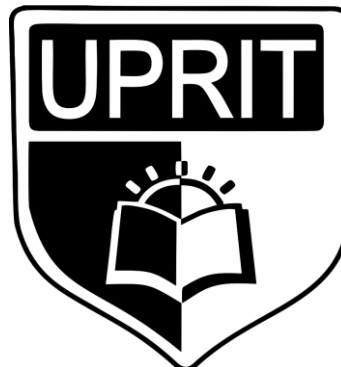




**UNIVERSIDAD PRIVADA DE TRUJILLO
FACULTAD DE INGENIERÍA
CARRERA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL**



**“BASES TEÓRICAS PARA LA ESTABILIZACIÓN DE
SUELOS CON CENIZA DE BAGAZO DE CAÑA DE AZÚCAR
PARA SU USO EN SUBRASANTES EN EL DISTRITO DE
LAREDO - TRUJILLO, LA LIBERTAD 2018”**

**TRABAJO DE INVESTIGACIÓN PARA
OPTAR EL GRADO DE BACHILLER**

AUTOR:

AQUINO MENDOZA MARCO ANTONIO

**TRUJILLO – PERÚ
2018**



HOJA DE FIRMAS

Mg. Ing. Enrique Duran Bazán.

Mg. Ing. Josualdo Villar Quiroz.



i. INDICE

RESUMEN	v
ABSTRACT	vi
I. INTRODUCCIÓN	7
1.1. DELIMITACION DEL PROBLEMA	9
1.2. JUSTIFICACIÓN	11
1.3. OBJETIVO	12
1.3.1. OBJETIVO GENERAL.....	12
1.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	12
1.4. PROCEDIMIENTOS METODOLOGICOS SEGUIDOS.....	13
1.4.1. TÉCNICAS, INSTRUMENTOS Y PROCEDIMIENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS.....	13
1.4.1.1.Técnicas de recolección de datos	13
1.4.1.2.Instrumento de recolección de datos	13
1.4.1.3.Validación de recolección de datos	13
II. RESULTADOS RESPECTO A LOS ANTECEDENTES	14
2.1 ESTABILIZACIÓN DE SUELOS.....	15
2.2 FUNDAMENTOS PARA LA ESTABILIZACIÓN DE SUELOS PARA CARRERTERAS.	21
2.3 SUBRASANTE.....	25



2.4 CENIZA DE BAGAZO DE CAÑA DE AZUCAR COMO AGENTE ESTABILIZANTE	27
2.5 DISEÑO DE PAVIMENTOS	28
2.5.1 Tipo de pavimentos.....	28
2.5.2 Factores a considerar en el diseño de pavimentos	37
2.5.3 Método de Diseño: AASHTO 93	39
2.6 CARACTERIZACIÓN DEL SUELO DEL DISTRITO DE LAREDO	43
III. CONCLUSIONES	44
IV. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.....	45
V. ANEXOS	47



RESUMEN

El costo creciente de los agentes estabilizadores tradicionales y la necesidad de contar con la utilización de desechos industriales y agrícolas con fines de ingeniería beneficiosos en La Libertad impulsó la presente investigación sobre el potencial de estabilización de la ceniza de bagazo (CBCA) en suelos arcillosos altamente expansivos. Este trabajo de investigación tiene como objetivo determinar las bases teóricas sobre la influencia de la adición de CBCA en la estabilización de suelos a nivel de subrasante en el distrito de Laredo. La investigación preliminar del suelo del Distrito de Laredo muestra que pertenece a la clase A-7-5 según clasificación AASHTO. Los suelos en esta clase generalmente son pobremente usados en ingeniería. Límites de Atterberg, esponjamiento libre, índice de esponjamiento libre, índice de hinchamiento libre, proctor modificado y CBR se usaron para evaluar las propiedades del suelo estabilizado. Las bases teóricas nos permiten predecir que hay una mejora en las propiedades geotécnicas de suelo estabilizado con CBCA, debido a que reduce el índice de plasticidad, hinchazón y MDD con un aumento en OMC y CBR con todos los contenidos de CBCA más altos.

PALABRAS CLAVES

- Bases Teóricas / Estabilización de suelos / subrasantes.



ABSTRAC

The increasing cost of the stabilizing traditional agents and the need to possess the utilization of industrial and agricultural waste beneficial ends of engineering in La Libertad, stimulated the present investigation on the potential of stabilization of the ash of bagasse (CBCA) in clayey highly expansive soils. This research work aims to determine the theoretical basis on the influence of the addition of CBCA in the stabilization of soils at the subgrade level in the district of Laredo. The preliminary investigation of the soil of the District of Laredo shows that it belongs to the class A-7-5 according to classification AASHTO. The soils in this class generally are poorly used in engineering. Atterberg's limits, swell frees, index of swell frees, index of swell frees, proctor modified and CBR was used to evaluate the properties of the stabilized soil. The theoretical basis allows us to predict that there is an improvement in the geotechnical properties of soil stabilized with CBCA, because it reduces the plasticity index, swelling and MDD with an increase in OMC and CBR with all the highest CBCA contents.

KEYWORDS

- Theoretical Bases / Stabilization of soils / subgrades



I. INTRODUCCIÓN

La estabilización es el proceso de combinación y mezclado de materiales con suelos para mejorar algunas de sus propiedades. El proceso puede incluir la combinación de suelos para conseguir una granulometría mejorada o la mezcla de aditivos comerciales que pueden alterar la textura, plasticidad, granulometría o actuar como cementantes del suelo. (Chen, 1988)

En el Perú según el Ministerio de Transportes y Comunicaciones (2013) “Manual de Carreteras: Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos: Sección Suelos y Pavimentos” existen 8 tipos de estabilizadores recomendados, los cuales dependen de las características físicas y mecánicas del suelo para su uso; a esto se suma que, en los últimos años se vienen realizando diversas investigaciones que permiten conocer las ventajas técnicas, económicas y ambientales de la utilización de diversos productos considerados “residuos” como agentes estabilizadores, brindando nuevas alternativas de solución y líneas de acción a seguir al momento de optar por una u otra alternativa de estabilización de una carretera no pavimentada de acuerdo a su ubicación en el territorio peruano. Es así que los residuos calcáreos de conchas de abanico en Piura, así como la ceniza de carbón de la planta termoeléctrica en Ilo, entre otros, toman relevancia al representar grandes contaminantes en sus respectivas regiones, pero al mismo tiempo, grandes alternativas de solución en su uso como agentes estabilizantes, teniendo como premisa que el desarrollo de un país se basa, primordialmente en sus vías de comunicación, ya que a través de ellas se llevan a cabo interrelaciones económicas, sociales y culturales entre las comunidades, municipios y departamentos.

Todos estos procesos, tanto las estabilizaciones estandarizadas como las nuevas alternativas, son controlados bajo la norma CE.020 Estabilización de Suelos y Taludes del Reglamento Nacional de Edificaciones así como el “Manual de Carreteras: Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos: Sección Suelos y Pavimentos” del Ministerio de Transportes y



Comunicaciones. Por otro lado, todos los ensayos realizados para la comprobación de los requerimientos mínimos exigidos de acuerdo al proyecto o construcción se rigen de acuerdo a el “Manual de Carreteras: Ensayos de Materiales” del MTC.

(Pérez, 2010) estabilizó en Juliaca-Puno, suelos arcillosos con ceniza de carbón y se comprobó que la mezcla de ceniza volante con el suelo arcilloso en estudio, como también la adición de cemento, presentó un mejor comportamiento que el suelo puro para su empleo como capa de sub-base y sub-rasante mejorada de pavimentos. Se examinó factores como; tiempo de curado, tiempo de compactación, contenido de agua y otros factores que influyen en el comportamiento de la mezcla final. La investigación concluye que existe viabilidad técnica y económica para la construcción de pavimentos empleando cenizas volantes de carbón como material estabilizador de suelos.

Hasta este punto se demuestra que nuestro país presenta aún una gran carencia de vías aptas para el tránsito vehicular que permita la conexión de costa, sierra y selva. Esto se complica debido a que nuestro territorio presenta diversas tipologías de suelos, cada una con diversas problemáticas propias del suelo y la zona, siendo prioritario la implementación de alternativas, como la estabilización de suelos con ceniza de bagazo de caña de azúcar (desecho industrial) que posibiliten el desarrollo vial, solucionando problemas locales, con elementos residuales de la zona, disminuyendo costos e incrementando alternativas medioambientalistas.

En el Perú, los caminos no pavimentados de bajo tránsito, no justifica la construcción de pavimentos asfálticos en su primera etapa, debido al costo elevado; sin embargo, demandan características aceptables de transitabilidad y confort. Por lo cual se debe controlar su condición resbaladiza en estado húmedo, en los tramos donde predominan los suelos arcillosos, las huellas profundas y baches por acumulación de humedad y la erosión de la superficie y el desprendimiento excesivo de polvo en épocas secas. (Flores, 2012).

1.1 DELIMITACIÓN DEL PROBLEMA

En el distrito de Laredo existen varios tramos carreteros sin pavimentar, debido a las bajas prestaciones ingenieriles del suelo de la zona y la carencia de alternativas económicas para el mejoramiento de sus vías. Por lo cual nace la necesidad de estabilizar dichos suelos dependiendo de algunos o varios requerimientos como por ejemplo el disminuir asentamientos de estructuras, disminuir el potencial de expansión y contracción de los suelos, aumentar la resistencia de los suelos, facilitar el trabajo de construcción, reducir la permeabilidad de ciertos suelos, escasez de materiales de construcción en la zona donde se está llevando a cabo el proyecto, disminuir el potencial de daños causados durante el congelamiento y descongelamiento progresivo de suelos, entre otros.

Básicamente para mejorar las propiedades mecánicas de un suelo, necesario para que cumpla con las características específicas de acuerdo al proyecto a desarrollarse, se puede alterar de muchas formas como puede ser por medios mecánicos, drenaje, adición de agentes estabilizantes, por la acción de cargas sobre él, congelándolo, entre otros. Sin embargo, y debido a la gran variabilidad de suelos, cada método resulta aplicable solamente a un número determinado de ellos. Las soluciones básicas son alternativas técnicas, económicas y ambientales, que consisten principalmente en la aplicación de estabilizadores de suelos, recubrimientos bituminosos y otros, posibilitando que las carreteras no pavimentadas tengan una mayor vida útil y presten un mejor servicio.

Por otro lado, dentro de las investigaciones realizadas sobre estabilización de suelos en nuestro país aún no hay una en la cual la ceniza de bagazo de caña de azúcar sea el agente estabilizador utilizado, pero existen reportes en otros países como en Brasil donde su estudio ha brindado grandes perspectivas en cuanto a las ventajas de su uso,



representando una gran alternativa al problema de contaminación en la ciudad. (Hoffman, 1985)

El estudio de la estabilización de suelos utilizando ceniza de caldera de hornos de industrias azucareras pretende demostrar como un material inerte, que es residuo industrial que proviene de la combustión del bagazo de caña en las empresas, puede mejorar las condiciones de los suelos, haciéndolos más estables, tratando en gran medida palear a mediano o largo plazo una probable escasez de cemento o de cal y que además contribuiría a disminuir el creciente problema de contaminación ambiental y de depósito de las grandes cantidades de ceniza que se generan en las empresas a nivel nacional, debido a que la producción de azúcar a partir de la caña de azúcar es una actividad industrial que contamina el medio ambiente debido al gran número de operaciones unitarias que realiza en su proceso de transformación; asimismo, la caña de azúcar es cultivada en la costa, sierra y selva y gracias a las condiciones climáticas y de suelo, se siembra y cosecha durante todo el año. El problema se acrecienta en nuestra región debido a que La Libertad ocupa el primer lugar en la producción de caña de azúcar en el Perú con 4 millones 345 mil 865 toneladas, lo que representa el 46%, superando a los departamentos de Lambayeque que representa un 23%, Lima, Ancash y Arequipa.

Por lo tanto, se propone el empleo de un agente estabilizador para el suelo de la región de estudio a partir de la ceniza de bagazo de caña de azúcar obtenidas localmente, solucionando dos grandes problemas como son la inestabilidad de suelos y la contaminación causada por la industria azucarera en la región. Pues al no haber una propuesta técnica investigada, los suelos del distrito de Laredo continuarán sin una alternativa para su utilización en subrasantes de pavimentos que aseguren una transitividad óptima y segura, del mismo modo se continuará con el deterioro ambiental producido por desechos de la industria azucarera al no investigarse métodos de reutilización.

Entonces el problema de la investigación es: ¿Cómo influye la adición de ceniza de bagazo de caña de azúcar en la estabilización de suelos a nivel de subrasante en el distrito de Laredo?

1.2 JUSTIFICACIÓN

Las investigaciones realizadas en nuestro país en los últimos años no contemplan el uso de la ceniza de bagazo de caña de azúcar sea el agente estabilizador utilizado a la hora de mejorar un suelo.

La utilización de la ceniza de bagazo de caña de azúcar en el estudio de estabilización de suelos pretende demostrar como un residuo industrial proveniente de la combustión de la caña de azúcar soluciona la problemática de las condiciones pobres del suelo en términos ingenieriles, mejorando sus condiciones al volverlos más estables y aumentando su capacidad de soporte.

El presente investigación tiene como propuesta el uso de la ceniza de bagazo de caña de azúcar (CBCA) proveniente de los hornos de industrias azucareras como agente estabilizador para el mejoramiento de las propiedades físico-mecánicas de los suelos de los caminos no pavimentados del distrito de Laredo en Trujillo, al no haber estudios previos de su empleo dentro de las investigaciones realizadas sobre estabilización de suelos en nuestro país, tomando como base los reportes recogidos acerca de su óptimo comportamiento y grandes perspectivas de su utilización en otros países como Brasil. Las conclusiones del estudio se fundamentan en una serie de ensayos de laboratorio, cuyos resultados nos indican en qué medida mejoran los suelos al aplicar diferentes porcentajes de ceniza, para luego escoger la de óptimo comportamiento y llevarlo a un análisis económico comparativo en su utilización a la hora de pavimentar vías.

Las ciudades peruanas deben enfrentar una serie de desafíos ambientales sobre todo en cuanto al correcto tratamiento y disposición de aguas residuales, residuos sólidos y ampliación de áreas verdes. El origen de múltiples causas de las enfermedades establece

la necesidad de servicios básicos universal y estrategias de educación y participación de la población basada en enfoques preventivos, de lo contrario, la reducción de enfermedades y el mejoramiento de la calidad de vida de la población será marginal.

Esta investigación nos permitirá conocer si la ceniza de bagazo de caña de azúcar como agente estabilizador realmente mejora las propiedades físico-mecánicas de los suelos, ya que en La Libertad aún no se cuenta con investigaciones similares de este tema. Es por esto que la importancia de éste trabajo radica en el hecho de que puede ofrecerse al medio una nueva adición para la estabilización de suelos, que mejore todas o alguna propiedad de los suelos y que además se dé utilidad a un material que contamina el medio ambiente, con el fin de utilizar a los suelos en la construcción de obras civiles.

1.3 OBJETIVO

1.3.1 Objetivo general

Determinar las bases teóricas sobre la influencia de la adición de ceniza de bagazo de caña de azúcar en la estabilización de suelos a nivel de subrasante en el distrito de Laredo.

1.3.2 Objetivos específicos

- ◆ Determinar las características físico-mecánicas del suelo que son mejoradas con el proceso de estabilización, mediante la adición de ceniza de bagazo de caña de azúcar a la muestra de suelo a nivel de subrasante extraída de la Av. Campo Primavera, progresiva Km 0 + 000.00 al Km 0 + 100.00, distrito de Laredo.

- ◆ Determinar las bases teóricas en la influencia de la ceniza de bagazo de caña de azúcar en el diseño estructural de un pavimento típico según normativa AASTHO.

1.4 PROCEDIMIENTOS METODOLÓGICOS SEGUIDOS

1.4.1. Técnicas, instrumentos y procedimientos de recolección de datos

1.4.1.1. Técnicas de recolección de datos

- La técnica de recolección de datos de la presente investigación será por medio de la observación directa, la cual permite la visualización, conservándose el orden, la precisión y coherencia de los datos visualizados obtenidos.
- Este proceso de conocimiento permite percibir deliberadamente el tipo de suelo que existe en el desarrollado de esta investigación de la Av. Campo Primavera, progresiva Km 0 + 000.00 al Km 1 + 00.00 del distrito de Laredo.
- Así mismo se utilizó la técnica del análisis de información para evaluar las tesis y publicaciones sobre el tema.

1.4.1.2. Instrumentos de recolección de datos

- Los formatos de guía de observación diseñados para el registro de los datos obtenidos de cada una de las calicatas realizadas en la Av. Campo Primavera, progresiva Km 0 + 000.00 al Km 1 + 00.00 del distrito de Laredo, serán adjuntadas al final de este informe.
- Otro instrumento usado será la matriz de datos, para evaluar las tesis y publicaciones sobre el tema. (Ver formato en anexos).

1.4.1.3. Validación de Recolección de Datos

Una de las fuentes de información son las publicaciones del libro de (Guyer, J. P., 2011, US Army, 1994). Referido al tema de Estabilización de Suelos.

II. RESULTADOS RESPECTO A LOS ANTECEDENTES

La construcción exitosa de carreteras requiere la construcción de una estructura que sea capaz de soportar las cargas de tráfico impuestas. Una de las capas más importantes de la carretera es la base real, o subrasante. El suelo de subrasante forma la parte integral del pavimento de la carretera estructura ya que proporciona el soporte al pavimento desde abajo. La función principal de la subrasante es para dar soporte adecuado al pavimento y para esto; la subrasante debería poseer suficiente estabilidad bajo clima adverso y condiciones de carga. Si estas estructuras se basan en suelos con baja capacidad de carga, es probable que fallen durante o después construcción, con o sin aplicación de carga de ruedas sobre ellos. Donde el pavimento sea construido en un suelo inherentemente débil, este material será normalmente eliminado y reemplazado con un material granular más fuerte o mejorando el suelo hacia la propiedad deseada por adición de productos químicos (Christopher, H., 2010).

Esta técnica de eliminación y reemplazo puede ser costosa y lenta. Donde los agregados son escasos, el uso de estos recursos no renovables se considera insostenible, particularmente si las distancias de acarreo son significativas.

Una alternativa a la opción de extracción y reemplazo es estabilizar químicamente el material encontrado. Esto elimina la necesidad de reemplazar el material y garantiza las características ingenieriles y mejora el rendimiento del material de acogida para permitir su uso dentro de la estructura del pavimento (Christopher, H., 2010).

2.1) ESTABILIZACIÓN DE SUELOS

La estabilización del suelo es la alteración de una o más propiedades del suelo, por acción mecánica o química, para crear un material de suelo mejorado que posee las propiedades de ingeniería deseadas. El proceso puede incluir la mezcla de suelos para lograr una gradación o mezcla de aditivos comercialmente disponibles que pueden alterar la gradación, textura o plasticidad, o actuar como un aglutinante para la cementación del suelo (Guyer, J. P., 2011, US Army, 1994).

2.1.1) Usos de la Estabilización

- **Mejora de la calidad:** Las mejoras más comunes logradas a través de la estabilización incluye la reducción del índice de plasticidad o potencial de hinchamiento, y aumenta la durabilidad y fuerza con una mejor gradación del suelo. En clima húmedo, la estabilización también puede ser utilizada para proporcionar una plataforma de trabajo para las operaciones de construcción (Guyer, J. P., 2011; US Army, 1994).
- **Reducción de espesor:** Se puede mejorar la resistencia y la rigidez de una capa de suelo mediante el uso de aditivos para permitir una reducción en el espesor de diseño del estabilizado material en comparación con un material no estabilizado o no consolidado. El grosor del diseño puede reducirse si los requisitos de resistencia, estabilidad y durabilidad de una base o sub-base de la carretera es indicado por un adecuado análisis con un mayor grado de complejidad (Guyer, J. P., 2011; US Army, 1994).

2.1.3) Tipos de Estabilización de Suelos

Los dos métodos más utilizados para estabilizar los suelos son la estabilización por compactación o estabilización por aditivos químicos. (Thian & Lee, 2012)

a) Estabilización Mecánica

La estabilización mecánica se puede definir como un proceso para mejorar las características de estabilidad y resistencia al corte del suelo sin alterar las propiedades químicas del suelo. Los principales métodos de estabilización mecánica se pueden clasificar en compactación, mezcla o mezcla de dos o más gradaciones, aplicación de refuerzo geográfico y remediación mecánica (Guyer, J. P., 2011; Makusa, G.P., 2012).

b) Estabilización Química

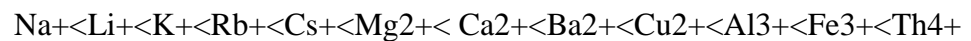
La estabilización del suelo con mezclas químicas es el método más antiguo y extendido de mejora del suelo. La estabilización química es la mezcla del suelo con una o la combinación de mezclas de polvo, lechada o líquido para mejorar o controlar su estabilidad, resistencia, hinchazón, permeabilidad y durabilidad.

La mejora del suelo mediante estabilización química se puede agrupar en tres reacciones químicas: intercambio catiónico, floculación-aglomeración y reacciones puzolánicas. (Khairul, 2009).

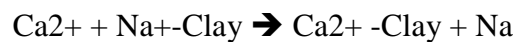
i. Intercambio de Cationes

Los iones en exceso de carga opuesta a la de la superficie de arcilla, sobre los de carga similar presente en la capa doble difusa se llaman iones intercambiables. Estos iones pueden ser reemplazados por un grupo de iones diferentes que tienen la misma carga total, alterando la composición química de la solución de electrolito de equilibrio.

Las partículas de arcilla negativamente cargadas adsorben cationes de tipo y cantidad específica. La facilidad del reemplazo o intercambio de cationes depende de varios factores, principalmente la valencia del catión. Los cationes de valencia más altos reemplazan fácilmente a los cationes de valencia más baja. Para iones de la misma valencia, el tamaño del ion hidratado se vuelve importante; cuanto mayor es el ion, mayor es el poder de reemplazo. Si otras condiciones son iguales, los cationes trivalentes se mantienen con más fuerza que los divalentes y los cationes divalentes se mantienen más fuertemente que los cationes monovalentes. Una típica serie de reemplazabilidad es:



Los cationes intercambiables pueden estar presentes en el agua circundante o pueden obtenerse de los estabilizadores. Un ejemplo de intercambio de cationes:



El espesor de la doble capa difusa disminuye al reemplazar los iones divalentes (Ca^{2+}) de estabilizadores con iones monovalentes (Na^+) de arcilla. Por lo tanto, el potencial de hinchazón disminuye.

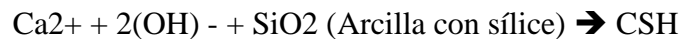
ii. Floculación y Aglomeración

Las reacciones de intercambio catiónico dan como resultado la floculación y la aglomeración de las partículas del suelo con la consiguiente reducción en la cantidad de materiales de tamaño de arcilla y por lo tanto el área de la superficie del suelo, lo que

inevitablemente explica la reducción de la plasticidad. Debido al cambio en la textura, se produce una reducción significativa en la hinchazón del suelo.

iii. Reacciones Puzolánicas

Las reacciones puzolánicas dependientes del tiempo juegan un papel importante en la estabilización del suelo, ya que ellos son responsables de la mejora en las diversas propiedades del suelo. Los constituyentes puzolánicos producen hidrato de silicato de calcio (CSH) e hidrato de aluminato de calcio (CAH). (Bañon & Beví, 2010)



El gel de silicato de calcio formado inicialmente recubre y une terrones de arcilla. El gel entonces cristaliza para formar una estructura entrelazada que aumenta la resistencia del suelo.

c) Estabilización con Cal

Se da con la mezcla de suelo, cal y agua, se genera la estabilidad cuando la cal viva reacciona químicamente con el agua. Al hidratarse la cal genera reacciones con las partículas arcillosas y esto evoluciona permanentemente en un fuerte matriz cementante.

La ventaja de estabilizar suelos con cal, es que aumenta la plasticidad, así como también el LL como el LP, y también considerablemente su IP. También se genera una compactación óptima gracias al aumento de su humedad, densificando al suelo de su elevada humedad natural, donde no permitirían la construcción de la capa de rodadura sobre ellos. (Brooks, 2009)

d) Estabilización Suelo – cemento

Se obtiene por la combinación de un suelo separado con aditivo sólido (cemento), teniendo como principal adición el agua, procediendo a una compactación y curado adecuado. Solo así, esta combinación para una base estabilizada se convierte en otro endurecido, mejorando su resistencia altamente.

Al realizar los ensayos de Proctor modificado, determinamos el óptimo contenido de agua, así mismo para la compactación de suelos. Estas propiedades dependen de:

- Tipo y cantidad de suelo, cemento y agua.
- Ejecución
- Edad de la mezcla compactada y tipo de curado.

Mientras más cemento y tiempo de preparación tenga la mezcla, aumenta su resistencia, el IP disminuye antes de agregarse el cemento e iniciarse el fraguado, su LL cambia ligeramente y su densidad máxima y húmeda cambia ligeramente.

e) Estabilización con Emulsión Asfáltica

La mezcla de un suelo con un producto asfáltico puede tener como finalidad:

- Un aumento de su estabilidad por las características aglomerantes del ligante que envuelve las partículas del suelo.
- Una impermeabilización del suelo, haciéndolo menos sensible a los cambios de humedad y por tanto más estable en condiciones adversas.

La dosificación necesaria de ligante es función principalmente de la granulometría (superficie específica) del suelo. Los suelos más adecuados son los granulares con pocos finos, de reducida plasticidad, que presentan menos del 20% que pasa la malla N°200, $LL < 30$ e $IP < 10$.

El material asfáltico usualmente empleado son las emulsiones asfálticas y los asfaltos fluidificados de viscosidad media. La mezcla se hace con frecuencia in situ, y la elección del ligante asfáltico dependerá de la granulometría del suelo, de su contenido de humedad y de las condiciones climáticas. La granulometría puede ser abierta, cerrada con finos o cerrada sin finos, pero una mayor superficie específica exigirá un ligante de curado y rotura más lentos, para permitir una mezcla más adecuada. En zonas con temperaturas elevadas, también deberán usarse productos de curado y rotura más lentos, éstos podrán ser más viscosos.

f) Estabilización con polímero

La palabra polímero se usa para una gran variedad de productos ofrecidos a la industria de construcción de carreteras. Algunos productos de “polímeros” tienen la misma fórmula que los jabones en polvo. Algunos simplemente lubrican el suelo para ayudar a lograr la máxima densidad cuando se compacta el suelo tratado. Ellos no tienen propiedades vinculantes del todo. (Bell, 1996)

g) Estabilización con Agentes Estabilizantes

Las cenizas volantes son un aditivo químico que se compone de silicio y aluminio y se produce como un subproducto de la combustión del carbón en las centrales. Las cenizas volantes pueden mezclarse a su vez con cal y agua para estabilizar los materiales granulares con pocos finos, produciendo una masa cementada. El papel de las cenizas volantes en la estabilización de

suelos es actuar como una puzolana y/o filler, dependiendo de si su empleo es como único agente estabilizador o mezclado con otros, teniendo como ventaja principal que es un producto de desecho en muchas industrias y por tanto, más barato que otros agentes.

Las cenizas volantes son un material puzolánico que mejora las propiedades por reacciones con la fracción arcillosa del suelo y le confiere resistencia mecánica. Si se emplea en conjunto con la cal, las cenizas volantes reaccionan con la cal y así puede ser empleada con suelos en los que la fracción fina es escasa. En estos casos, también se puede adicionar una pequeña cantidad de cemento para aumentar las características mecánicas, en el conocido LCF. (Bowles E. , 1981)

2.2) FUNDAMENTOS PARA LA ESTABILIZACIÓN DE SUELOS PARA CARRETERAS

Las carreteras de Tercera Clase, según el MTC (2013), son aquellas con IMDA menores a 400 veh/día, con calzada de dos carriles de 3,00 m de ancho como mínimo, aun excepcionalmente pueden tener hasta 2,50m; Estas carreteras pueden funcionar con soluciones denominadas básicas o económicas, consistentes en la aplicación de estabilizadores de suelos, emulsionantes asfálticas y/o micro pavimentos; o en afirmado, en la superficie de rodadura.

La estabilización se fundamenta en el mejoramiento de las propiedades del suelo, como son la estabilidad volumétrica, resistencia, permeabilidad, compresibilidad y durabilidad siendo estas las más relevantes al momento de realizar algún tipo de estabilización. Al elegir algún tipo de producto para mejorar las características del suelo los estudios se concentran en verificar si mejora alguna de éstas propiedades.

2.2.1) Estabilidad Volumétrica.

La expansión y contracción de varios suelos, causados por los constantes cambios de humedad, se pueden manifestar en forma repentina o acompañando a las variaciones estacionales o con la actividad del ingeniero.

Para el desarrollo de esta propiedad nos basaremos en los tipos de suelos arcillosos; los cuales tienen la capacidad de expansión o de retracción dependiendo de su contenido de humedad. En un suelo de estas características el objetivo primordial es cambiar esa masa de arcilla expansiva a una masa completamente rígida o en una masa granulada, pero con una capacidad de expansión mínima; esto es juntar las partículas que la conforman, de manera que puedan resistir las presiones internas que provocan la expansión y/o hinchamiento. Esto más que todo se logra con la aplicación de procesos químicos o térmicos. Para arcillas ubicadas en la superficie los procesos químicos son efectivos; los procesos térmicos se han aplicado a arcillas más profundas. (ASTMC618, 2003)

2.2.2) Resistencia.

La estabilización mecánica es fundamental para mejorar esta propiedad (compactación), para lograr una mayor resistencia se necesita aplicar algunas formas de estabilización, estas son:

- a) Compactación (mediante amasado, vibración o impactos)
- b) Vibro-flotación
- c) Precarga
- d) Drenaje (para reducir la cantidad y/o presión de agua en los poros de los suelos)
- e) Estabilización mecánica con mezclas y/o combinación de otros suelos
- f) Estabilización química con cemento, cal u otros aditivos.

Con poca resistencia ocurre comúnmente en suelos orgánicos, ya que la presencia de material orgánico no permite una adecuada estabilización de estos suelos.

4.3) Permeabilidad.

En los diferentes tipos de suelos la permeabilidad es la capacidad de transferir agua (u otra sustancia); es permeable cuando éste deja pasar a través de él una cantidad considerable de fluido, y es impermeable si la cantidad de fluido es nulo. El suelo se puede definir como permeable pues presenta poros; en este caso son los espacios vacíos que le permiten absorber el agua; a su vez estos espacios vacíos están interconectados de tal forma que dispone de caminos por los que el agua puede pasar sin ningún impedimento. Si no ocurre esto, es decir, la cantidad de espacios vacíos es mínima, entonces el suelo será impermeable. (Bowles J. , 1992)

Muchas veces la permeabilidad se ve perjudicada por las propiedades y estructura del suelo, donde éstas serán dependientes del número y tamaño de los poros del suelo.

Según la textura, mientras el suelo sea más fino (textura más fina) más lenta será su permeabilidad.

Tabla 1 PERMEABILIDAD SEGÚN TEXTURA DEL SUELO

SUELO	TEXTURA	PERMEABILIDAD
Suelos arcillosos	Fina	De muy lenta a muy rápida
Suelos limosos	Moderadamente fina	
	Moderadamente gruesa	
Suelos arenosos	Gruesa	

FUENTE: Ministerio de Transportes y Comunicaciones.

La permeabilidad se podrá modificar si se modifica la estructura, como lo indica la Tabla 2.

Tabla 2 PERMEABILIDAD SEGÚN LA ESTRUCTURA DEL SUELO

TIPO DE ESTRUCTURA		PERMEABILIDAD
Laminar	Gran traslapo	De muy lenta a muy rápida
	Ligero traslapo	
En bloque		
Prismática		
Granular		

FUENTE: Ministerio de Transportes y Comunicaciones.

2.2.4) Durabilidad.

La resistencia al intemperismo es lo deseable para obtener suelos estabilizados, los principales problemas de durabilidad están relacionados a los suelos cercanos a la superficie de rodamiento; y para mejorarlas se necesita de la inserción de químicos, dependiendo del tipo de suelo. (Amu & et al., 2011)

2.2.5) Compresibilidad.

Es el grado en que la masa de suelo disminuye su volumen bajo el efecto de una carga. Esta propiedad afecta a otras como la permeabilidad; también altera la magnitud y el sentido de las fuerzas interpartículas; modificando la resistencia del suelo al esfuerzo cortante o pudiendo provocar deslizamientos.

Si se habla de los suelos de textura gruesa (gravas y arenas); la compresibilidad será mínima, pues sus partículas están en contacto. Nos centraremos en los suelos de grano fino, las arcillas y limos; si se comprime una masa húmeda de estos suelos, se produce una reducción en su volumen, pues gran parte de la humedad y el aire presentes se eliminarán; la compresibilidad llega al máximo mientras mayor cantidad de materia orgánica esté presente. Estos problemas pueden afectar 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 uso.

2.3) SUBRASANTE

La subrasante es el soporte natural, preparado y compactado, en la cual se puede construir un pavimento. La función de la subrasante es dar un apoyo razonablemente uniforme, sin cambios bruscos en el valor soporte, es decir, mucho más importante es que la subrasante brinde un apoyo estable a que tenga una alta capacidad de soporte. Por lo tanto, se debe tener mucho cuidado con la expansión de suelos (AASHTO. 1993, p. 4) “Las propiedades importantes para analizar en la subrasante son las propiedades físicas (granulometría, límites de consistencia, densidad, contenido de agua), propiedades de rigidez (módulo resiliente, módulo de elasticidad y CBR), propiedades hidráulicas (coeficiente de drenaje, permeabilidad, coeficiente de expansión)” (Menéndez, 2013).

Tabla 3 CATEGORÍAS DE LA SUBRASANTE

CATEGORIAS DE LA SUBRASANTE	CBR
S0: Subrasante Inadecuada	CBR < 3%
S1: Subrasante Pobre	De CBR \geq 3% A CBR < 6%
S2: Subrasante Regular	De CBR \geq 6% A CBR < 10%
S3: Subrasante Buena	De CBR \geq 10% A CBR < 20%
S4: Subrasante Muy Buena	De CBR \geq 20% A CBR < 30%
S5: Subrasante Excelente	De CBR \geq 30%

FUENTE: Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2013.

Se consideran como materiales aptos para la coronación de la subrasante suelos con CBR igual o mayor de 6%.

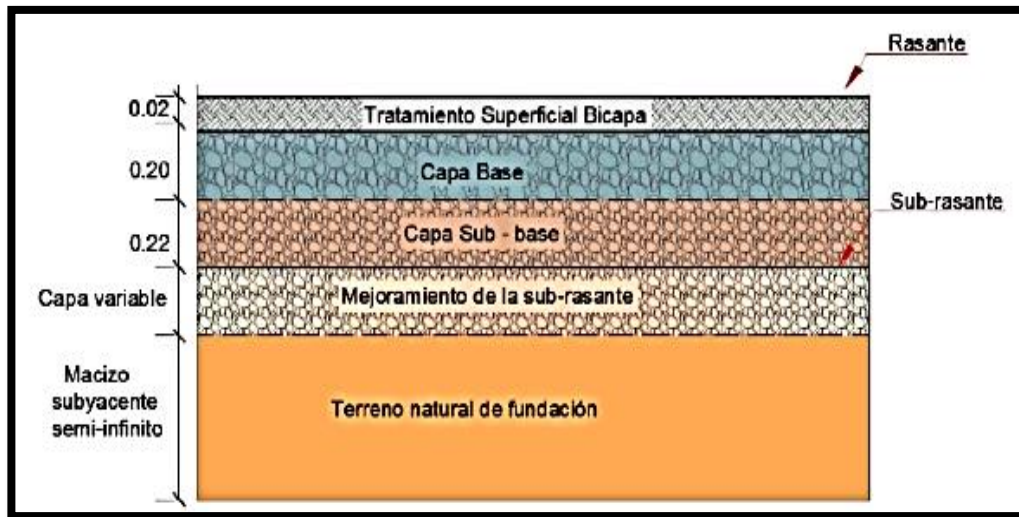


Figura 1 Sección Transversal - Pavimento Flexible.

FUENTE: Ramón, 2008.

Los parámetros determinantes en la respuesta de la Subrasante en el comportamiento de una subrasante generalmente dependen de tres características básicas, las cuales se hallan interrelacionadas entre sí, siendo éstas las siguientes (Ramón, B. 2013, p. 7)

a) La capacidad portante

La subrasante debe tener la capacidad de soportar las cargas transmitidas por la estructura del pavimento. La capacidad de carga es función del tipo de suelo, del grado de compactación y de su contenido de humedad. El propósito del pavimento es proporcionar una superficie confortable al tránsito de vehículos. Consecuentemente, es necesario que la subrasante sea capaz de soportar un número grande de repeticiones de carga sin presentar deformaciones (Ramón, B. 2013, p.7).

b) Contenido de humedad

El diferente grado de humedad de la subrasante afecta en forma determinante su capacidad de carga, pudiendo además llegar a provocar inclusive contracciones y/o expansiones indeseables, especialmente en el caso de la presencia de suelos finos.

El contenido de humedad es afectado principalmente por las condiciones de drenaje, elevación del nivel freático, infiltración etc. Una subrasante con un elevado contenido de humedad sufrirá deformaciones prematuras ante el paso de las cargas de sollicitación de los vehículos (Ramón, B. 2013, p. 7).

c) Contracción y/o expansión

Algunos suelos se contraen o se expanden, dependiendo de su grado de plasticidad y su contenido de humedad. Cualquier pavimento construido sobre estos suelos, si no se adoptan las medidas pertinentes, tenderán a deformarse y/o deteriorarse prematuramente. Para evitar que las deflexiones admisibles en la subrasante excedan los límites establecidos, debe cumplirse que la presión transmitida por la carga se mantenga por debajo del valor de la carga máxima transmitida al suelo, para lo cual deberá tomarse en cuenta el tránsito de diseño a través del número de repeticiones de carga, las deflexiones máximas esperadas y el CBR del material con el que se ejecutará el mejoramiento (Ramón, B. 2013, p.7).

2.4) CENIZA DE BAGAZO DE CAÑA DE AZUCAR COMO AGENTE ESTABILIZANTE

En estos días, la sostenibilidad juega un papel importante en todos los aspectos de las actividades humanas. Muchas tecnologías llegaron a su fin porque no estaban en armonía con la idea de desarrollo. La sostenibilidad está preocupada por el mundo que dejaremos atrás para generaciones futuras. Se centra en los problemas sociales, ambientales y económicos de los humanos ocupaciones. Por lo tanto, requiere que cada actividad sea respetuosa con el medio ambiente, económica y seguro para lo social. (CCanto, 2010)

La ceniza de bagazo contiene una gran cantidad de sílice, que es el componente más importante de materiales de reemplazo de cemento. También se encuentra en gran cantidad como un subproducto en las fábricas de azúcar. A pesar de esta abundancia y contenido de sílice, se ha hecho relativamente poco para examinar la potencial de este material para la



estabilización del suelo. Aunque poco, las investigaciones realizadas conformar la idoneidad de este material para la estabilización del suelo como una mezcla con cal y cemento. Pero aun así su idoneidad como material independiente sigue siendo cuestionable.

2.5) DISEÑO DE PAVIMENTOS

Un pavimento es una estructura cuya finalidad es permitir el tránsito de vehículos y puede estar conformada por una o varias capas superpuestas. Las principales funciones que debe cumplir un pavimento son “proporcionar una superficie de rodamiento uniforme, de color y textura apropiados, resistente a la acción del tránsito, a la del intemperismo y otros agentes perjudiciales, así como transmitir adecuadamente a las terracerías los esfuerzos producidos por las cargas impuestas por el tránsito”. Además debe ser resistente al desgaste debido a la abrasión producida por las llantas y tener buenas condiciones de drenaje. En cuanto a la seguridad vial debe presentar una textura apropiada de acuerdo a la velocidad de circulación de los vehículos para mejorar la fricción, debe tener un color adecuado de tal manera que se eviten los reflejos y deslumbramientos. Con el fin de brindar comodidad a los usuarios, debe procurar tener regularidad superficial, tanto transversal como longitudinal. También se debería tener en cuenta en el diseño medidas para disminuir el ruido de la rodadura. Como toda obra de infraestructura los factores de costo y de vida útil son muy importantes por lo que el pavimento debe ser durable y económico. (AASHTO, 1995)

Existen varios tipos de pavimento; sin embargo, sólo se profundizará en dos por el alcance del presente trabajo: flexible y rígido.

2.5.1) Tipos de Pavimentos

i) Pavimentos flexibles

Este tipo se caracteriza por estar conformado en la superficie por una capa de material bituminoso o mezcla asfáltica que se apoya sobre capas de material

granular, las cuales generalmente van disminuyendo su calidad conforme se acercan más a la subrasante. Esto se debe a que los esfuerzos que se producen por el tránsito van disminuyendo con la profundidad y por razones económicas. La teoría que se utiliza para analizar su comportamiento es la teoría de capas de Burmister.

A) Las características fundamentales que debe cumplir un pavimento flexible son:

- **Resistencia estructural:** el pavimento debe ser capaz de soportar las cargas debidas al tránsito de tal manera que el deterioro sea paulatino y que se cumpla el ciclo de vida definido en el proyecto.

La causa de falla en este tipo de pavimentos con mayor aceptación es los esfuerzos cortantes. Sin embargo, también se producen esfuerzos adicionales por la aceleración y frenado de los vehículos así como esfuerzos de tensión en los niveles superiores de la estructura al deformarse esta verticalmente debido a la carga que soporta. Asimismo, el pavimento se encuentra sometido a cargas actuantes repetitivas. Éstas afectan a largo plazo la resistencia de las capas de relativa rigidez, que en los pavimentos flexibles serían sobre todo las carpetas y bases estabilizadas, donde podrían ocurrir fenómenos de fatiga. Además, la repetición de cargas puede causar la rotura de los granos del material granular modificando la resistencia de estas capas.

- **Deformabilidad:** el nivel de deformación del pavimento se debe controlar debido a que es una de las principales causas de falla en la estructura y si la deformación es permanentemente, el pavimento deja de cumplir las funciones para las cuales fue construido. Se presentan dos clases de deformaciones en una vía: elásticas (recuperación instantánea) y plásticas (permanentes).



- **Durabilidad:** una carretera que tenga un ciclo de vida prolongado en condiciones aceptables no sólo evita la necesidad de construcción nueva, sino también la molestia de los usuarios de la vía al interrumpir el tránsito.
- **Costo:** se debe hallar un equilibrio entre el costo de construcción inicial y el mantenimiento al que tendrá que ser sometida la vía. Asimismo influye la calidad y la disponibilidad de los materiales para la estructura.
- **Requerimientos de la conservación:** las condiciones de drenaje y subdrenaje juegan un rol decisivo en el ciclo de vida del pavimento.
- **Comodidad:** una carretera tiene que resultar cómoda para los usuarios.

B) Las capas que generalmente componen la estructura de un pavimento flexible son las siguientes:

- **Carpeta asfáltica:** es la capa superficial de la estructura. Tiene tres funciones principales: servir como superficie de rodamiento uniforme y estable para permitir el tránsito, impermeabilizar la estructura para evitar en lo posible la percolación del agua al interior del pavimento y ser resistente a los esfuerzos producidos por las cargas aplicadas.
- **Base:** sirve como apoyo a la carpeta asfáltica y transmite los esfuerzos producidos por el tránsito a las capas inferiores en un nivel adecuado.
- **Sub-base:** principalmente cumple con una función económica ya que permite la utilización de materiales de menor calidad en un porcentaje del espesor del pavimento. Entonces, dependiendo de la calidad y el costo del material disponible, se puede utilizar sólo base o sub-base y base. Con la construcción de

la sub-base, puede ser que el espesor final de la capa sea mayor pero aun así resultar en un diseño más económico. Además puede servir como una capa de transición ya que actúa como un filtro que separa a la base de la subrasante impidiendo que los finos penetren en la primera y la dañen estructuralmente. Esta capa ayuda a controlar los cambios volumétricos que podrían tomar lugar en la subrasante debido a cambios en su contenido de agua o a cambios de temperatura. De esta manera, las deformaciones serían absorbidas por la sub-base evitando que se reflejen en la carpeta asfáltica. En cuanto a resistencia cumple la misma función que las capas superiores de transmitir los esfuerzos a la subrasante. Por último, a través de esta capa se puede drenar el agua e impedir la ascensión capilar.

Además en la fase de construcción se pueden utilizar ciertos tratamientos como: la capa de sellado que se coloca encima de la carpeta asfáltica para impermeabilizar la superficie, el riego de liga y la capa de imprimación que sirven para asegurar la adherencia entre asfalto antiguo y nuevo en el primer caso, y entre el material granular y la mezcla asfáltica que se colocará encima en el segundo. Desde que se comenzaron a construir pavimentos flexibles se han ido elaborando teorías y desarrollando mejoras para el diseño y el análisis de estas estructuras. Algunos de estos avances son mencionados por Huang. Los métodos de diseño pueden ser clasificados dentro de cinco categorías y se detallan a continuación:

- **Métodos empíricos:** se caracterizan, como su nombre lo indica, por estar basados en datos recolectados de campo. Justamente esta característica resulta una desventaja en sí misma ya que el método sólo puede ser utilizado bajo las condiciones ambientales, de los materiales y de carga de las muestras originales. Los resultados no pueden ser extrapolados directamente y haría falta desarrollar un nuevo método para corregir este inconveniente.

- **Métodos para limitar la falla por corte:** el objetivo de estos métodos es evitar que la falla por corte ocurra. Para esto se deben tener en cuenta principalmente las propiedades de cohesión y el ángulo interno de fricción del suelo de las diferentes capas del pavimento y de la subrasante. Este procedimiento ya no es tan popular debido a que con el incremento del volumen del tráfico y la mayor velocidad a la que llegan los vehículos se hace necesario brindar comodidad a los usuarios y no solo prevenir la falla por corte de los pavimentos.
- **Métodos para limitar las deformaciones:** con estas técnicas se diseña el pavimento con un espesor que impida que se exceda el límite permisible de deflexiones verticales. La ventaja de utilizar deflexiones como criterio principal es que se pueden medir directamente en campo. Sin embargo, se debe tener en cuenta que gran cantidad de pavimentos fallan por esfuerzos y tensiones mayores que los esperados y no por deflexiones.
- **Métodos de regresión basados en el desempeño de los pavimentos o en las pruebas de las carreteras:** estos procedimientos se caracterizan por utilizar ecuaciones de regresión basadas en los resultados de pruebas de caminos existentes. No obstante, presenta la misma desventaja que el método empírico en que dichas ecuaciones sólo corresponden a las condiciones del lugar en que se encontraba la vía.
- **Métodos mecánicos-empíricos:** estos métodos incorporan la mecánica de materiales y los datos obtenidos del rendimiento en campo de los pavimentos. Mediante estas metodologías se llega a relacionar las solicitaciones a las que se ve sometida la estructura con la respuesta de la misma, por ejemplo la carga de las llantas con los esfuerzos ocasionados. Utilizando este procedimiento se ha podido incrementar la confiabilidad del diseño y predecir el tipo de desgaste o deterioro que podría presentar el pavimento. Asimismo, al contrario de otros métodos antes

mencionados, se puede extrapolar a partir de los datos de ciertas zonas o condiciones en que se llevan a cabo pruebas a otras circunstancias.

Un hito importante en el desarrollo de los pavimentos flexibles fue la creación de los conceptos de serviciabilidad y confiabilidad, los cuales se explicarán más a detalle posteriormente en el capítulo de diseño.

ii) Pavimentos Rígidos

El elemento estructural primordial en este tipo de pavimento consta de una losa de concreto que se apoya directamente en la subrasante o en una capa de material granular seleccionado denominada subbase.

La necesidad de utilizar la subbase surge sólo si la subrasante no tiene las condiciones necesarias como para resistir a la losa y las cargas sobre esta; es decir, que no actúe como un soporte adecuado. Una de las diferencias más saltantes entre los pavimentos flexibles y rígidos es la forma en que se distribuyen los esfuerzos producidos por el tránsito sobre ellos. Debido a que el concreto es mucho más rígido que la mezcla de asfalto, éste distribuye los esfuerzos en una zona mucho más amplia.

Del mismo modo, el concreto presenta un poco de resistencia a la tensión por lo que aún en zonas débiles de la subrasante su comportamiento es adecuado. Es por ello que la capacidad portante de un pavimento rígido recae en las losas en vez de en las capas subyacentes, las cuales ejercen poca influencia al momento del diseño.

Otra diferencia importante es la existencia de juntas en los pavimentos rígidos, las que no se presentan en los flexibles. Es así como la teoría de análisis que se utiliza para la primera clase de pavimento es la teoría de placa o plancha en lugar de la teoría de capas utilizada para los caminos asfaltados.

La resistencia del concreto utilizada usualmente es alta, entre 200 y 400 kg/cm². Por su parte las losas pueden ser de concreto simple, reforzado o pre esforzado. Otro autor clasifica los pavimentos rígidos de la siguiente manera:

- **Pavimento articulado de concreto simple o Jointed Plain Concrete Pavement (JPCP):** es la solución más económica con juntas espaciadas de manera cercana.
- **Pavimento articulado de concreto reforzado o Jointed Reinforced Concrete Pavement (JRCP):** si bien el refuerzo no aumenta la capacidad portante de la estructura, si permite espaciar las juntas un poco más. Asimismo, análogamente a otra estructura de concreto reforzado como una viga, el acero puede mantener el concreto unido en caso se produzca una grieta o rotura.
- **Pavimento continuo de concreto reforzado o Continuous Reinforced Concrete Pavement (CRCP):** con esta clase se pueden eliminar las juntas transversales pero el espesor de la losa es igual al de los dos tipos antes mencionados (JPCP y JRCP).
- **Pavimento de concreto preesforzado o Prestressed Concrete Pavement (PCP):** al ser aplicada una precompresión, los esfuerzos de tensión o tracción disminuyen cuando la estructura es sometida a cargas. Por lo tanto, la probabilidad de agrietamiento es menor y también se puede utilizar un menor número de juntas transversales. No obstante, no es una solución ni muy económica ni muy práctica si se tiene en cuenta el enorme trabajo que implica la etapa de construcción.

Son dos las capas que forman parte de un pavimento rígido, la subbase y la losa de concreto, y sus funciones se detallan a continuación:

1.- Sub-base o base: los distintos autores citados en el presente documento concuerdan en que las funciones de la sub-base deberían ser las siguientes:



- Servir como apoyo uniforme a la losa.
- Control de bombeo: se debe tratar de evitar el bombeo, eyección de agua con suelo (mayormente finos), a través de las juntas, grietas y extremos del pavimento. El agua proviene de la infiltración por medio de las juntas, luego por acción de los movimientos repetitivos de la losa, por las pesadas cargas axiales del tránsito, los finos se van segregando y se licúan para posteriormente salir a la superficie. Para que ocurra el bombeo se necesita que el suelo se encuentre saturado, por ello contar con un adecuado sistema de drenaje es una de las medidas más eficientes para contrarrestar ese efecto.
- Mejorar el drenaje: otra opción a la situación descrita en el párrafo anterior es el uso de la sub-base para elevar el pavimento en caso la napa freática se encuentre muy superficial. Además utilizar material uniformemente gradado para que conforme la capa, permitiría que el agua sea drenada rápidamente evitando la acumulación.
- Reducir las consecuencias del congelamiento de los suelos: el limo es más susceptible al congelamiento que la arcilla por lo que habría que limitar el porcentaje existente en la sub-base. Para que se produzca congelamiento debe haber una fuente continua de agua, entonces si la napa freática se encuentra muy cercana a la sub-base se podría optar por deprimirla.
- Controlar los cambios de volumen de la subrasante y disminuir los efectos que tales cambios puedan producir en la superficie.
- Aumentar un poco la capacidad portante del suelo de la subrasante.

- Facilitar la construcción: la sub-base se puede usar como plataforma para el paso de los equipos pesados de construcción.

2.- Losa de concreto: sus funciones son similares a las de la carpeta asfáltica además de soportar y transmitir adecuadamente los esfuerzos provenientes de la superficie a las capas inferiores.

El principal criterio de diseño de un pavimento rígido considerado hasta hoy es el esfuerzo debido a la flexión. Los primeros diseños consideraban que el esfuerzo debido a cargas en las esquinas de la losa era el más crítico. No obstante, ahora es el esfuerzo en los extremos de la losa, debido a las cargas en el borde, el que se considera más crítico. Al igual que en los pavimentos flexibles, también en los rígidos se desarrollaron diversos métodos de análisis y diseño. Seguidamente se nombran algunos de ellos:

- **Soluciones analíticas:** son tres, la fórmula de Goldbeck, el análisis de Westergaard basado en fundaciones o cimientos líquidos y el análisis de Pickett basado en cimientos sólidos. La primera considera al pavimento como una viga con una cara concentrada en la esquina. La segunda asume que la presión reactiva entre la losa y la subrasante en un punto es proporcional a la deflexión en ese mismo punto, así como que la losa y la capa inferior se encuentran en contacto pleno. El método de la PCA se basa en este análisis. Por último, el análisis de Pickett desarrolló soluciones teóricas en las cuales las losas de concreto se desenvolvían en un medio-espacio elástico.
- **Soluciones numéricas:** en las soluciones analíticas se asumió que la losa y la capa adyacente se encontraban en contacto total pero en la realidad este hecho no se cumple. Por ende, se desarrollaron métodos de elementos discretos y de elementos finitos.

Debido a que el comportamiento o la respuesta del pavimento no siempre se podrán predecir con total seguridad a partir de resultados teóricos fue necesario recopilar y cotejar con datos reales de desempeño. Es así como se reconoció lo siguiente:

- **Fatiga del concreto:** un esfuerzo de flexión repetido no causa necesariamente la ruptura del concreto siempre y cuando no se exceda el cincuenta por ciento del módulo de ruptura.
- **Bombeo:** con el incremento del tráfico en las carreteras, se hizo evidente el importante rol que desempeñaba el tipo de subrasante que existía bajo el pavimento para su funcionamiento. Es así como se determinó que el uso de material granular como base ayudaba a contrarrestar el bombeo.

En resumen el espesor y tipo de pavimento dependerá fundamentalmente de dos aspectos: las cargas y las solicitaciones climáticas a las que se verá sometido y al material que compone el suelo donde se va a asentar.

2.5.2) Factores a Considerar en el Diseño de Pavimentos

a) El Tránsito

Durante el período de diseño adoptado. La repetición de las cargas de tránsito y la consecuente acumulación de deformaciones sobre el pavimento (fatiga) son fundamentales para el cálculo. A demás, se deben tener en cuenta las máximas presiones de contacto, las solicitaciones tangenciales entramos especiales (curvas, zonas de frenado y aceleración, etc.), las velocidades de operación de los vehículos (en especial las tents en zonas de estacionamiento de vehículo pesados), la canalización del tránsito, etc. (Montejo, A. 2002, p. 9)

b) La Subrasante

De la calidad de esta capa depende, en gran parte, el espesor que debe tener un pavimento, sea éste flexible o rígido. Como parámetro de evaluación de esta capa se emplea la capacidad de soporte o resistencia a la deformación por esfuerzo cortante bajo las cargas del tránsito. Es necesario tener en cuenta la sensibilidad del suelo a la humedad, tanto en lo que se refiere a la resistencia como a las eventuales variaciones de volumen (hinchamiento – retracción). Los cambios de volumen de un suelo de subrasante de tipo expansivo pueden ocasionar graves daños en las estructuras que se apoyen sobre éste, por esta razón cuando se concluya un pavimento sobre este tipo de suelo deberá tomarse la precaución de impedir las variaciones de humedad del suelo para lo cual habrá que pensar en la impermeabilización de la estructura. Otra forma de enfrentar este problema es mediante la estabilización de este tipo de suelo con algún aditivo, en nuestro medio los mejores resultados se han logrado mediante la estabilización de suelos con cal (Montejo, A. 2002, p. 9)

c) El Clima

Los factores que en nuestro medio más afectan a un pavimento son las lluvias y los cambios de temperatura. Las lluvias por su acción directa en la elevación del nivel freático influyen en la resistencia, la compresibilidad y los cambios volumétricos de los suelos de subrasante especialmente. Este parámetro también influye en algunas actividades de construcción tales como el movimiento de tierras y la colocación y compactación de capas granulares y asfálticas. Los cambios de temperatura en las losas de pavimento rígidos ocasionan en ésta esfuerzos muy elevados, que en algunos casos pueden ser superiores a los generados por las cargas de los vehículos que circulan sobre ellas. En los pavimentos flexibles y dado que el asfalto tiene una alta susceptibilidad térmica, el aumento o la disminución de temperatura puede ocasionar una modificación sustancial en el módulo de elasticidad de las

capas asfálticas, ocasionando en ellas y bajo condiciones especiales, deformaciones o agrietamiento que influirán en el nivel de servicios de la vía (Montejo, A. 2002,p. 10)

d) Los Materiales Disponibles

Los materiales disponibles son determinantes para la selección de la estructura de pavimento más adecuada técnica y económicamente. Por una parte, se consideran los agregados disponibles en canteras y depósitos aluviales del área. Además de la calidad requerida, en la que se incluye la deseada homogeneidad, hay que atender al volumen disponible aprovechable, a las facilidades de explotación y al precio, condicionado en buena medida por la distancia de acarreo, por otra parte, se deben considerar materiales básicos de mayor costo: ligantes y conglomerantes, especialmente (Montejo, A. 2002,p. 10)

2.5.3) Método de Diseño: AASHTO 93

El método de diseño AASHTO fue desarrollado a partir de los resultados de la prueba de carretera AASHTO que se llevaron a cabo durante 1959 y 1960-12, y es probablemente el método más ampliamente utilizado en todo el mundo. Una serie de conceptos importantes surgieron del examen práctico que se utiliza en otros métodos de diseño y se resumen a continuación. En primer lugar, un sistema de calificación del pavimento fue desarrollado como parte de la prueba de manejo. En segundo lugar, a un amplio panel de usuarios de carretera se les pidió que condujeran a través de una variedad de caminos diferentes e indicar su opinión de las condiciones en una escala entre 0 (mala) a 5 (excelente). El promedio de calificación obtenida por cada camino se llama "Present Serviceability Rating" o PSR por sus siglas en inglés. Esto se correlaciona luego con mediciones objetivas de la rugosidad, ahuellamiento, formación de grietas y parches, de los cuales la rugosidad fue el factor dominante. El



objetivo es medir el Índice actual de serviciabilidad o "Present Serviceability Index" (PSI):

Ecuación 1: Índice Actual de Serviabilidad

$$PSI = 5.0 - b_1 \log R - b_2 RD^2 - b_3(C + P)^{0.5}$$

Dónde:

R	:	Rugosidad (pulgada por milla)
RD	:	Profundidad de la huella (pulgadas)
C	:	Craqueo (Porcentaje)
P	:	Parche (Porcentaje)
b1, b2, b3	:	Coefficientes de acuerdo a la capa (sin unidades)
PSI	:	Índice de Condición del Pavimento (sin unidades)

El conteo del tráfico se debe traducir en "ejes equivalentes" para un conteo y suma uniforme de las cargas aportadas por cada tipo de vehículo.

La resistencia de la subrasante se correlaciona con el módulo de elasticidad obtenido en laboratorio.

En este método, el espesor de las capas puede variar dependiendo de la calidad del material utilizado y del tráfico de la vía. Este método de diseño basa el resultado en un factor denominado "Numero estructural", obtenido de la sumatoria de los coeficientes estructural y espesores de cada capa pero también se puede conocer valores típicos.

Ecuación 2: Número Estructural

$$SN = \sum_i a_i * h_i$$

Dónde:

- a** : Coeficientes de resistencia del material
h : Ancho del tipo de capa 25

Los coeficientes de resistencia “a” están relacionados con los ensayos de resistencia del material estándar. Por ejemplo, se ha derivado una relación entre el coeficiente de resistencia para una base de piedra triturada (a_2) y su valor de CBR. Del mismo modo, este valor de a_2 se ha relacionado con la resistencia a la compresión no confinada. Por otra parte, los coeficientes para los materiales de asfalto son muy dependientes de la temperatura; por ello los valores más bajos se deben utilizar en climas más cálidos.

Los factores ambientales son considerados en el diseño de pavimentos representados como un "factor regional" (R), el cual afectará directamente a la estimación del tráfico existente. Por lo tanto, en las zonas cálidas y áridas, donde no existe excesiva presencia de agua y humedad en el pavimento, se supone que un diseño adecuado está relacionado con un factor regional bajo. Por el contrario, en las zonas húmedas, el factor regional es alto. Estos valores oscilan entre 0,2 en zonas áridas y 5,0 en las zonas húmedas. A pesar de la importancia del factor regional en el proceso de diseño, no hay una guía detallada que se utilice para la selección de su valor. Varios métodos se han utilizado en los Estados Unidos, pero, esencialmente, que están basados en "ingeniería de juicio", o son un medio para calibrar el método de diseño AASHTO por lo que está de acuerdo con los gráficos de diseño. Estos enfoques son válidos siempre que el comportamiento de los pavimentos en la región se conozca. Los exámenes prácticos demuestran de manera espectacular la variabilidad que se puede tener en el desempeño de los pavimentos. El método de diseño permite una elección

de los diferentes niveles de confiabilidad seleccionados sobre la base de la clase de carretera y la política de la administración de carreteras los cuales se toman en cuenta para su posterior diseño.

La ecuación de diseño AASHTO relaciona la capacidad de tráfico de carga en términos de ejes equivalentes estándar (ponderada por un factor regional) a número estructural, en donde la resistencia de la sub rasante se expresa en términos de módulo resiliente; el PSI original, el valor PSI seleccionado para definir la condición terminal es usado para determinar el nivel de confiabilidad. A primera vista la ecuación parece compleja pero en realidad es bastante sencilla:

Ecuación 3: Método AASHTO 93

$$\begin{aligned} \log W_{8.2} = & Z * S_0 + 9.36 \log_{10} (SN + 1) + \left[\frac{\log_{10} [(PSI_0 - PSI_f)/(4.2 - 1.5)]}{0.4 + (1094/(SN + 1)^{5.19})} \right] \\ & + 2.32 \log_{10} M_R - 8.27 \end{aligned}$$

Dónde:

- W_{8.2}** : Trafico Acumulado Ponderado
Z : Desviación de la normal
S₀ : Desviación Estándar del Tráfico
SN : Número Estructural
PSI : Índice de Condición del Pavimento
Mr : Módulo de Resiliencia de la sub-rasante

El método AASHTO 93 presenta los siguientes pasos: Estimación de la carga total convertidas a ejes equivalentes para la vida útil de diseño. Multiplicar el tráfico por un factor regional correctivo. Calcular la resistencia de la sub rasante, en términos de módulo de elasticidad (esto es 1500 CBR en libras por pulgada cuadrada a la unidad imperial) ponderada como sea necesario para las condiciones mensuales. Seleccione



la pérdida de capacidad de servicio (PSI0 - PSIf) típicamente entre 2,0 y 3,0. Seleccione el nivel de confiabilidad y la desviación estándar del rendimiento local de 0,35 a 0,45 en la escala de $\log W_{8.2}$. Usar un nomograma para encontrar SN, o usar la ecuación iterativa.

2.6) CARACTERIZACIÓN DEL SUELO DEL DISTRITO DE LAREDO

El suelo es de color negro grisáceo, es altamente plástico. En consecuencia, el suelo cae bajo la clase de suelo A-7-5 basado en el sistema de clasificación de suelos AASHTO. Los suelos de esta clase generalmente se clasifican como un material de propiedad de ingenieril deficiente para ser utilizado como material de subrasante.

El suelo del Distrito de Laredo es arcilla expansiva altamente plástica con baja capacidad de carga cuando está empapado y con un alto potencial de hinchamiento, y está por debajo de las recomendaciones estándar para la mayoría de las obras geotécnicas, especialmente la construcción de carreteras. Por lo tanto, el suelo requiere una modificación y/o estabilización inicial para mejorar su viabilidad y propiedades ingenieriles. (Ver detalles de calicatas en anexos).



III. CONCLUSIONES

Las siguientes conclusiones se pueden extraer de los resultados de la investigación realizada dentro del alcance del estudio:

1. Se determinó el contenido de las referencias de información de publicaciones de manuales, tesis y libros, fueron fuente del desarrollo al tema estabilización de suelos con agentes estabilizantes, obteniendo resultados favorables de las definiciones de las bases teóricas.
2. Se logró caracterizar la estabilización de suelos a nivel de subrasante en el distrito de Laredo.
3. Se determinó la influencia de la ceniza de bagazo de caña de azúcar en el diseño estructural de un pavimento típico según normativa AASTHO.
4. En base al estudio realizado, se prevé que la estabilización de suelos con ceniza de bagazo de caña de azúcar es una alternativa potencial de reutilización de residuos industriales en la construcción de infraestructura vial.
5. Se determinó que existe viabilidad técnica para la estabilización de suelo empleando ceniza de bagazo de caña de azúcar para su uso en subrasantes.



IV. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AASHTO. (1995). Standard Specification for Transportation Materials and Methods of Sampling and Testing. América.
- Al-Rawas, A., & Mattheus, F. (2006). Expansive Soils Recent Advanced in Characterization and Treatment. Netherlands: Proceedings and Monographs in Engineering, Water and Earth Sciences.
- Amu, O., & et al. (2011). Geotechnical Properties of Lateritic Soil Stabilized with Sugarcane Straw Ash. American Journal of Scientific and Industrial Research.
- ASTM C618. (2003). Specification for fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolanas for Use as a Mineral Admixture in portland Cement Concrete (Vol. IV.02). Philadelphia: American Society for Testing and Materials.
- Badillo, J. (1995). Mecánica de Suelos Tomo I. México: Limus Noriega Editores.
- Bañon, L., & Bevia, J. (2010). Manual de Carreteras, Construcción y Mantenimiento (Vol. II).
- Barrera, M., & Garnica, P. (2002). Introducción a la Mecánica de Suelos No Saturados en Vías Terrestres. México: Instituto Mexicano de Transporte.
- Bell, F. (1996). Lime Stabilization of Clay Minerals and Soils (Vol. XLII). Journal of Engineering Geology.
- Bowles, E. (1981). Manual de Laboratorio de Suelos en Ingeniería Civil (Segunda ed.). México D.F., México: McGraw Hill Interamericana.
- Bowles, J. (1992). Engineering Properties of Soil and Their Measurements (Cuarta ed.). McGraw-Hill Boston.



- Brooks, R. (2009). Soil Stabilization with Fly Ash and Rice Husk Ash (Vol. D). International Journal of Research and Reviews in Applied Sciences.
- CCanto, G. (2010). Metodología de la Investigación Científica en Ingeniería Civil. Ingeniería de Transportes (Tercera ed.). Perú.
- Chen, F. (1988). Foundation on Expansive Soils. Elsevier, Amsterdam.
- Chittaranjan, M., & et al. (Octubre 2011). Agriculturl Wastes as Soil Stabilizers (Vol. IV). International Journal of Earth Sciences and Engineering .
- Chou, L. (1987). Lime Stabilization: Reactions, Properties, Design and Construction. State of the Art Report 5. Washington D.C.: Trasportation Research Board.
- Christopher, M. (2005). Stabilization of Soft Clay Subgrades in Virginia Phase I Laboratory Study. MSc. Thesis. Blacksburg, Virginia: Virginia Polytechnic Institute and State University.
- De Solminihac, H. (2001). Gestión de Infraestructura Vial (Segunda ed.). (P. U. Chile, Ed.) Chile.
- Flores, L. (2012). Evaluación Estructural de Pavimentos Flexibles de Carreteras de Bajo Volumen de Tránsito. Tesis de Maestría. (U. N. Ingeniería, Ed.) Lima.
- Hoffman, M. (1985). Estudios de Evaluación Estructural de Pavimentos Basados en La Interpretación de Curvas de Deflexiones (Ensayos No Destructivos). (L. I. Consultores, Ed.) Lima: Louis Berger Internacional Inc.
- Khairul, A. (2009). The Effect of Catalyst on Soil Stabilization by Application of Lime. University of Malaysia.



V. ANEXOS

ANEXO N°1

FICHA DE REGISTRO DE DATOS N° 01

REVISIÓN DE LAS PUBLICACIONES REFERIDAS AL TEMA

DENOMINACIÓN DE LA FICHA:

ELABORADO POR:

A. - PUBLICACIONES DE TESIS.

- 1.
 - 2.
-

B. - GUIAS.

- 1.
 - 2.
-

C.- NORMAS TÉCNICAS

- 1.
 - 2.
-

ANEXO N°2



ANEXO N°3: GUÍA DE OBSERVACIÓN DE CALICATAS

UPRIT	FACULTAD DE INGENIERÍA ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL LABORATORIO DE MECANICA DE SUELOS	
GUIA DE OBSERVACION DE CALICATAS REALIZADAS EN LA AV. CAMPO PRIMAVERAL, PROGRESIVA Km 0 + 000.00 al Km 1 + 000.00, LAREDO		
TESIS:	"ESTABILIZACIÓN DE SUELOS CON CENIZA DE BAGAZO DE CAÑA DE AZÚCAR PARA SU USO EN SUBRASANTES EN EL DISTRITO DE LAREDO - TRUJILLO, LA LIBERTAD 2018"	
TESISTA:	Nº de Ensayo:	1
Código:	CAL-01	Tipo de Muestra: Suelo de la Zona

1. DATOS INFORMATIVOS

- 1.1 Ubicación: Av. Campo Primavera
- 1.2 Distrito: Laredo
- 1.3 Ciudad: Trujillo
- 1.4 Departamento: La Libertad
- 1.5 Coordenadas: -8.060720, -79.043241
- 1.6 Altitud: 77 m.s.n.m.
- 1.7 Profundidad: 2 metros
- 1.8 Utilización: Vivienda
- 1.9 Clima: Templado
- 1.10 Estratos: 2



ESTRATO	PROFUNDIDAD (En metros)	DESCRIPCION
1	0 – 1	Estrato conformado por arena fina suelta contaminada con residuos de relleno conformado por material orgánico, cierto desmonte con basura y afirmado usado posiblemente para el tránsito de vehículos.
2	1 – 2	Estrato conformado por arena fina sin plasticidad y otros fino, estrato color beige pardo o amarillo oscuro.

UPRIT	FACULTAD DE INGENIERÍA ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL LABORATORIO DE MECANICA DE SUELOS	
GUIA DE OBSERVACION DE CALICATAS REALIZADAS EN LA AV. CAMPO PRIMAVERAL, PROGRESIVA Km 0 + 000.00 al Km 1 + 000.00, LAREDO		
TESIS:	"ESTABILIZACIÓN DE SUELOS CON CENIZA DE BAGAZO DE CAÑA DE AZÚCAR PARA SU USO EN SUBRASANTES EN EL DISTRITO DE LAREDO - TRUJILLO, LA LIBERTAD 2018"	
TESISTA:	Nº de Ensayo:	2
Código:	Tipo de Muestra:	Suelo de la Zona
CAL-02		

1. DATOS INFORMATIVOS

- 1.1 Ubicación: Av. Campo Primavera
- 1.2 Distrito: Laredo
- 1.3 Ciudad: Trujillo
- 1.4 Departamento: La Libertad
- 1.5 Coordenadas: -8.096269, -78.958534
- 1.6 Altitud: 77 m.s.n.m.
- 1.7 Profundidad: 2 metros
- 1.8 Utilización: Vivienda
- 1.9 Clima: Templado
- 1.10 Estratos: 2



ESTRATO	PROFUNDIDAD (En metros)	DESCRIPCION
1	0 – 1	Estrato conformado por arena fina suelta contaminada con residuos de relleno conformado por material orgánico, cierto desmonte con basura y afirmado usado posiblemente para el tránsito de vehículos.
2	1 – 2	Estrato conformado por arena fina sin plasticidad y otros fino, estrato color beige pardo o amarillo oscuro.