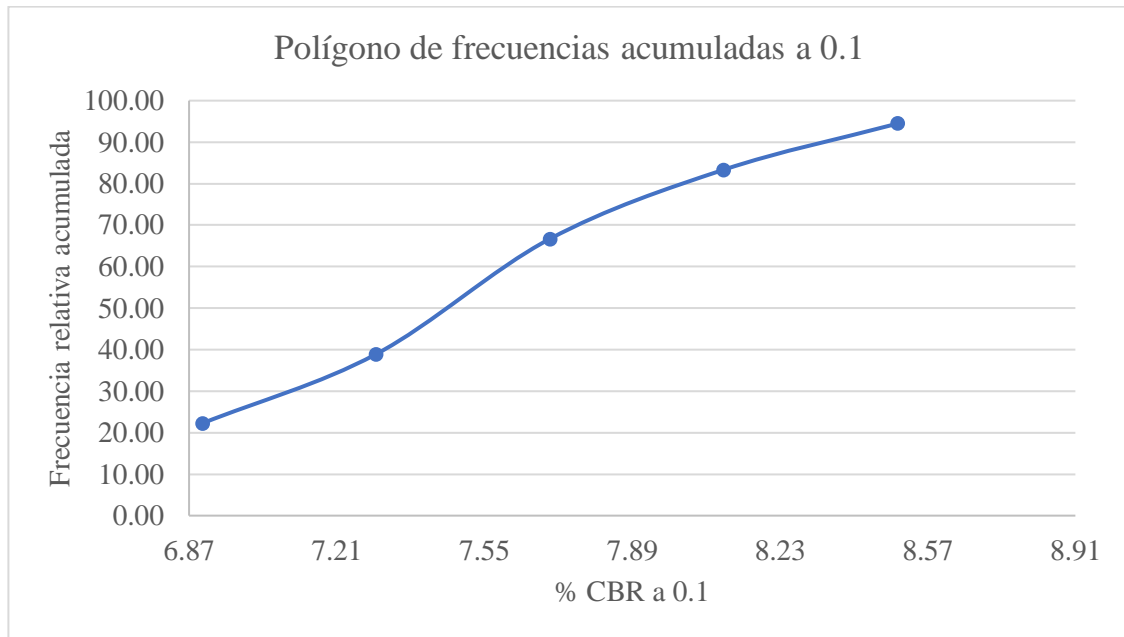


Fuente: Elaboración propia

Se puede ver en la figura 38 que los resultados obtenidos tienen una semejanza normal, al presentarse una mayor cantidad de resultados en los rangos de 7.5% a 7.9% de valor de CBR.

Graficando el polígono de frecuencias acumuladas:

Figura 39. Polígono de frecuencias acumuladas 0.1 in.



Fuente: Elaboración propia

Analizando la figura 39 de las frecuencias acumuladas, se puede ver que todos los valores de CBR obtenidos a 0.1 in. Son mayores al 6% de CBR el cual es el parámetro que se determinó a seguir en este estudio.

- **CBR a 0.2 in.:** donde se tiene los siguientes valores de CBR:

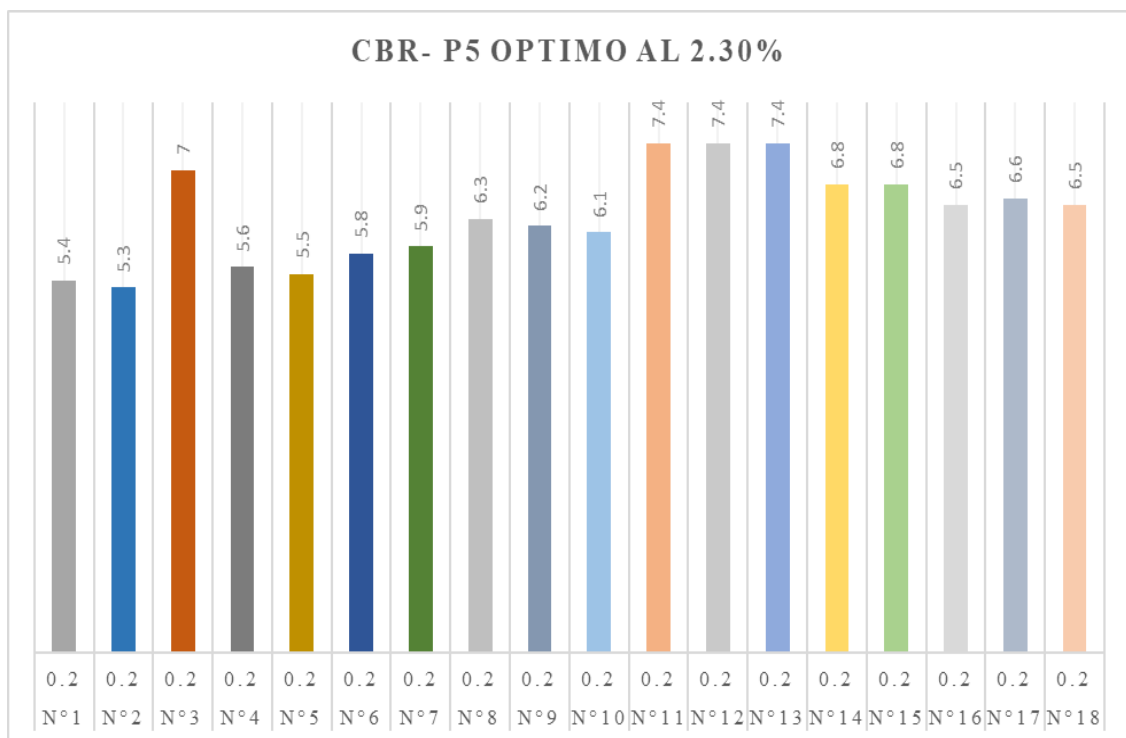
Tabla 37. Resultados de CBR

Ensayo	Porcentaje óptimo	%CBR - P5
		0.2
1	2.30%	5.4
2		5.3
3		7
4		5.6
5		5.5
6		5.8
7		5.9
8		6.3
9		6.2
10		6.1

11	7.4
12	7.4
13	7.4
14	6.8
15	6.8
16	6.5
17	6.6
18	6.5

Fuete: elaboración propia

Figura 40. CBR óptimo a 0.2 in.



Fuente: Elaboración propia

En la figura 40 se puede notar que los valores de CBR a 0.2 in, son menores en comparación a los valores obtenidos a 0.1 in. Esto puede sugerir que este tipo de estabilización no tiene un buen comportamiento ante la acción de carga.

También se determinó los valores de la media y desviación estándar para este grupo de datos:

Tabla 38. Estadística descriptiva

Media	6.36
Desviación estándar	0.69
valor máximo	7.4
valor mínimo	5.3

Fuente: elaboración propia

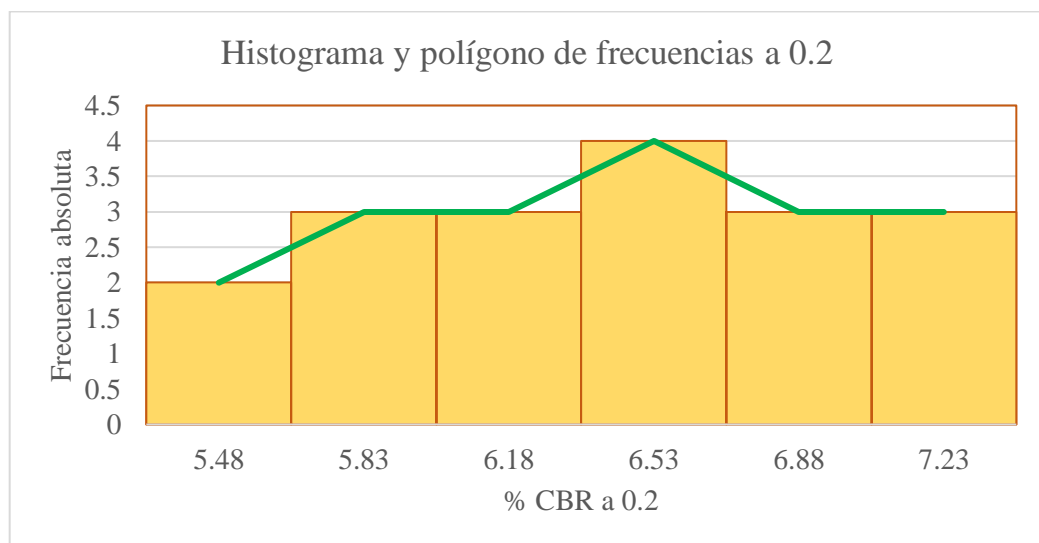
Para apreciar si los resultados obtenidos siguen una tendencia normal, se procede a determinar las curvas de frecuencias relativas y acumuladas:

Tabla 39. Frecuencia relativa y acumulada

Intervalo de clase		Marca de clase	Frecuencia absoluta	Frecuencia acumulada	Frecuencia relativa	Frecuencia relativa acumulada
5.3	5.65	5.48	2	2	11.11	11.11
5.65	6	5.83	3	5	16.67	27.78
6	6.35	6.18	3	8	16.67	44.44
6.35	6.7	6.53	4	12	22.22	66.67
6.7	7.05	6.88	3	15	16.67	83.33
7.05	7.4	7.23	3	18	16.67	100
			18			

Fuente: Elaboración propia

Figura 41. Histograma para 0.2 in

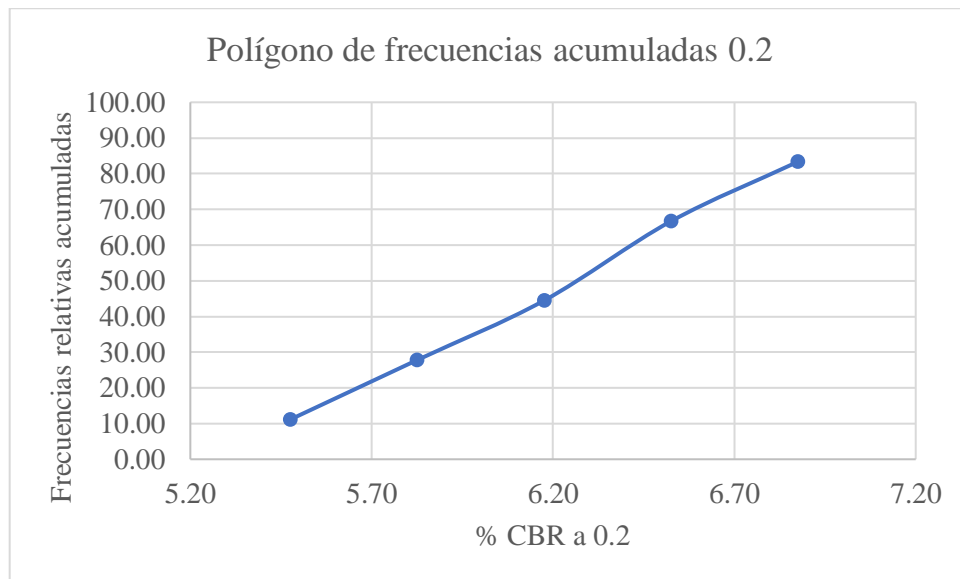


Fuente: Elaboración propia

En la figura 41 se puede apreciar que los resultados obtenidos se asemejan a una distribución normal y además presentan mayor número de valores en los rangos de 6.35% a 6.7% de CBR, denotando que estos valores están por encima del valor de referencia que es el 6% para alcanzar una condición de una subrasante regular.

Graficando la curva de frecuencias acumuladas:

Figura 42. Polígono de frecuencias acumuladas a 0.2 in.



Fuente: Elaboración propia

Según la figura 42 de frecuencias acumuladas, el número de ensayos que están por encima del valor de CBR de 6% son más del 65%, denotando que la mayoría de los resultados alcanzan los valores esperados.

4.3.1.1 Determinación del tipo de tratamiento

Según lo que se puede observar en el análisis estadístico descriptivo que se aplicó a los resultados obtenidos, se puede establecer que los resultados se asemejan a una distribución normal, además que estos tienen valores que en su gran mayoría son superiores al valor de CBR del 6% necesario para establecer una condición de sub rasante regular.

Debido que el objetivo del presente estudio es analizar la estabilización de suelos combinándolos con materiales de desecho de construcciones y que cuenta con la variable

de la cantidad de materiales de desecho de construcciones, se realizó el análisis de las medias muestrales y las medias poblacionales mediante la prueba t de Student para una muestra, con el fin de verificar si esta propuesta de adicionar agregados de desecho de construcciones mejora las capacidades físicas y mecánicas del suelo.

La prueba t de Student para una muestra es una técnica estadística utilizada para determinar si la media de una sola muestra difiere significativamente de un valor conocido o esperado (generalmente llamado la "media poblacional hipotética"). Es ampliamente usada cuando el tamaño de la muestra es pequeño y la distribución poblacional es aproximadamente normal. Esta prueba tiene como objetivo determinar si hay suficiente evidencia estadística para rechazar una hipótesis nula (H_0) acerca de la media poblacional. La hipótesis nula generalmente plantea que la media de la muestra es igual a la media poblacional.

4.3.2 Estadística inferencial

Para el análisis de la estadística inferencial se procedió a determinar, la media y la desviación estándar necesarios para determinar si la prueba de hipótesis es verídica o no, además de determinar el intervalo de confianza con el cual se tratará de encontrar un par de números que formaran un intervalo donde estará inserto el parámetro buscado.

Por tal motivo se tiene los siguientes resultados:

- **Para 0.1 in.**

Se calculo:

Tabla 40. Parámetros para 0.1 in

Media	7.69
Desviación estándar	0.69
valor máximo	9.1
valor mínimo	6.7
Varianza	0.47
n	18

Fuente: Elaboración propia

Intervalo de confianza:

Como el tamaño de la muestra es menor a 30 y se conoce el valor de la media muestral y la varianza, se procede a usar la siguiente formula:

Tabla 41. Intervalo de confianza.

Tamaño de muestra	Se conoce	Aproximación para la media poblacional (μ)
$n \geq 30$	$\sigma^2 y z$	$\bar{x} \pm z \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$
$n \geq 30$	Solo z	$\bar{x} \pm z \frac{s}{\sqrt{n}}$
$n < 30$	$\sigma^2 y z$	$\bar{x} \pm z \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$
$n < 30$	Solo “t”	$\bar{x} \pm t \frac{s}{\sqrt{n}}$

$$\bar{x} \pm z \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$$

Límite superior:

$$\mu = 7.69 + 1.96 \frac{0.69}{\sqrt{18}}$$

$$\mu = 8.01$$

Límite inferior:

$$\mu = 7.69 - 1.96 \frac{0.69}{\sqrt{18}}$$

$$\mu = 7.37$$

Estos resultaos indican que los valores que estén dentro de este intervalo de confianza gozan del nivel de confianza propuesto para este estudio.

- **Para 0.2 in.**

Tabla 42. Parámetros para 0.2 in

Media	6.36
Desviación estándar	0.69
valor máximo	7.4
valor mínimo	5.3
Varianza	0.48
n	18

Fuente: Elaboración propia

se usará la formula:

$$\bar{x} \pm z \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$$

Límite superior:

$$\mu = 6.36 + 1.96 \frac{0.69}{\sqrt{18}}$$

$$\mu = 6.68$$

Límite inferior:

$$\mu = 6.36 - 1.96 \frac{0.69}{\sqrt{18}}$$

$$\mu = 6.04$$

Estos resultaos indican que los valores que estén dentro de este intervalo de confianza gozan del nivel de confianza propuesto para este estudio.

4.4 Prueba de hipótesis

Según el comportamiento que se puede ver en el histograma de frecuencias, ya que sigue una tendencia casi normal, pero no se cuentan con un numero de datos los cuales sean mayores a 30, se opta por elegir la prueba t Student para muestras únicas ya que esta prueba se adecua de mejor manera al contemplar un numero de datos menores a 30 para

su análisis, además de comparar la media muestral (la que se calculó) y la media teórica (según recomendaciones).

Esta prueba plantea dos tipos de hipótesis:

Hipótesis nula (H_0): La media de la muestra es igual a la media teórica (por ejemplo, $\mu = \mu_0$).

Hipótesis alternativa (H_1): La media de la muestra es diferente a la media teórica (por ejemplo, $\mu \neq \mu_0$).

Se debe establecer un nivel de significancia de α , que comúnmente es del 0.05, que proviene del nivel de confianza asumido para este estudio que es del 95%.

Se debe calcular el estadístico t , con la siguiente formula:

$$t = \frac{\bar{x} - \mu_0}{\frac{s}{\sqrt{n}}}$$

Donde:

\bar{x} : Media muestral.

μ_0 : Media poblacional hipotética.

s : Desviación estándar de la muestra.

n : Tamaño de la muestra.

Luego se debe determinar el valor critico o el p-valor, consultando la tabla t Student con $n-1$ grados de libertad. Si el valor absoluto de t excede el valor crítico o si el p-valor es menor que α , se rechaza la hipótesis nula H_0 .

- **Para 0.1 in.**

Tabla 43. Parámetros estadísticos para 0.1 in

Parámetros	valores
Media teórica	6
Media muestral	7.69
Desviación estándar muestral	0.69
Tamaño de la muestra	18

Fuente: Elaboración propia

Aplicando la fórmula para determinar el estadístico t:

$$t = \frac{\bar{x} - \mu_0}{\frac{s}{\sqrt{n}}}$$

$$t = \frac{7.69 - 6}{\frac{0.69}{\sqrt{18}}}$$

$$t = 10.43$$

Para determinar el t crítico o el p-valor se recurrirá a la tabla t Student, con un grado de libertad igual a: $18-1 = 17$.

Figura 43. Tabla de valores críticos de la distribución t de student

El valor de la tabla para p y C es el valor crítico t^* que deja una probabilidad p a la derecha y una probabilidad C entre $-t^*$ y t^*

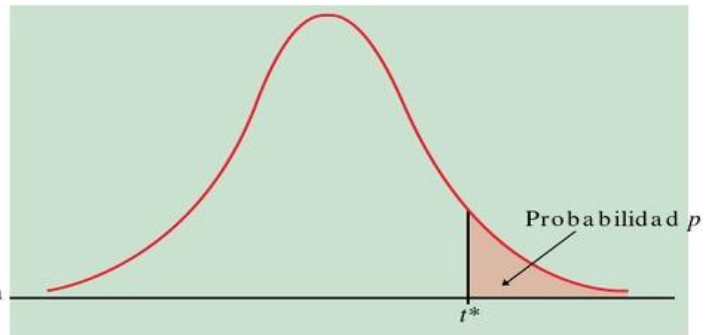


TABLA B Valores críticos de la distribución t de Student												
gl	Probabilidad de la cola p											
	.25	.20	.15	.10	.05	.025	.02	.01	.005	.0025	.001	.0005
1	1.000	1.376	1.963	3.078	6.314	12.71	15.89	31.82	63.66	127.3	318.3	636.6
2	0.816	1.061	1.386	1.886	2.920	4.303	4.849	6.965	9.925	14.09	22.33	31.60
3	0.765	0.978	1.250	1.638	2.353	3.182	3.482	4.541	5.841	7.453	10.21	12.92
4	0.741	0.941	1.190	1.533	2.132	2.776	2.999	3.747	4.604	5.598	7.173	8.610
5	0.727	0.920	1.156	1.476	2.015	2.571	2.757	3.365	4.032	4.773	5.893	6.869
6	0.718	0.906	1.134	1.440	1.943	2.447	2.612	3.143	3.707	4.317	5.208	5.959
7	0.711	0.896	1.119	1.415	1.895	2.365	2.517	2.998	3.499	4.029	4.785	5.408
8	0.706	0.889	1.108	1.397	1.860	2.306	2.449	2.896	3.355	3.833	4.501	5.041
9	0.703	0.883	1.100	1.383	1.833	2.262	2.398	2.821	3.250	3.690	4.297	4.781
10	0.700	0.879	1.093	1.372	1.812	2.228	2.359	2.764	3.169	3.581	4.144	4.587
11	0.697	0.876	1.088	1.363	1.796	2.201	2.328	2.718	3.106	3.497	4.025	4.437
12	0.695	0.873	1.083	1.356	1.782	2.179	2.303	2.681	3.055	3.428	3.930	4.318
13	0.694	0.870	1.079	1.350	1.771	2.160	2.282	2.650	3.012	3.372	3.852	4.221
14	0.692	0.868	1.076	1.345	1.761	2.145	2.264	2.624	2.977	3.326	3.787	4.140
15	0.691	0.866	1.074	1.341	1.753	2.131	2.249	2.602	2.947	3.286	3.733	4.073
16	0.690	0.865	1.071	1.337	1.746	2.120	2.235	2.583	2.921	3.252	3.686	4.015
17	0.689	0.863	1.069	1.333	1.740	2.110	2.224	2.567	2.898	3.222	3.646	3.965
18	0.688	0.862	1.067	1.330	1.734	2.101	2.214	2.552	2.878	3.197	3.611	3.922
19	0.688	0.861	1.066	1.328	1.729	2.093	2.205	2.539	2.861	3.174	3.579	3.883
20	0.687	0.860	1.064	1.325	1.725	2.086	2.197	2.528	2.845	3.153	3.552	3.850
21	0.686	0.859	1.063	1.323	1.721	2.080	2.189	2.518	2.831	3.135	3.527	3.819
22	0.686	0.858	1.061	1.321	1.717	2.074	2.183	2.508	2.819	3.119	3.505	3.792
23	0.685	0.858	1.060	1.319	1.714	2.069	2.177	2.500	2.807	3.104	3.485	3.768
24	0.685	0.857	1.059	1.318	1.711	2.064	2.172	2.492	2.797	3.091	3.467	3.745
25	0.684	0.856	1.058	1.316	1.708	2.060	2.167	2.485	2.787	3.078	3.450	3.725
26	0.684	0.856	1.058	1.315	1.706	2.056	2.162	2.479	2.779	3.067	3.435	3.707
27	0.684	0.855	1.057	1.314	1.703	2.052	2.158	2.473	2.771	3.057	3.421	3.690
28	0.683	0.855	1.056	1.313	1.701	2.048	2.154	2.467	2.763	3.047	3.408	3.674
29	0.683	0.854	1.055	1.311	1.699	2.045	2.150	2.462	2.756	3.038	3.396	3.659
30	0.683	0.854	1.055	1.310	1.697	2.042	2.147	2.457	2.750	3.030	3.385	3.646
40	0.681	0.851	1.050	1.303	1.684	2.021	2.123	2.423	2.704	2.971	3.307	3.551
50	0.679	0.849	1.047	1.299	1.676	2.009	2.109	2.403	2.678	2.937	3.261	3.496
60	0.679	0.848	1.045	1.296	1.671	2.000	2.099	2.390	2.660	2.915	3.232	3.460
80	0.678	0.846	1.043	1.292	1.664	1.990	2.088	2.374	2.639	2.887	3.195	3.416
100	0.677	0.845	1.042	1.290	1.660	1.984	2.081	2.364	2.626	2.871	3.174	3.390
1000	0.675	0.842	1.037	1.282	1.646	1.962	2.056	2.330	2.581	2.813	3.098	3.300
z^*	0.674	0.841	1.036	1.282	1.645	1.960	2.054	2.326	2.576	2.807	3.091	3.291
	50%	60%	70%	80%	90%	95%	96%	98%	99%	99.5%	99.8%	99.9%
	Nivel de confianza C											

Dando como resultado:

$$t \text{ critico} = 2.11$$

como:

$$t_{cal.} > t_{crit.}$$

$$10.43 > 2.11 \text{ ¡verdadero!}$$

Se rechaza la hipótesis nula, por lo tanto, se asume la hipótesis alternativa, la cual indica que la media de la muestra es diferente a la media teórica.

Analizando la hipótesis propuesta para esta presente investigación, se puede establecer que:

La incorporación de agregados de desechos de construcciones en suelos cohesivos, mejora sus propiedades físicas y mecánicas.

Sugiere una hipótesis alternativa: $H_1: X > u$ con dirección de la cola hacia la derecha.

Por lo tanto, se puede asegurar que:

El valor obtenido de CBR es significativamente mayor y que esa diferencia es estadísticamente significativa.

Dando como resultado que la prueba de hipótesis verifique como positiva a la hipótesis de investigación.

- **Para 0.2 in.**

Tabla 44. Parámetros estadísticos para 0.2 in

Parámetros	valores
Media teórica	6
Media muestral	6.36
Desviación estándar muestral	0.69
Tamaño de la muestra	18

Fuente: Elaboración propia

Aplicando la fórmula para determinar el estadístico t:

$$t = \frac{\bar{x} - \mu_0}{\frac{s}{\sqrt{n}}}$$

$$t = \frac{6.36 - 6}{\frac{0.69}{\sqrt{18}}}$$

$$t = 2.22$$

Para determinar el t crítico o el p-valor se recurrirá a la tabla t Student, con un grado de libertad igual a: $18-1 = 17$.

Figura 44. Tabla de valores críticos de la distribución t de student

El valor de la tabla para p y C es el valor crítico t^* que deja una probabilidad p a la derecha y una probabilidad C entre $-t^*$ y t^*

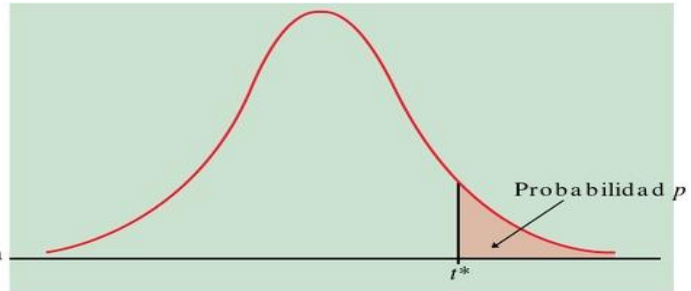


TABLA B Valores críticos de la distribución t de Student

gl	Probabilidad de la cola p											
	.25	.20	.15	.10	.05	.025	.02	.01	.005	.0025	.001	.0005
1	1.000	1.376	1.963	3.078	6.314	12.71	15.89	31.82	63.66	127.3	318.3	636.6
2	0.816	1.061	1.386	1.886	2.920	4.303	4.849	6.965	9.925	14.09	22.33	31.60
3	0.765	0.978	1.250	1.638	2.353	3.182	3.482	4.541	5.841	7.453	10.21	12.92
4	0.741	0.941	1.190	1.533	2.132	2.776	2.999	3.747	4.604	5.598	7.173	8.610
5	0.727	0.920	1.156	1.476	2.015	2.571	2.757	3.365	4.032	4.773	5.893	6.869
6	0.718	0.906	1.134	1.440	1.943	2.447	2.612	3.143	3.707	4.317	5.208	5.959
7	0.711	0.896	1.119	1.415	1.895	2.365	2.517	2.998	3.499	4.029	4.785	5.408
8	0.706	0.889	1.108	1.397	1.860	2.306	2.449	2.896	3.355	3.833	4.501	5.041
9	0.703	0.883	1.100	1.383	1.833	2.262	2.398	2.821	3.250	3.690	4.297	4.781
10	0.700	0.879	1.093	1.372	1.812	2.228	2.359	2.764	3.169	3.581	4.144	4.587
11	0.697	0.876	1.088	1.363	1.796	2.201	2.328	2.718	3.106	3.497	4.025	4.437
12	0.695	0.873	1.083	1.356	1.782	2.179	2.303	2.681	3.055	3.428	3.930	4.318
13	0.694	0.870	1.079	1.350	1.771	2.160	2.282	2.650	3.012	3.372	3.852	4.221
14	0.692	0.868	1.076	1.345	1.761	2.145	2.264	2.624	2.977	3.326	3.787	4.140
15	0.691	0.866	1.074	1.341	1.753	2.131	2.249	2.602	2.947	3.286	3.733	4.073
16	0.690	0.865	1.071	1.337	1.746	2.118	2.235	2.583	2.921	3.252	3.686	4.015
17	0.689	0.863	1.069	1.333	1.740	2.110	2.224	2.567	2.898	3.222	3.646	3.965
18	0.688	0.862	1.067	1.330	1.734	2.101	2.214	2.552	2.878	3.197	3.611	3.922
19	0.688	0.861	1.066	1.328	1.729	2.093	2.205	2.539	2.861	3.174	3.579	3.883
20	0.687	0.860	1.064	1.325	1.725	2.086	2.197	2.528	2.845	3.153	3.552	3.850
21	0.686	0.859	1.063	1.323	1.721	2.080	2.189	2.518	2.831	3.135	3.527	3.819
22	0.686	0.858	1.061	1.321	1.717	2.074	2.183	2.508	2.819	3.119	3.505	3.792
23	0.685	0.858	1.060	1.319	1.714	2.069	2.177	2.500	2.807	3.104	3.485	3.768
24	0.685	0.857	1.059	1.318	1.711	2.064	2.172	2.492	2.797	3.091	3.467	3.745
25	0.684	0.856	1.058	1.316	1.708	2.060	2.167	2.485	2.787	3.078	3.450	3.725
26	0.684	0.856	1.058	1.315	1.706	2.056	2.162	2.479	2.779	3.067	3.435	3.707
27	0.684	0.855	1.057	1.314	1.703	2.052	2.158	2.473	2.771	3.057	3.421	3.690
28	0.683	0.855	1.056	1.313	1.701	2.048	2.154	2.467	2.763	3.047	3.408	3.674
29	0.683	0.854	1.055	1.311	1.699	2.045	2.150	2.462	2.756	3.038	3.396	3.659
30	0.683	0.854	1.055	1.310	1.697	2.042	2.147	2.457	2.750	3.030	3.385	3.646
40	0.681	0.851	1.050	1.303	1.684	2.021	2.123	2.423	2.704	2.971	3.307	3.551
50	0.679	0.849	1.047	1.299	1.676	2.009	2.109	2.403	2.678	2.937	3.261	3.496
60	0.679	0.848	1.045	1.296	1.671	2.000	2.099	2.390	2.660	2.915	3.232	3.460
80	0.678	0.846	1.043	1.292	1.664	1.990	2.088	2.374	2.639	2.887	3.195	3.416
100	0.677	0.845	1.042	1.290	1.660	1.984	2.081	2.364	2.626	2.871	3.174	3.390
1000	0.675	0.842	1.037	1.282	1.646	1.962	2.056	2.330	2.581	2.813	3.098	3.300
z^*	0.674	0.841	1.036	1.282	1.645	1.960	2.054	2.326	2.576	2.807	3.091	3.291
	50%	60%	70%	80%	90%	95%	96%	98%	99%	99.5%	99.8%	99.9%
	Nivel de confianza C											

Dando como resultado:

$$t \text{ critico} = 2.11$$

como:

$$t_{cal.} > t_{crit.}$$

$$2.22 > 2.11 \text{ ¡verdadero!}$$

Se rechaza la hipótesis nula, por lo tanto, se asume la hipótesis alternativa, la cual indica que la media de la muestra es diferente a la media teórica.

Analizando la hipótesis propuesta para esta presente investigación, se puede establecer que:

La incorporación de agregados de desechos de construcciones en suelos cohesivos, mejora sus propiedades físicas y mecánicas.

Sugiere una hipótesis alternativa: $H1: X > u$ con dirección de la cola hacia la derecha.

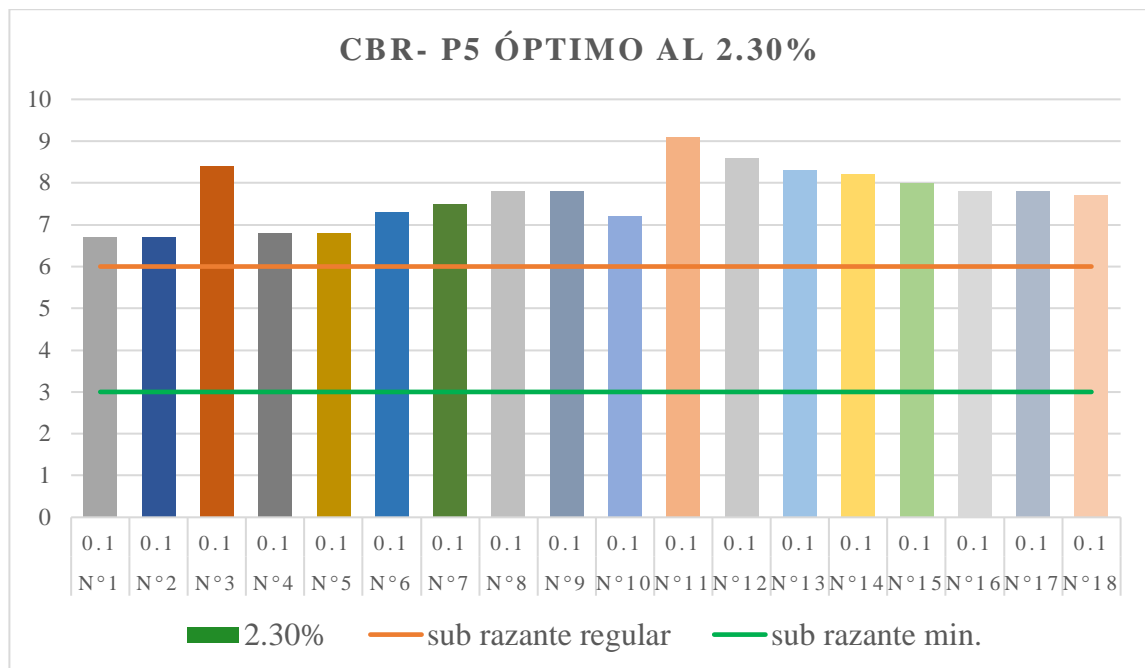
Por lo tanto, se puede asegurar que:

El valor obtenido de CBR es mayor y que esa diferencia es estadísticamente significativa.

Esto quiere decir que las mejoras obtenidas son significativas y la hipótesis de investigación sea aceptada.

Resultados de estabilización capa sub rasante a 0.1 in.

Figura 45. Valores de CBR a 0.1 con el porcentaje óptimo del aditivo para P5



Fuente: Elaboración propia

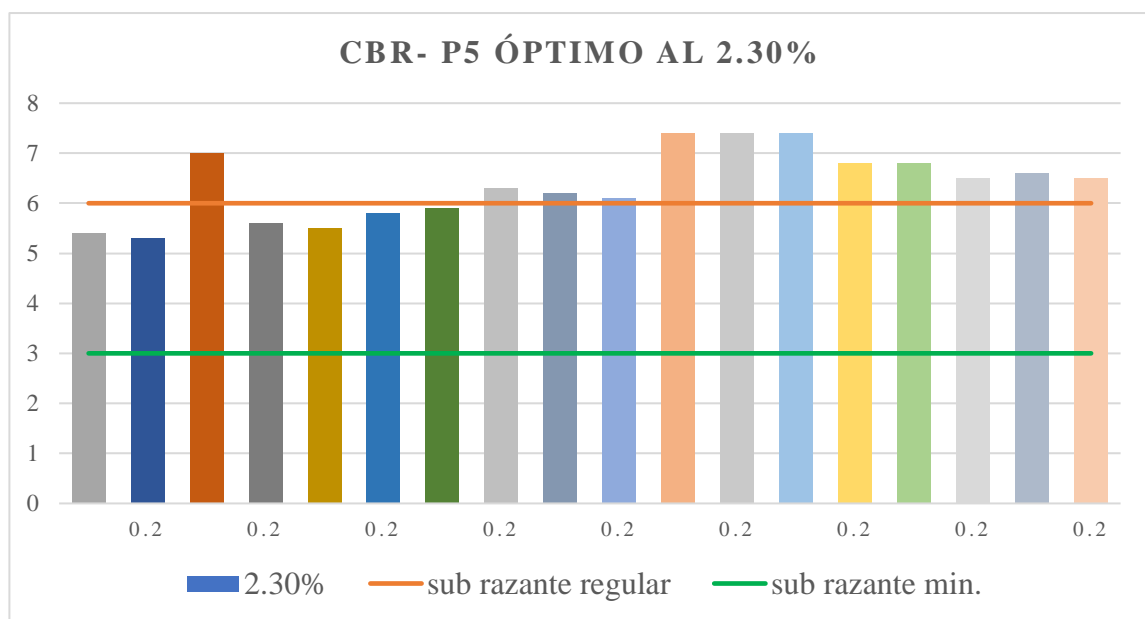
Interpretación de la figura 45: Los resultados indican que los valores obtenidos del resultado de la estabilización con agregados de desecho de construcciones en combinación de 50% concreto y 50% ladrillo, son eficaces para los suelos del tipo A-4, requiriendo bajas cantidades de este agregado para lograr valores aceptables para el correcto funcionamiento de una capa sub rasante. Pudiendo resaltar que los valores de CBR obtenidos superan el valor del 6% seleccionado como parámetro de control para este estudio, además de cumplir con los valores mínimos requeridos por la ABC el cual tiene un valor de CBR mínimo del 3%.

Estos resultados se obtuvieron netamente de los valores de CBR a 0.1 in. De moldes de 56 golpes, con el fin de simular condiciones máximas (tráfico pesado o capas superiores como base y sub base), con el fin de verificar cómo se comporta este tipo de estabilización, la cual denota un funcionamiento mejor que lo esperado.

Como valor promedio de CBR a 0.1 in igual a 7.69%, se puede decir que la adición de este aditivo mejorara en gran medida los valores de la resistencia inicial de los suelos finos estabilizados con el mismo, haciendo que estos valores sean más representativos.

Resultados de estabilización capa sub rasante a 0.2 in.

Figura 46. Valores de CBR a 0.2 con el porcentaje óptimo del aditivo para P5



Fuente: Elaboración propia

Interpretación de la figura 46: Se puede resaltar que los valores de CBR a 0.2 in. Son menores en comparación a la resistencia obtenida a una penetración de 0.1 in. Con un valor promedio de CBR de 6.36%, el cual cumple con la condición estipulada para este estudio que es del 6% para alcanzar una condición de sub rasante regular, además de cumplir con el valor de CBR mínimo estipulado por la ABC del 3%.

Además, se puede decir que este tipo de estabilización a mayores niveles de carga, no presenta un aumento de su densificación y sufre deformaciones en su composición, lo cual lo reflejan los resultados al ser menores en comparación. Esto puede reflejar que la estructura interna del suelo puede perder cohesión o compactación, esto debido a que, según la tendencia de estabilizaciones hechas con cal y cemento en las cuales se ve resistencias iniciales elevadas, pero su estructura interna tiende a no soportar deformaciones mayores.

4.5 Especificaciones técnicas

Los agregados de desecho de construcciones, al tener una composición variada de materiales provenientes de construcciones nuevas o demoliciones, causa que sus propiedades cambien uno respecto al otro, por tal motivo se establece que para la correcta aplicación de este proceso de estabilización se siga los siguientes puntos:

- **Equipo:** Con el fin de que el uso de este tipo de agente estabilizante sea lo más sencillo posible en obra, se empleara equipos de manejo simple como ser:
Palas, combos, tamices o mallas, tolvas, chancadoras, etc. y toda herramienta que sea necesaria para tratar al material de manera que sea limpiado, procesado y dosificado de manera adecuada según el caso para el cual pretenda ser usado.
- **Tipo de material usado:**
 - **Material:** El material empleado será enteramente obtenido de remodelaciones o construcciones donde no se tengan altas exigencias en su construcción, ya que estas serán las más comunes en nuestro medio.
El material debe estar conformado enteramente de concreto y ladrillos libres de materia orgánica.

Su granulometría debe ser menor a $\frac{3}{4}$ de pulgada, con el fin de minimizar el proceso de triturado, además de evitar realizar compensaciones de suelos.

Debe estar compuesto en proporciones iguales de concreto y ladrillo (50% - 50%)

El suelo que mejor reacciona con este agente estabilizante son los pertenecientes al grupo A-4.

Para suelos de grupos A-5, A-6 y A-7, requerirá mayores cantidades del aditivo.

- **Procedimiento:** Para la obtención de material estabilizante se debe triturar en partes iguales el concreto y el ladrillo, recomendando hacerlo de manera separada y luego mezclarlos antes de la aplicación al suelo. Esto con el fin de evitar que se disgregue el concreto ya que tiene una composición diferente al del ladrillo.

Hacer pasar las partes que ya están trituradas por una malla de tamaño nominal igual a $\frac{3}{4}$ de pulgada luego reservar en un lugar apartado para su posterior combinación en proporciones iguales.

Mezclar el suelo con el aditivo en una proporción igual de 2.3% en peso para suelos de características limosas. Para suelos arcillosos se recomienda elegir proporciones mayores del 15% en peso, para ser usados en su aplicación.

Compactar al 100% de su densidad máxima seca (Proctor T-180), con el fin de simular condiciones máximas.

CAPÍTULO V
CONCLUSIONES Y
RECOMENDACIONES

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

Tras realizar el análisis de la estabilización de suelos cohesivos combinándolos con materiales de desechos de construcciones en pruebas físico-mecánicas, se puede concluir que se cumplió de manera satisfactoria el objetivo general y los objetivos específicos planteados en esta investigación.

Con respecto al objetivo general, se realizó el análisis de la estabilización de suelos cohesivos combinándolos con materiales de desechos de construcciones en pruebas físico-mecánicas, con lo cual se puede concluir que estos materiales afectan de manera positiva a las propiedades físicas de los suelos finos, haciendo que adquieran mayor capacidad de soporte ante la aplicación de una carga, por lo cual hace que estos obtengan valores óptimos para ser usados en estabilizaciones de sub rasantes.

Se analizó el comportamiento de los agregados de desecho al ser combinados con suelos del tipo A-4 y A-6, llegando a la conclusión de que, en presencia de suelos más finos, se necesitara mayor cantidad de agregados de desecho para garantizar el proceso de estabilización.

En cuanto a los objetivos específicos, se puede concluir que también han sido alcanzados.

- Se pudo determinar las áreas de muestreo, las cuales fueron seleccionadas de tal manera que estas sean lo más representativas dentro del área de estudio.
- Se analizo las condiciones iniciales de cada muestra obtenida dentro del área de estudio y se seleccionó los puntos que presentan las condiciones más desfavorables en comparación a los demás.
- Se aplico de manera rigurosa las metodologías propuestas para la estabilización de suelos.
- Se realizaron ensayos de CBR haciendo variar el porcentaje de combinación del aditivo, donde se pudo observar cómo se comportaron los diferentes tipos de suelos al ser estabilizados con agregados de desecho de construcciones.

- Se realizó el análisis estadístico de los resultados obtenidos, usando como herramientas la prueba t Student, para determinar si los valores obtenidos del proceso de estabilización son relevantes frente a los valores recomendados por norma.
- Se realizó el análisis de las medias muestrales usando la prueba t Student para determinar si las diferencias obtenidas con respecto a una media poblacional son estadísticamente relevantes, es decir que se les dio una mayor relevancia a los resultados obtenidos de este proceso de estabilización. Además, se llevó a cabo un análisis de estadística inferencial de medidas como ser medias, desviaciones estándar y varianzas, lo que permitió evaluar la consistencia y confiabilidad de los resultados.
- Se pudo determinar un porcentaje óptimo de mezcla de los agregados de desecho de construcciones, tomando en cuenta que tenga un equilibrio técnico y económico en la estabilización de una capa sub rasante.

La respuesta anticipada de la hipótesis de investigación, la cual plantea que la incorporación de agregados de desechos de construcciones en suelos cohesivos, mejora sus propiedades físicas y mecánicas, con lo cual se pudo verificar que los resultados de CBR demostraron ser adecuados a los requerimientos mínimos de estabilidad lo cual indica coherencia con la pregunta del problema de la investigación. Los resultados obtenidos han demostrado que el aditivo propuesto para el análisis de la estabilización, se comporta de manera diferente frente a diferentes tipos de suelos, lo que facilitaría la selección de las cantidades a usar frente a estos. En base a las especificaciones técnicas para una capa sub rasante, se realizó las mediciones de CBR con el fin de evaluar el funcionamiento de los agregados de desechos de construcciones como un agente estabilizante para la construcción de carreteras. Tras efectuar las mediciones con un porcentaje óptimo se observó que el agregado en cuestión brinda resultados mejores a los esperados, por otro lado, algunos valores independientemente no alcanzan dichos valores lo cual puede ser debido al proceso de compactación o al proceso de mezclado del aditivo con el suelo. Este hallazgo resalta la importancia de seleccionar las técnicas más adecuadas de mezclado y compactado para cumplir con las especificaciones técnicas para la capa sub rasante de una carretera.

Se llevo a cabo un estudio detallado de los métodos mencionados, al seleccionar zonas de muestreo y caracterizarlas. Se aplico el método de estabilización planteado, realizando el análisis estadístico detallado de los resultados obtenidos de dichos procesos y se pudo identificar cómo se comporta este aditivo en diferentes condiciones, lo que pudo influir en la especificación técnica final.

El aporte teórico fue decisivo, ya que se logró analizar el comportamiento de este aditivo en comparación a las especificaciones técnicas para una capa sub rasante, contribuyendo al avance del conocimiento en el campo de la ingeniería civil, proporcionando información relevante para futuras investigaciones y aplicaciones además de brindar un nuevo uso para estos materiales, lo cual beneficiaría el tema medioambiental en nuestro medio.

El control de las variables extrañas fue eficiente en la investigación, controlando las condiciones del equipo y los parámetros operacionales, teniendo un especial cuidado con la humedad optima del suelo, además del grado de compactación y el tiempo de curado, para minimizar las variables extrañas en el análisis de la estabilización de suelos. Asimismo, el uso de materiales de referencia permitió verificar la exactitud de los resultados y garantizar la estabilidad del suelo, lo que permitió obtener resultados confiables y precisos en el análisis estadístico, garantizando la validez de las conclusiones obtenidas.

El nivel de confianza fue cumplido en la investigación, ya que se aplicaron métodos estadísticos rigurosos y se controlaron adecuadamente las variables, lo que proporcionó resultados confiables y significativos para respaldar las conclusiones obtenidas.

5.2 Recomendaciones

En base a los resultados obtenidos en la presente investigación, se recomienda utilizar los resultados obtenidos para el mejoramiento o la estabilización de suelos finos para subrasantes, considerando los valores óptimos para los requerimientos deseados en futuras investigaciones y aplicaciones de proyectos prácticos manteniendo la coherencia entre los objetivos, la hipótesis y la problemática de la investigación.

También se sugiere establecer mayores porcentajes de combinación del aditivo, ya que se puede observar una clara tendencia a mejorar su eficiencia cuando se presentan mayores porcentajes. Esto garantizará la eficiencia y confiabilidad de este proceso de estabilización de subrasantes en proyectos futuros.

Al momento de aplicar las condiciones de humedad óptima se debe tomar en cuenta que el aditivo al estar en estado seco, hará que esta se vea afectada, por lo cual se debe tomar especiales cuidados al momento de realizar los procesos pertinentes, con el fin de obtener mejores resultados.

Ya que los resultados de esta investigación se basan en las condiciones más críticas que pueden presentarse en una subrasante mejorada, si incita a futuras investigaciones o aplicaciones prácticas trabajar con diferentes porcentajes de combinación según sea necesario, ya que se puede esperar que su comportamiento sea casi el mismo que a las condiciones críticas analizadas.

Los resultados, fruto del análisis de esta propuesta de estabilización de suelos para subrasantes, tiene por objetivo compartir los conocimientos y experiencias obtenidos, los cuales puedan contribuir al avance de nuevas técnicas amigables con el medio ambiente dentro de la ingeniería civil. Por otra parte, se deben considerar las advertencias pertinentes en el uso de este aditivo para evitar posibles errores en la implementación de su uso para la estabilización de suelos, lo cual llevara a un uso eficiente de este material.

Se recomienda identificar y controlar posibles variables extrañas, las cuales pueden influir en los resultados de este proceso de estabilización. Esto puede incluir factores como:

- Variabilidad en la selección y procesamiento de los desechos de construcciones para su uso.
- Diferencias en los tipos de suelos a ser empleados en la combinación de los agregados de desecho.
- Variación de los equipos e instrumentos utilizados para la medición del tamaño del agregado e influencia de la composición y sus propiedades físicas.

- Realizar calibraciones periódicas de los equipos y herramientas utilizados en el análisis de la estabilización de suelos, asegurando la precisión y consistencia de los resultados obtenidos.
- Para la ejecución a grandes escalas se recomienda aplicar pruebas preliminares, con el fin de analizar el correcto funcionamiento de este proceso de estabilización e identificar posibles fuentes de variabilidad antes de su proceso de aplicación.

Utilizar herramientas estadísticas centradas en la regresión simple o el análisis de varianza, para identificar y aislar el efecto de las variables extrañas, garantizando que los resultados principales reflejen resultados correctos.