

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1. ANTECEDENTES

El pavimento Unicapa es formado por un suelo de subrasante, mezclado por un porcentaje óptimo de cemento Portland del 15%, está definido a través de experiencias desarrolladas por el Instituto Salvadoreño del Cemento y el Concreto (ISCYC); como su nombre lo indica se constituye por una sola capa que está compactada y es para la aplicación en caminos rurales de bajo volumen en tráfico.

En Bolivia aún se está implementando el uso del pavimento Unicapa, la Sociedad Boliviana de Cemento S.A. (SOBOCE) realizó junto a la Administradora Boliviana de Carreteras (ABC) y al Instituto Boliviano del Cemento y Hormigón (IBCH) un tramo de prueba en la localidad de “Alto Limanipata” de la ciudad de La Paz en el año 2010. También se realizó por la Administradora Boliviana de Carreteras de Chuquisaca ejecutando el tramo de “Tarabuco – Zudañez” en el año 2011.

Posteriormente la Administradora Boliviana de Carreteras de Oruro ejecutó pruebas de conformación del pavimento Unicapa para mejorar las condiciones de transitabilidad de motorizados en la carretera entre “Lajma - Chuquichambi” de este departamento en el año 2014. El Servicio Departamental de Caminos (SEDCAM) de Oruro realizó un tramo de Caracollos en el año 2019, pavimento que aún está en proceso de construcción.

Lo que el autor propone en la investigación es analizar el método de pavimento Unicapa para el mejoramiento de subrasante, extrayendo muestras de diferentes tramos y mezclar con un porcentaje óptimo de cemento conocido de tal manera, se pueda determinar las diferencias técnicas y económicas frente al ripiado común.

El aporte teórico se basa en la investigación que realizó el Instituto Salvadoreño del Cemento y el Concreto (ISCYC), de lograr un pavimento que constituya una alternativa al ripiado aprovechando al máximo de los suelos existentes, y que simultáneamente sea económica y durable para la red de caminos rurales de bajo tráfico, y así, beneficiando a

las comunidades del área rural, resolviendo el problema de transitabilidad y que exista además un crecimiento socio-económico

1.2. SITUACIÓN PROBLÉMICA

Actualmente los caminos rurales (de tierra) dentro del departamento de Tarija, están en situaciones críticas, debido a que hacer y mantener el ripiado se vuelve tedioso, pues el mantenimiento que necesita para cumplir con el requerimiento de seguridad para el tráfico que circula debe ser continuo y constante: esto se vuelve más complicado en épocas de lluvia, al no hacer dicho mantenimiento se generan cortes en las vías, accidentes e incomodidad para los usuarios que la transitan causando la dificultad en varios factores importantes de las poblaciones que se ven incomunicadas por este tipo de vías; por lo que es necesario buscar alternativas de solución que mejoren la circulación vehicular que presentan estos caminos rurales y que sean más rentables.

Por tanto, es posible encontrar nuevas alternativas para el mejoramiento de las condiciones que predominan estos caminos rurales, se propone la solución del pavimento Unicapa sabiendo que no existe en el departamento de Tarija dichos pavimentos, por esta razón se realizó un análisis del pavimento Unicapa que se extrajeron de los tramos de Sella Quebrada, Carachimayo y Obrajes, sometiendo así a pruebas de ensayos de laboratorio para la caracterización de cada una de ellas y finalizando con la prueba de resistencia tanto en compresión y flexión determinando las diferencias técnicas del pavimento Unicapa donde se demuestra que es más eficaz que el ripiado para la aplicación en los caminos rurales.

1.2.1. Problema

En esta investigación se plantea la siguiente interrogante.

¿Qué diferencias técnicas y económicas tiene un pavimento Unicapa, frente al ripiado común para la subrasante de caminos rurales?

1.2.2. Relevancia y factibilidad del problema

Es importante destacar el problema que actualmente sucede en los caminos rurales, por la falta de importancia, se ven descuidados y/o con o sin un mantenimiento necesario por eso nació la idea del pavimento Unicapa que propone un método más sencillo de realizar y que a largo plazo puede llegar a ser más económico respecto a otros métodos para los caminos rurales.

1.2.3. Delimitación temporal y espacial del problema

La investigación se planificó para un tiempo de 14 semanas que contemplan los meses de agosto, septiembre, octubre y noviembre; tomando las precauciones del tiempo necesario para realizar las actividades.

Los ensayos de dicha investigación fueron realizados en los laboratorios de la Universidad Autónoma Juan Misael Saracho, tomando en cuenta el tipo de equipos que fueron necesarios para la caracterización del suelo, del cemento y prueba de resistencia en compresión y flexión.

1.3. JUSTIFICACIÓN

Los caminos son factores de desarrollo importantes en nuestro medio, sin embargo, toman en cuenta más las vías principales para su diseño, construcción y mantenimiento; dejando de lado a los caminos rurales que también tienen importancia para la unión entre comunidades y con las ciudades principales.

Existe el problema de los caminos rurales que se encuentran en malas condiciones por la falta de mantenimiento porque éste, debe de ser continuo y constante, lo que significa un elevado costo del mismo, causando el deterioro, dificultando la transitabilidad y dando como resultado vida útil sea menos en los caminos rurales.

En el departamento de Tarija existe 423.08 kilómetros de tramos ripiados, las cuales se van deteriorando por el paso de las lluvias. (Administradora Boliviana de Carreteras)

La protección del medio ambiente se impone cada vez más sobre la búsqueda y explotación de bancos de materiales en nuestro medio, por lo que es más factible

aprovechar los suelos locales mediante el uso del pavimento Unicapa que sólo es suelo – cemento, así reduciendo la explotación de los bancos de materiales y dando un ahorro en los costos, menor tiempo en la construcción y menos impacto al medio ambiente.

Por tanto, el pavimento Unicapa es una propuesta de solución para ser alternativa frente al ripiado u otro método de mantenimiento para los caminos rurales:

Aprovechamiento de los suelos existentes en el lugar.

La utilización de equipos convencionales de construcción.

Mínimo mantenimiento durante la vida útil.

Puede ser considerado como base de excelente soporte para la construcción en los pavimentos.

1.4. OBJETIVOS

1.4.1. Objetivo general

Realizar el análisis técnico y económico de caminos rurales aplicando las alternativas de pavimento Unicapa y ripiado sobre subrasantes.

1.4.2. Objetivos específicos

Se toma los siguientes objetivos específicos, para tener como meta las diferentes partes de esta investigación.

- Análisis del respaldo bibliográfico sobre pavimento Unicapa.
- Realizar los ensayos de laboratorio para caracterizar el suelo subrasante.
- Aplicar el porcentaje óptimo del 15 % de cemento a los suelos subrasantes.
- Evaluar especímenes sobre resistencia de compresión y flexión.
- Analizar ventajas y desventajas del pavimento Unicapa y el ripiado.
- Analizar la parte económica de los métodos del pavimento Unicapa y el ripiado.
- Establecer conclusiones y recomendaciones sobre los resultados.

1.5. HIPÓTESIS

Si, al aplicar la muestra del suelo-cemento del método de pavimento Unicapa las características de resistencia de compresión y flexión podrá aumentar respecto a un ripiado común para la aplicación de caminos de desarrollo (rural).

1.6. OPERACIONALIZACIÓN DE LAS VARIABLES

1.6.1. Variable independiente

Tabla 1 Variable independiente

| Variable | Dimensión | Indicador | Valor / Acción |
|---------------------|----------------------|-------------------------------|---|
| Tipos de subrasante | Contenido de humedad | % | Es la cantidad de agua contenido en el suelo en su estado natural. |
| | Granulometría | % | Distribución de tamaños mostrados en una curva de acuerdo a normas. |
| | Límites de Atterberg | % | Determinación de los límites de plasticidad que presentan los suelos a consecuencias de los efectos que tiene la humedad en los mismos. |
| | Compactación | gr/cm ² | Densidad máxima. Curva de compactación. |
| | | % | Curva de compactación. |
| CBR | % | Curva de carga – penetración. | |

Fuente: Elaboración propia

1.6.2. Variable dependiente

Tabla 2 Variable dependiente

| Variable | Dimensión | Indicador | Valor / Acción |
|-----------------------|-------------------------|--|--|
| Pruebas de compresión | Mezcla de suelo-cemento | Adimensional | Cantidades de material. |
| | Curado | Tiempo (t) | Sumergido en agua en tiempos diferentes. |
| | Resistencia | Gramos/ centímetros cúbicos (gr/cm ²) | Prensa hidráulica. |
| Pruebas de flexión | Mezcla de suelo-cemento | Adimensional | Cantidades de material. |
| | Curado | Tiempo (t) | Sumergido en agua en tiempos diferentes. |
| | Resistencia | Gramos/ centímetros cúbicos (gr/cm ²) | Prensa hidráulica. |

Fuente: Elaboración propia

1.7. IDENTIFICACIÓN DEL TIPO DE INVESTIGACIÓN

Este trabajo pertenece al tipo de investigación explicativa ya que trata de llevar a cabo una investigación de forma puntual con la intención de proporcionar detalles para aumentar la comprensión sobre un tema específico.

1.8. UNIDADES DE ESTUDIO Y DECISIÓN MUESTRAL

1.8.1. Unidades de estudio

Las unidades de estudio serán los siguientes ensayos de:

Ensayos de laboratorios de suelos.

Ensayos de laboratorio de hormigón y materiales de resistencia.

Serán llevadas a cabo en las instalaciones de la Universidad Autónoma Juan Misael Saracho.

1.8.2. Población

Caminos de desarrollo (rurales)

1.8.3. Muestra

Los tramos de caminos de desarrollo (rurales) que se tomaron en la siguiente investigación son:

Carachimayo

Sella Quebrada

Obrajes

1.8.4. Selección de las técnicas de muestreo

En esta investigación se realizó con el método probabilístico de la técnica de muestreo estratificado, donde se tiene que ordenar los elementos en clases o subgrupos, que comúnmente se denominan estratos, considerando algunas características comunes; por ejemplo, edades, sexo, tipos de ensayos, características, propiedades y otros. El número de cada clase o estrato, debe ser definido de forma proporcional a la población N.

1.9. MÉTODOS Y TÉCNICAS EMPLEADAS

1.9.1. Métodos

Ensayos de laboratorio en prueba de resistencia tanto en compresión y flexión

1.9.2. Técnicas

Las técnicas son experimentales y fueron aplicadas a los 3 tramos de subrasantes extraídas, realizando su caracterización de cada uno de ellos:

Granulometría

Límites de Atterberg

Contenido de humedad

Compactación T-180

Capacidad portante (CBR)

Como también la caracterización del Ripiado:

Peso específico

Peso unitario

Granulometría

Soporte de California (CBR).

Para así finalizar con la prueba de resistencia en compresión y flexión a la mezcla de suelo-cemento.

1.10. ALCANCE

La presente investigación utiliza la norma AASHTO para realizar un análisis de los métodos de pavimento Unicapa con tres suelos subrasantes diferentes que son: A-4 (CL), A-1-b (SP) y A-7-5 (CH) que se realizó la caracterización respectiva de cada suelo, este procedimiento de caracterización fue el mismo para el ripiado.

Posteriormente la mezcla de suelo-cemento fue con el 15% de cemento, dato que fue obtenido en la investigación realizado por el Instituto Salvadoreño Cemento y Concreto (ISCYC), usando el cemento “El Puente IP-30” de la ciudad de Tarija.

Dicha mezcla de suelo-cemento se procedió a la elaboración de probetas y vigas para el método pavimento Unicapa, que fueron compactadas con el pistón T-180, procedimiento que se repitió para los otros suelos estudiados con la finalidad de ser sometidos en las pruebas de resistencia de compresión y flexión a los 28 días curado y así, comparar los resultados obtenidos con los parámetros que se basa el método del pavimento Unicapa.

Una vez teniendo el análisis del pavimento Unicapa, se verifica y compara los resultados frente al método del ripiado, encontrando ventajas y desventajas de este nuevo método tanto en lo técnico, como en lo económico para el mejoramiento de los suelos subrasantes en los caminos de desarrollo o rural.

CAPÍTULO II

ASPECTOS GENERALES DEL PAVIMENTO UNICAPA Y RIPIADO

2.1. GENERALIDADES

El objetivo principal de este capítulo es presentar los aspectos básicos de los métodos del ripiado y el pavimento Unicapa aplicados para los suelos subrasantes en los caminos rurales de bajo tráfico.

Conociendo que el ripiado es la mezcla de suelo subrasante y grava; actualmente en nuestro medio es un método muy utilizado para el perfilado de caminos rurales con la perspectiva de mejorar.

Existe también el pavimento Unicapa que es un nuevo método que recién están implementando en nuestro país, que es básicamente la mezcla de suelo subrasante con un porcentaje óptimo de cemento.

Ambos métodos se identificaron sus características generales, propiedades, clasificaciones, para tener resultados de datos y así analizar en el ámbito técnico y económico para encontrar el mejor método como alternativa de mejoramiento de los caminos rurales de bajo tráfico.

2.2. CAMINO DE DESARROLLO (RURALES)

Los caminos rurales constituyen infraestructura esencial para el desarrollo social y económico de las comunidades rurales, comúnmente ubicadas en zonas donde el acceso a los servicios básicos es muy limitado y las dinámicas comerciales se ven obstaculizadas por las dificultades para el transporte de los productos y los insumos.

Los caminos rurales han sido afectados por eventos naturales asociados al clima, esta situación tiende a agravarse si no se realiza un mantenimiento necesario que es periódicamente, por métodos económicos como ser, ripiados. perfilados, entre otros.(Ortiz, s. f.).

Figura 1 Caminos rurales



Fuente: Ortiz, s. f.

2.2.1. Mantenimiento de caminos rurales

El realizar mantenimiento a las carreteras y caminos (mantenimiento de vías terrestres) es importante ya que de esta manera se asegura el tiempo de vida útil previsto de los mismos, manteniendo un funcionamiento adecuado de la vía. En este artículo mostramos los tipos de mantenimiento de carreteras (clasificación de mantenimiento), esperamos sea de utilidad. (IngeCivil, 2018)

Figura 2 Mantenimiento de caminos rurales



Fuente: IngeCivil, 2018

2.2.1.1. Tipos de mantenimiento en caminos rurales

Existen 4 tipos de mantenimiento de carreteras:

Mantenimiento rutinario.

Mantenimiento preventivo.

Mantenimiento periódico.

Mantenimiento de emergencia.

En cuanto a los mantenimientos para los caminos rurales están en el mantenimiento periódico que se hace cada 1 a 5 años, de esta manera asegurar la vida útil del camino. (IngeCivil, 2018)

Las actividades a realizar son las siguientes:

Reposición de ripio.

Perfilado.

Nivelado.

2.3. SUELOS

Desde el punto de vista ingenieril, suelo es definido como un agregado natural no cementado de granos minerales y materia orgánica en descomposición, con líquido y gas en los espacios vacíos entre las partículas que lo constituyen. El ingeniero, compara al suelo como un material de construcción que tiene una importante influencia en el diseño y construcción de una obra de ingeniería. (Lizzeth Geraldine, 14:53:20 UTC)

Figura 3 Suelo



Fuente: Lizzeth Geraldine, 14:53:20 UTC

2.3.1. Origen

Los suelos se originan por la desintegración, alteración física y/o química de las rocas madreas (sean éstas ígneas, metamórficas o sedimentarias) que, por el intemperismo, cambian su composición química y mineralógica, así como sus propiedades físicas y mecánicas en el tiempo.

2.3.2. Depósitos del suelo natural

Algunos suelos permanecen donde se forman y cubren la superficie rocosa de la que derivan y se llaman suelos residuales. En contraste, algunos productos intemperizados son transportados por medio de procesos físicos a otros lugares y depositados. Esos se llaman suelos transportados. Según el agente de transporte, se subdividen en tres categorías principales:

Aluviales o fluviales: depositados por agua en movimiento.

Glaciales: depositados por acción glaciaria.

Eólicos: depositados por acción del viento.

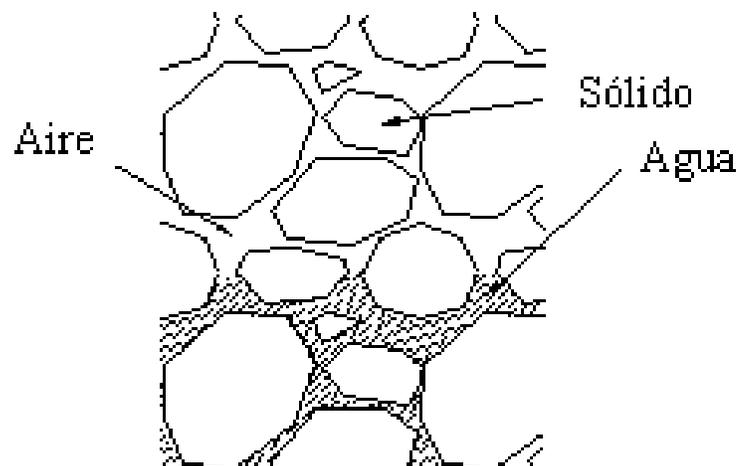
En adición a los suelos transportados y residuales, las turbas se derivan de la descomposición de materiales orgánicos encontrados en áreas de poca altura donde el nivel freático está cerca o arriba de la superficie del terreno. La presencia de un nivel alto del agua freática ayuda o soporta el crecimiento de plantas acuáticas que, al descomponerse, forman turba. Este tipo de depósito se encuentra comúnmente en áreas costeras y regiones glaciares. Cuando un porcentaje relativamente grande de turba se mezcla con suelo inorgánico, se le denomina suelo orgánico. Estos suelos orgánicos tienen la característica de un contenido natural de agua de entre 200% y 300%, son altamente compresibles. Las pruebas de laboratorio muestran que, bajo carga, se obtiene un gran asentamiento debido a la consolidación secundaria de los suelos orgánicos.

Durante la planificación, diseño y construcción de cimentaciones, terraplenes y estructuras de retención, los ingenieros deben conocer el origen de los depósitos de los suelos sobre los que se construirán las cimentaciones debido a que cada depósito de suelo tiene atributos físicos propios y únicos. (Das, 2001)

2.3.3. Composición de los suelos

Un suelo está compuesto por tres partes, sólida, líquida y otra gaseosa. La parte sólida está formada en su mayoría por partículas minerales de suelo; la parte líquida está constituida por el agua, aunque en los suelos pueden existir otros líquidos de menos importancia; la parte gaseosa la comprende principalmente el aire. (Eddy Herbas, 2010)

Figura 4 Composición del suelo



Fuente: Eddy Herbas, 2010

2.3.4. Tamaño de las partículas de suelo

Tabla 3 Tamaños de suelo

| Gravas (> 2 mm) | Arenas (entre 0.06 y 2 mm) | Limos (entre 0.001 y 0.06 mm) | Arcillas (< 0.002 mm) |
|--|---|---|---|
| <p>Los granos no se apelmazan, aunque estén húmedos, debido a las pequeñas tensiones capilares.</p> <p>Cuando el gradiente hidráulico es mayor de 1, se produce en ellas flujo turbulento.</p> | <p>Los granos se apelmazan si están húmedos, no se suele producir en ellas flujo turbulento.</p> <p>Partículas visibles, en general no plásticas.</p> <p>Terrenos secos tienen una ligera cohesión, se reducen a polvo fácilmente entre los dedos.</p> <p>Fácilmente erosionadas por el viento.</p> <p>Los asentamientos finalizan al acabarse la construcción.</p> | <p>Partículas invisibles y algo plásticos.</p> <p>Los terrones secos tienen cohesión apreciable, pero se reducen a polvo con los dedos.</p> <p>Difícilmente erosionado por el viento.</p> <p>Los asentamientos suelen continuar después de acabada la construcción.</p> <p>No suele tener propiedades coloidales.</p> <p>Para tamaños mayores a 0.002 mm se hace cada vez mayor proporción de minerales no arcillosos.</p> <p>Tacto áspero, se secan con relativa rapidez y no se pegan en los dedos.</p> | <p>Tienen propiedades coloidales.</p> <p>Consisten en su mayor parte de minerales arcillosos.</p> <p>Tacto suave.</p> <p>Se secan lentamente y se pegan a los dedos.</p> <p>Los terrones secos se pueden partir, pero no se pueden reducir a polvo con los dedos.</p> |

Fuente: Administradora Boliviana de Carreteras, 2000

2.3.5. Propiedades de los suelos

Las propiedades físico - mecánicas son las características usadas para la selección de los materiales, para las especificaciones de construcción y para el control de calidad. Para conocer las propiedades físico - mecánicas de los suelos en un proyecto, es necesario tomar muestras para posteriormente determinar sus propiedades en el laboratorio. (Manuel Antonio Artero Alvarado, 2003)

Entre las propiedades físicas de los suelos, se estudiaron los siguientes:

Contenido de humedad

Granulometría

Límites de Atterberg

Compactación T-180

Soporte de California (CBR)

Contenido de humedad

El contenido de humedad de un suelo es la relación del cociente del peso de las partículas sólidas y en el uso del agua que guarda, esto se expresa en términos de porcentaje.

El contenido de humedad de los suelos es la propiedad física del suelo siendo de gran utilidad en la construcción civil y se obtiene de una manera sencilla, pues el comportamiento y la resistencia de los suelos en la construcción están rígidos ya que la cantidad de agua se contienen. El contenido de humedad de una masa de suelo está formado por la suma de sus aguas libre, capilar e hidroscofia. (Administradora Boliviana de Carreteras, 2000)

Importancia

La importancia del contenido de agua que presenta un suelo representa junto con la cantidad de aire; una de las características más importantes para explicar el comportamiento de este (especialmente en aquellos de textura más fina), es por ejemplo cambio de volumen, cohesión, estabilidad mecánica.

Granulometría

Se denomina distribución granulométrica de un suelo a la división del mismo en diferentes fracciones, seleccionadas por el tamaño de sus partículas componentes; las partículas de cada fracción se caracterizan porque su tamaño se encuentra comprendido entre un valor máximo y un valor mínimo, en forma correlativa para las distintas fracciones, de tal modo que el máximo de una fracción es el mínimo de la que le sigue correlativamente. (Administradora Boliviana de Carreteras, 2000)

Límites de Atterberg

Los límites de Atterberg se basan en el concepto de que en un suelo de grano fino sólo puede existir 4 estados de consistencia según su humedad. Así, un suelo se encuentra en estado sólido, cuando está seco. Al agregársele agua poco a poco va pasando sucesivamente a los estados de semisólido, plástico y finalmente líquido. Los contenidos de humedad en los puntos de transición de un estado al otro son los denominados límites de Atterberg. Los ensayos se realizan en el laboratorio y miden la cohesión del terreno y su contenido de humedad, para ello se forman pequeños cilindros de 3 mm de espesor con el suelo. (Administradora Boliviana de Carreteras, 2000)

Compactación Proctor Modificado T-180

Cuando los suelos tienen características y/o propiedades no adecuadas para la construcción, como pueden ser: alta permeabilidad, baja capacidad de soporte y otros, se puede recurrir a algunos medios para mejorar dichas propiedades y características; tales casos son denominados como estabilización.

La compactación es un método de mejoramiento de suelos que consiste en ejercer una acción mecánica de relativamente corta duración sobre una masa de suelo a un estado parcialmente saturado, para reducir su volumen (disminuyendo sus vacíos) y aumentar su densidad. En general, la compactación es la densificación del suelo por remoción de aire, lo que requiere energía mecánica. El grado de compactación de un suelo se mide en términos de su densidad en estado seco.

El propósito de este ensayo de compactación en el laboratorio es determinar la curva de compactación para una determinada energía de compactación. Esta curva considerada en

abscisas el contenido de humedad y en ordenadas la densidad seca. A partir de ella, se podrá obtener la humedad llamada óptima que es la que corresponde a la densidad máxima.

Con estos resultados se podrá determinar la cantidad de agua de amasado a usar cuando se compacta el suelo en terreno para obtener la máxima densidad seca para una determinada energía de compactación. (Administradora Boliviana de Carreteras, 2000)

Soporte de California (CBR)

La finalidad de este ensayo, es determinar a capacidad de soporte (CBR) de suelos y agregados compactados en laboratorios con una humedad óptima y niveles de compactación variables. Es un método desarrollado para la división de carreteras del Estado de California (EE.UU.) y sirve para evaluar la calidad relativa del suelo para subrasante, subbase y base de pavimentos.

Este ensayo mide la resistencia al corte de un suelo bajo condiciones de humedad y densidad controladas, permitiendo obtener un (%) de la relación de soporte. El porcentaje de CBR, está definido como la fuerza requerida para que un porcentaje de fuerza necesaria aplicada por el pistón penetre a esa misma profundidad y con igual velocidad, en una probeta normalizada constituida por una muestra patrón de material chancado. (Administradora Boliviana de Carreteras, 2000)

2.3.6. Clasificación de los suelos

Los suelos con propiedades similares se clasifican en grupos y subgrupos basados en comportamiento ingenieril. Los sistemas de clasificación proporcionan un lenguaje común para expresar en forma concisa las características generales de los suelos son usados comúnmente por los ingenieros de suelos. Éstos son el sistema de clasificación AASHTO y el Sistema Unificado de Clasificación de suelos. El sistema AASHTO lo usan principalmente los departamentos de caminos estatales y de condados, mientras que los ingenieros geotécnicos usualmente prefieren el sistema Unificado. (Das, 2001)

2.3.6.1. Sistema de clasificación AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials)

Este sistema de clasificación fue desarrollado en 1929 como el Public Road Administrations Classification System (Sistema de Clasificación de la Oficina de Caminos Públicos).

El sistema de clasificación AASHTO actualmente en uso, se muestra en la siguiente tabla. De acuerdo con éste, el suelo se clasifica en siete grupos mayores A-1 al A-7. Los suelos clasificados en los grupos A-1, A-2 y A-3 son materiales granulares, donde 35% o menos de las partículas pasar por la criba No. 200 son clasificados en los A-4, A-5, A-6 y A-7. (Das, 2001)

2.3.6.1.1. Suelos granulares

Grupo A-1

El material de este grupo comprende las mezclas bien graduadas, compuestas de fragmentos de piedras, grava, arena y material ligante poco plástico. Se incluyen también en este grupo mezclas bien graduadas que no tienen material ligante.

Subgrupo A-1-a= Comprende aquellos materiales formados predominantemente por piedra o grava, con o sin material ligante, estos materiales son bien graduados.

Subgrupo A-1-b= Incluye aquellos materiales formados predominantemente por arena gruesa bien graduada, con o sin ligante.

Grupo A-2

Comprende una gran variedad de material granular que contiene menos del 35% del material fino.

Subgrupo A-2-4 y A-2-5= Pertenecen a estos subgrupos aquellos materiales cuyo contenido de material fino es igual o menor del 35% y cuya fracción que pasa el tamiz No. 40 tiene las mismas características de los suelos A-6 y A-7.

Grupo A-3

En este grupo se encuentra incluidas las arenas finas, de playa y aquellas con poca cantidad de limo que no tengan plasticidad. Este grupo incluye, además, las arenas del río que contengan poca grava y arena gruesa.

2.3.6.1.2. Suelos finos

Contienen más del 35% del material fino que pasa el tamiz No. 200. Estos suelos constituyen los grupos A-4, A-5, A-6 y A-7. La mayoría están formados por materiales tipo limo y arcilla.

Grupo A-4

Pertencen a este grupo los suelos limosos poco o nada plásticos que tienen un 75% o más del material fino que pasa el tamiz número. Además, se incluye en este grupo las mezclas de limo con grava arena hasta un 64%.

Grupo A-5

Los suelos comprendidos en este grupo son semejantes a los del anterior, pero contienen material micáceo o diatomáceo. Son elásticos y tienen un límite líquido elevado.

Grupo A-6

El material típico de este grupo es la arcilla plástica. Por lo menos el 75% de estos suelos debe pasar el tamiz No. 200, pero incluyen también las mezclas arcillo-arenosas cuyo porcentaje de arena y grava sea inferior al 64%. Estos materiales presentan, generalmente grandes cambios de volumen entre los estados seco y húmedo.

Grupo A-7

Los suelos de este grupo son semejantes a los suelos A-6 pero son elásticos. Sus límites líquidos son elevados. Subgrupo A-7-5 incluye aquellos materiales cuyos índices de plasticidad no son muy altos con respecto a sus límites líquidos. Subgrupos A-7-6 comprende aquellos suelos cuyo índice de plasticidad son muy elevados con respecto a sus límites líquidos y que, además experimentan cambios de volumen extremadamente grandes. El sistema de clasificación se basa en los siguientes criterios:

Tabla 4 Clasificación de materiales para subrasante de carreteras según AASHTO

| Clasificación de suelos AASHTO | | | | | | | | | | | |
|---|---|--------------|---------------|---|--------------|--------------|--------------|---|------------|----------------------|------------------------------|
| Clasificación general | Materiales granulares | | | | | | | Materiales limo-arcillosos | | | |
| | 35% o menos pasa el tamiz N° 200 | | | | | | | Más del 35% pasa el tamiz N° 200 | | | |
| Grupos y subgrupos | A-1 | | A-3 | A-2 | | | | A-4 | A-5 | A-6 | A-7 |
| | A-1-a | A-1-b | | A-2-4 | A-2-5 | A-2-6 | A-2-7 | | | | A-7-5 A-7-6 |
| Análisis granulométrico % que pasa el tamiz | | | | | | | | | | | |
| N° 10 (2,00 mm) | 50 MAX | | | | | | | | | | |
| N° 40 (0,42 mm) | 30 MAX | 50 MAX | 51 MIN | | | | | | | | |
| N° 200 (0,074 mm) | 15 MAX | 25 MAX | 10 MAX | 35 MAX | 35 MAX | 35 MAX | 35 MAX | 36 MIN | 36 MIN | 36 MIN | 36 MIN |
| Característica del material que pasa el tamiz N° 40 | | | | | | | | | | | |
| Límite líquido (LL) | - | | - | 40 MAX | 41 MIN | 40 MAX | 41 MIN | 40 MAX | 41 MIN | 40 MAX | 41 MIN |
| Índice plasticidad (IP) | 6 MAX | | NP | 10 MAX | 10 MAX | 11 MIN | 11 MIN | 10 MAX | 10 MAX | 11 MIN | 11 MIN |
| Índice de grupo (IG) | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 4 MAX | 4 MAX | 8 MAX | 12 MAX | 16 MAX | 20 MAX |
| Tipos de material | Frag. De Piedra Grava y Arena | | Arena Fina | Gravas y Arenas Limosas - Arcillosas | | | | Suelos Limosos | | Suelos Arcillosos | |
| Terreno de fundación | Excelente a bueno | | | | | | | Regular a malo | | | |
| Tasa General de los sobrantes | De mediano a pobre | | | | | | | | | | |
| Para A-7-, PL < LL -30 Para A-7-6, PL > 30 | | | | | | | | | | | |

Fuente: Das, 2001

2.3.6.2. Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS)

La forma original de este sistema fue propuesta por Casagrande en 1942 para usarse en la construcción de aeropuertos emprendida por el cuerpo de ingeniero del ejército durante la segunda guerra mundial. En cooperación con la oficina de restauración de Estados Unidos, el sistema fue revisado en 1952. Hoy en día, es ampliamente usado por los ingenieros. El sistema unificado clasifica los suelos en dos amplias categorías.

Suelos de grano grueso que son de naturaleza tipo grava y arenosa con menos del 50% pasando por la malla No. 200. Los símbolos de grupo comienzan con el prefijo G o S significa grava o suelo gravoso y S significa arena o suelo arenoso.

Los suelos de grano fino con 50% o más pasando por la malla No. 200. Los símbolos de grupo comienzan con un prefijo M, que significa limo inorgánico, C para arcilla inorgánica u O para limos y arcillas orgánicos. El símbolo Pt se usa para turbas, lodos y otros suelos altamente orgánicos.

Otros símbolos son también usados para la clasificación:

W= Bien graduado.

P= Mal graduado.

L= Baja plasticidad (límite líquido menor que 50).

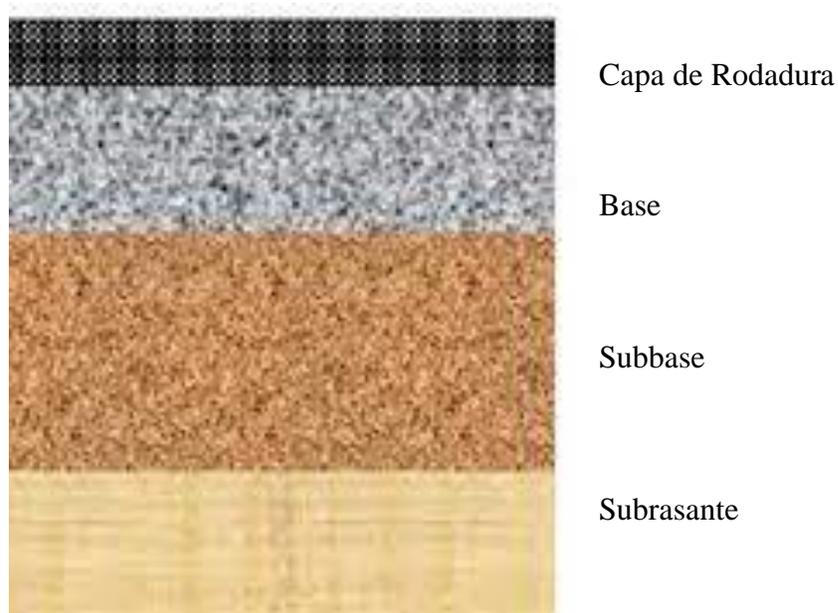
H= Alta plasticidad (límite líquido mayor que 50).

2.4. SUBRASANTE

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

Puede estar constituida por suelos en su estado natural, o por éstos con algún proceso de mejoramiento tal como la estabilización mecánica, la estabilización físico-químico con aditivos como el cemento Portland, la cal, el asfalto, entre otras.(José Rafael Menéndez Acurio, 2019).

Figura 5 Ejemplo de la subrasante en un pavimento convencional



Fuente: Quezada-Osoria, s. f.

2.4.1. Categorías de la subrasante

Tabla 5 Categorías de la subrasante

| No. | Categorías | CBR |
|------------|----------------------|------------|
| 0 | Subrasante muy pobre | < 3% |
| 1 | Subrasante Pobre | 3% - 5% |
| 2 | Subrasante Regular | 6% - 10% |
| 3 | Subrasante Buena | 11% - 19% |
| 4 | Subrasante muy buena | > 20% |

Fuente: Anali C. Escandón Munguía, 2015

Se considerarán como materiales aptos para la coronación de la subrasante suelos con CBR igual o mayor de 6%. En caso de ser menor, se procederá a eliminar esa capa de material inadecuado y se colocará un material granular con CBR mayor a 6%, para su estabilización. La profundidad mínima especificada puede ser de 20 a 50 cm. (Anali C. Escandón Munguía, 2015)

2.4.2. Funciones de la subrasante

Las principales funciones de la capa subrasante son:

Recibir y resistir las cargas del tránsito que le son permitidas por el pavimento.

Transmitir y distribuir de modo adecuado las cargas del tránsito al cuerpo del terraplén.

2.5. RIPIADO

Los caminos de ripio un relleno de cascajo, casquijo o grava utilizado para pavimentar. Al ser más permeables, los caminos de ripio dan una mayor transitabilidad que los de tierra, pero igual que estos últimos, requieren mucho más mantenimiento que los asfaltados y levantan mucha polvareda. En los caminos ripio, los vehículos tienen menor estabilidad y adherencia que en el asfalto. (Camino de ripio, 2019)

Figura 6 Camino de ripio



Fuente: *Caminos de ripio compactado | Lomas de Caburgua—Parcelas en Pucón de 5.000m², s. f.*

2.5.1. Materiales del ripiado

Los materiales empleados contienen partículas con diámetro máximo de 5 cm, con calidad superior a los materiales naturales de la subrasante.

Figura 7 Material de ripio



Fuente: Grava (o Ripio)—Áridos Concepción», s. f.

Los materiales destinados a la preparación de la capa de refuerzo, cuando sometido a los ensayos de caracterización deberán presentar índice de grupo (IG), igual o menos que el IG de la subrasante, determinado a partir de los siguientes ensayos:

Análisis granulométrico por tamizado AASHTO T88.

Límite de plasticidad AASHTO T90.

Límite de liquidez AASHTO T89.

Los materiales utilizados en la capa deberán presentar un Índice de Soporte de California (CBR) de acuerdo con las indicaciones del proyecto y una expansión máxima de 1% cuando determinado por el ensayo de AASHTO T193 con la energía de compactación correspondiente al 95% de la densidad seca máxima obtenida según el AASHTO T180. (Administradora Boliviana de Carreteras, 2011)

2.5.2. Caracterización del ripiado

Son los siguientes ensayos:

Granulometría

Compactación

Soporte de California

Peso unitario

El peso unitario o peso volumétrico unitario del agregado grueso, es el peso de la cantidad necesaria de agregado que llena un recipiente de volumen conocido. Este valor necesario para determinar la cantidad de agregado que puede ser acomodado en una mezcla de concreto. Físicamente es el volumen ocupado por el agregado y los vacíos entre sus partículas.

Para agregados, tanto finos como gruesos o las combinaciones de éstos, los métodos para terminar los pesos volumétricos describen dos formas de llenar el recipiente:

Procedimiento por apisonado.

Procedimiento por simple vaciado.

Los resultados dependen del procedimiento utilizado en el llenado, pues varían con la compactación alcanzada. Al incluir el espacio entre partículas influye la forma de acomodo de éstos. Es un valor útil sobre todo para hacer las transformaciones de pesos a volúmenes y viceversas. Por ejemplo, para un agregado grueso pesos unitarios altos significan que quedan muy pocos huecos para llenar con arena y cemento. (Administradora Boliviana de Carreteras, 2000)

Peso específico

Tiene el objeto de determinar del peso específico aparente y del peso específico a granel, lo mismo que la cantidad de agua expresada como porcentaje que absorbe el agregado grueso cuando se sumerge en agua por periodo de 24 horas. (Administradora Boliviana de Carreteras, 2000)

Desgaste de Los Ángeles

Este método abarca el procedimiento de ensayo para determinar el porcentaje de desgaste del agregado grueso natural por medio de la máquina de los Ángeles. (Administradora Boliviana de Carreteras, 2000)

2.5.3. Equipo

Para la ejecución del ripiado se utiliza los siguientes:

Motoniveladora pesada con escarificador.

Camión regador.

Pala cargadora.

Rodillos lisos, neumáticos, pata de cabra, estáticos y vibratorios.

Arados de disco y rastras.

Tractores de neumáticos con tracción en las 4 ruedas.

Plantas trituradoras, seleccionadora y/o dosificadora, según el caso si es necesario.

Equipo de extracción y transporte.

(Administradora Boliviana de Carreteras, 2011)

2.5.4. Ejecución del ripiado

La ejecución estructural comprende las operaciones de suministro de los materiales requeridos, carga, transporte y distribución sobre la plataforma, esparcimiento, mezcla, humedecimiento o desecación y en los volúmenes que permitan, después de la compactación, llegar al espesor proyectado.

El espesor mínimo de cualquier capa refuerzo será de 10 cm, después de la compactación y el espesor máximo será de 20 cm.

Antes de iniciar las operaciones constructivas deberán concluirse todos los trabajos de topografía necesarios para efectuar el control de alineamiento y cotas de la capa a ser colocada.

La capa de subrasante, sobre la cual será ejecutada la capa de refuerzo, deberá haber sido preparada y regularizada conforme su respectiva especificación.

En el caso de que la ejecución de la capa de refuerzo de ripio no se realice inmediatamente después de la regularización de la subrasante y en caso de que la última capa haya quedado expuesta a las lluvias, se debe evaluar los siguientes parámetros de la subrasante:

El porcentaje de humedad deberá estar entre ± 3 % de la humedad óptima de compactación del material de la subrasante. Si el porcentaje resulta fuera del rango indicado, la humedad de la subrasante deberá corregirse hasta que las condiciones de humedad satisfagan el límite indicado.

El grado de compactación, deberá ser del 95 % de la energía de compactación del ensayo AASHTO T-180 D, determinado a través del ensayo AASHTO T-193.

Las áreas donde el grado de compactación resulte inferior al necesario deberán ser reconstruidas antes de la ejecución de la capa de refuerzo estructural.

La superficie de la subrasante deberá estar perfectamente limpia y nivelada.

Los materiales excavados y transportados a la plataforma podrán ser descargados, formando acopios acamellonados para su posterior esparcimiento y mezcla empleando motoniveladora con escarificado y rodillos de grillas, arados de discos y rastras.

Después del esparcimiento de los materiales, se deberá determinar su contenido de humedad. En el caso de exceso de humedad, se procederá a la desecación de los materiales removiéndolos con equipo adecuado hasta que la misma se encuadre dentro de la faja de variación de humedad definida por el proyecto. Si falta humedad, se adicionará agua uniformemente mediante un camión regador para obtener una humedad uniforme en todo el espesor de la capa compactada.

Después de alcanzar un contenido de humedad adecuado, se iniciarán las operaciones de compactación. Los equipos recorrerán la capa que está siendo compactada, en trayectorias equidistantes del eje, de modo sobreponer, en cada corrido, por lo menos 20 cm de la superficie cubierta en el recorrido anterior. En los tramos en tangente, los recorridos serán realizados del borde hacia el eje. En los tramos curvos, los recorridos se realizarán partiendo del borde más bajo en dirección al borde más alto, repetidamente, hasta que se obtenga el grado de compactación especificado. (Administradora Boliviana de Carreteras, 2011)

2.5.4.1. Control de ejecución

Determinación del contenido de humedad de compactación cada 100 m lineales antes de la compactación del material. Las tolerancias admitidas para la humedad de compactación en la pista serán en $\pm 2\%$ en torno de la humedad óptima.

Determinación de la densidad “in situ” al menos cada 100 m lineales, algunos en los puntos coincidiendo con los sitios en los que fueron obtenidas las muestras para los ensayos de compactación de acuerdo al procedimiento Standard designado con AASHTO T-191 y AASHTO T-224, este último para el ajuste de la densidad máxima por variación en el contenido de partículas gruesas.

Determinación del grado de compactación (GC), tomando en cuenta los valores de la densidad seca máxima, determinados en laboratorio, y de la densidad seca “in situ” obtenidos en la plataforma. El GC de la capa ejecutada deberá presentar el valor mínimo de 95 %.

Para la aceptación, serán considerados los valores individuales resultados de los ensayos. (Administradora Boliviana de Carreteras, 2011)

2.5.5. Control geométrico

Después de la ejecución de la capa de refuerzo se procederá a la nivelación del eje y los bordes permitiéndose las siguientes tolerancias:

Variación máxima en el ancho de más 20 cm, no admitiéndose variación en menos (-).

Variación máxima en bombeo de más de 20 %, no admitiéndose variación en menos (-).

Variación máxima de cotas para el eje y para los bordes de menos (-) 2 cm con relación a las cotas de diseño, no admitiéndose variación en más (+).

(Administradora Boliviana de Carreteras, 2011)

2.6. CEMENTO

El cemento es un conglomerante, que une o da cohesión, se presenta en forma de polvo que se obtiene de pulverizar duras rocas (caliza) y arcilla, luego quemarlas en un horno

rotatorio y agregar yeso, y de nuevo molerlas. Tiene la peculiaridad de endurecerse con el agua y producir compuesto mecánicamente resistente. (Bettina Yaneth Villa Gutiérrez, 2010)

Figura 8 Cemento



Fuente: IBNORCA, 1995

2.6.1. Tipos de cemento

Los tipos de cemento de acuerdo a AASHTO M-85:

Tipo I= Uso general.

Tipo II= Resistencia moderada a los sulfatos.

Tipo III= Alta resistencia inicial.

Tipo IV= Bajo calor de hidratación.

Tipo V= Alta resistencia a los sulfatos.

2.6.2. Especificaciones del cemento Portland

Cementos en Bolivia

La norma boliviana del cemento (NB-011) = Cemento–definiciones, clasificación y especificaciones, presenta los siguientes tipos de cemento:

Tabla 6 Clasificación y composición de los cementos

| Tipos de cemento | | | Proporción en masa % (1) | | | |
|--------------------|------------------|------|--------------------------|------------------|---------------|-------------------------|
| | | | Componentes principales | | | Componentes adicionales |
| Denominación | Designación | Tipo | Clinker | Puzolana natural | Filler calizo | |
| Cemento Portland | Cemento Portland | I | 95 a 100 | - | - | 0 a 5 |
| | Cemento Portland | IP | 70 a 94 | 6 a 30 | - | 0 a 5 |
| | Cemento Portland | IF | 80 a 94 | - | 6 a 15 | 0 a 5 |
| Cemento Puzolánico | | P | ≥ 60 | ≤ 40 | - | 0 a 5 |

Fuente: IBNORCA, 1995

Tabla 7 Clasificación según la resistencia del cemento

| Categoría resistencia de los cementos | | | | |
|---------------------------------------|--|-----------------|-----------------|------------------|
| Categorías Resistencias | Resistencia a la compresión (MPa) (NB 470) | | | |
| | - | Mínima a 3 días | Mínima a 7 días | Mínima a 28 días |
| Alta | 40 [5800 lb/pulg ²] | 17 | 25 | 40 |
| Media | 30 [4350 lb/pulg ²] | - | 17 | 30 |
| Corriente | 25 [3600 lb/pulg ²] | - | 15 | 25 |

Fuente: IBNORCA, 1995

2.7. PAVIMENTO UNICAPA

2.7.1. Introducción

La mayor parte de los caminos rurales de nuestro país no están pavimentados y por tanto presentan diversos problemas de transitabilidad especialmente en épocas de lluvias, cuando algunas vías pueden tomarse intransitables perjudicando el normal desenvolvimiento de las regiones que necesitan de rutas adecuadas para su desarrollo.

Un paliativo usualmente empleado es la colocación de ripio, pero esta es una solución de corta duración debido a que, con el transcurso del tiempo y el paso de los vehículos, se va perdiendo el material y por tanto se requiere de restituciones periódicas de material seleccionado que se vuelven antieconómicas.

El Instituto Salvadoreño del Cemento y el Concreto (ISYC) inició en el año 2000, el proyecto de investigación denominado “Pavimento Unicapa de Alto Desempeño”, para lograr un pavimento que constituya una alternativa al ripiado y que simultáneamente sea económica y durable para la red de caminos rurales de bajo tráfico. En el cual, los objetivos se plantearon para tener como resultado:

Una alternativa de pavimento a la red vial no pavimentada y de bajo tráfico del país y la región.

Una intervención de mayor durabilidad y menor costo en caminos rurales.

Una alternativa de pavimento, a la intervención tradicional de colocación de ripiado realizada por lo general 2 veces por año en este tipo de caminos.

Bajo este contexto surgió una estructura de pavimento formada por una sola capa utilizando el suelo existente en el camino, mezclado con un porcentaje de cemento Portland que puede variar entre el 11 % al 18 %, que compactada al porcentaje de diseño capaz de soportar las cargas y el desgaste producido por el tráfico, proporcionado a la vez una superficie de rodaje adecuada.

El Instituto Salvadoreño del Cemento y del Concreto (ISCYC) realizó varios tramos de prueba con diferentes tipos porcentajes de cemento para encontrar el más óptimo,

demostrando así que el porcentaje óptimo es del 15% realizado en el tramo Río Chiquito – Las Pilas, cumpliendo con los requerimientos que el pavimento Unicapa demanda. Este puede definirse como el pavimento formado por el suelo existente el camino, dependiendo de la granulometría del suelo existente y su índice de plasticidad, que forma una sola capa compactada, capaz de soportar las cargas y desgaste producido por el tráfico, proporcionando a la vez una superficie de rodaje adecuada para caminos rurales y/o vías de baja intensidad del tráfico.

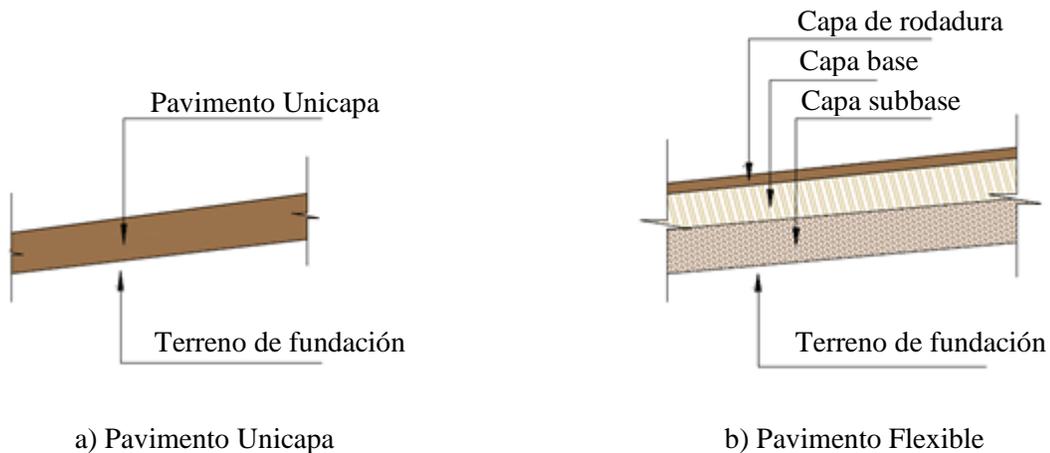
2.7.2. Definición

El pavimento Unicapa, puede definirse como el pavimento formado por el suelo subrasante existente del camino, mezclado con un porcentaje óptimo de cemento Portland del 15 %, dependiendo de la granulometría del suelo existente y su índice de plasticidad que forma una sola capa compactada, capaz de soportar las cargas y desgaste producido por el tráfico, proporcionando a la vez una superficie de rodaje adecuada para caminos rurales y/o vías de baja intensidad del tráfico.

Los pavimentos Unicapa ha sido diseñado específicamente para carreteras donde el grado de confort e índice de rugosidad no sean tan exigentes como en las carreteras de altas especificaciones (como, por ejemplo: autopista y carreteras primarias), está diseñado para ofrecer capacidad estructural y seguridad al usuario en camino con velocidades máximos de 65 km/h y Tráfico Promedio Diario Anual (TPDA) menor a 500 vehículos. (Instituto Boliviano del Cemento y el Hormigón, 2003)

En la siguiente figura se muestra un esquema del Pavimento Unicapa y de un pavimento convencional.

Figura 9 Tipos de pavimento



Fuente: Instituto Salvadoreño del Cemento y el Concreto, 2000

El pavimento Unicapa es una alternativa al ripiado y se ha observado que tiene una durabilidad considerablemente mayor que un camino al que se realizan continuos ripiados, siendo ésta la alternativa de comparación. Su vida útil es, obviamente inferior a la de un pavimento rígido, por ejemplo.

En general, en las superficies de pavimentos Unicapa, aparece en algunos sectores pequeñas fisuras de retracción, especialmente cuando se construye con suelos finos. Estas fisuras no representan ningún riesgo estructural y su aparición es normal.

Esencialmente, el costo del pavimento Unicapa depende del porcentaje de cemento en la mezcla y el uso de los equipos para llevar adelante el proceso constructivo.

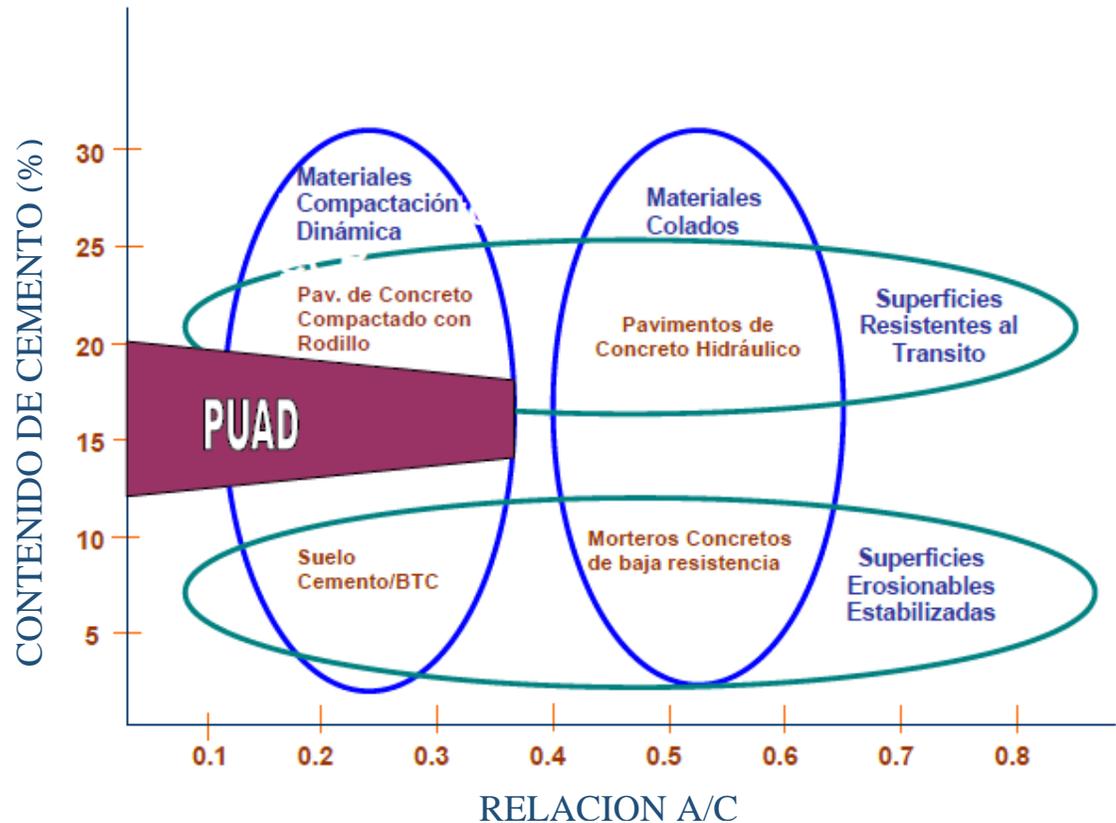
Cuando las distancias de transporte son largas y no es fácil encontrar bancos de materiales adecuados para realizar ripiados continuos, el pavimento Unicapa será más competitivo.

Por otra parte, el uso de pavimentos Unicapa es una forma de tratar los caminos de forma progresiva, con un costo relativamente bajo a largo plazo, las vías pueden contar un nivel funcional y estructural aceptable, durante unos cinco años, cuando es posible colocar una capa de rodadura aprovechando el aporte estructural que puede brindar el pavimento Unicapa.

Como se mencionó anteriormente, una de las cualidades de este pavimento es que soporta la abrasión de los vehículos que transitan sobre éste, dicha técnica de superficie resistente

al tránsito, radica el contenido de cemento dentro de la masa del material que se está tratando y el procedimiento de compactación depende de la relación de agua/cemento como se muestra en la siguiente figura.

Figura 10 Ubicación del pav. Unicapa en el conjunto de estructuras de pavimentos



Fuente: Instituto Salvadoreño del Cemento y el Concreto, 2000

2.7.3. Ventajas del pavimento Unicapa

Pueden destacarse las siguientes ventajas de los pavimentos Unicapa:

Utilización de materiales y suelos del lugar. Es posible utilizar la mayoría de los suelos que se encuentran en la traza de la carretera. Los caminos que tienen un ripiado previo pueden requerir menores contenidos de cemento.

Menor impacto ambiental. Reduce tanto el uso de bancos de préstamo de materiales granulares, así como las emisiones generadas por la explotación y transporte de ripio.

Simplificación de procesos de construcción. Los pavimentos Unicapa se construyen en una sola capa optimizando los rendimientos y la intervención de equipos en la obra, además del control de calidad en obra.

Maquinaria convencional o de alto rendimiento. Puede utilizarse tanto el equipo convencional de carreteras, como motoniveladoras y rodillos compactadores, así como equipos pulvimezcladores que en sus versiones más avanzadas dosifican automáticamente el cemento y agua.

Valor estructural remanente. Al final de la vida útil puede aprovecharse la estructura del pavimento Unicapa como la base de suelo cemento para apoyar un pavimento rígido o flexible, reduciendo los costos de rehabilitación.

Bajo costo y durabilidad. El pavimento Unicapa es una alternativa para los caminos que requieren permanentes ripiados para mejorar su transitabilidad, ofrecen además una mejor superficie de rodadura en un empedrado y su construcción más rápida. La durabilidad de Unicapa se sitúa entre 3 a 10 años y puede ser más económico que efectuar los ripiados y perfilado en este periodo, además de que al final de este periodo, tiene una importante vida remanente, con un aporte estructural que permitirá reducir los espesores de la capa de rodadura que se coloque posteriormente. (Instituto Boliviano del Cemento y el Hormigón, 2003)

2.7.4. Campo de aplicación

Principalmente se puede aplicar en:

Camino rurales.

Vías municipales no urbanas.

Calles en zonas rurales de poco tráfico.

Camino agrícolas.

Patios.

Plazas.

Estacionamientos.

Siempre en comparación con ripiados periódicos.

2.7.5. Etapas para el diseño del proyecto

Al igual que otras alternativas de pavimentos, en los pavimentos Unicapá deberán realizarse los estudios previos correspondientes en la etapa de geotécnica, tráfico y factibilidad del proyecto según el campo de aplicación de los pavimentos Unicapá, el detalle de dichas etapas se explica en las secciones siguientes:

2.7.5.1. Suelos

Inicialmente se debe conocer los suelos existentes a lo largo del camino, identificar cambios en el mismo. Determinar pendientes longitudinales y transversales, obras de drenaje, etc. Si existe material de ripio en un espesor relativamente uniforme, puede excavar calicatas cada uno o dos kilómetros.

Estos pozos de al menos 60 x 60 x 75 cm, permitirán registrar los espesores de material de ripio que podría estar presente y las distintas capas que conforman la subrasante.

Existe también el ensayo de placa de carga AASHTO T-222 o penetrómetro dinámico de cono (DCP), con los cuales se puede determinar el Módulo de Reacción del terreno (k).

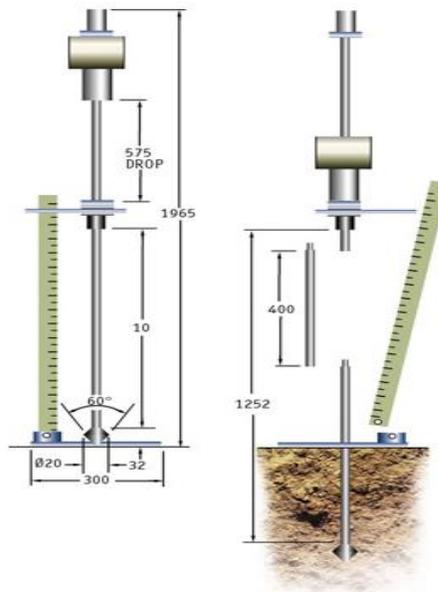
En caso de que no exista material de ripio a lo largo del proyecto y se tengan cambios considerables en el tipo de suelo existente, los pozos de ensayo deberán realizarse cada 500 m o según se verifiquen cambios en los tipos de suelos de la traza.

Figura 11 Placa de carga (AASHTO T-222)



Fuente: Administradora Boliviana de Carreteras, 2011

Figura 12 Penetrómetro dinámico de cono (DCP)



Fuente: ADATEC S.A., 2015

2.7.5.2. Diseño estructural del pavimento

El ISCYC ha trabajado intensamente en el desarrollo de una teoría estructural, habiendo evolucionado en una metodología fundamentada en el método Parmigiani – Di Pace para el diseño de pavimentos de hormigón compactado con rodillo, modificando algunos

parámetros, puesto que los pavimentos Unicapa tienen un comportamiento diferente a las mezclas de hormigón.

La metodología propuesta ha sido ajustada en función de los resultados de los tramos realizados, dando lugar a un método iterativo que compara el esfuerzo debido a las cargas, con el esfuerzo admisible determinado. Por otra parte, se requiere que el esfuerzo por cargas corresponda al 50 % del módulo de ruptura, cubriendo así los aspectos de fatiga del material.

Debido a lo extenso del procedimiento de cálculo, no es posible cubrirlo en detalle, sin embargo, en el IBCH se cuenta con información completa sobre el método de diseño y también se puede proporcionar asesoramiento técnico al respecto. (Instituto Boliviano del Cemento y el Hormigón, 2003)

Valor de soporte de la subrasante (K)

El soporte que la subrasante presta al pavimento se expresa con el valor del módulo de reacción “K”, de la subrasante y puede ser determinada mediante ensayos de placa de carga en el terreno (AASHTO T-222) o por correlación con valores de soporte establecidos mediante otros ensayos como el CBR.

Téngase siempre presente, que el valor de soporte de un terreno, no es absoluto si no que depende de la deflexión que se considere. Por lo tanto, según la estructura que se construya deberá establecerse, previamente, la deformación máxima admisible, para que de acuerdo con ésta se seleccione el valor de soporte del terreno.

En carreteras, calles o aeropistas, cuando se ejecutan pruebas directas de carga, se considera como valor de soporte del terreno aquella carga unitaria correspondiente a una deflexión comprendida entre 0.1 y 0.5 pulg. Para pavimentos flexibles se toma 0.5 pulg. como deflexión crítica máxima, pues se ha comprobado, experimentalmente que esta es la máxima deformación que pueden registrar estos pavimentos sin presentar fallas. Sin embargo, teniendo en cuenta el efecto destructivo de las repeticiones de carga, se recomienda por razones de seguridad, considerar deflexiones menores de ¼ pulg. para la determinación del valor de soporte del terreno. De ahí que generalmente, se tome como

valor de soporte del terreno de fundación aquella carga unitaria correspondiente a una deflexión crítica de 0.1 o 0.2 pulg. (Manuel Antonio Artero Alvarado, 2003)

Ensayo de resistencia de flexión

La resistencia a la flexión (también llamada módulo de ruptura) es un parámetro de diseño especificado para pavimentos rígidos. Esto se debe al hecho de que los pavimentos son esforzados en flexión durante la carga de tráfico. Este esfuerzo a la flexión puede ser determinado usando el ensayo: carga en el centro. El tamaño de la vida es típicamente normado por la AASHTO T177 con una dimensión de 15 x 15 x 50 cm. (José Rafael Menéndez Acurio, 2019)

En cuanto a los resultados a flexión se han obtenido los siguientes datos a los 28 días:

Tabla 8 Resistencia de flexión

| Prueba de resistencia | |
|---|---|
| Resistencia a la flexión | Valores (Edad: 28 días) |
| Valores típicos en suelos granulares no plásticos | 11 kg/cm ² - 23 kg/cm ² |
| Valores típicos en suelos de plasticidad | 7 kg/cm ² - 15 kg/cm ² |

Fuente: Instituto Salvadoreño del Cemento y el Concreto, 2000

Ensayo de resistencia de compresión

El ensayo de resistencia a la compresión es desarrollado con un cilindro de 6 x 12 pulg. después de 28 días del curado. El ensayo es realizado de acuerdo al AASHTO T22 (resistencia a la compresión de especímenes cilíndricos de concreto). Aunque el módulo de rotura es la resistencia especificada para el diseño estructural de pavimento rígidos, la resistencia a la compresión es un ensayo mucho más fácil de realizar y puede ser correlacionado fácilmente al módulo de rotura.

Por lo tanto la resistencia a la compresión se usan en algunos casos como criterio de aceptación, es también menos propenso a variaciones durante el ensayo que los ensayos de resistencia a flexión. (José Rafael Menéndez Acurio, 2019)

En cuanto a los resultados a compresión se han obtenido los siguientes datos a los 28 días:

Tabla 9 Resistencia a compresión

| Prueba de resistencia | |
|---|--|
| Resistencia a la compresión | Valores (Edad: 28 días) |
| Valores típicos en suelos granulares no plásticos | 60 kg/cm ² - 120 kg/cm ² |
| Valores típicos en suelos de plasticidad | 30 kg/cm ² - 75 kg/cm ² |

Fuente: Instituto Salvadoreño del Cemento y el Concreto, 2000

Periodo de diseño

Los pavimentos Unicapa basándose en sus características estructurales y de funcionamiento están concebido por un periodo de diseño de 3-10 años, en los cuales se espera que se comporten satisfactoriamente, no se pueden considerar periodos mayores como los considerados para pavimentos rígidos o flexibles ya que las características de funcionalidad son mayores en estos últimos. (Manuel Antonio Artero Alvarado, 2003)

Comportamiento a la fatiga

Como se establece en el concreto, aunque una carga individual produzca esfuerzos de flexión menores que su módulo de ruptura y por tanto no origine falla en el pavimento, la repetición de esa misma carga un número grande de veces puede producir fatiga en el material y ocasionar roturas en las losas.

Los diversos estudios realizados hasta el momento en Japón, EE.UU. y México, han permitido obtener diferentes expresiones para describir la relación entre SR y el logaritmo del número NR de repeticiones permitidas de las cargas. (Manuel Antonio Artero Alvarado, 2003)

Tensión admisible del pavimento

El espesor de diseño se debe seleccionar de tal manera que la tensión de trabajo del pavimento (σ) sea menor que la tensión admisible (σ_{adm}). La tensión admisible (σ_{adm}) del pavimento depende del número de repeticiones de las caras de rueda de diseño que se espera se produzcan durante el periodo proyectado de vida útil (periodo de diseño). (Manuel Antonio Artero Alvarado, 2003)

Módulo de elasticidad (E)

En el diseño estructural de un pavimento es muy importante que tenga una capacidad de soporte suficiente para distribuir de forma adecuada las cargas impuestas por el tráfico vehicular, generando las menores deformaciones posibles. Esto se logra teniendo altos módulos de elasticidad en la capa de la estructura del pavimento.

Al mezclar los suelos con cemento se eleva considerablemente los módulos de elasticidad, generando una rigidez tal que pueda ser aprovechada en beneficio de una conveniente distribución de carga y un buen desempeño de la estructura del pavimento durante la vida de diseño.

Los valores del módulo de elasticidad, tanto estático como dinámico y el coeficiente de Poisson son muy variables, dependiendo principalmente del tipo de suelo y contenido de cemento en la mezcla.

La determinación de los módulos de elasticidad dinámicos o estáticos no es una práctica habitual en el diseño.

En general, este módulo es bajo comparándolo con el del concreto y muy alto si se le compara con el del suelo natural. (Bettina Yaneth Villa Gutiérrez, 2010)

Densidad

Un suelo granular no plástico con un peso volumétrico seco máximo relativamente alto, es una excelente opción cuando se trata de cumplir parámetros estructurales muy exigentes.

La densidad de la mezcla se mide usualmente en términos de peso volumétrico seco máximo, el cual se utiliza como uno de los parámetros de control en el campo. La relación “humedad optimada – densidad máxima seca” puede variar para un mismo tipo de suelo y contenido de cemento si se cambia la energía de compactación. Esto significa que un incremento en el peso volumétrico seco máximo, provocado por una mayor energía de compactación que no llegue a fracturar las partículas del suelo, aumenta notablemente la resistencia a compresión de la mezcla y mejora el resto de propiedades estructurales.

En los últimos años diversos países han adoptado en sus métodos de diseño y especificaciones, una mayor energía de compactación aplicando la norma AASHTO T-180. Este cambio está más de acuerdo con la energía de compactación generada por los equipos de los que se dispone actualmente. Así mismo, el costo de las mezclas se ha logrado optimizar, ya que se requiere una menor cantidad de cemento para lograr la resistencia especificada debido al incremento de densidad obtenido al aumentar la energía de compactación, es por todo esto que las mezclas de los pavimentos Unicapa son realizadas utilizando la norma AASHTO T-180. (Bettina Yaneth Villa Gutiérrez, 2010)

Coefficiente de Poisson

El coeficiente de Poisson es un parámetro que depende de la forma del espécimen y módulo de elasticidad, pero fundamentalmente, de la homogeneidad de la mezcla compactada.

El valor del coeficiente de Poisson para el pavimento Unicapa es de 0,15.

(Bettina Yaneth Villa Gutiérrez, 2010)

Resistencia al desgaste

Los pavimentos Unicapa presentan una mejor resistencia al desgaste que el suelo – cemento ordinario, por lo que es resistente a la acción erosiva de la lluvia y pueden soportar directamente el paso continuando de vehículos.

La resistencia al desgaste depende del tipo de suelo y peso volumétrico del mismo contenido de agregado grueso, porcentaje de cemento y principalmente, de la edad y características del material.

Existen dos métodos para realizar el ensayo de desgaste: el método de desgaste por rotación o impacto y el método de desgaste por rotación y sobrepeso. (Bettina Yaneth Villa Gutiérrez, 2010)

2.7.6. Propiedades de ingeniería de los pavimentos Unicapa

Tabla 10 Propiedades del pavimento Unicapa

| Propiedades | Valores (Edad: 28 días) |
|--|---|
| Resistencia a la compresión | |
| Valores típicos en suelos granulares no plásticos | 60 kg/cm ² - 120 kg/cm ² |
| Valores típicos en suelos de plasticidad | 30 kg/cm ² - 75 kg/cm ² |
| Resistencia a la flexión | |
| Valores típicos en suelos granulares no plásticos | 11 kg/cm ² - 23 kg/cm ² |
| Valores típicos en suelos de plasticidad | 7 kg/cm ² - 15 kg/cm ² |
| Módulo de elasticidad | |
| Valores típicos en suelos granulares no plásticos | 176,056 kg/cm ² - 422,535 kg/cm ² |
| Valores típicos en suelos de plasticidad | 56 kg/cm ² - 211,267 kg/cm ² |
| Densidad | |
| Valores típicos en suelos granulares no plásticos | 1,900 kg/m ³ - 2,400 kg/m ³ |
| Valores típicos en suelos de plasticidad | 1,600 kg/m ³ - 1,950 kg/m ³ |
| Resistencia a la abrasión | |
| Método de rotación e impacto. Rango de valores alcanzados a la fecha (diversos tipos de suelo) | 33% - 96% |
| Método de rotación y sobrepeso. Rango de valores alcanzador a la fecha (diversos tipos de suelo) | 0,02% - 0,2% |

Fuente: Instituto Salvadoreño del Cemento y el Concreto, 2000

2.7.7. Parámetros del método de diseño estructural

Para determinar el espesor del pavimento, se requiere la siguiente información:

Valor de soporte de la subrasante “k” (MPa/m).

Módulo de ruptura a la flexión “MR” (MPa).

Módulo de elasticidad “E” (MPa).

Coefficiente de Poisson.

Carga por rueda “P” (MN).

Separación entre ruedas “s” (m).

Presión de inflado de neumáticos “p” (MPa).

Número de repeticiones de carga en periodo de diseño (N).

Periodo de diseño.

Tasa de crecimiento vehicular.

(Instituto Salvadoreño del Cemento y el Concreto, 2000)

2.7.8. Cálculo del espesor del pavimento Unicapa

Para el cálculo del espesor del pavimento Unicapa se deben seguir los pasos a continuación:

Se calcula el número de repeticiones de cargas esperadas durante el periodo de diseño:

$$N = PD * 365 * A$$

Donde:

PD= Periodo de diseño (años).

A= Número de repeticiones de carga diarias.

Se calcula el factor de crecimiento (Fcr) en función de i y PD.

$$F_{cr} = \frac{(1 + i)^{PD} - 1}{i}$$

Donde:

i= Tasa de crecimiento vehicular anual (decimal).

PD= Periodo de diseño (años).

Con el factor de crecimiento (F_{cr}) y el número de repeticiones esperadas (N), se calcula la proyección del número de repeticiones de carga (NR) durante el periodo de diseño:

$$NR = N * \left(1 + \frac{F_{cr}}{100}\right)$$

Se determina la relación de tensiones (SR), entre la tensión debida a la carga y el módulo ruptura a flexión, en función de NR :

$$SR = 1.20 - 0.10 \log NR, \text{ para } NR \geq 100$$

Se determina la tensión admisible (σ_{adm})

$$\sigma_{adm} = SR * MR$$

Donde:

SR = Relaciones de tensiones.

MR = Módulo de ruptura.

Se calcula el radio “ a ” del área equivalente de contacto:

$$a = \left(\frac{P}{p * \pi}\right)^{0.5}$$

Donde:

P = Máxima carga de rueda simple (MN).

p = Presión de inflado de neumáticos (MPa).

Se asume un espesor tentativo de pavimento (h), en m.

Se calcula el “radio de rigidez relativa de Westergaard”.

$$L = \sqrt[4]{\frac{E_c * h^3}{12 * (1 - \mu^2) * k}}$$

Donde:

E= Módulo de elasticidad (MPa).

h= Espesor asumido (m).

k= Valor de soporte de la subrasante (MPa/m).

μ = Coeficiente de Poisson.

Se calcula la variable Y que relaciona el radio equivalente de contacto, radio de rigidez relativa y separación entre llantas.

$$Y = 0.33635 - 0.065 * \left(\frac{S}{a}\right) + \left[0.016 * \left(\frac{S}{a}\right) - 0.58\right] * \ln\left(\frac{a}{L}\right)$$

Donde:

s= Separación entre los centros de las ruedas (m).

a= El radio del área equivalente de contacto.

L= Radio de rigidez relativa de Westergaard.

Se calcula la tensión (σ), en el pavimento producida por las cargas.

$$\sigma = \frac{Nr * P}{h^2} * Y$$

Donde:

Nr= Número de llantas en la punta del eje.

P= Máxima carga de rueda simple (MN).

h= Espesor asumido (m).

Y= Variable.

Se compara el (σ) con (σ_{adm}) (primera condición).

$$\sigma < \sigma_{adm} \rightarrow ok!$$

Obtener un valor de σ correspondiente al 50 % del módulo de ruptura (segunda condición).

$$\sigma_{adm} \leq 0.5 * MR \rightarrow ok!$$

Nota: Si la condición no se cumple, habrá que calcular nuevamente hasta obtener un valor de σ correspondiente al 50 % del módulo de ruptura, realizando las modificaciones pertinentes.

Para mayor facilidad de cálculo del espesor del pavimento Unicapa, se presenta a continuación un ejemplo de hoja electrónica en Excel, realizado por el Instituto Salvadoreño del Cemento y el Concreto.

Gráfica 1 Hoja de Excel para el cálculo de espesores del pavimento Unicapa

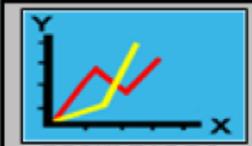
PAVIMENTO UNICAPA DE ALTO DESEMPEÑO : DISEÑO DE ESPESORES DE PAVIMENTO

Fecha #####

PROYECTO:
PROCEDIMIENTO DE CÁLCULO DESARROLLADO POR EL ISCYC

| VEHICULO DE DISEÑO | | C2 | C2 |
|---|------------------|-------------|-----------|
| PARAMETROS | | | |
| Módulo Elástico (a 60 días) | E = | 12,000 | MPa |
| Espesor tentativo del pavimento | h = | 0.226 | m |
| Coefficiente de Poisson | μ = | 0.15 | |
| Módulo de reacción de la subrasante | K = | 90 | MPa / m |
| Carga de cada rueda | P = | 0.024 | MN |
| Presión de inflado de neumático | p = | 0.63 | MPa |
| Número de Ruedas (en cada punta de eje) | Nr = (1 ó 2) | 2 | |
| Radio del área equivalente | a = | 0.110 | m |
| Radio de rigidez relativa | l = | 0.602 | m |
| Separación entre centros de ruedas | s = | 0.5 | m |
| | sfa = | 4.54 | |
| | a/l = | 0.183 | |
| Formula Modificada por ISCYC | | | |
| | g = | 0.90293 | |
| | σ = | 0.85 | MPa |
| FATIGA POR FLEXION | | | |
| Módulo de rotura a flexión (a 60 días) | Mr = | 1.7 | MPa |
| Número diario de repeticiones de la carga | A = | 200 | |
| Período de diseño | PD = | 3 | Años |
| Aumento de tráfico anual | % = | 3.7 | |
| Factor de Crecimiento | Fcr = | 3.11 | |
| Número de repeticiones en período diseño | NR = | 225,816 | |
| Relación Tensión / Módulo de rotura | SR = | 0.6646 | |
| Tensión admisible | σ = | 1.13 | MPa |
| Es el Espesor Correcto ? | VERDADERO | OK ! | |
| ESPESOR DE DISEÑO = 0.226 Metros | | | |

[ALGUNOS
PARAMETROS DE
DISEÑO](#)


[RESULTADOS
GRAFICOS](#)

[GENERALIDADES DEL PROCESO CONSTRUCTIVO](#)

[PROCEDIMIENTOS DE LABORATORIO](#)

[CONTROL DE CALIDAD](#)

[ANALISIS DE COSTOS](#)

ISCYC

Fuente: Instituto Salvadoreño del Cemento y el Concreto, 2000

2.7.9. Proceso constructivo

La construcción de los pavimentos Unicapa es similar a la de la estabilización de bases “in situ” con cemento, la cual se basa en incorporar el cemento, en el seno de un material granular adecuado para su empleo, con el objetivo de obtener un ahorro en los costos de construcción; al evitar transportar materiales de mayor calidad, y por tanto más caros, y a grandes distancias.

Toda la dificultad de este proceso de construcción “in situ” reside, por un lado, en tener controlado el estado hídrico del material a tratar y, por otro, en dosificar y mezclar correctamente la cantidad necesaria de cemento, a la vez que se alcanza la geometría predefinida de la capa.

La construcción “in situ” de pavimentos Unicapa en materiales granulares, en general suelos, requiere de estudios previos en laboratorio, seguidos de comprobaciones a nivel de la obra. Su ejecución está constituida por una serie de operaciones elementales que deben realizarse siguiendo un ordenamiento preciso, empleando varios equipos específicos y, exige destreza y experiencia por parte de los operadores y jefes de unidad de la obra. (Instituto Boliviano del Cemento y el Hormigón, 2003)

Las etapas para el proceso constructivo son las siguientes:

2.7.9.1. Preparación del suelo existente

La preparación del suelo tiene como objetivos esenciales facilitar la acción de los mezcladores, por un lado, y, por otro, homogeneizar la capa de suelo a pavimentar que puede ser variable en función de la naturaleza de los suelos existentes. Las principales labores a realizar en la preparación del suelo son:

Escarificado y disgregación

El escarificado y disgregación del suelo “in situ” y la eliminación de elementos gruesos permiten obtener un mezclado más eficaz. El escarificado se realiza habitualmente mediante una máquina de rizado con varios dientes que puede ir montado sobre tractor (como se observa en la figura 13), o bien, sobre motoniveladora en posición central o

posterior. Por lo general se escarifica hasta una profundidad de 3 cm. mayor que la especificada como espesor (espesor del pavimento).

Eliminación de la fracción gruesa

Para la eliminación de los elementos gruesos se emplean rastrillos de piedras compuestos por varios dientes curvos insertados en un bastidor horizontal que es arrastrado por un tractor.

Generalmente la extracción se realiza en dos pasadas, en la primera con 7 – 9 dientes, se extraen los elementos más gruesos (100 – 250 mm) y en la segunda, con 15 – 18 dientes, extraen las gravas medias (> 40 – 50 mm).

Homogeneización y pulverización

La homogeneización del suelo responde al objetivo de limitar las variaciones de sus características en relación con las muestras que se tomaron para realizar los estudios previos de laboratorio. Se necesita conocer correctamente la disposición del material en el terreno para definir un método de trabajo que permita corregir las heterogeneidades. Resulta ser una cuestión relativamente compleja ya que por razones económicas no suele ser viable proceder una extracción y homogeneización en acopio. De ahí que sea más sencillo definir previamente varias fórmulas de trabajo en función de las características de los materiales que serán estabilizados.

La pulverización es de gran importancia en los suelos cohesivos ya que en éstos la correcta homogeneización y el contacto íntimo del cemento sólo es posible si se han deshecho los terrones y grumos arcillosos.

Hay suelos que forma terrones muy duros cuando están secos. En estos casos suele haber un contenido de humedad óptimo para ablandar los terrones, si el material es de este tipo, conviene mojarlo, mezclarlo bien, dejarlo reposar y pulverizarlo al siguiente día.

También se puede hacer uso de maquinaria agrícola de uso común como las gradas de disco y los arados de vertederas. De igual manera pueden usarse máquinas de ripiado con varios dientes montados sobre motoniveladora e incluso la propia hoja de la motoniveladora usada como vertedera. La homogeneización y pulverización en

operaciones de cierta envergadura requiere equipos similares a los de mezclado, esto es, mezcladoras rotativas de uno o varios ejes arrastradas por tractor, tipo pulvimixer, o bien suspendidas, en posición intermedia o trasera, en vehículos específicos, tipo estabilizador.

Ajuste de la humedad

La otra operación habitual en la preparación del material a usar, es la del ajuste del estado hídrico: aumentar o disminuir la humedad. Si se trata de disminuir la humedad se puede recurrir a una simple aireación, que puede coincidir con la operación de escarificado, homogeneización y/o eliminación de la fracción gruesa, o bien a un pre – tratamiento con cal. Si es necesario aumentar la humedad del suelo se hace coincidir con la homogeneización teniendo en cuenta que, en general, es recomendable ajustar la humedad del suelo unos 2 o 3 puntos por encima del óptimo de humedad del Proctor Modificado para tener en cuenta la dosificación necesaria de cemento y la evaporación que se produce durante el mezclado y la puesta en obra.

Para el humedecimiento del suelo se emplean equipos de mezclado similares a los de homogeneización o de mezclado con el cemento. El aporte del agua puede hacerse directamente desde camiones – cisternas acoplados a los mezcladores si éstos disponen de barra regadora integrada, o bien, previamente mediante camiones – cisternas con barra regadora; aunque este último no es la mejor alternativa.

No se debe confundir la operación previa de humedecimiento del suelo con los riegos superficiales de agua que se deben realizar, especialmente en épocas cálidas para mantener la humedad cuando ya ha sido ajustada. Estos riegos de agua auxiliares pueden aplicarse antes de la extensión del cemento, también tras el mezclado y antes de la compactación. (Manuel Antonio Artero Alvarado, 2003)

Figura 13 Escarificado del suelo



Fuente: Manuel Antonio Artero Alvarado, 2003

2.7.9.2. Colocado y extendido del cemento

El objetivo básico de la extensión del cemento es el de dosificar lo más preciso posible la cantidad determinada de cemento en la fórmula de trabajo, función del espesor del pavimento Unicapa a construir. Una correcta dosificación del cemento es fundamental para el éxito del proyecto, pero hay que recordar que también lo es su correcta homogenización y un buen ajuste de humedad.

La dosificación del cemento puede realizarse simplemente a mano, con sacos, éstos se colocan en hileras transversales al camino que se está ejecutando, distanciados convenientemente para producir la proporción especificada. Los sacos se rompen y su contenido se vacía sobre la superficie a modo de formar hilos transversales, luego por medio de rastras de clavos u otro dispositivo conveniente, se riega el cemento para formar una capa uniforme de suelos. Sin embargo, lo correcto sería utilizar maquinas dosificadoras; en los equipos más sencillos, el cemento puede hacerse con camiones cargados a granel equipados con descargadores graduados, en los cuales se puede regular la cantidad de cemento que debe regarse en determinada área, en este sistema el camión

se mueve a una velocidad lenta en el sector asignado, dejando tras de sí hilos de cemento. Estos hilos se distribuyen paralelamente al eje de la faja en proceso e igualmente distanciados en todo el ancho de la vía.

Los equipos habituales de dosificación consisten en tolvas dosificadoras de materiales pulverulentos que suelen ir acopladas a un camión – silo. El cemento se descarga sobre la tolva que en su parte inferior lleva una compuerta regulable y un dosificador alveolar que es accionado mecánica o hidráulicamente pero siempre ligado a la velocidad del vehículo tractor.

También existen tolvas de funcionamiento automático, remolcadas o arrastradas por tractor y esté unido al camión – silo por tubería flexible. Suelen ser modelos más sofisticados que las anteriores, dan mayor precisión, dotados de agitadores y vibradores para evitar la formación de bóvedas y, en algunos casos, con posibilidad de regular la anchura de extendido.

La extensión del cemento debe efectuarse por bandas paralela adyacentes, borde contra borde, sobre toda la superficie a tratar y con la precisión, para que la desviación de la dosificación por metro cuadrado, con relación a la fórmula de trabajo, no varíe en más del 10 %.

Como regla general se protegerán los equipos de extensión con faldones para limitar la emisión de polvo. Algunos equipos llevan una rampa provista de vaporizadores que con una pequeña cantidad de agua consiguen minimizar el problema de la formación de polvo.

Es posible también realizar la aplicación del cemento por medio de distribuidores mecanizados en polvo o se puede aplicar en forma de lechada. Una vez colocado el cemento se tiene un plazo máximo de trabajabilidad que depende de las condiciones ambientales, en El Salvador se recomienda 2.5 horas, cementos con puzolana permiten algo más de tiempo, en climas fríos también el proceso de endurecimiento es más lento. (Manuel Antonio Artero Alvarado, 2003)

Figura 14 Colocado y la distribución del cemento



Fuente: Instituto Salvadoreño del Cemento y el Concreto, 2000

2.7.9.3. Mezcla del suelo con el cemento

El mezclado del suelo con el cemento constituye la fase más delicada e importante del proceso de pavimentación. La homogeneidad obtenida y la profundidad del tratamiento son los aspectos fundamentales a asegurar con el equipo empleado. Otro aspecto importante, especialmente desde el punto económico, es que el mezclado suele ser en la mayoría de los casos, el proceso que limita el rendimiento de la operación, es decir, es su cuello de la botella. Es fundamental, por lo tanto, elegir correctamente el equipo de mezclado.

Los mezcladores de suelos constan al menos de vehículo tractor y dispositivo de mezclado. Dicho dispositivo puede ser fijo o móvil, y en este caso, el movimiento puede venir dado por la tracción y la fricción al suelo o por una fuente de energía exterior (por ejemplo, un pulvimixer). Este último caso es el más habitual.

Los equipos de mezclado habituales son los que están constituidos por mezcladores rotativos. El eje de rotación puede ser vertical u horizontal y puede existir un único rotor o varios. En el caso de los equipos de rotor único y eje horizontal, que es el más habitual, el rotor va cubierto para una carcasa. Existen tres tipos de configuraciones:

Según la posición relativa del tractor y del mezclador.

Arrastrada (tipo pulvimixer).

Suspendida sobre un bastidor en posición frontal o central (en ambos casos la denominación es la de estabilizador de suelos).

Las características de los pulvimixer y de los estabilizadores son muy similares, diferenciándose en la potencia y dimensiones, la que suele ser mayor en los estabilizadores. El rotor, de un diámetro de entre 0.5 y 1.2 m., va provisto de dientes, como en las fresadoras, o lo que es más normal, de unas paletas especiales de acero resistente al desgaste. El número (entre 50 y 150) y la forma de las paletas varía de unos modelos a otros; el ancho de trabajo puede ser de 1.5 a 3 m, aunque lo más normal es de 2 a 2.5 m, y la profundidad puede alcanzar a los 50 cm. en algunas máquinas. Los estabilizadores de suelos suelen estar equipados en el interior de la carcasa de una rampa para inyectar agua lo que resulta muy interesante para poder ajustar con precisión la humedad, aunque obliga a la presencia de una cisterna que se desplaza solidariamente con el estabilizador.

La calidad del trabajo realizado, especialmente la homogeneidad, y el rendimiento obtenido con los estabilizadores de suelos y con los pulvimixer dependen esencialmente de la adecuación de una serie de parámetros.

Velocidad de avance.

Velocidad de giro del rotor.

Forma y disposición de las paletas.

En cada caso es necesario ajustar uno o varios de estos parámetros, generalmente la velocidad de avance y la de giro, pues los otros vendrán dados por el proyecto y por el tipo de máquina. Un aspecto importante a tener en cuenta es la presencia en el suelo de elementos muy gruesos (superiores a 40 – 50 mm) que dificultan grandemente el trabajo y producen frecuentes averías.

Recientes ensayos realizados con este tipo de equipos han mostrado que:

La homogenización en sentido vertical es muy buena sobre todo el espesor tratado.

La homogenización en sentido transversal es casi nula, por lo que se debe extremar la corrección de la distribución del cemento y del agua.

La variación de la profundidad del tratamiento puede ser grande, aunque en los equipos más modernos se puede llegar a limitar dicha variación a ± 1 cm.

La calidad del tratamiento “in situ”, se realiza correctamente puede ser comparable al realizado en planta.

Además, cabe mencionar la existencia de equipos de mezclado más sofisticados, como son los mezcladores de varios rotores y las plantas móviles de mezclado.

Figura 15 Mezclado del suelo con el cemento



Fuente: Instituto Boliviano del Cemento y el Hormigón, 2003

En Bolivia se cuenta con al menos dos equipos pulvimezcladores (pulvimixer), su rendimiento es mucho más alto que las motoniveladoras, el grado de pulverización que se puede alcanzar es también mucho mayor y usualmente en una sola pasada. (Manuel Antonio Artero Alvarado, 2003)

2.7.9.4. Aplicación de agua

Una vez realizada la mezcla de suelo-cemento, se recomienda verificar constantemente el contenido de humedad en varios puntos antes de realizar el proceso de compactación, a fin de que se pueda comparar y cumplir con la humedad óptima de compactación del ensayo proctor AASHTO T-180, además se recomienda ejecutar calicatas de observación

en la mezcla suelta para asegurarse que el mezclado del suelo, cemento y agua sea eficiente en todo el espesor y que además la humedad sea uniforme en todo el espesor tratado.

Figura 16 Aplicación del agua



Fuente: Asociación Dominicana de Productores de Cemento Portland, 2010

También están los mezcladores escarificadores, los cuales poseen tres formas básicas de llevar a cabo los trabajos:

Aplicando el agua y el cemento, y escarificando y/o mezclando posteriormente, como se puede observar en la figura 17.

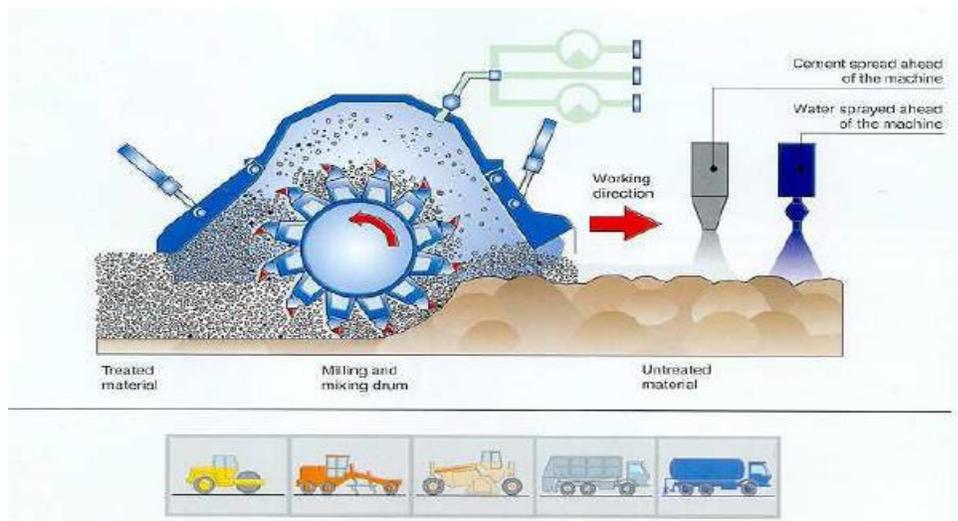
Se utiliza un número determinado de equipos; primeramente se riega el agua con un camión cisterna, después se extiende el cemento con un camión de riego, luego la máquina mezcladora – escarificadora, por medio de un tambor de aspas dentro de la carcasa protectora homogéneamente los diferentes materiales; la mezcla obtenida sale por una compuerta regulable situada en la parte trasera de la carcasa, para que seguidamente la máquina que se encargara del perfilado y nivelación haga su trabajo, y finalmente se compacte con un rodillo vibratorio o el equipo que se acomode mejor a la mezcla.

Figura 17 Pulvimezclador jalada por un tractor



Fuente: Instituto Boliviano del Cemento y el Hormigón, 2009

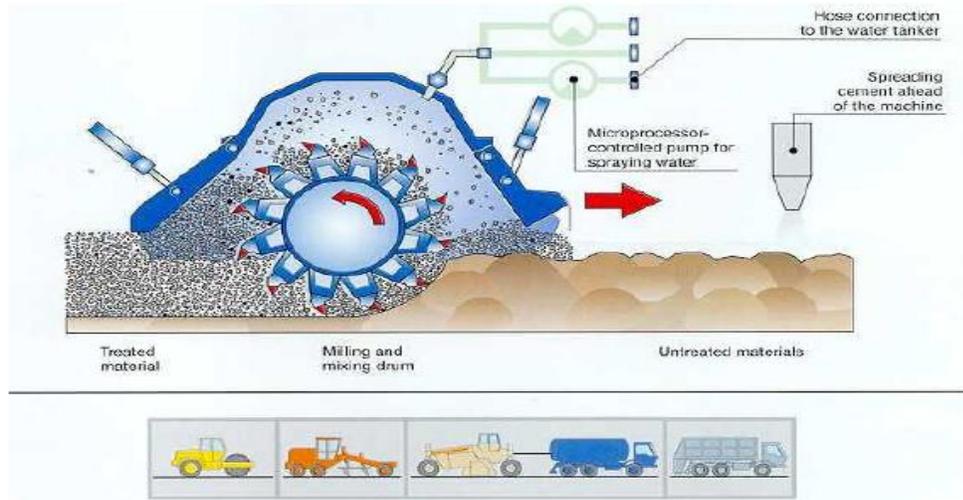
Figura 18 Mezclado – escarificado, aplicando agua y cemento simultáneamente



Fuente: Manuel Antonio Artero Alvarado, 2003

Aplicando el cemento y posteriormente escarificando y/o humedeciendo la superficie simultáneamente como se muestra en la siguiente figura:

Figura 19 Aplicando el cemento y posteriormente escarificando

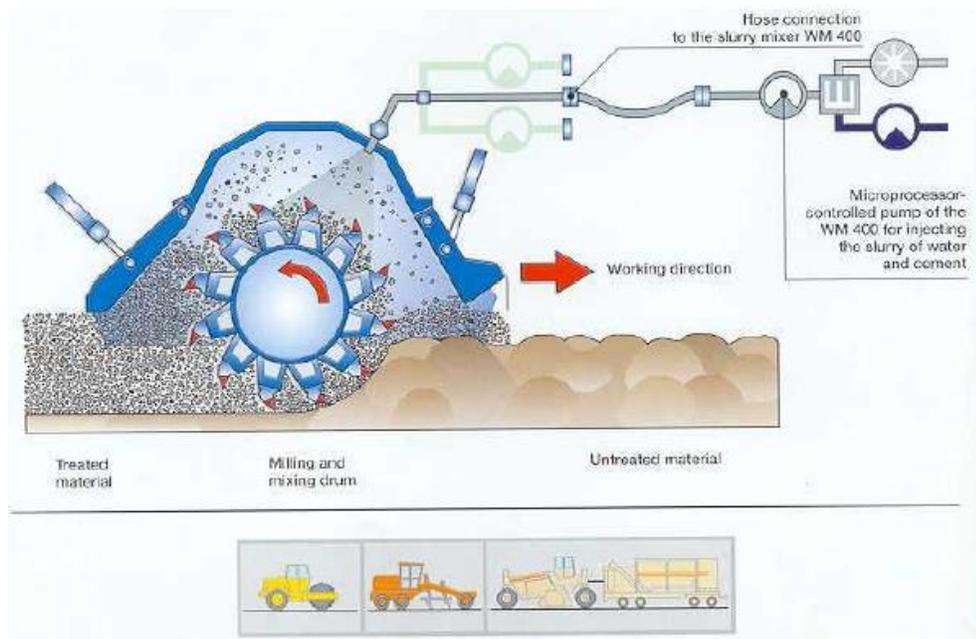


Fuente: Manuel Antonio Artero Alvarado, 2003

El funcionamiento es similar al descrito en el caso anterior con la diferencia que aquí se conecta directamente el camión cisterna al equipo mezclador – escarificador mediante una manguera, el camión posee un microprocesador que controla la bomba con la que se rocía el agua a la mezcla.

Haciendo todos los procesos en forma simultánea, como se observa en la siguiente figura:

Figura 20 Procesos de forma simultánea



Fuente: Manuel Antonio Artero Alvarado, 2003

En este procedimiento se adiciona el cemento y el agua en forma de lechada por medio de una manguera conectada al pre – mezcladora de los componentes antes mencionados, la cual también posee un microprocesador que controla las cantidades de lechada inyectadas a la mezcla, para que se repita la secuencia de procedimientos antes descritas. (Manuel Antonio Artero Alvarado, 2003)

2.7.9.5. Compactación

La relación entre la calidad de una capa de suelo natural o de suelo estabilizado con el nivel de compactación alcanzado es bien conocida, la obtención de una densidad elevada es importante para alcanzar unas buenas resistencias mecánicas, pero, sobre todo, la densidad alcanzada en el fondo de la capa tratada es fundamental de cara a obtener una buena resistencia a la fatiga de la capa de los pavimentos Unicapa.

El nivel de referencia habitual para la compactación de las capas “in situ” es la densidad máxima obtenida en el ensayo proctor modificado, sin embargo, deben tenerse en cuenta las diferencias entre las densidades medias y las densidades del fondo de capa, que puede ser significativas.

Para realizar esta operación puede emplearse un gran número de tipos de máquinas, pero las más frecuentes son los rodillos lisos, los rodillos vibratorios, los compactadores de neumáticos y los compactadores de patas. No todos estos equipos son siempre adecuados, por el contrario, para cada tipo de suelo y espesor de capa a estabilizar debe estudiarse un sistema (tipo de equipos, potencia, peso y número de pasadas) idóneo de compactación mediante el correspondiente tramo de ensayo. Se entran en cuenta, como es lógico, otros factores como el costo y la disponibilidad de los equipos.

Los rodillos lisos, también denominados apisonadoras, actúan por el efecto del peso propio concentrado en la zona de contacto entre el cilindro metálico y el suelo. Suelen ser autopropulsadas, son dos cilindros de igual anchura (tipo tándem).

Los rodillos vibratorios son los más utilizados por su versatilidad y eficacia. Pueden ir remolcados o bien ser autopropulsados.

Existen numerosas configuraciones, aunque las básicas son dos:

Dos rodillos metálicos, lisos o con patas, con un solo o los dos rodillos vibratorios.

Mixtos articulados, con un eje tractor de dos neumáticos unido por articulación a un rodillo vibratorio, lisos o con patas. (Manuel Antonio Artero Alvarado, 2003)

Figura 21 Compactación



Fuente: Instituto Boliviano del Cemento y el Hormigón, 2003

2.7.9.6. Nivelación

El objetivo de esta operación es conformar la capa estabilizada o el pavimento con la geometría requerida. En este tipo de pavimentación el perfilado se efectúa preferentemente mediante eliminación de material, es decir, que se evita el procedimiento de compensar las partes bajas aportando material de las zonas altas; esto se debe tener en cuenta durante el proceso de extensión del suelo (pre – nivelación) con el objetivo de que, tras las distintas operaciones que componen la estabilización, se produzca un sobre espesor de capa (en torno al 10 – 15 % del espesor total) que será eliminado en la operación de nivelación final.

La nivelación final se realizará de forma rápida e inmediatamente después de la compactación parcial, respetando siempre el periodo de manejabilidad de la mezcla. La precisión que se alcanza en los suelos estabilizados con cemento suele ser mayor que en los materiales granulares no tratados. (Manuel Antonio Artero Alvarado, 2003)

2.7.9.7. Ejecución de las juntas

Los pavimentos Unicapa tienen posibilidades de presentar fisuras finas y espontáneas, producto del alto contenido de cemento en la masa de suelo, la cual no representará riesgo estructural alguno, sin embargo, se tratará de controlar en lo posible dicho fisuramiento creando juntas transversales de contracción. Debido a que no se tiene experiencia alguna en la construcción de juntas en los pavimentos Unicapa, las recomendaciones para su construcción se basan en las técnicas de ejecución de juntas en reciclados de pavimento usando cemento Portland.

Existen diversas alternativas para realizar las juntas transversales de contracción, desde un corte fresco hasta aserrados con disco en el material endurecido, este último es recomendado muy poco, debido a que el material tratado nunca logra la dureza de un concreto hidráulico, por lo que al realizar el aserrado siempre ocurren desportillamientos en las aristas de dichas juntas. Por lo que se recomienda un corte en fresco de un ancho de unos 4 mm y a una profundidad que corresponda a la mitad del espesor de la capa tratada. (Manuel Antonio Artero Alvarado, 2003)

Figura 22 Juntas de control



Fuente: Instituto Boliviano del Cemento y el Hormigón, 2009

2.7.9.8. Curado

Una vez concluido el proceso de compactación, el pavimento debe protegerse de manera que la humedad de la mezcla compactada no se pierda rápidamente lo que influiría en el proceso de hidratación del cemento.

Es posible utilizar riegos continuos de agua posteriormente a las operaciones de compactación por al menos ocho días. También, en el caso de suelos granulares no plásticos, se puede utilizar un compuesto de curado de base acuosa aplicado por aspersión en la misma forma en que se realiza en pavimentos rígidos. Alternativamente se puede aplicar una membrana asfáltica posteriormente a las operaciones de compactación final y acabado. (Instituto Boliviano del Cemento y el Hormigón, 2003)

Figura 23 Compuesto químico de curado



Fuente: Manuel Antonio Artero Alvarado, 2003

2.7.9.9. Apertura al tráfico

La apertura al tráfico tanto de construcción como público, puede realizarse en cuanto finalice el procedimiento de compactación y curado.

2.7.10. Control de calidad

El control de calidad en campo se resume en tres actividades principales, control en la dosificación del cemento; humedad de compactación y densidad, esto puede alcanzarse a través de las siguientes actividades:

Revisión de perfiles longitudinales y transversales.

Pulverizado correcto del suelo.

Distribución uniforme del cemento según la dosificación.

Verificación constante del contenido de humedad de la mezcla.

Comprobar la adecuada homogenización de la mezcla.

Verificar que el grado de compactación alcanzado cumple con la especificación.

Cumplimiento de los tiempos de ejecución.

Revisar el espesor de diseño.

Proporcionar el curado adecuado.

2.7.10.1. Desempeño estructural y funcional de los pavimentos Unicapa

El pavimento Unicapa es una alternativa al ripiado y se ha observado que tiene una durabilidad considerablemente mayor que un camino al que se realizan continuos ripiados, siendo ésta la alternativa de comparación. Su vida útil es, obviamente inferior a la de un pavimento rígido, por ejemplo.

En general, en las superficies de pavimentos Unicapa, aparece en algunos sectores pequeñas fisuras de retracción, especialmente cuando se construye con suelos finos. Estas fisuras no representan ningún riesgo estructural y su aparición es normal.

Después de aproximadamente un año de operación, usualmente se produce una pequeña pérdida de material superficial, que al inicio no influye en el comportamiento estructural, pero progresivamente comenzará a deteriorar la superficie, por lo que debe planearse una rehabilitación aproximadamente para el año cinco.

Es importante hacer énfasis en que el mantenimiento de las cunetas laterales y obras de drenajes es fundamental y la pendiente transversal del pavimento debe estar en el orden del 3 %.

La obstrucción de drenajes, especialmente cunetas, unida a la acción del tráfico, puede producir ahuellamientos significativos y daños en el pavimento Unicapa.

Figura 24 Aspecto del pav. Unicapa a un año de operación (desempeño esperado)



Fuente: Instituto Salvadoreño del Cemento y el Concreto, 2000

2.7.11. Costo

Esencialmente, el costo del pavimento Unicapa depende del porcentaje de cemento en la mezcla y el uso de los equipos para llevar adelante el proceso constructivo. Si el camino está constituido por suelos granulares no plásticos, el costo será menor al de trabajar con suelos finos, de igual manera, el uso de un pulvimezclador en lugar de motoniveladoras, puede abaratar los costos y utilizar un menor tiempo para la ejecución de la obra.

Cuando las distancias de transporte son largas y no es fácil encontrar bancos de materiales adecuados para realizar ripiados continuos, el pavimento Unicapa será más competitivo.

Por otra parte, el uso de pavimentos Unicapa es una forma de tratar los caminos de forma progresiva, con un costo inicial relativamente bajo, las vías pueden contar un nivel funcional y estructural aceptable durante unos cinco años, cuando es posible colocar una capa de rodadura aprovechando el aporte estructural que puede brindar el pavimento Unicapa. (Instituto Boliviano del Cemento y el Hormigón, 2003)

2.7.12. Experiencias en El Salvador sobre el pavimento Unicapa

En octubre de 2002, se construyó el primer tramo experimental de Unicapa, dentro de las instalaciones de Planta El Ronco de Cemento de El Salvador, desarrollando estudios de investigación previos, durante y después de la construcción. Se analizaron en profundidad las propiedades de los suelos y se definieron porcentajes de cemento del 13 y 15 % en peso.

Puesto que este tramo contaba con un alto volumen de tráfico pesado, se constituyó en un tramo de uso acelerado, para obtener resultados de desempeño del pavimento a corto plazo. En El Salvador establecieron la utilización de cementos de mampostería ASTM C91 tipo M, no disponible en Bolivia.

Con los resultados de esta investigación, se construyeron posteriormente los tramos: Delicias de Concepción – Cantón el Limón; San Francisco Gotera, Morazán, Río Chiquito – Las Pilas Chalatenango, con diferentes condiciones de suelo, clima, topografía y tráfico.

De esta forma se encontró el porcentaje óptimo realizado en el tramo de Río Chiquito – Las Pilas cumpliendo con las características necesarias para que el pavimento Unicapa rinda ante las exigencias en los caminos rurales.

Inicialmente se consideró utilizar únicamente cemento ASTM C1157 tipo HE, el cual es un cemento por desempeño de resistencia temprana y que localmente se utiliza con excelentes resultados para construir capas de suelo cemento; sin embargo, se observó en los ensayos de mezclas en laboratorio, que muchos de los especímenes sufrieron una contracción considerable debido a los altos porcentajes de cemento, agrietándose y sufriendo desintegración en las pruebas respectivas.

Por tal razón, se consideró ampliar la investigación utilizando cemento de mampostería ASTM C91 tipo M, concebido en principio para obras albañilería y no para trabajos de construcción de capas de estructuras de pavimentos; pero las virtudes de éste en su composición química, retención de agua (mayor plazo de trabajabilidad), menor contracción y mayor adherencia, potenciaron la posibilidad de obtener buenos resultados en mezclas de pavimento Unicapa, por lo que se estudiaron diversas variables considerando además de los dos tipos de cemento mencionados, diferencias en el tamaño

de los especímenes (tres tipos de molde), dos energía de compactación, y evaluación de resistencia a compresión y flexión.

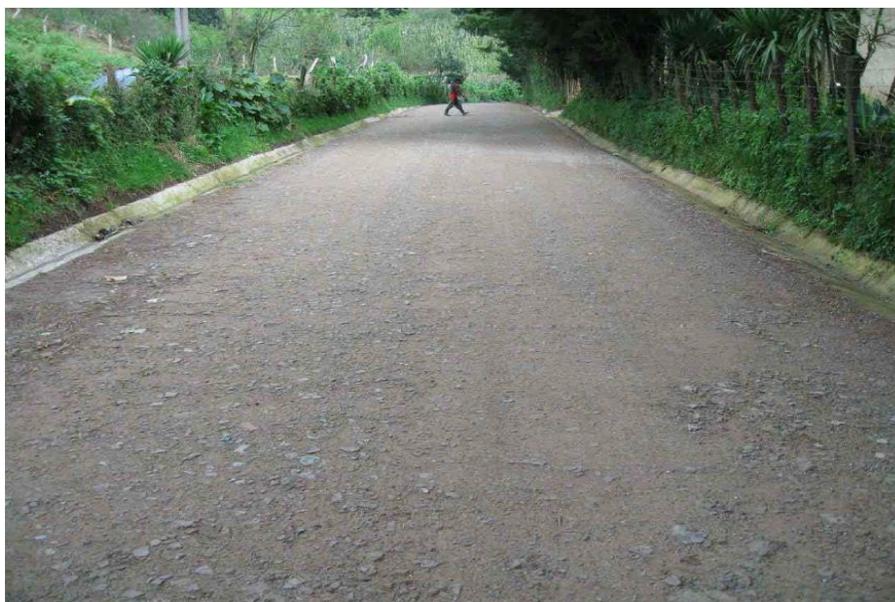
A continuación, se mostrará una tabla con las descripciones y propiedades de los tramos realizados en El Salvador.

Tabla 11 Propiedades del pavimento Unicapa del tramo Río Chiquito

| El Salvador | |
|------------------------------|---|
| Tramo: | Río Chiquito - Las Pilas, Chalatenango |
| Construcción: | Noviembre, 2003 |
| Longitud: | 5500 m con un ancho de rodaje de 6 m |
| Periodo de diseño: | 6 años |
| Trafico: | 200 repeticiones por carga por día (camiones de 2 y 3 ejes) |
| Suelo: | A-7-5; A-7-6 |
| Descripción: | Arcilla moderada y alta plasticidad |
| CBR: | 10 % |
| Contenido de cemento: | 15 % |
| Espesor: | 0,23 m |
| Resistencia a la compresión: | 5,00 MPa → 50,99 kg/cm ² |
| Resistencia a la flexión: | 1,30 MPa → 13,26 kg/cm ² |
| Resistencia a la abrasión: | 48 % |

Fuente: Carlos Quintanilla, 2012

Tramo Río Chiquito, Las Pilas (2003)



Fuente: Instituto Salvadoreño del Cemento y el Concreto, 2000

Tramo Río Chiquito, Las Pilas – El Salvador, después de 9 años



Fuente: Instituto Salvadoreño del Cemento y el Concreto, 2000

Tabla 12 Propiedades del pavimento Unicapa del tramo Suchito, El Salvador

| El Salvador | |
|------------------------------|--|
| Tramo: | Suchito - Cinquera, Cuscatlán |
| Construcción: | Febrero, 2010 |
| Longitud: | 200 m |
| Periodo de diseño: | 6 años |
| Trafico: | 35 repeticiones por carga por día (camiones de 2 y 3 ejes) |
| Suelo: | A-7-6 |
| Descripción: | Arcilla de alta plasticidad |
| CBR: | 8 % |
| Contenido de cemento: | 15 % |
| Espesor: | 0,25 m |
| Resistencia a la compresión: | 5,26 MPa → 53,64 kg/cm ² |
| Resistencia a la flexión: | 1,60 MPa → 16,32 kg/cm ² |
| Resistencia a la abrasión: | 45 % |

Fuente: Carlos Quintanilla, 2012

Tramo Suchito – Cinquera, Cuscatlán – El Salvador (2010)



Fuente: Instituto Salvadoreño del Cemento y el Concreto, 2000

Tramo Suchito – Cinquera, Cuscatlán – El Salvador (2012), después de 2 años



Fuente: Instituto Salvadoreño del Cemento y el Concreto, 2000

2.7.13. Experiencia en otros países sobre el pavimento Unicapa

A continuación, se mostrará una tabla con las descripciones y propiedades de los tramos realizados en otros países.

Tabla 13 Propiedades del pavimento Unicapa del tramo Managua, Nicaragua

| Nicaragua | |
|-----------------------|---|
| Tramo: | Cedro Galan - Managua |
| Construcción: | Julio, 2012 |
| Longitud: | 500 m |
| Periodo de diseño: | 6 años |
| Trafico: | 50 repeticiones por carga por día (bus, camiones de 2 y 3 ejes) |
| Suelo: | A-1-b |
| Descripción: | Arena gruesa |
| Contenido de cemento: | 15 % |
| Espesor: | 0,20 m |

Fuente: Carlos Quintanilla, 2012

Camino Cedro Galan, Managua – Nicaragua



Fuente: Instituto Salvadoreño del Cemento y el Concreto, 2000

Tabla 14 Propiedades del pavimento Unicapa del tramo de Guanacaste, Costa Rica

| Costa Rica | |
|-----------------------|-------------------------------|
| Tramo: | El Jobo, La Cruz - Guanacaste |
| Construcción: | 2007 |
| Longitud: | 400 m |
| Contenido de cemento: | 15 % |
| Espesor: | 0,22 m |

Fuente: Carlos Quintanilla, 2012

El Jobo, La Cruz provincia de Guanacaste – Costa Rica



Fuente: Instituto Salvadoreño del Cemento y el Concreto, 2000

Tabla 15 Propiedades del pavimento Unicapa del tramo de Chumaltenango - Guatemala

| Guatemala | |
|-----------------------|---|
| Tramo: | San Juan Comalapa - San Martin Jilotepeque, Chumaltenango |
| Construcción: | Marzo, 2008 |
| Longitud: | 1000 m |
| Periodo de diseño: | 6 años |
| Suelo: | A-2-4 (0) |
| Descripción: | Arena |
| CBR: | 15 % |
| Contenido de cemento: | 15 % |
| Espesor: | 0,23 m |

Fuente: Carlos Quintanilla, 2012

San Juan Comalapa – San Martín Jilotepeque, Chimaltenango – Guatemala



Fuente: Instituto Salvadoreño del Cemento y el Concreto, 2000

Tabla 16 Propiedades del pavimento Unicapa del tramo de Pirita, Panamá

| Panamá | |
|-----------------------|--------|
| Tramo: | Pirita |
| Construcción: | 2005 |
| Longitud: | 300 m |
| Contenido de cemento: | 15% |
| Espesor: | 0,20 m |

Fuente: Carlos Quintanilla, 2012

Este país no se pudo encontrar fotos del lugar con el pavimento Unicapa.

2.7.14. Experiencia en Bolivia sobre el pavimento Unicapa

En el país existen interesantes experiencias en el uso de suelo cemento, especialmente mezclado en planta. Los tramos de la carretera Santa Cruz – Puerto Suárez que tienen capa de rodadura de pavimento rígido, tienen especificada una capa sub-base de suelo-cemento mezclada en planta, que se ha construido normalmente y alcanzando las resistencias de diseño en los tramos San José – Roboré; Roboré – El Carmen; El Tinto – San José y la parte de pavimento rígido de Paraíso – El Tinto.

En cuanto al suelo-cemento mezclado en sitio, el IBCH impulsó un tramo experimental en Santa Cruz, en la Circunvalación de Saavedra, realizado en coordinación con el

SEPCAM de Santa Cruz, el Comando de Ingeniería del ejército, las cuatro fábricas de cemento del país y la Alcaldía de Saavedra. Este tramo se realizó con el equipo pulvimezclador del COMANING, mezclando diversos tipos de materiales y se encuentra en operación con un revestimiento de tratamiento superficial desde hace más de dos años.

En cuanto al uso de pavimentos Unicapa, SOBOCE realizó junto al IBCH un tramo de prueba en la localidad de “Alto Limanipata”, zona rural en la cual existe un importante tráfico de volquetas que transportan áridos, con el barrio “Las Nieves” al que se tiene acceso por la avenida periférica o la autopista La Paz – El Alto, por lo que el tráfico es mayor al que se puede esperar en una zona rural típica.

Para el diseño, puesto que no se cuenta con un estudio de tráfico a detalle, se ha utilizado el conteo interno de la planta de áridos San Roque, volquetas de las cuales se tiene además los pesos por eje, siendo el total 31 volquetas cargadas para el carril de diseño, con un peso estimado de 25 toneladas para configuración de eje delantero simple (7 t) y trasero tándem (18 t).

A continuación, se mostrará una tabla con las descripciones y propiedades de los tramos realizados en Bolivia.

Tabla 17 Propiedades del pavimento Unicapa del tramo de La Paz, Bolivia

| Bolivia | |
|------------------------------|--|
| Tramo: | Alto Limanipata, La Paz |
| Construcción: | Noviembre, 2010 |
| Longitud: | 100 m |
| Periodo de diseño: | 5 años |
| Trafico: | 31 repeticiones por carga por día (camiones de 2 y 3 ejes) |
| Suelo: | A-1-a (0); A-1-b (0) |
| Descripción: | Arena gruesa |
| CBR: | 21 % |
| Contenido de cemento: | 15 % |
| Cemento: | Portland IP- 30 |
| Espesor: | 0,25 |
| Resistencia a la compresión: | 7,00 MPa → 71,38 kg/cm ² |
| Resistencia a la flexión: | 1,85 MPa → 18,86 kg/cm ² |
| Resistencia a la abrasión: | 40 % |

Fuente: Carlos Quintanilla, 2012

Alto Limanipata, La Paz – Bolivia



Fuente: Instituto Boliviano del Cemento y el Hormigón, 2003

Tabla 18 Propiedades del pavimento Unicapa del tramo Tarabuco, Chuquisaca

| Bolivia | |
|------------------------------|--|
| Tramo: | Lamboyo, Tarabuco – Zundañez, Chuquisaca |
| Construcción: | Noviembre, 2011 |
| Longitud: | 340 m |
| Periodo de diseño: | 10 años |
| Tráfico: | 164 repeticiones por carga por día (bus, camiones de 2 y 3 ejes) |
| Suelo: | A-1-b (0) |
| Descripción: | Arena gruesa |
| CBR: | 21 % |
| Contenido de cemento: | 15 % |
| Cemento: | Portland IP- 30 |
| Espesor: | 0,20 m |
| Resistencia a la compresión: | 10,90 MPa → 111,15 kg/cm ² |

Fuente: Carlos Quintanilla, 2012

Lamboyo, Tarabuco – Zundañez Chuquisaca – Bolivia



Fuente: Instituto Boliviano del Cemento y el Hormigón, 2003

2.8. MARCO NORMATIVO

Actualmente, existen varias normativas, pero se realizará el siguiente proyecto con las normas de AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials), ASTM (American Society for Testing and Materials) y la Norma Boliviana NB-011.

2.9. ANÁLISIS Y TENDENCIAS

Se tomó conocimiento que el pavimento Unicapa es un nuevo método que sirve para el mejoramiento de los caminos rurales, por tanto, en el departamento de Tarija no existe algún camino que se haya diseñado y darle uso evidente.

2.10. POSICIÓN DEL INVESTIGADOR

Se puede verificar que en nuestro país existen muchos caminos de desarrollo (rurales) que no tienen una buena estructura que ofrezca un transporte seguro lo cual dificulta la libre

transitabilidad entre las comunidades viéndose afectados el desarrollo económico y social en cualquiera de estas regiones, esto nos resulta una implementación del pavimento como una alternativa para la red vial no pavimentada de manera sencilla siendo el pavimento Unicapa una mezcla sencilla compuesta de cemento y suelo subrasante a través de un proceso de compactación de una capa.

Asimismo, esta alternativa de solución presenta métodos de bajo costo y durables con referencias a otros tipos de pavimento que necesitan mantenimiento como ser el ripiado.

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA DE APLICACIÓN

3.1. INTRODUCCIÓN

Para el desarrollo de la investigación se realizaron pruebas de laboratorio identificados en tres diferentes tramos los cuales están ubicados en zona de Cercado del departamento de Tarija.

Asimismo, se describe el proceso de ensayos requeridos para el análisis de las propiedades y características del pavimento Unicapa como también un costo somero para formarse una idea de la factibilidad económica de la aplicación respecto al ripiado.

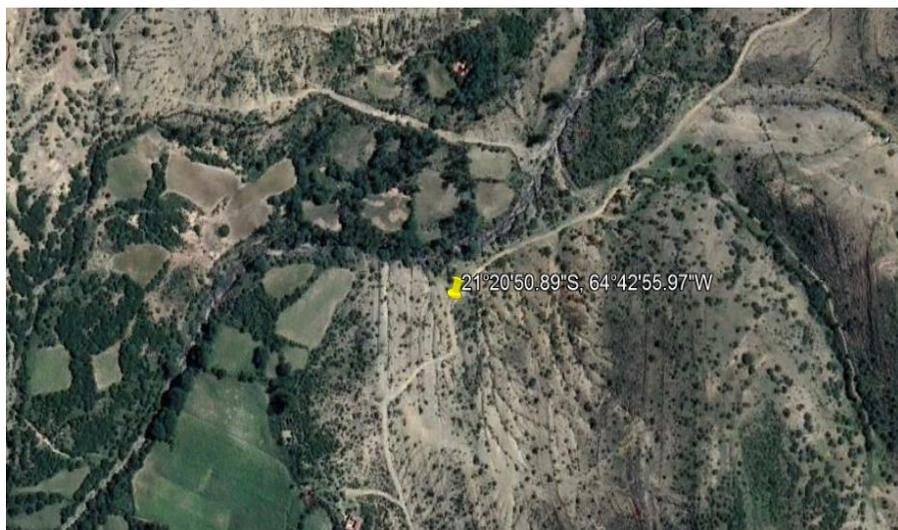
3.2. UBICACIÓN

Se tomaron muestras de suelo natural de tres diferentes lugares:

Muestra 1

El primer suelo, denominado “Muestra 1” se extrajo de la zona de Carachimayo, geográficamente se encuentra 21°20’50.89” latitud sur y 64°42’55.97” de longitud oeste.

Figura 25 Extracción de muestra del tramo de Carachimayo

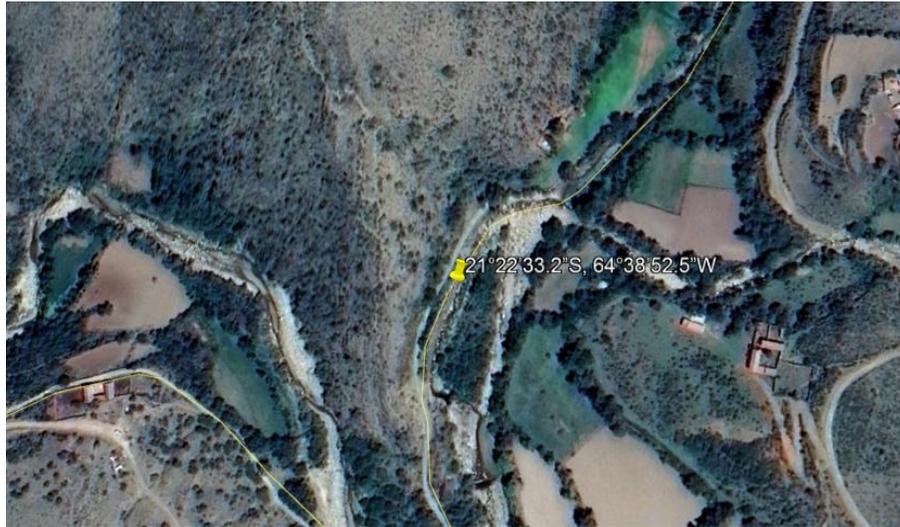


Fuente: Google Earth, s. f.

Muestra 2

El segundo suelo, denominado “Muestra 2” se extrajo de la zona de Sella quebrada, geográficamente se encuentra $21^{\circ}22'33.2''$ latitud sur y $64^{\circ}38'52.5''$ de longitud oeste.

Figura 26 Extracción de muestra del tramo de Sella Quebrada

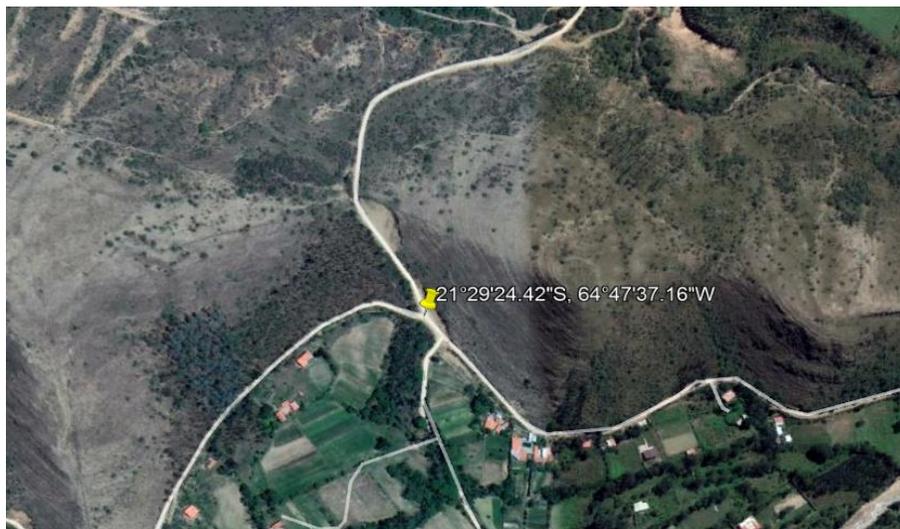


Fuente: Google Earth, s. f.

Muestra 3

El segundo suelo, denominado “Muestra 3” se extrajo de la zona de Obrajes, geográficamente se encuentra $21^{\circ}29'24.42''$ latitud sur y $64^{\circ}47'37.16''$ de longitud oeste.

Figura 27 Extracción de muestra del tramo de Obrajes



Fuente: Google Earth, s. f.

3.3. CARACTERIZACIÓN DE LOS SUELOS SUBRASANTES

Los resultados se muestran en las siguientes tablas que corresponden a cada uno de los tramos. Las planillas de ensayos de caracterización están en el ANEXO A.

Tabla 19 Muestra 1 - Carachimayo

| Muestra 1 – Carachimayo | | | | | |
|--------------------------------|-----------------------|--------------------|---------------------------|-----------------|-----------------|
| Ensayos | | Unidad | Ensayo 1 | Ensayo 2 | Promedio |
| Contenido de humedad | | % | 23,20 | 23,54 | 23,37 |
| Límites | Líquido | % | 26 | 27 | 26,27 |
| | Plástico | % | 17 | 19 | 18 |
| | Índice de plasticidad | % | 8 | 7 | 8 |
| | Índice de grupo | Adim. | 0 | 0 | 0 |
| Granulometría | % retenido de N° 4 | % | 74,79 | 78,14 | 76,46 |
| | % retenido de N° 10 | % | 68,96 | 71,39 | 70,17 |
| | % retenido de N° 40 | % | 52,74 | 56,97 | 54,86 |
| | % retenido de N° 200 | % | 34,65 | 36,76 | 35,70 |
| Compactación | Densidad máxima | gr/cm ³ | 2,08 | 2,08 | 2,08 |
| | Humedad óptima | % | 11,47 | 11,82 | 11,65 |
| Tipo de suelo | | | | | |
| AASHTO | | | A-4 ⁽⁰⁾ | | |
| SUCS | | | CL | | |

Fuente: Elaboración propia

Tabla 20 Muestra 2 - Sella Quebrada

| Muestra 2 – Sella quebrada | | | | | |
|-----------------------------------|-----------------------|--------------------|-----------------------------|-----------------|-----------------|
| Ensayos | | Unidad | Ensayo 1 | Ensayo 2 | Promedio |
| Contenido de humedad | | % | 5,98 | 5,93 | 5,96 |
| Límites | Líquido | % | 0 | 0 | 0,00 |
| | Plástico | % | 0 | 0 | 0 |
| | Índice de plasticidad | % | 0 | 0 | 0 |
| | Índice de grupo | Adim | 0 | 0 | 0,00 |
| Granulometría | % retenido de N° 4 | % | 66,35 | 61,87 | 64,11 |
| | % retenido de N° 10 | % | 55,53 | 49,01 | 52,27 |
| | % retenido de N° 40 | % | 42,72 | 32,65 | 37,68 |
| | % retenido de N° 200 | % | 7,84 | 4,11 | 5,97 |
| Compactación | Densidad máxima | gr/cm ³ | 1,98 | 1,90 | 1,94 |
| | Humedad óptima | % | 9,08 | 9,27 | 9,17 |
| Tipo de suelo | | | | | |
| AASHTO | | | A-1-b ⁽⁰⁾ | | |
| SUCS | | | SP | | |

Fuente: Elaboración propia

Tabla 21 Muestra 3 - Obrajes

| Muestra 3 – Obrajes | | | | | |
|----------------------------|-----------------------|--------------------|-----------------------------|-----------------|-----------------|
| Ensayos | | Unidad | Ensayo 1 | Ensayo 2 | Promedio |
| Contenido de humedad | | % | 7,85 | 7,49 | 7,67 |
| Límites | Líquido | % | 54 | 52 | 52,55 |
| | Plástico | % | 28 | 27 | 28 |
| | Índice de plasticidad | % | 26 | 24 | 25 |
| | Índice de grupo | Adim | 17 | 16 | 16,50 |
| Granulometría | % retenido de N° 4 | % | 100,00 | 100,00 | 100,00 |
| | % retenido de N° 10 | % | 99,74 | 99,76 | 99,75 |
| | % retenido de N° 40 | % | 99,02 | 99,30 | 99,16 |
| | % retenido de N° 200 | % | 97,50 | 98,30 | 97,90 |
| Compactación | Densidad máxima | gr/cm ³ | 1,67 | 1,68 | 1,68 |
| | Humedad óptima | % | 15,38 | 14,89 | 15,14 |
| Tipo de suelo | | | | | |
| AASHTO | | | A-7-5₍₁₇₎ | | |
| SUCS | | | CH | | |

Fuente: Elaboración propia

3.4. CARACTERIZACIÓN DEL RIPIADO

A continuación, se muestra una tabla de resumen de los resultados de los ensayos realizados y su clasificación correspondiente. Las planillas de ensayos de caracterización están en el ANEXO B.

Tabla 22 Caracterización del ripiado

| Muestra – Ripiado | | | | | |
|--------------------------|----------------------|--------------------|--------------------------|-----------------|-----------------|
| Ensayo | | Unidad | Ensayo 1 | Ensayo 2 | Promedio |
| Granulometría | % retenido de N° 4 | % | 43,08 | 38,86 | 40,97 |
| | % retenido de N° 10 | % | 37,10 | 30,12 | 33,61 |
| | % retenido de N° 40 | % | 10,19 | 19,76 | 14,98 |
| | % retenido de N° 200 | % | 0,76 | 0,76 | 0,76 |
| Compactación | Densidad máxima | gr/cm ³ | 2,21 | 2,21 | 2,21 |
| | Humedad óptima | % | 5,40 | 5,02 | 5,21 |
| CBR | Resistencia | kg/cm ² | 24,59 | 22,48 | 23,53 |
| Tipo de suelo | | | | | |
| AASHTO | | | A-4₍₀₎ | | |

Fuente: Elaboración propia

3.5. CARACTERIZACIÓN DEL CEMENTO

Se realizaron los siguientes ensayos, que muestra en la siguiente tabla:

Tabla 23 Caracterización del cemento

| Caracterización del cemento | | |
|-----------------------------|---------|--------------------|
| Ensayos | Valores | Unidad |
| Finura del cemento | 2,33 | % |
| Peso específico del cemento | 3,04 | gr/cm ³ |

Fuente: Elaboración propia

Las planillas de ensayos de caracterización están en el ANEXO C.

3.6. HUMEDAD ÓPTIMA DEL PAVIMENTO UNICAPA

Se realizó el ensayo de Compactación Proctor Modificado T-180 (AASHTO), este método controla los procesos de compactación que se realizan en laboratorio, cuando se busca determinar la relación entre el contenido de humedad y peso volumétrico seco del suelo, para que con dichos datos se pueda definir una curva de compactación.

La norma de AASHTO T-180 se describen cuatro procedimientos alternativos:

Método A – molde de 100mm de diámetro: suelo que pasa por el tamiz de 4,75 mm (N°4).

Método B – molde de 150mm de diámetro: suelo que pasa por el tamiz de 4,75 mm (N°4).

Método C – molde de 100mm de diámetro: suelo que pasa por el tamiz de 19 mm (N°4).

Método D – molde de 150mm de diámetro: suelo que pasa por el tamiz de 19 mm (N°4).

Este método se realizó con la compactación del método C con la mezcla del suelo más el 15 % de cemento óptimo, con el objetivo de encontrar su humedad óptima y densidad máxima de cada uno de los suelos a analizar.

Se realizó el ensayo con un martillo de 10 lb (4.54 Kg), altura de caída de 18”, 56 golpes por capa y compactado en 5 capas con un molde de 6” (15.24 cm) de diámetro y de 4.59” (11.64 cm) de altura y el collarín de igual diámetro y de 2” de altura.

Preparación de la muestra de suelo subrasante

La muestra extraída es metida al horno por un tiempo de 24 horas hasta que se vuelva desmenuzable. Se disgregó los terrones, evitando reducir el tamaño natural de las partículas.

Tamización de la muestra

Teniendo la muestra el suelo pasó por el tamiz N° 3/4, para obtener un peso de muestra de 5 kg. por punto, es decir, que sería un peso total de 25 kg, para obtener unos 5 puntos como máximo y poder formar una curva de compactación.

Se pesó el molde limpio sin collarín y sus dimensiones para determinar el volumen del molde.

Mezcla de suelo-cemento

La muestra de 5 kilogramos, debe contener el 15% de cemento del peso total, teniendo así, 750 gramos de cemento y el restante de la muestra de suelo.

Figura 28 Suelo más cemento



Fuente: Elaboración propia

En una fuente se mezcló uniformemente para luego agregar agua y se procedió a mezclar muy bien hasta lograr que la mezcla se encuentre homogeneizada.

Figura 29 Mezcla de suelo y cemento



Fuente: Elaboración propia

Compactación de la mezcla de suelo-cemento

Al llenar el molde la muestra se fue dividiendo en 5 porciones (previamente ya armado) y por cada capa se le aplicó el proceso de compactación con 56 golpes de pistón, uniformemente distribuidos en el molde de 100 mm.

Se repitió por 5 veces la operación anterior, al compactar la última capa debe quedar un pequeño exceso de material por sobre el borde del material del molde.

Figura 30 Compactación T-180



Fuente: Elaboración propia

Enrasado de la muestra suelo-cemento al borde del molde

Una vez acabada la compactación, se retira el collarín y se enrasa cuidadosamente el suelo con la regla al nivel del borde del molde, rellenando cualquier concavidad superficial formada eventualmente con suelo que haya quedado restante.

Con una brocha se limpia el molde de posible suelo suelto que se pudiese adherir en el exterior, para después pesar el molde con la muestra compactada.

Figura 31 Enrasado del molde



Fuente: Elaboración propia

Extracción de una muestra para el cálculo de la humedad del suelo

Se extrae una muestra representativa del suelo compactado de la parte central del molde y colocando en una tara (la tara fue previamente pesada) para pesarlo, esta tara con muestra se secó en el horno por 24 horas y volvió a pesarlo encontrando así, la humedad del suelo compactado.

Figura 32 Extracción de una pequeña muestra



Fuente: Elaboración propia

Figura 33 Muestra para obtener el contenido de humedad



Fuente: Elaboración propia

El ensayo de compactación se realiza 5 veces para tener como resultado puntos, que tendrán diferentes cantidades de agua con la condición más seca del suelo hasta la más humedad (4 %, 8 %, 12 %, 16 % y 20 %); de este modo se genera una gráfica donde se logra encontrar la cantidad de agua requerida para el máximo de compactación se refiera como humedad óptima.

Este procedimiento se repitió 3 veces a los tramos extraídos. Se puede observar la planilla de datos de resultado en el ANEXO D.

3.6.1. Valores de la humedad óptima al 15% de cemento

Tabla 24 Resumen de valores de compactación

| Valores de humedad óptima | | |
|---------------------------|--------------------|---|
| Tramo | Humedad óptima (%) | Densidad relativa (gr/cm ³) |
| Carachimayo | 10,08 | 1,99 |
| Sella Quebrada | 9,08 | 2,04 |
| Obrajes | 15,44 | 1,77 |

Fuente: Elaboración Propia

Con estos datos encontrados, se inició la elaboración de probetas cilíndricas y vigas de las tres muestras con la humedad óptima y la densidad máxima de cada muestra más el 15% de cemento.

3.7. ELABORACIÓN DE ESPECÍMENES

Debido a que en los pavimentos Unicapa no se tiene una normativa que especifique la práctica de moldeo de especímenes de prueba, se plantea en los siguientes una propuesta fundamentada en las características de los pavimentos Unicapa de alto desempeño del Instituto Salvadoreño de Cemento y Concreto (ISCYC), es decir: estos pavimentos desde el punto de vista constructivo califican como materiales de compactación dinámica, ya que por su relación agua/cemento es muy baja, no pueden ser colocador porque no tiene fluidez.

Para la elaboración de especímenes y evaluando la resistencia se realizó en función de la energía de compactación se propuso utilizar:

Norma AASHTO T180 “Relaciones de peso unitario – humedad en los suelos – método modificado”

3.8. PROCEDIMIENTO DE ELABORACIÓN DE PROBETAS CILÍNDRICAS

Se realizó el ensayo de Compactación Proctor Modificado T180 (AASHTO), este método controla los procesos de compactación que se realizan en laboratorio, cuando se busca determinar la relación entre el contenido de humedad y peso volumétrico seco del suelo, para que con dichos datos se pueda definir una curva de compactación.

Se utilizó el método C del ensayo de Compactación de Proctor Modificado T180. Encontrando los valores de humedad óptima se hacen las mezclas de suelo y cemento para elaborar las probetas y así, determinar la resistencia a compresión.

Se utilizó un molde de 6" x 12" para elaborar los especímenes y con un martillo de 10 lb (4,54 Kg.), con una altura de caída de 18", dichas probetas fueron prestados del laboratorio de hormigón.

Con estas dimensiones de molde se cumple la relación de esbeltez necesaria y la relación del diámetro y tamaño máximo del agregado contenido en el suelo.

Engrasar al molde de la probeta

El molde se les aplicó en sus caras interiores una capa delgada de aceite para autos con la ayuda de una brocha incluyendo la placa plana con el objetivo que la muestra no llegue a pegar y evitar que existiera pérdidas considerables.

Figura 34 Brocha y aceite



Fuente: Imágenes Google

Preparación de la muestra de la subrasante

La muestra extraída es metida al horno por un tiempo de 24 horas hasta que se vuelva desmenuzable. Se disgregó los terrones, evitando reducir el tamaño natural de las partículas.

La capacidad volumétrica del molde se obtuvo a través de sus dimensiones para la mezcla el suelo natural de subrasante con el 15 % de cemento de 1,65 kilogramos peso parcial teniendo un peso total de 11 kilogramos.

Figura 35 Mezcla total del espécimen, suelo y cemento



Fuente: Elaboración propia

En una fuente se mezcló uniformemente el suelo.

Figura 36 Mezcla homogénea



Fuente: Elaboración propia

Adición del agua a la mezcla de suelo-cemento

Se agregó la humedad óptima obtenida de la curva de compactación del suelo respectivo más el cemento y debe de mezclar homogéneamente y evitar que se hicieran grumos.

Figura 37 Adición del agua a la mezcla



Fuente: Elaboración propia

Compactación de las probetas cilíndricas

Con la mezcla lista se procedió al moldeo de los especímenes, compactando de modo continuo para que se tenga 10 capas de 74 golpes por capa. Teniendo el cuidado de que la mezcla mantenga la humedad necesaria, durante el proceso de compactación, cubriéndola con un plástico.

Una vez acabada la compactación, se enrasa cuidadosamente al borde del molde, rellenando cualquier concavidad formada eventualmente con suelo que haya quedado restante.

Con una brocha se limpia el molde de posible suelo suelto que se pudiese adherir en el exterior y se deja el espécimen elaborado por un periodo de 30 minutos antes de retirar el molde

Por último, se procedió a desmoldar la muestra teniendo como resultado una probeta.

Figura 38 Probeta de suelo - cemento



Fuente: Elaboración propia

Curado de las probetas cilíndricas

Cada probeta al momento de desmoldar se agrega agua a los especímenes con la ayuda del rociador para que sea la distribución uniforme en todo el cuerpo de la probeta, asegurando que el curado sea adecuado ya que el cemento necesita ser hidratado y así garantizar el endurecimiento del suelo – cemento, procedimiento que se realizó durante 28 días 3 veces al día, los días sábados y domingos que no se tenían acceso al laboratorio se procedía a humedecer con abundante agua para luego ser cubierto por una bolsa plástica en su totalidad, para evitar que la humedad se evaporara y produzca fisuras debilitando al espécimen.

Figura 39 Rociador



Fuente: Elaboración propia

Se elaboró 15 probetas para cada suelo y pasada los 28 días, se lleva a la prensa hidráulica para calcular un esfuerzo de compresión obteniendo los valores necesarios para el objetivo de la investigación.

3.9. PROCEDIMIENTO DE ELABORACIÓN DE VIGAS

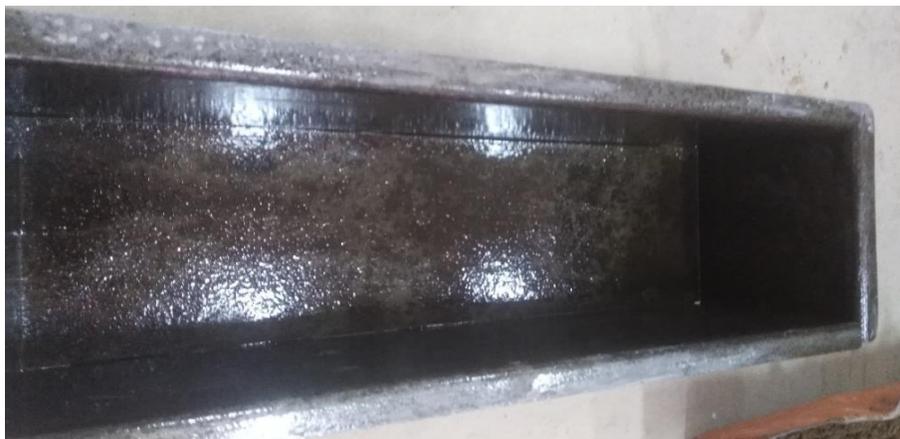
Con los valores de humedad óptima y densidad máxima se hacen las mezclas de suelo subrasante y cemento para elaborar las vigas y así, determinar la resistencia a flexión.

El molde que se utilizó para elaborar los especímenes, tiene las siguientes dimensiones: 15 cm x 15 cm x 50 cm y con un martillo de 10 lb (4,54 Kg.), altura de caída de 18” teniendo una cantidad de muestra total de 30 kilogramos.

Engrasar al molde de la viga

El molde se le aplicó en sus caras interiores una capa delgada de aceite para autos con la ayuda de una brocha incluyendo la placa plana con el objetivo que la muestra no llegue a pegar y evitar que existiera pérdidas considerables.

Figura 40 Molde de viga



Fuente: Elaboración propia

Preparación de la muestra de la subrasante

La muestra extraída es metida al horno por un tiempo de 24 horas hasta que se vuelva desmenuzable. Se disgregó los terrones, evitando reducir el tamaño natural de las partículas.

La capacidad volumétrica del molde se obtuvo a través de sus dimensiones para la mezcla el suelo natural de subrasante con el 15 % de cemento de 4.5 kilogramos peso parcial teniendo un peso total de 30 kilogramos. En una bandeja grande se mezcló uniformemente el suelo.

Figura 41 Suelo - cemento



Fuente: Elaboración propia

Adición del agua a la mezcla de suelo-cemento

Se agregó el porcentaje de la humedad óptima obtenida de la curva de compactación del suelo respectivo más el cemento para mezclarlo homogéneamente y evitar que se hicieran grumos.

Figura 42 Adición del agua al suelo - cemento



Fuente: Elaboración propia

Compactación de las vigas

Procedió compactar de modo a que se tenga 10 capas de 178 golpes por capa. Teniendo el cuidado de que la mezcla mantenga la humedad necesaria, durante el proceso de compactación, cubriéndola con un plástico.

Figura 43 Compactación de la viga



Fuente: Elaboración propia

Una vez acabada la compactación, se enrasa cuidadosamente el suelo compactado del molde, rellenando cualquier concavidad formada eventualmente con suelo que haya quedado restante.

Con una brocha se limpia el molde de posible suelo suelto que se pudiese adherir en el exterior.

Por último, se procedió a desmoldar la muestra teniendo como resultado una viga.

Figura 44 Viga de suelo - cemento



Fuente: Elaboración propia

Curado de las vigas

Cada viga al momento de desmoldar se agrega agua a los especímenes con la ayuda del rociador para que sea la distribución uniforme en todo el cuerpo de la probeta, asegurando que el curado sea adecuado ya que el cemento necesita ser hidratado y así garantizar el endurecimiento del suelo – cemento, procedimiento que se realizó durante 28 días 3 veces al día, los días sábados y domingos que no se tenían acceso al laboratorio se procedía a humedecer con abundante agua para luego ser cubierto por una bolsa plástica en su totalidad, para evitar que la humedad se evaporara y produzca fisuras debilitando al espécimen.

Figura 45 Rociador



Fuente: Imágenes Google

Se elaboró 15 vigas para cada suelo y pasada los 28 días, se lleva a la prensa hidráulica para que calcule el esfuerzo de flexión obteniendo los valores necesarios para el objetivo de la investigación.

3.10. ENSAYO DE ROTURA DE PROBETAS CILÍNDRICAS A COMPRESIÓN

El ensayo se realizó en las instalaciones de la Universidad Autónoma Juan Misael Saracho en el laboratorio de Hormigones.

La resistencia a compresión fue determinada mediante una prensa mecánica que aplica cargas a una razón uniforme con una capacidad máxima de 1000 KN. La carga que se aplica al espécimen se indica en forma digital en la máquina de ensayo.

El ensayo consiste en aplicar una carga axial de compresión al cilindro moldeado a una razón uniforme antes que la falla ocurra. (Véase ANEXO E)

Figura 46 Prueba de resistencia en compresión



Fuente: Elaboración propia

Figura 47 Rotura de la probeta



Fuente: Elaboración propia

3.10.1. Valores de esfuerzo de las probetas cilíndricas

Tabla 25 Valores de esfuerzo de rotura en probetas cilíndricas - Carachimayo

| N° | F. de Vaciado | F. de Rotura | Edad (días) | Altura (cm) | Diámetro (cm) | Área (cm ²) | Carga (KN) | Esfuerzo | |
|-------------------|---------------|--------------|-------------|-------------|---------------|-------------------------|------------|-------------|-----------------------|
| | | | | | | | | (MPa) | (Kg/cm ²) |
| 1 | 23/9/2019 | 21/10/2019 | 28 | 30,00 | 15,20 | 181,46 | 76,50 | 4,21 | 42,93 |
| 2 | 23/9/2019 | 21/10/2019 | 28 | 29,98 | 15,20 | 181,46 | 75,60 | 4,16 | 42,42 |
| 3 | 23/9/2019 | 21/10/2019 | 28 | 29,95 | 15,20 | 181,46 | 74,70 | 4,12 | 42,01 |
| 4 | 23/9/2019 | 21/10/2019 | 28 | 30,00 | 15,20 | 181,46 | 77,20 | 4,52 | 46,09 |
| 5 | 23/9/2019 | 21/10/2019 | 28 | 29,95 | 15,20 | 181,46 | 76,10 | 4,68 | 47,72 |
| 6 | 23/9/2019 | 21/10/2019 | 28 | 29,98 | 15,20 | 181,46 | 75,20 | 4,53 | 46,19 |
| 7 | 24/9/2019 | 22/10/2019 | 28 | 30,00 | 15,20 | 181,46 | 76,00 | 4,21 | 42,93 |
| 8 | 24/9/2019 | 22/10/2019 | 28 | 30,00 | 15,20 | 181,46 | 76,60 | 4,06 | 41,40 |
| 9 | 24/9/2019 | 22/10/2019 | 28 | 29,95 | 15,20 | 181,46 | 75,60 | 4,60 | 46,96 |
| 10 | 24/9/2019 | 22/10/2019 | 28 | 29,98 | 15,20 | 181,46 | 75,60 | 4,19 | 42,68 |
| 11 | 24/9/2019 | 22/10/2019 | 28 | 29,95 | 15,20 | 181,46 | 76,30 | 4,14 | 42,22 |
| 12 | 25/9/2019 | 23/10/2019 | 28 | 30,00 | 15,20 | 181,46 | 76,10 | 4,32 | 44,05 |
| 13 | 25/9/2019 | 23/10/2019 | 28 | 30,00 | 15,20 | 181,46 | 75,60 | 4,60 | 46,91 |
| 14 | 25/9/2019 | 23/10/2019 | 28 | 29,98 | 15,20 | 181,46 | 75,90 | 4,61 | 46,96 |
| 15 | 25/9/2019 | 23/10/2019 | 28 | 29,98 | 15,20 | 181,46 | 76,20 | 4,37 | 44,56 |
| PROMEDIO = | | | | | | | | 4,35 | 44,40 |

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 26 Valores de esfuerzo de rotura en probetas cilíndricas - Sella Quebrada

| N° | F. de Vaciado | F. de Rotura | Edad (días) | Altura (cm) | Diámetro (cm) | Área (cm ²) | Carga (KN) | Esfuerzo | |
|-------------------|---------------|--------------|-------------|-------------|---------------|-------------------------|------------|-------------|-----------------------|
| | | | | | | | | (MPa) | (Kg/cm ²) |
| 1 | 26/9/2019 | 24/10/2019 | 28 | 30,00 | 15,2 | 181,46 | 94,4 | 5,95 | 60,67 |
| 2 | 26/9/2019 | 24/10/2019 | 28 | 29,78 | 15,2 | 181,46 | 118,8 | 6,54 | 66,69 |
| 3 | 26/9/2019 | 24/10/2019 | 28 | 29,95 | 15,2 | 181,46 | 110,2 | 6,07 | 61,90 |
| 4 | 26/9/2019 | 24/10/2019 | 28 | 29,95 | 15,2 | 181,46 | 96,2 | 6,02 | 61,39 |
| 5 | 26/9/2019 | 24/10/2019 | 28 | 29,95 | 15,2 | 181,46 | 120,6 | 6,64 | 67,71 |
| 6 | 26/9/2019 | 24/10/2019 | 28 | 29,95 | 15,2 | 181,46 | 98,6 | 6,06 | 61,79 |
| 7 | 29/9/2019 | 27/10/2019 | 28 | 30,00 | 15,2 | 181,46 | 103,2 | 6,0 | 61,64 |
| 8 | 29/9/2019 | 27/10/2019 | 28 | 30,00 | 15,2 | 181,46 | 108,4 | 6,3 | 64,55 |
| 9 | 29/9/2019 | 27/10/2019 | 28 | 29,95 | 15,2 | 181,46 | 109,6 | 6,4 | 64,75 |
| 10 | 29/9/2019 | 27/10/2019 | 28 | 29,98 | 15,2 | 181,46 | 100,9 | 6,25 | 63,68 |
| 11 | 29/9/2019 | 27/10/2019 | 28 | 29,98 | 15,2 | 181,46 | 105,8 | 6,31 | 64,29 |
| 12 | 30/9/2019 | 28/10/2019 | 28 | 29,90 | 15,2 | 181,46 | 109,0 | 6,05 | 61,64 |
| 13 | 30/9/2019 | 28/10/2019 | 28 | 30,00 | 15,2 | 181,46 | 105,3 | 6,33 | 64,55 |
| 14 | 30/9/2019 | 28/10/2019 | 28 | 30,00 | 15,2 | 181,46 | 103,4 | 6,35 | 64,75 |
| 15 | 30/9/2019 | 28/10/2019 | 28 | 30,00 | 15,2 | 181,46 | 107,4 | 6,05 | 61,72 |
| PROMEDIO = | | | | | | | | 6,22 | 63,45 |

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 27 Valores de esfuerzo de rotura en probetas cilíndricas - Obrajes

| N° | F. de Vaciado | F. de Rotura | Edad (días) | Altura (cm) | Diámetro (cm) | Área (cm ²) | Carga (KN) | Esfuerzo | |
|-------------------|---------------|--------------|-------------|-------------|---------------|-------------------------|------------|-------------|-----------------------|
| | | | | | | | | (MPa) | (Kg/cm ²) |
| 1 | 1/10/2019 | 29/10/2019 | 28 | 30,00 | 15,20 | 181,46 | 39,60 | 2,18 | 22,23 |
| 2 | 1/10/2019 | 29/10/2019 | 28 | 29,98 | 15,20 | 181,46 | 36,90 | 2,03 | 20,70 |
| 3 | 1/10/2019 | 29/10/2019 | 28 | 30,00 | 15,20 | 181,46 | 38,20 | 2,10 | 21,41 |
| 4 | 1/10/2019 | 29/10/2019 | 28 | 29,98 | 15,20 | 181,46 | 37,30 | 2,05 | 20,90 |
| 5 | 1/10/2019 | 29/10/2019 | 28 | 30,00 | 15,20 | 181,46 | 40,30 | 2,22 | 22,64 |
| 6 | 2/10/2019 | 30/10/2019 | 28 | 30,00 | 15,20 | 181,46 | 39,20 | 2,16 | 22,03 |
| 7 | 2/10/2019 | 30/10/2019 | 28 | 30,00 | 15,20 | 181,46 | 38,70 | 2,13 | 21,72 |
| 8 | 2/10/2019 | 30/10/2019 | 28 | 30,00 | 15,20 | 181,46 | 39,00 | 2,15 | 21,87 |
| 9 | 2/10/2019 | 30/10/2019 | 28 | 29,98 | 15,20 | 181,46 | 38,20 | 2,10 | 21,45 |
| 10 | 2/10/2019 | 30/10/2019 | 28 | 30,00 | 15,20 | 181,46 | 37,40 | 2,06 | 21,01 |
| 11 | 3/10/2019 | 31/10/2019 | 28 | 30,00 | 15,20 | 181,46 | 38,60 | 2,12 | 21,65 |
| 12 | 3/10/2019 | 31/10/2019 | 28 | 30,00 | 15,20 | 181,46 | 38,90 | 2,14 | 21,86 |
| 13 | 3/10/2019 | 31/10/2019 | 28 | 29,98 | 15,20 | 181,46 | 39,40 | 2,17 | 22,13 |
| 14 | 3/10/2019 | 31/10/2019 | 28 | 30,00 | 15,20 | 181,46 | 39,00 | 2,15 | 21,87 |
| 15 | 4/10/2019 | 1/11/2019 | 28 | 29,98 | 15,20 | 181,46 | 38,60 | 2,13 | 21,68 |
| PROMEDIO = | | | | | | | | 2,13 | 21,68 |

Fuente: Elaboración Propia

3.11. ENSAYO DE ROTURA DE VIGAS A FLEXIÓN

El ensayo se realizó en las instalaciones de la Universidad Autónoma Juan Misael Saracho en el laboratorio de Hormigones.

La resistencia a flexión de las vigas fue determinada mediante una prensa mecánica con una capacidad máxima de 200 kN, que aplica cargas a una razón uniforme, esta prensa se encuentra muy bien calibrada y presenta una pantalla lo suficientemente grande donde se muestra la carga que se aplica al espécimen en el momento ensayo, lo cual puede ser lectura fácilmente. (Véase ANEXO E)

Figura 48 Prueba de resistencia en flexión



Fuente: Elaboración Propia

Figura 49 Rotura de viga



Fuente: Elaboración Propia

Tabla 28 Valores de esfuerzo de viga - Carachimayo

| N° | F. de Vaciado | F. de Rotura | Edad (días) | Altura (cm) | Ancho (cm) | Largo (cm) | Carga (KN) | Esfuerzo | |
|-------------------|---------------|--------------|-------------|-------------|------------|------------|------------|-------------|-----------------------|
| | | | | | | | | (MPa) | (Kg/cm ²) |
| 1 | 4/10/2019 | 1/11/2019 | 28 | 30,00 | 15,50 | 53,50 | 5,81 | 0,77 | 7,85 |
| 2 | 4/10/2019 | 1/11/2019 | 28 | 30,00 | 15,50 | 53,50 | 5,28 | 0,70 | 7,14 |
| 3 | 4/10/2019 | 1/11/2019 | 28 | 30,00 | 15,50 | 53,50 | 5,20 | 0,69 | 7,04 |
| 4 | 5/10/2019 | 2/11/2019 | 28 | 30,00 | 15,50 | 53,50 | 5,66 | 0,75 | 7,65 |
| 5 | 5/10/2019 | 2/11/2019 | 28 | 30,00 | 15,50 | 53,50 | 5,58 | 0,74 | 7,49 |
| 6 | 5/10/2019 | 2/11/2019 | 28 | 30,00 | 15,50 | 53,50 | 5,28 | 0,70 | 7,09 |
| 7 | 5/10/2019 | 2/11/2019 | 28 | 30,00 | 15,50 | 53,50 | 5,43 | 0,72 | 7,34 |
| 8 | 7/10/2019 | 4/11/2019 | 28 | 30,00 | 15,50 | 53,50 | 5,62 | 0,74 | 7,57 |
| 9 | 7/10/2019 | 4/11/2019 | 28 | 30,00 | 15,50 | 53,50 | 5,20 | 0,72 | 7,29 |
| 10 | 7/10/2019 | 4/11/2019 | 28 | 30,00 | 15,50 | 53,50 | 5,35 | 0,71 | 7,21 |
| 11 | 7/10/2019 | 4/11/2019 | 28 | 30,00 | 15,50 | 53,50 | 5,51 | 0,73 | 7,46 |
| 12 | 8/10/2019 | 5/11/2019 | 28 | 30,00 | 15,50 | 53,50 | 5,43 | 0,72 | 7,34 |
| 13 | 8/10/2019 | 5/11/2019 | 28 | 30,00 | 15,50 | 53,50 | 5,62 | 0,74 | 7,57 |
| 14 | 8/10/2019 | 5/11/2019 | 28 | 30,00 | 15,50 | 53,50 | 5,28 | 0,70 | 7,14 |
| 15 | 9/10/2019 | 6/11/2019 | 28 | 30,00 | 15,50 | 53,50 | 5,35 | 0,71 | 7,21 |
| PROMEDIO = | | | | | | | | 0,72 | 7,36 |

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 29 Valores de esfuerzo de viga - Sella Quebrada

| N° | F. de Vaciado | F. de Rotura | Edad (días) | Altura (cm) | Ancho (cm) | Largo (cm) | Carga (KN) | Esfuerzo | |
|-------------------|---------------|--------------|-------------|-------------|------------|------------|------------|-------------|-----------------------|
| | | | | | | | | (MPa) | (Kg/cm ²) |
| 1 | 9/10/2019 | 6/11/2019 | 28 | 30,00 | 15,50 | 53,50 | 18,20 | 2,02 | 20,60 |
| 2 | 9/10/2019 | 6/11/2019 | 28 | 30,00 | 15,50 | 53,50 | 19,46 | 2,16 | 22,03 |
| 3 | 10/10/2019 | 7/11/2019 | 28 | 30,00 | 15,50 | 53,50 | 18,92 | 2,10 | 21,41 |
| 4 | 10/10/2019 | 7/11/2019 | 28 | 30,00 | 15,50 | 53,50 | 20,36 | 2,26 | 23,05 |
| 5 | 10/10/2019 | 7/11/2019 | 28 | 30,00 | 15,50 | 53,50 | 21,26 | 2,02 | 20,60 |
| 6 | 10/10/2019 | 7/11/2019 | 28 | 30,00 | 15,50 | 53,50 | 19,01 | 2,11 | 21,52 |
| 7 | 11/10/2019 | 8/11/2019 | 28 | 30,00 | 15,50 | 53,50 | 22,43 | 2,19 | 22,33 |
| 8 | 11/10/2019 | 8/11/2019 | 28 | 30,00 | 15,50 | 53,50 | 20,13 | 2,14 | 21,82 |
| 9 | 11/10/2019 | 8/11/2019 | 28 | 30,00 | 15,50 | 53,50 | 23,34 | 2,59 | 26,41 |
| 10 | 12/10/2019 | 9/11/2019 | 28 | 30,00 | 15,50 | 53,50 | 18,83 | 2,09 | 21,31 |
| 11 | 12/10/2019 | 9/11/2019 | 28 | 30,00 | 15,50 | 53,50 | 19,19 | 2,13 | 21,72 |
| 12 | 12/10/2019 | 9/11/2019 | 28 | 30,00 | 15,50 | 53,50 | 19,64 | 2,18 | 22,23 |
| 13 | 12/10/2019 | 9/11/2019 | 28 | 30,00 | 15,50 | 53,50 | 20,81 | 2,14 | 21,82 |
| 14 | 14/10/2019 | 11/11/2019 | 28 | 30,00 | 15,50 | 53,50 | 24,33 | 2,17 | 22,08 |
| 15 | 14/10/2019 | 11/11/2019 | 28 | 30,00 | 15,50 | 53,50 | 19,06 | 2,12 | 21,62 |
| PROMEDIO = | | | | | | | | 2,16 | 22,04 |

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 30 Valores de esfuerzo de viga - Obrajes

| N° | F. de Vaciado | F. de Rotura | Edad (días) | Altura (cm) | Ancho (cm) | Largo (cm) | Carga (KN) | Esfuerzo | |
|-------------------|---------------|--------------|-------------|-------------|------------|------------|------------|-------------|-----------------------|
| | | | | | | | | (MPa) | (Kg/cm ²) |
| 1 | 14/10/2019 | 11/11/2019 | 28 | 30,00 | 15,50 | 53,50 | 2,80 | 0,35 | 3,57 |
| 2 | 14/10/2019 | 11/11/2019 | 28 | 30,00 | 15,50 | 53,50 | 3,12 | 0,39 | 3,98 |
| 3 | 15/10/2019 | 12/11/2019 | 28 | 30,00 | 15,50 | 53,50 | 2,43 | 0,30 | 3,06 |
| 4 | 15/10/2019 | 12/11/2019 | 28 | 30,00 | 15,50 | 53,50 | 3,05 | 0,38 | 3,87 |
| 5 | 15/10/2019 | 12/11/2019 | 28 | 30,00 | 15,50 | 53,50 | 2,88 | 0,36 | 3,67 |
| 6 | 16/10/2019 | 13/11/2019 | 28 | 30,00 | 15,50 | 53,50 | 2,96 | 0,37 | 3,77 |
| 7 | 16/10/2019 | 13/11/2019 | 28 | 30,00 | 15,50 | 53,50 | 2,80 | 0,35 | 3,52 |
| 8 | 16/10/2019 | 13/11/2019 | 28 | 30,00 | 15,50 | 53,50 | 2,72 | 0,34 | 3,47 |
| 9 | 16/10/2019 | 13/11/2019 | 28 | 30,00 | 15,50 | 53,50 | 2,80 | 0,35 | 3,57 |
| 10 | 17/10/2019 | 14/11/2019 | 28 | 30,00 | 15,50 | 53,50 | 2,96 | 0,37 | 3,72 |
| 11 | 17/10/2019 | 14/11/2019 | 28 | 30,00 | 15,50 | 53,50 | 2,88 | 0,36 | 3,65 |
| 12 | 17/10/2019 | 14/11/2019 | 28 | 30,00 | 15,50 | 53,50 | 2,72 | 0,34 | 3,49 |
| 13 | 18/10/2019 | 15/11/2019 | 28 | 30,00 | 15,50 | 53,50 | 3,12 | 0,39 | 3,98 |
| 14 | 18/10/2019 | 15/11/2019 | 28 | 30,00 | 15,50 | 53,50 | 2,80 | 0,35 | 3,57 |
| 15 | 18/10/2019 | 15/11/2019 | 28 | 30,00 | 15,50 | 53,50 | 2,88 | 0,36 | 3,68 |
| PROMEDIO = | | | | | | | | 0,36 | 3,64 |

Fuente: Elaboración Propia

Las planillas de las pruebas de rotura en compresión y flexión realizadas en los laboratorios de la Universidad Autónoma Juan Misael Saracho se encuentran al final de esta investigación en la sección de ANEXOS E.

3.12. ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LOS VALORES DE PRUEBA DE RESISTENCIA

3.12.1. Estadística descriptiva de pruebas de compresión

3.12.1.1. Muestra 1 - Carachimayo

Tabla 31 Resumen estadístico para Carachimayo

| Descripción | Valores |
|---------------------------|---------|
| Recuento | 15 |
| Promedio | 44,40 |
| Mediana | 44,05 |
| Moda | 44,05 |
| Varianza | 4,80 |
| Desviación Estándar | 2,19 |
| Coefficiente de Variación | 4,93% |
| Mínimo | 41,40 |
| Máximo | 47,72 |
| Rango | 6,32 |
| Sesgo | 0,20 |
| Curtosis | -1,70 |
| Suma | 666,03 |

Fuente: StatGraphics Centurion XVI, s. f.

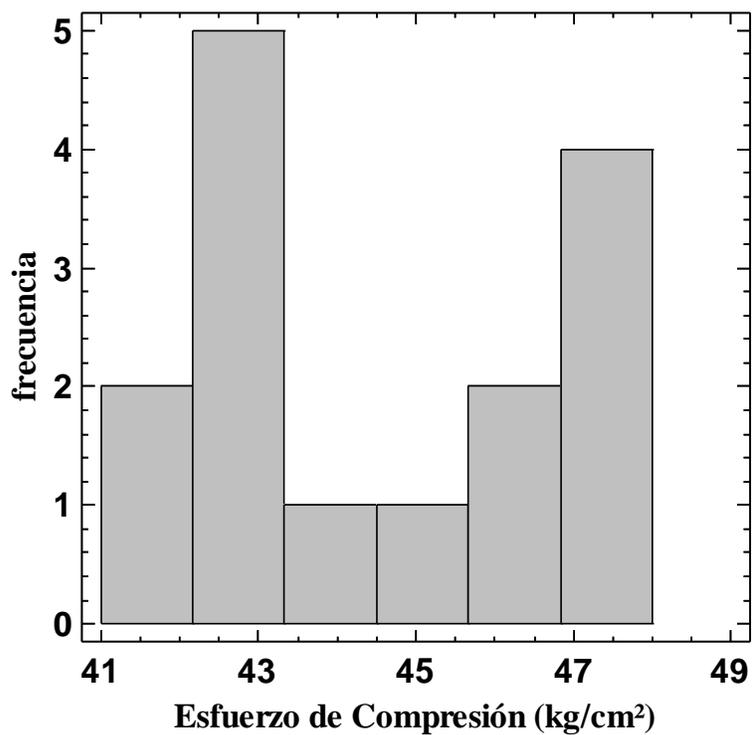
En este caso, el valor del sesgo estandarizado se encuentra dentro del rango esperado para datos provenientes una distribución normal. El valor de curtosis estandarizada se encuentra dentro del rango esperado para datos provenientes de una distribución normal.

Tabla 32 Tabla de frecuencias para Carachimayo

| Clase | Límite inferior | Límite superior | Punto medio | Frecuencia | Frecuencia relativa | Frecuencia acumulada | Frecuencia rel. acum. |
|-------|-----------------|-----------------|-------------|------------|---------------------|----------------------|-----------------------|
| | menor o igual | 41,0 | | 0 | 0,00 | 0 | 0,00 |
| 1 | 41,0 | 42,16 | 41,58 | 2 | 0,13 | 2 | 0,13 |
| 2 | 42,16 | 43,33 | 42,75 | 5 | 0,33 | 7 | 0,46 |
| 3 | 43,33 | 44,50 | 43,91 | 1 | 0,06 | 8 | 0,53 |
| 4 | 44,50 | 45,66 | 45,08 | 1 | 0,06 | 9 | 0,60 |
| 5 | 45,66 | 46,83 | 46,25 | 2 | 0,13 | 11 | 0,73 |
| 6 | 46,83 | 48,00 | 47,41 | 4 | 0,26 | 15 | 1,00 |
| | mayor de | 48,00 | | 0 | 0,00 | 15 | 1,00 |

Fuente: StatGraphics Centurion XVI, s. f.

Gráfica 2 Histograma de Carachimayo



Fuente: StatGraphics Centurion XVI, s. f.

3.12.1.2. Muestra 2 – Sella Quebrada

Tabla 33 Resumen estadístico para Sella Quebrada

| Descripción | Valores |
|---------------------------|---------|
| Recuento | 15 |
| Promedio | 63,07 |
| Mediana | 63,68 |
| Moda | 63,68 |
| Varianza | 5,50 |
| Desviación Estándar | 2,34 |
| Coefficiente de Variación | 3,71% |
| Mínimo | 59,65 |
| Máximo | 67,71 |
| Rango | 8,06 |
| Sesgo | 0,45 |
| Curtosis | -0,52 |
| Suma | 946,08 |

Fuente: StatGraphics Centurion XVI, s. f.

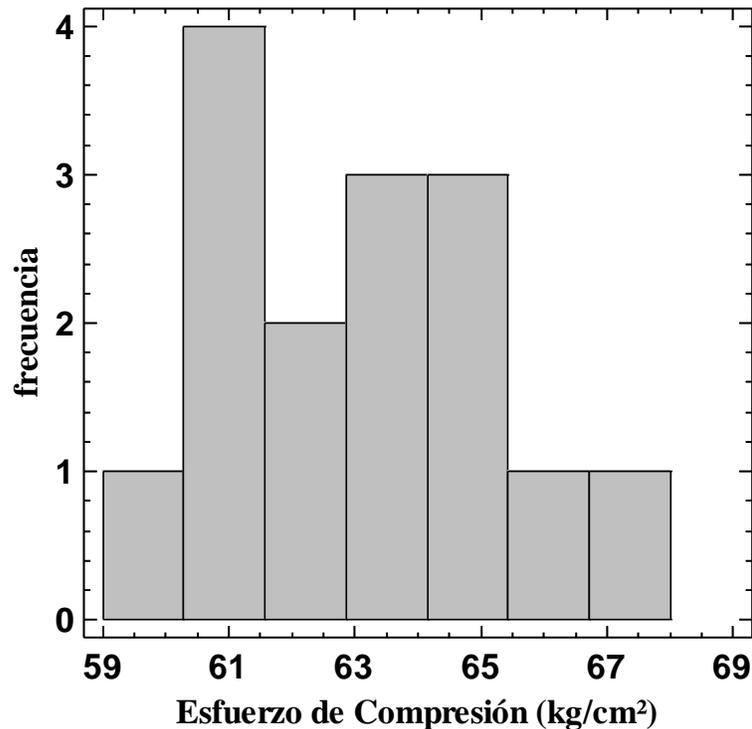
En este caso, el valor del sesgo estandarizado se encuentra dentro del rango esperado para datos provenientes una distribución normal. El valor de curtosis estandarizada se encuentra dentro del rango esperado para datos provenientes de una distribución normal.

Tabla 34 Tabla de frecuencias para Sella Quebrada

| Clase | Límite inferior | Límite superior | Punto medio | Frecuencia | Frecuencia relativa | Frecuencia acumulada | Frecuencia rel. acum. |
|-------|-----------------|-----------------|-------------|------------|---------------------|----------------------|-----------------------|
| | menor o igual | 59,00 | | 0 | 0,00 | 0 | 0,00 |
| 1 | 59,00 | 60,28 | 59,64 | 1 | 0,06 | 1 | 0,06 |
| 2 | 60,28 | 61,57 | 60,92 | 4 | 0,26 | 5 | 0,33 |
| 3 | 61,57 | 62,85 | 62,21 | 2 | 0,13 | 7 | 0,46 |
| 4 | 62,85 | 64,14 | 63,50 | 3 | 0,20 | 10 | 0,66 |
| 5 | 64,14 | 65,42 | 64,78 | 3 | 0,20 | 13 | 0,86 |
| 6 | 65,42 | 66,71 | 66,07 | 1 | 0,06 | 14 | 0,93 |
| 7 | 66,71 | 68,00 | 67,35 | 1 | 0,06 | 15 | 1,00 |
| | mayor de | 68,00 | | 0 | 0,00 | 15 | 1,00 |

Fuente: StatGraphics Centurion XVI, s. f.

Gráfica 3 Histograma de Sella Quebrada



Fuente: StatGraphics Centurion XVI, s. f.

3.12.1.3. Muestra 3 – Sella Quebrada

Tabla 35 Resumen estadístico para Obrajes

| Descripción | Valores |
|--------------------------|---------|
| Recuento | 15 |
| Promedio | 21,67 |
| Mediana | 21,72 |
| Moda | 21,87 |
| Varianza | 0,27 |
| Desviación Estándar | 0,52 |
| Coeficiente de Variación | 2,40% |
| Mínimo | 20,70 |
| Máximo | 22,64 |
| Rango | 1,94 |
| Sesgo | -0,29 |
| Curtosis | -0,04 |
| Suma | 325,15 |

Fuente: StatGraphics Centurion XVI, s. f.

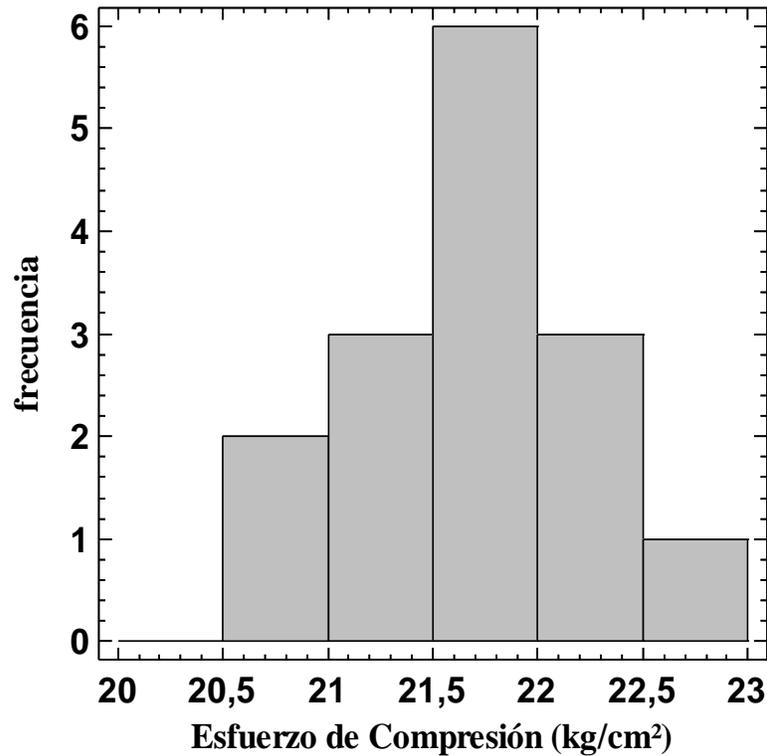
En este caso, el valor del sesgo estandarizado se encuentra dentro del rango esperado para datos provenientes una distribución normal. El valor de curtosis estandarizada se encuentra dentro del rango esperado para datos provenientes de una distribución normal.

Tabla 36 Tabla de frecuencias para Obrajes

| Clase | Límite inferior | Límite superior | Punto medio | Frecuencia | Frecuencia relativa | Frecuencia acumulada | Frecuencia rel. acum. |
|-------|-----------------|-----------------|-------------|------------|---------------------|----------------------|-----------------------|
| | menor o igual | 20,00 | | 0 | 0,00 | 0 | 0,00 |
| 1 | 20,00 | 20,50 | 20,25 | 0 | 0,00 | 0 | 0,00 |
| 2 | 20,50 | 21,00 | 20,75 | 2 | 0,13 | 2 | 0,13 |
| 3 | 21,00 | 21,50 | 21,25 | 3 | 0,20 | 5 | 0,33 |
| 4 | 21,50 | 22,00 | 21,75 | 6 | 0,40 | 11 | 0,73 |
| 5 | 22,00 | 22,50 | 22,25 | 3 | 0,20 | 14 | 0,93 |
| 6 | 22,50 | 23,00 | 22,75 | 1 | 0,06 | 15 | 1,00 |
| | mayor de | 23,00 | | 0 | 0,00 | 15 | 1,00 |

Fuente: StatGraphics Centurion XVI, s. f.

Gráfica 4 Histograma de Obrajes



Fuente: StatGraphics Centurion XVI, s. f.

3.12.2. Prueba de hipótesis de prueba de compresión

En esta investigación se realizó la prueba de hipótesis con el programa de StatGraphics Centurión XVI, dicho programa presenta 4 métodos para la realización de prueba hipótesis, en esta investigación sólo se aplicó con 2 métodos: Prueba de t y Chi – Cuadrado

3.12.2.1. Prueba de hipótesis para esfuerzo de compresión de Carachimayo

Media muestral = 44,40

Mediana muestral = 44,05

Desviación estándar de la muestra = 2,19

Prueba t

Hipótesis nula: media = 0.00

Alternativa: no igual

Estadístico t = 78,43

Valor-P = 0.00

Se rechaza la hipótesis nula para alfa = 0,05.

La prueba-t evalúa la hipótesis de que la media de Carachimayo es igual a 0.0 versus la hipótesis alterna de que la media de Carachimayo es no igual a 0.0. Debido a que el valor-P para esta prueba es menor que 0.05, se puede rechazar la hipótesis nula con un 95.0% de confianza.

Prueba chi-cuadrada

Hipótesis Nula: sigma = 1,00

Alternativa: no igual

Chi-cuadrado calculado = 67,30

Valor-P = 1,18E-8

Se rechaza la hipótesis nula para alfa = 0,05.

La prueba de chi-cuadrada evalúa la hipótesis nula de que la desviación estándar de esfuerzo 1 es igual a 1,0 versus la hipótesis alterna de que la desviación estándar de esfuerzo 1 es no igual a 1,0. Debido a que el valor-P para esta prueba es menor que 0,05, se puede rechazar la hipótesis nula con un 95,0% de confianza.

3.12.2.2. Prueba de hipótesis para esfuerzo de compresión de Sella Quebrada

Media muestral = 63,07

Mediana muestral = 63,68

Desviación estándar de la muestra = 2,34

Prueba t

Hipótesis Nula: media = 0.00

Alternativa: no igual

Estadístico t = 104,13

Valor-P = 0.00

Se rechaza la hipótesis nula para alfa = 0,05.

La prueba-t evalúa la hipótesis de que la media de Sella Quebrada es igual a 0,0 versus la hipótesis alterna de que la media de Sella Quebrada es no igual a 0,0. Debido a que el valor-P para esta prueba es menor que 0,05, se puede rechazar la hipótesis nula con un 95,0% de confianza.

Prueba chi-cuadrada

Hipótesis Nula: sigma = 1,00

Alternativa: no igual

Chi-cuadrado calculado = 77,03

Valor-P = 1,99E-10

Se rechaza la hipótesis nula para alfa = 0,05.

La prueba de chi-cuadrada evalúa la hipótesis nula de que la desviación estándar de Esfuerzo 2 es igual a 1,0 versus la hipótesis alterna de que la desviación estándar de Esfuerzo 2 es no igual a 1,0. Debido a que el valor-P para esta prueba es menor que 0,05, se puede rechazar la hipótesis nula con un 95,0% de confianza.

3.12.2.3. Prueba de hipótesis para esfuerzo de compresión de Obrajes

Media muestral = 21,67

Mediana muestral = 21,72

Desviación estándar de la muestra = 0,52

Prueba t

Hipótesis nula: media = 0

Alternativa: no igual

Estadístico t = 161,15

Valor-P = 0.00

Se rechaza la hipótesis nula para alfa = 0,05.

La prueba-t evalúa la hipótesis de que la media de Obrajes es igual a 0,0 versus la hipótesis alterna de que la media de Obrajes es no igual a 0,0. Debido a que el valor-P para esta prueba es menor que 0,05, se puede rechazar la hipótesis nula con un 95,0% de confianza.

Prueba chi-cuadrada

Hipótesis Nula: sigma = 1,00

Alternativa: no igual

Chi-cuadrado calculado = 3,79

Valor-P = 0,0068

Se rechaza la hipótesis nula para alfa = 0,05.

La prueba de chi-cuadrada evalúa la hipótesis nula de que la desviación estándar de Obrajes es igual a 1,0 versus la hipótesis alterna de que la desviación estándar de Obrajes es no igual a 1,0. Debido a que el valor-P para esta prueba es menor que 0,05, se puede rechazar la hipótesis nula con un 95,0% de confianza.

3.12.3. Estadística descriptiva de pruebas de flexión

3.12.3.1. Muestra 1 – Carachimayo

Tabla 37 Resumen estadístico para Carachimayo

| Descripción | Valores |
|---------------------------|---------|
| Recuento | 15 |
| Promedio | 7,35 |
| Mediana | 7,34 |
| Moda | 7.13 |
| Varianza | 0,054 |
| Desviación Estándar | 0,23 |
| Coefficiente de Variación | 3,17% |
| Mínimo | 7,04 |
| Máximo | 7,85 |
| Rango | 0,81 |
| Sesgo | 0,54 |
| Curtosis | -0,40 |
| Suma | 110,39 |

Fuente: StatGraphics Centurion XVI, s. f.

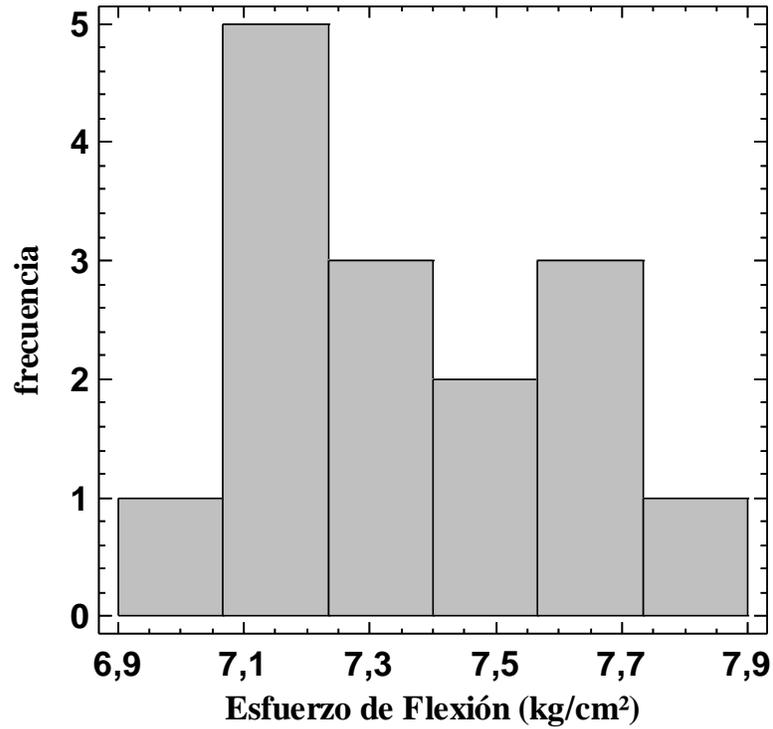
En este caso, el valor del sesgo estandarizado se encuentra dentro del rango esperado para datos provenientes una distribución normal. El valor de curtosis estandarizada se encuentra dentro del rango esperado para datos provenientes de una distribución normal.

Tabla 38 Tabla de frecuencias para Carachimayo

| Clase | Límite inferior | Límite superior | Punto medio | Frecuencia | Frecuencia relativa | Frecuencia acumulada | Frecuencia rel. acum. |
|-------|-----------------|-----------------|-------------|------------|---------------------|----------------------|-----------------------|
| | menor o igual | 6,90 | | 0 | 0,00 | 0 | 0,00 |
| 1 | 6,90 | 7,06 | 6,98 | 1 | 0,06 | 1 | 0,06 |
| 2 | 7,06 | 7,23 | 7,15 | 5 | 0,33 | 6 | 0,40 |
| 3 | 7,23 | 7,40 | 7,31 | 3 | 0,20 | 9 | 0,60 |
| 4 | 7,40 | 7,56 | 7,48 | 2 | 0,13 | 11 | 0,73 |
| 5 | 7,56 | 7,73 | 7,65 | 3 | 0,20 | 14 | 0,93 |
| 6 | 7,73 | 7,90 | 7,81 | 1 | 0,06 | 15 | 1,00 |
| | mayor de | 7,90 | | 0 | 0,00 | 15 | 1,00 |

Fuente: StatGraphics Centurion XVI, s. f.

Gráfica 5 Histograma para Carachimayo



Fuente: StatGraphics Centurion XVI, s. f.

3.12.3.2. Muestra 2 – Sella Quebrada

Tabla 39 Resumen estadístico para Sella Quebrada

| Descripción | Valores |
|---------------------------|---------|
| Recuento | 15 |
| Promedio | 23,62 |
| Mediana | 23,05 |
| Moda | 23,05 |
| Varianza | 6,69 |
| Desviación Estándar | 2,58 |
| Coefficiente de Variación | 10,95% |
| Mínimo | 20,60 |
| Máximo | 29,57 |
| Rango | 8,97 |
| Sesgo | 1,05 |
| Curtosis | 0,45 |
| Suma | 354,31 |

Fuente: StatGraphics Centurion XVI, s. f.

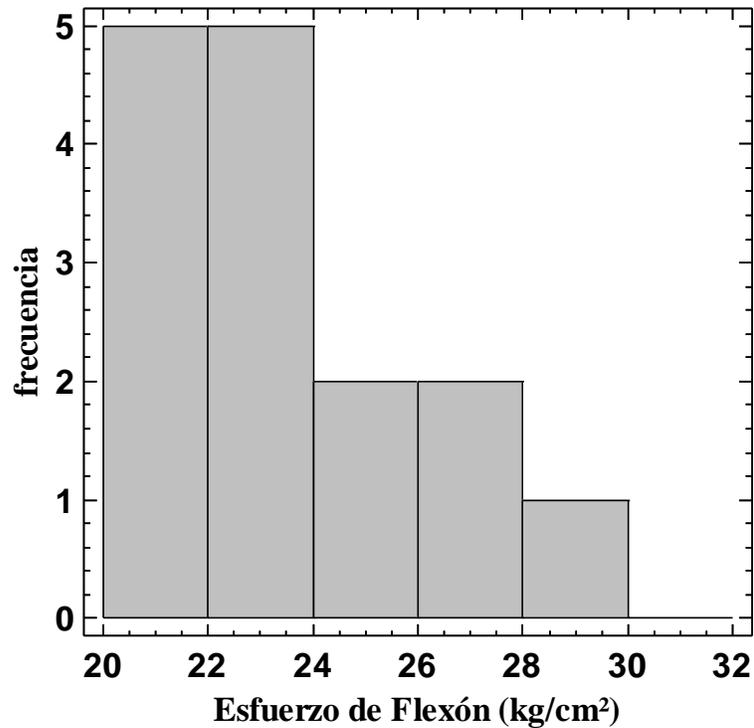
En este caso, el valor del sesgo estandarizado se encuentra dentro del rango esperado para datos provenientes una distribución normal. El valor de curtosis estandarizada se encuentra dentro del rango esperado para datos provenientes de una distribución normal.

Tabla 40 Tabla de frecuencias para Sella Quebrada

| | Límite inferior | Límite superior | Punto medio | Frecuencia | Frecuencia relativa | Frecuencia acumulada | Frecuencia rel. acum. |
|---|-----------------|-----------------|-------------|------------|---------------------|----------------------|-----------------------|
| | menor o igual | 20,00 | | 0 | 0,00 | 0 | 0,00 |
| 1 | 20,00 | 22,00 | 21,00 | 5 | 0,33 | 5 | 0,33 |
| 2 | 22,00 | 24,00 | 23,00 | 5 | 0,33 | 10 | 0,66 |
| 3 | 24,00 | 26,00 | 25,00 | 2 | 0,13 | 12 | 0,80 |
| 4 | 26,00 | 28,00 | 27,00 | 2 | 0,13 | 14 | 0,93 |
| 5 | 28,00 | 30,00 | 29,00 | 1 | 0,06 | 15 | 1,00 |
| 6 | 30,00 | 32,00 | 31,00 | 0 | 0,00 | 15 | 1,00 |
| | mayor de | 32,0 | | 0 | 0,00 | 15 | 1,00 |

Fuente: (StatGraphics Centurion XVI, s. f.)

Gráfica 6 Histograma para Sella Quebrada



Fuente: StatGraphics Centurion XVI, s. f.

3.12.3.3. Muestra 3 - Obrajes

Tabla 41 Resumen estadístico para Obrajes

| Descripción | Valores |
|---------------------------|---------|
| Recuento | 15 |
| Promedio | 3,63 |
| Mediana | 3,65 |
| Moda | 3,57 |
| Varianza | 0,05 |
| Desviación Estándar | 0,22 |
| Coefficiente de Variación | 6,26% |
| Mínimo | 3,06 |
| Máximo | 3,98 |
| Rango | 0,92 |
| Sesgo | -0,75 |
| Curtosis | 2,09 |
| Suma | 54,57 |

Fuente: StatGraphics Centurion XVI, s. f.

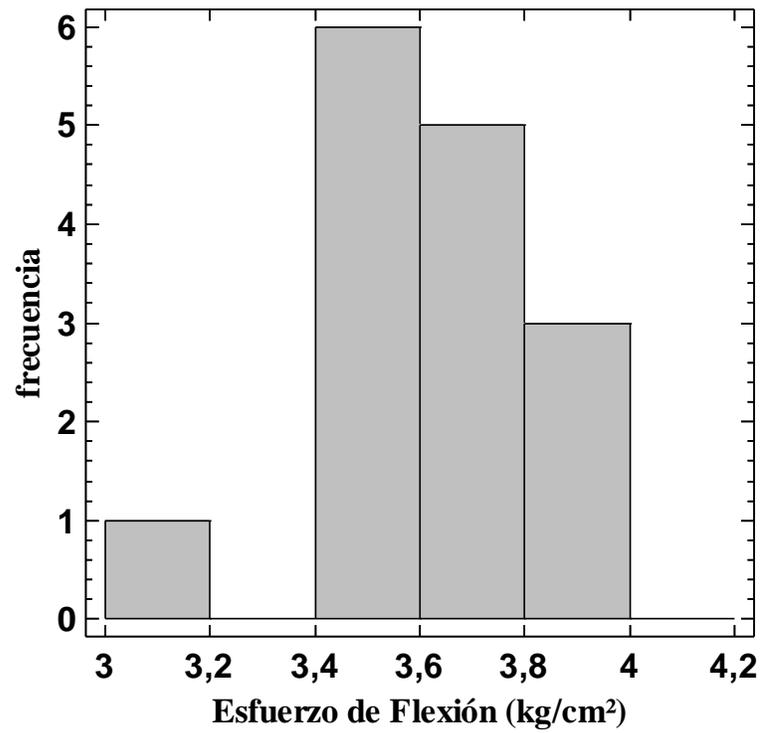
En este caso, el valor del sesgo estandarizado se encuentra dentro del rango esperado para datos provenientes una distribución normal. El valor de curtosis estandarizada se encuentra dentro del rango esperado para datos provenientes de una distribución normal.

Tabla 42 Tabla de frecuencias para Obrajes

| Clase | Límite inferior | Límite superior | Punto medio | Frecuencia | Frecuencia relativa | Frecuencia acumulada | Frecuencia rel. acum. |
|-------|-----------------|-----------------|-------------|------------|---------------------|----------------------|-----------------------|
| | menor o igual | 3,00 | | 0 | 0,00 | 0 | 0,00 |
| 1 | 3,00 | 3,20 | 3,10 | 1 | 0,06 | 1 | 0,06 |
| 2 | 3,20 | 3,40 | 3,30 | 0 | 0,00 | 1 | 0,06 |
| 3 | 3,40 | 3,60 | 3,50 | 6 | 0,40 | 7 | 0,46 |
| 4 | 3,60 | 3,80 | 3,70 | 5 | 0,33 | 12 | 0,80 |
| 5 | 3,80 | 4,00 | 3,90 | 3 | 0,20 | 15 | 1,00 |
| 6 | 4,00 | 4,20 | 4,10 | 0 | 0,00 | 15 | 1,00 |
| | mayor de | 4,20 | | 0 | 0,00 | 15 | 1,00 |

Fuente: StatGraphics Centurion XVI, s. f.

Gráfica 7 Histograma para Obrajes



Fuente: StatGraphics Centurion XVI, s. f.

3.12.4. Prueba de hipótesis de prueba de flexión

3.12.4.1. Prueba de hipótesis para esfuerzo de flexión de Carachimayo

Media muestral = 7,359

Mediana muestral = 7,34

Desviación estándar de la muestra = 0,23

Prueba t

Hipótesis nula: media = 0.00

Alternativa: no igual

Estadístico t = 122,16

Valor-P = 0.00

Se rechaza la hipótesis nula para alfa = 0,05.

La prueba-t evalúa la hipótesis de que la media de Carachimayo es igual a 0,0 versus la hipótesis alterna de que la media de Carachimayo es no igual a 0,0. Debido a que el valor-P para esta prueba es menor que 0,05, se puede rechazar la hipótesis nula con un 95,0% de confianza.

Prueba chi-cuadrada

Hipótesis Nula: sigma = 1,00

Alternativa: no igual

Chi-cuadrado calculado = 0,76

Valor-P = 2,23E-7

Se rechaza la hipótesis nula para alfa = 0,05.

La prueba de chi-cuadrada evalúa la hipótesis nula de que la desviación estándar de Carachimayo es igual a 1,0 versus la hipótesis alterna de que la desviación estándar de Carachimayo es no igual a 1,0. Debido a que el valor-P para esta prueba es menor que 0,05, se puede rechazar la hipótesis nula con un 95,0% de confianza.

3.12.4.2. Prueba de hipótesis para esfuerzo de flexión de Sella Quebrada

Media muestral = 23,62

Mediana muestral = 23,05

Desviación estándar de la muestra = 2,58

Prueba t

Hipótesis nula: media = 0.00

Alternativa: no igual

Estadístico t = 35,36

Valor-P = 0.00

Se rechaza la hipótesis nula para alfa = 0,05.

La prueba-t evalúa la hipótesis de que la media de Sella Quebrada es igual a 0,0 versus la hipótesis alterna de que la media de Sella Quebrada es no igual a 0,0. Debido a que el valor-P para esta prueba es menor que 0,05, se puede rechazar la hipótesis nula con un 95,0% de confianza.

Prueba chi-cuadrada

Hipótesis nula: sigma = 1,00

Alternativa: no igual

Chi-cuadrado calculado = 93,68

Valor-P = 0.00

Se rechaza la hipótesis nula para alfa = 0,05.

La prueba de chi-cuadrada evalúa la hipótesis nula de que la desviación estándar de Sella Quebrada es igual a 1,0 versus la hipótesis alterna de que la desviación estándar de Sella Quebrada es no igual a 1,0. Debido a que el valor-P para esta prueba es menor que 0,05, se puede rechazar la hipótesis nula con un 95,0% de confianza.

3.12.4.3. Prueba de hipótesis para esfuerzo de flexión de Obrajes

Media muestral = 3,63

Mediana muestral = 3,65

Desviación estándar de la muestra = 0,22

Prueba t

Hipótesis Nula: media = 0.00

Alternativa: no igual

Estadístico t = 61,83

Valor-P = 0.00

Se rechaza la hipótesis nula para alfa = 0,05.

La prueba-t evalúa la hipótesis de que la media de Obrajes es igual a 0,0 versus la hipótesis alterna de que la media de Obrajes es no igual a 0,0. Debido a que el valor-P para esta prueba es menor que 0,05, se puede rechazar la hipótesis nula con un 95,0% de confianza.

Prueba chi-cuadrada

Hipótesis nula: sigma = 1,00

Alternativa: no igual

Chi-cuadrado calculado = 0,72

Valor-P = 1,41E-7

Se rechaza la hipótesis nula para alfa = 0,05.

La prueba de chi-cuadrada evalúa la hipótesis nula de que la desviación estándar de Obrajes es igual a 1,0 versus la hipótesis alterna de que la desviación estándar de Obrajes es no igual a 1,0. Debido a que el valor-P para esta prueba es menor que 0,05, se puede rechazar la hipótesis nula con un 95,0% de confianza.

3.13. ANÁLISIS DE LOS SUELOS ESTUDIADOS

3.13.1. Criterio técnico

Se realizó el análisis granulométrico de 3 diferentes suelos.

Carachimayo

De acuerdo a la clasificación por la AASHTO, el suelo de esa zona tiene los siguientes porcentajes en promedio:

Porcentaje retenido en el N° 10 = 68.96 % y 78.14 %

Porcentaje retenido en el N° 40 = 52.74 % y 56.97 %

Porcentaje retenido en el N° 200 = 34.65 % y 36.76 %

Por la figura de la curva de distribución granulométrica (Véase ANEXO A) se puede decir que es un suelo limoso poco o nada plástico con 75% o más del material fino. Con un terreno de fundación de regular a malo.

Con respecto al C.B.R. de laboratorio obtenido para este suelo (Véase ANEXO A), se puede decir que la subrasante es regular según la tabla N° 4 que varía de 6 % - 10 %.

Sella Quebrada

De acuerdo a la clasificación por la AASHTO, el suelo de esa zona tiene los siguientes porcentajes en promedio:

Porcentaje retenido en el N° 10 = 55.53 % y 49.01 %

Porcentaje retenido en el N° 40 = 42.72 % y 32.65 %

Porcentaje retenido en el N° 200 = 7.84 % y 4.11 %

Por la figura de la curva de distribución granulométrica (Véase ANEXO A) se puede decir que es un suelo bien graduado, compuesto por fragmentos de piedras, gravas, arena y material ligante poco plástico donde predomina la arena.

Con respecto al C.B.R. de laboratorio obtenido para este suelo (Véase ANEXO A), se puede decir que la subrasante es muy buena según la tabla N° 4 que es > 20%.

Obrajes

De acuerdo a la clasificación por la AASHTO, el suelo de esa zona tiene los siguientes porcentajes en promedio:

Porcentaje retenido en el N° 10 = 99.74 % y 99.76 %

Porcentaje retenido en el N° 40 = 99.02 % y 99.30 %

Porcentaje retenido en el N° 200 = 97.50 % y 98.30 %

Por la figura de la curva de distribución granulométrica (Véase ANEXO A) se puede decir que es un suelo altamente arcilloso cuyos índices de plasticidad son muy altos > 50 , con respecto a sus límites líquidos. Teniendo un terreno de fundación de regular a malo

Con respecto al C.B.R. de laboratorio obtenido para este suelo (Véase ANEXO A), se puede decir que la subrasante es regular según la tabla N° 4 que varía de 6 % - 10 %.

3.14. ANÁLISIS DE RESULTADOS PARA EL ESFUERZO DE COMPRESIÓN

Se muestra en la siguiente tabla, un conjunto de resultados de diferentes muestras de suelo, sometidas al esfuerzo a compresión.

Tabla 43 Resultados de resistencia a compresión

| Esfuerzos a compresión (kg/cm²) | | |
|---|--------------------------|----------------|
| Carachimayo | Sella de Quebrada | Obrajes |
| 42,93 | 60,67 | 22,23 |
| 42,42 | 66,69 | 20,70 |
| 42,01 | 61,90 | 21,41 |
| 46,09 | 61,39 | 20,90 |
| 47,72 | 67,71 | 22,64 |
| 46,19 | 61,79 | 22,03 |
| 42,93 | 61,64 | 21,72 |
| 41,40 | 64,55 | 21,87 |
| 46,96 | 64,75 | 21,45 |
| 42,68 | 63,68 | 21,01 |
| 42,22 | 64,29 | 21,65 |
| 44,05 | 61,64 | 21,86 |
| 46,91 | 64,55 | 22,13 |
| 46,96 | 64,75 | 21,87 |
| 44,56 | 61,72 | 21,68 |
| 44,40 | 63,45 | 21,68 |

Fuente: Elaboración propia

Se observa en los resultados de los esfuerzos de compresión de las probetas que para un porcentaje del 15 % de cemento en peso con un curado a 28 días se presenta valores máximos:

Tabla 44 Esfuerzo de compresión valores máximos

| Tramo | Esfuerzo | |
|----------------|----------|-----------------------|
| | (MPa) | (Kg/cm ²) |
| Carachimayo | 4,68 | 47,72 |
| Sella Quebrada | 6,64 | 67,71 |
| Obrajes | 2,22 | 22,64 |

Fuente: Elaboración propia

También se presenta valores mínimos:

Tabla 45 Esfuerzo de compresión valores mínimos

| Tramo | Esfuerzo | |
|----------------|----------|-----------------------|
| | (MPa) | (Kg/cm ²) |
| Carachimayo | 4,06 | 41,40 |
| Sella Quebrada | 5,95 | 60,67 |
| Obrajes | 2,03 | 20,70 |

Fuente: Elaboración propia

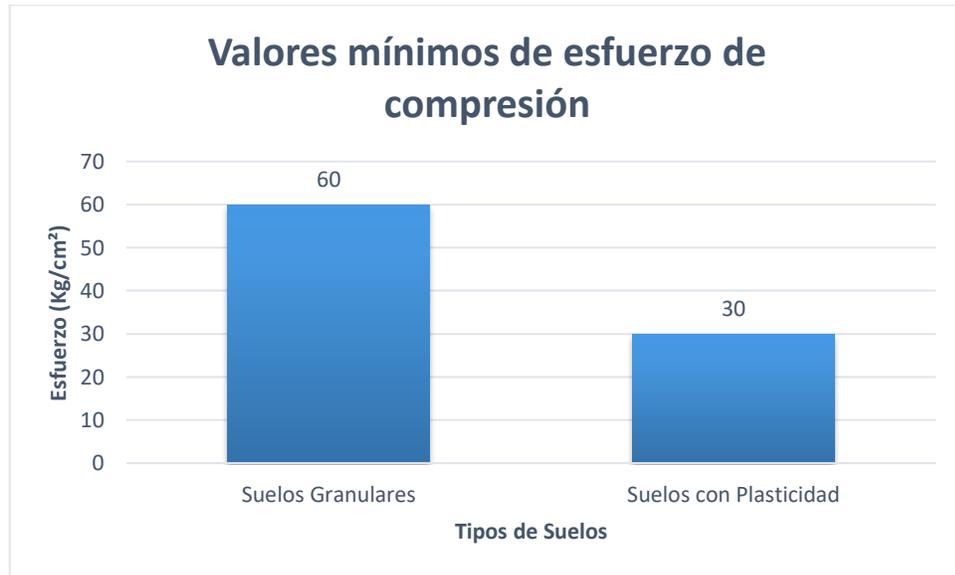
Si se relaciona el máximo valor de éstos con la resistencia mínima requerida para el hormigón compactado a 28 días ($R_c \geq 35$ MPa) podemos indicar que la resistencia correspondiente de cada suelo es del 14 %, 19 % y 7 % respectivamente de la resistencia a compresión que requiere este tipo de hormigón.

Tenemos una tabla de parámetros que los suelos en general, sean plásticos o granulares deben de cumplir para los requerimientos de prueba de resistencia en la compresión.

| Prueba de resistencia | |
|---|--|
| Resistencia a la compresión | Valores (Edad: 28 días) |
| Valores típicos en suelos granulares no plásticos | 60 kg/cm ² - 120 kg/cm ² |
| Valores típicos en suelos de plasticidad | 30 kg/cm ² - 75 kg/cm ² |

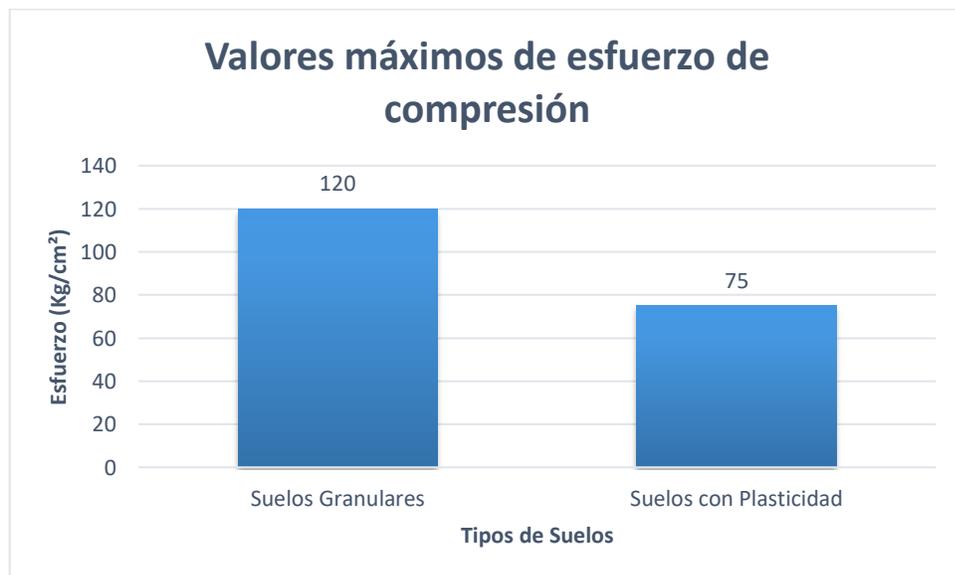
Fuente: (Instituto Salvadoreño del Cemento y el Concreto, 2000)

Gráfica 8 Valores mínimos de esfuerzos de compresión



Fuente: Elaboración propia

Gráfica 9 Valores máximos de esfuerzo de compresión

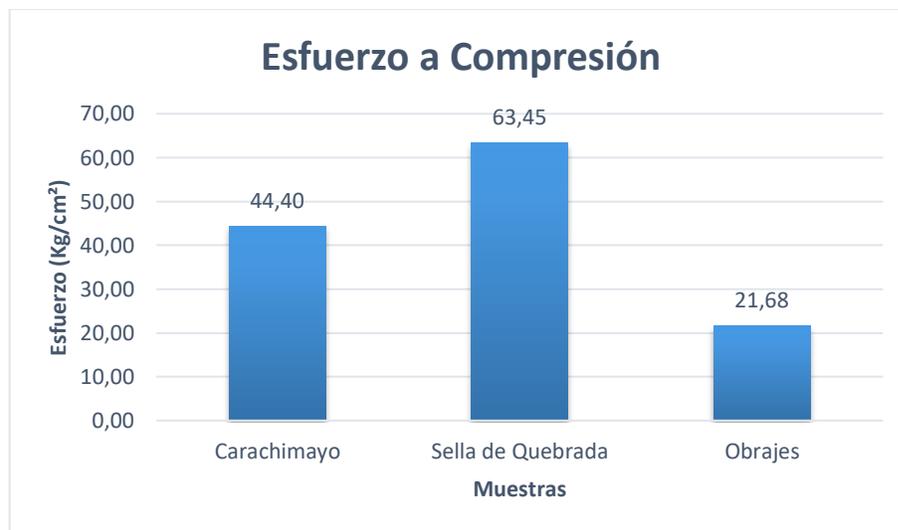


Fuente: Elaboración propia

En la siguiente gráfica se muestra los valores promedios de los 3 diferentes tipos tramos extraídos y estudiados.

Se realizó una gráfica con los promedios de cada lugar para tener una mejor comprensión sobre los resultados finales de la investigación.

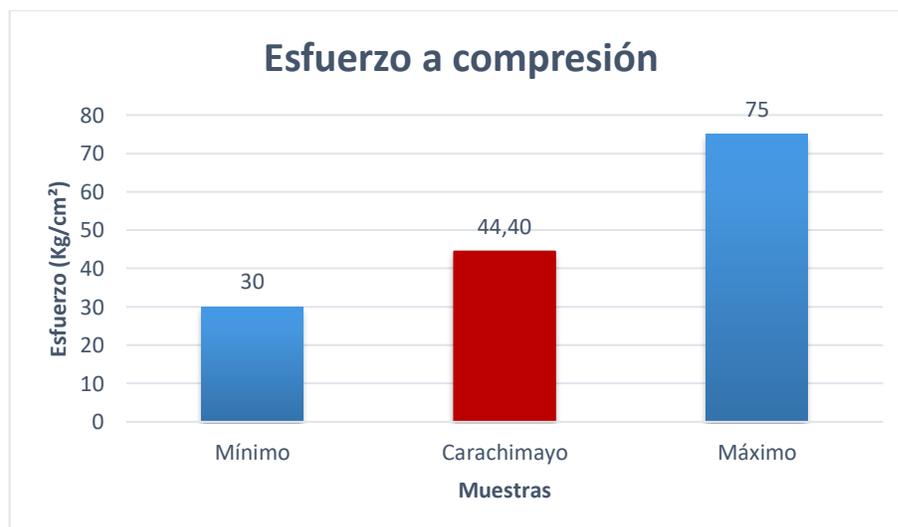
Gráfica 10 Resultados promedios de esfuerzos a compresión



Fuente: Elaboración propia

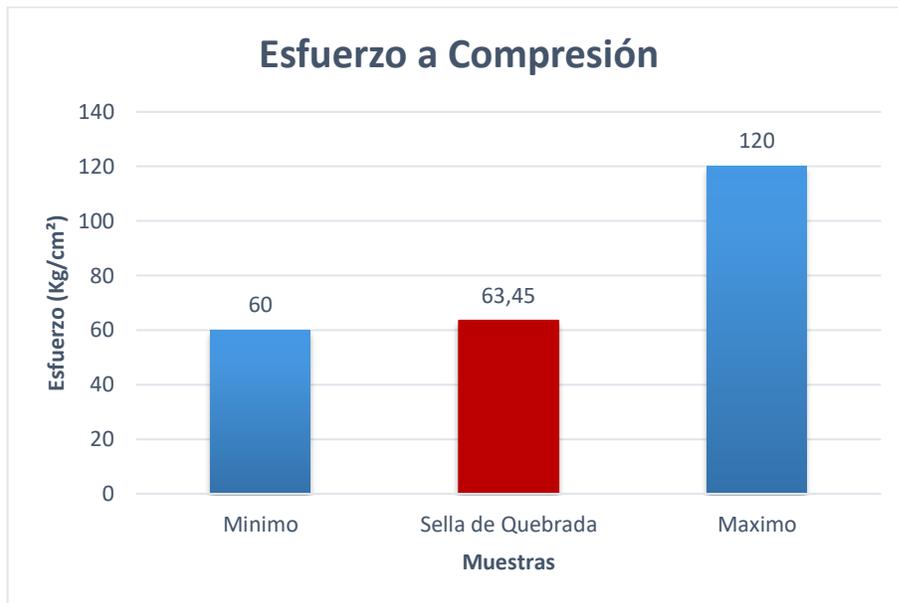
Se pudo verificar los resultados si se encuentran en los parámetros mínimos y máximos de la prueba de resistencia de compresión respecto a cada uno de los tramos estudiados en las siguientes gráficas.

Gráfica 11 Esfuerzo de compresión de Carachimayo



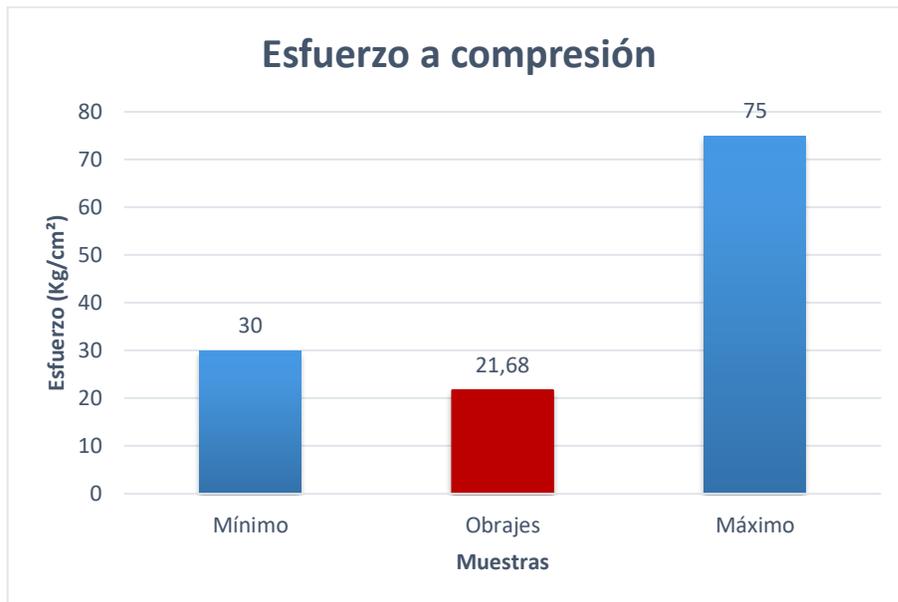
Fuente: Elaboración propia

Gráfica 12 Esfuerzo de compresión de Sella Quebrada



Fuente: Elaboración propia

Gráfica 13 Esfuerzo de compresión de Obrajes



Fuente: Elaboración propia

Se puede observar en las gráficas que los suelos de Carachimayo y Sella Quebrada cumplen con los parámetros de resistencia en compresión; mientras que la muestra de Obrajes se encuentra por debajo de lo mínimo, por tanto, no cumple el esfuerzo necesario teniendo esta muestra el 15 % de cemento.

No se descarta el uso de este suelo para el método del pavimento Unicapa, si bien no cumple con el requerido, realizando un análisis de estos resultados y comparando con tramos ya realizados por el Instituto Salvadoreño de Cemento y Concreto, que es una fuente confiable, se encontró un tramo de este mismo tipo suelo clasificado en la AASHTO (Río Chiquito - Las Pilas, Chalatenango) con la diferencia que el suelo de Obrajes es un suelo altamente arcilloso clasificado como CH mientras que el suelo de Las Pilas es un CL bajo en plasticidad, este es el motivo por el cual el suelo no alcanzó su resistencia requerida, un suelo que se puede subsanar aumentando el porcentaje de cemento.

3.15. ANÁLISIS DE RESULTADO DE ESFUERZO A FLEXIÓN

Se muestra en la siguiente tabla, un conjunto de resultados de diferentes muestras de suelo, sometidas al esfuerzo a Flexión.

Tabla 46 Resultados de resistencia a flexión

| Esfuerzos a Flexión (kg/cm²) | | |
|--|--------------------------|----------------|
| Carachimayo | Sella de Quebrada | Obrajes |
| 7,85 | 20,60 | 3,57 |
| 7,14 | 22,03 | 3,98 |
| 7,04 | 21,41 | 3,06 |
| 7,65 | 23,05 | 3,87 |
| 7,49 | 20,60 | 3,67 |
| 7,09 | 21,52 | 3,77 |
| 7,34 | 22,33 | 3,52 |
| 7,57 | 21,82 | 3,47 |
| 7,29 | 26,41 | 3,57 |
| 7,21 | 21,31 | 3,72 |
| 7,46 | 21,72 | 3,65 |
| 7,34 | 22,23 | 3,49 |
| 7,57 | 21,82 | 3,98 |
| 7,14 | 22,08 | 3,57 |
| 7,21 | 21,62 | 3,68 |
| 7,36 | 22,04 | 3,64 |

Fuente: Elaboración propia

Se observa en los resultados de los esfuerzos de flexión de las vigas que para un porcentaje del 15 % de cemento en peso con un curado a 28 días se presenta valores máximos:

Tabla 47 Esfuerzo de flexión valores máximos

| Tramo | Esfuerzo | |
|----------------|----------|-----------------------|
| | (MPa) | (Kg/cm ²) |
| Carachimayo | 0,77 | 7,85 |
| Sella Quebrada | 2,59 | 26,41 |
| Obrajes | 0,39 | 3,98 |

Fuente: Elaboración propia

También se presenta valores mínimos:

Tabla 48 Esfuerzo de flexión valores mínimos

| Tramo | Esfuerzo | |
|----------------|----------|-----------------------|
| | (MPa) | (Kg/cm ²) |
| Carachimayo | 0,69 | 7,04 |
| Sella Quebrada | 2,02 | 20,60 |
| Obrajes | 0,30 | 3,06 |

Fuente: Elaboración propia

Estos valores son mucho mayores que los comúnmente se puede encontrar en una base granular tratada con cemento, que varía del 3 al 5 % de cemento en peso.

Si comparamos los valores máximos obtenidos con el que exige un pavimento rígido (concreto $MR \geq 45 \text{ kg/cm}^2$ (4.5 MPa) podemos decir que la máxima resistencia a la flexión que se pudo alcanzar corresponde a 20 %, 60 % y 10 % respectivamente de la calidad que exige el concreto del pavimento rígido.

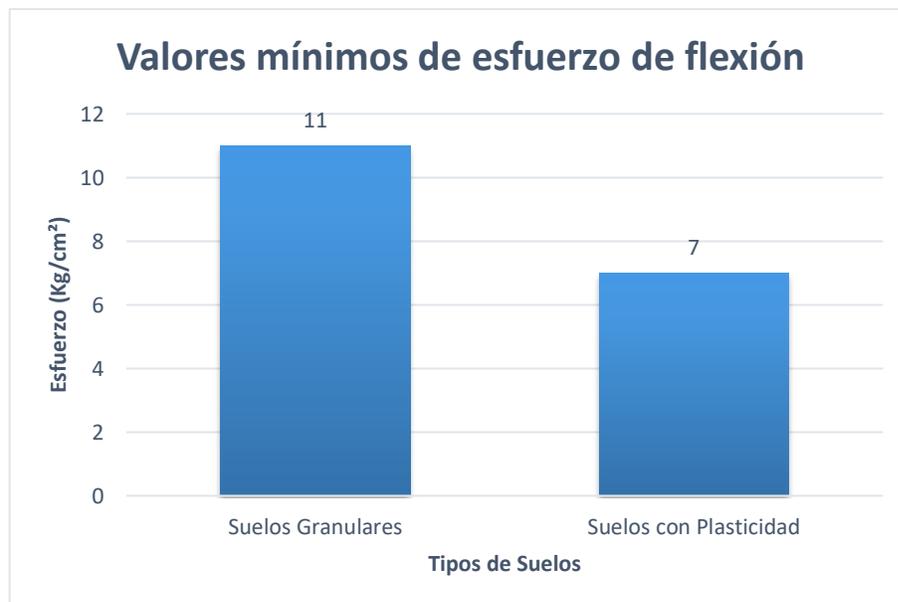
Esto nos muestra que se pudo obtener la rigidez prácticamente necesaria para que el pavimento Unicapa actúe como losa.

Tenemos una tabla de parámetros que los suelos en general, sean plásticos o granulares deben de cumplir para los requerimientos de prueba de resistencia en la compresión.

| Prueba de resistencia | |
|---|---|
| Resistencia a la flexión | Valores (Edad: 28 días) |
| Valores típicos en suelos granulares no plásticos | 11 kg/cm ² - 23 kg/cm ² |
| Valores típicos en suelos de plasticidad | 7 kg/cm ² - 15 kg/cm ² |

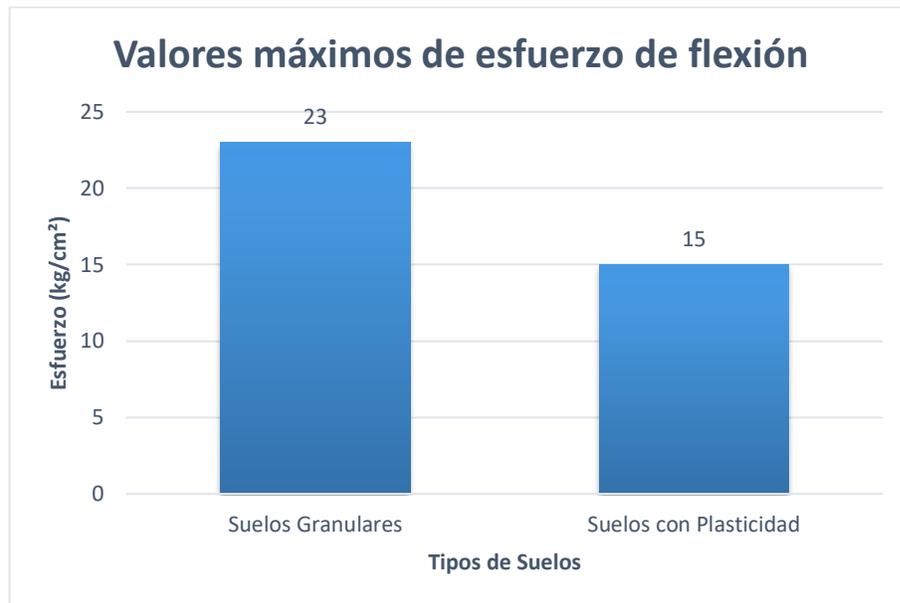
Fuente: (Instituto Salvadoreño del Cemento y el Concreto, 2000)

Gráfica 14 Valores mínimos de esfuerzo de flexión



Fuente: Elaboración propia

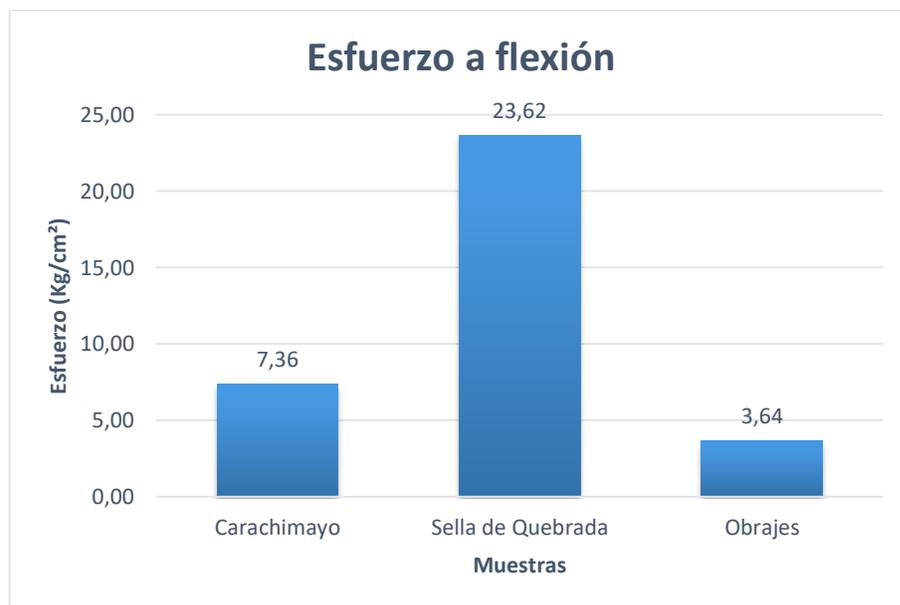
Gráfica 15 Esfuerzos máximos de esfuerzo de flexión



Fuente: Elaboración propia

En la siguiente gráfica se muestra los valores promedios de los 3 diferentes tipos tramos extraídos y estudiados.

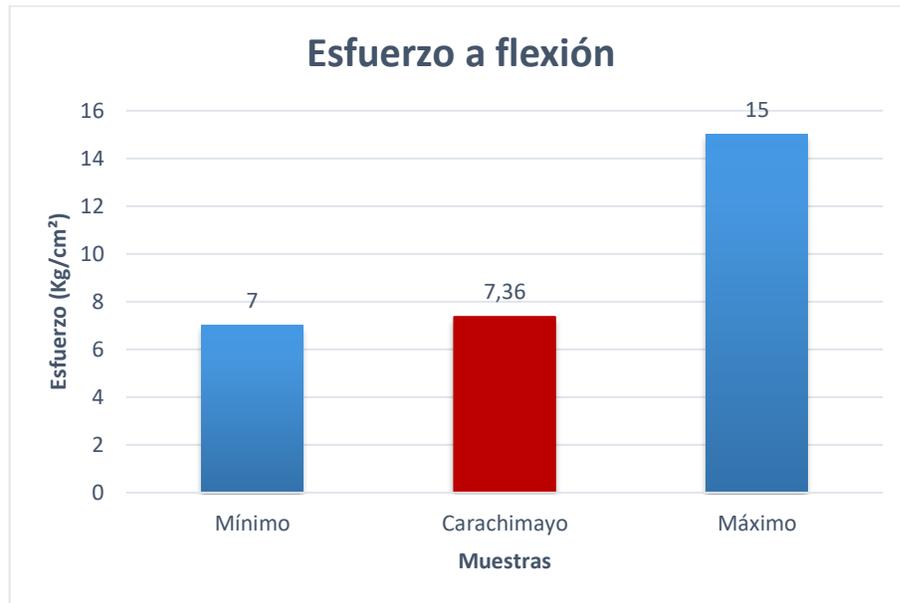
Gráfica 16 Resultados promedios de esfuerzos a flexión



Fuente: Elaboración propia

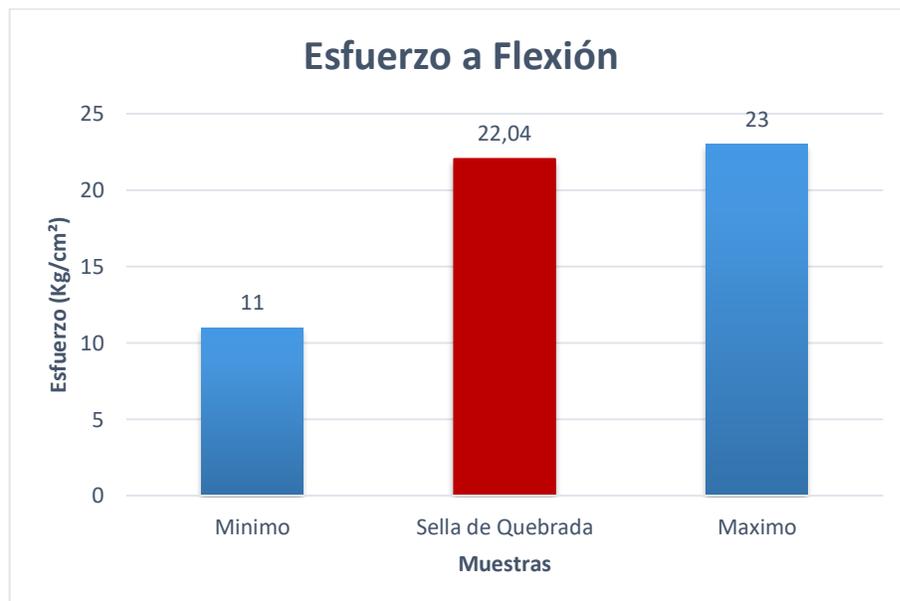
Se pudo verificar los resultados si se encuentran en los parámetros mínimos y máximos de la prueba de resistencia de flexión respecto a cada uno de los tramos estudiados en las siguientes gráficas.

Gráfica 17 Esfuerzo de flexión de Carachimayo



Fuente: Elaboración propia

Gráfica 18 Esfuerzo de flexión de Sella Quebrada



Fuente: Elaboración propia

Gráfica 19 Esfuerzo de flexión de Obrajes



Fuente: Elaboración propia

Se puede observar en las gráficas que los suelos de Carachimayo y Sella Quebrada cumplen con los parámetros de resistencia en flexión; mientras que la muestra de Obrajes se encuentra por debajo de lo mínimo, por tanto, no cumple el esfuerzo necesario teniendo esta muestra el 15 % de cemento.

3.16. ANÁLISIS ECONÓMICO

En esta investigación se realizó el análisis de costos pavimento Unicapa y el ripiado de manera superficial.

Los precios de los materiales, mano de obra y equipo que se involucra realizar un pavimento Unicapa y un ripiado común, se consultaron precios del mercado local e información por parte de la Administradora Boliviana de Carreteras y el Instituto Boliviano de Cemento y Hormigón.

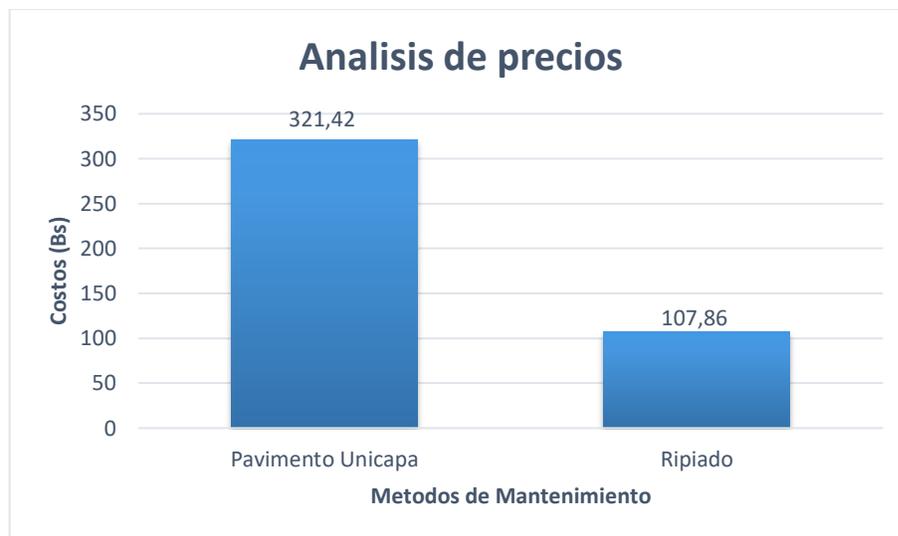
Tabla 49 Presupuesto general

| Presupuesto general | | | | | | |
|---------------------|-------------------|----------------|----------|---------------------------|---|------------------------|
| Nro. | Ítem | Unidad | Cantidad | Precio unitario (numeral) | Precio unitario (literal) | Precio total (numeral) |
| 1 | Ripiado | m ³ | 1 | 107,86 | Ciento y siete 86/100 Bolivianos | 107,86 |
| 2 | Pavimento Unicapa | m ³ | 1 | 321,42 | Trescientos veintiuno 42/100 Bolivianos | 321,42 |

Fuente: Elaboración propia

En la tabla del presupuesto general, se observa la diferencia entre ambos costos y se puede obtener ventajas y desventajas de los mismos en el criterio económico entre el pavimento Unicapa y el ripiado común.

Gráfica 20 Análisis de precios



Fuente: Elaboración propia

El análisis de precio unitario se encuentra al final de la investigación en la sección de ANEXO F

3.17. ANÁLISIS COMPARATIVO ENTRE EL PAVIMENTO UNICAPA Y RIPIADO

A continuación, se presenta un cuadro de diferencias entre ambos métodos que aportan a los caminos rurales.

Tabla 50 Análisis comparativo del pavimento Unicapa y el ripiado

| Descripción | Pavimento Unicapa | Ripiado |
|---------------------|---------------------------|------------------------------|
| Duración | De 3 – 10 años | Alrededor de 1 año |
| Material | Aprovechamiento del lugar | Extracción de un banco o río |
| Resistencia | Alto | Bajo |
| Método constructivo | Fácil | Difícil |
| Capa de rodadura | Estable | Polvoso |
| Desgaste | Poco | Permanente |
| Mantenimiento | Mínimo | 2 veces por año |
| Impacto ambiental | Bajo | Alto |
| Costo a largo plazo | Bajo | Alto |

Fuente: Elaboración propia

3.18. VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE AMBOS MÉTODOS

A continuación, se muestra una tabla de ventajas y desventajas de ambos métodos, para encontrar la diferencia y analizar el método más correcto en la aplicación de los caminos rurales en cuanto a construcción y costo.

Tabla 51 Ventajas y desventajas del pavimento Unicapa y el ripiado

| Pavimento Unicapa | | Ripiado | |
|--|-------------------------------------|---------------------------------|--|
| Ventajas | Desventajas | Ventajas | Desventajas |
| El ciclo de vida es de 3 a 10 años | Generación de basura por el cemento | Bajo costo al inicio del diseño | Vida útil de 1 año |
| Menor impacto ambiental | Contaminación de la flora | Maquinaria Convencional | Mantenimiento constante |
| Después del periodo de diseño la estructura puede servir como base para la rehabilitación de otro pavimento. | | | Material transportado de banco o sacado ríos, desbroce y limpieza de los préstamos de yacimientos. |
| Fácil de diseñar | | | Difícil encontrar material |
| Fácil de construir | | | Existe pérdida de material |
| Bajo costo | | | Alto Costo |
| Mantenimiento mínimo | | | Contaminación de la flora |
| Maquinaria convencional | | | |

Fuente: Elaboración propia

Como se puede observar en el cuadro, se analiza los factores generales de cada método, teniendo como resultado que el pavimento Unicapa es un método que aporta muchas ventajas para aplicar a los caminos rurales.

3.19. RECOMENDACIONES AMBIENTALES

3.19.1. Método del rpiado

Para evitar que casen daños el medio ambiente durante las operaciones destinadas a la ejecución del rpiado, debe tomarse en cuenta cuidados especiales:

La disciplina del tráfico y estacionamiento adecuado a los vehículos, es fundamental importancia en la preservación ambiental.

Debe ser prohibido el trafico desordenado, fuera del cuerpo de la carretera, para evitar daños a la vegetación y a las interferencias en el drenaje natural.

En la explotación de materiales, deberán ser tomados cuidados especiales en los servicios de excavación, carga y transporte de materiales para evitar la degradación ambiental.

Las áreas destinadas a estacionamiento y servicios de mantenimientos de los equipos deber ser localizados de forma que, residuos de lubricantes.

3.19.2. Método del pavimento Unicapa

Se toma algunas recomendaciones para el cuidado del medio ambiente al momento de ejecutar el método de pavimento Unicapa a continuación, los siguientes:

Aprovechamiento de los suelos existentes en el lugar, lo cual genera menor impacto ambiental al disminuir la explotación de los bancos de préstamo.

Evitar la generación de basura con la bolsa de cemento, que implica la recolección y limpieza total de los mismos.

El uso de agua a través de fuentes naturales, evitar su contaminación con cualquier otro.

Designar áreas destinadas a estacionamiento y servicios de mantenimientos de los equipos para evitar la contaminación ambiental con residuos de lubricantes.

CAPÍTULO IV

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1. CONCLUSIONES

- Al finalizar el presente estudio se puede lograr que se pudo realizar satisfactoriamente el objetivo principal de analizar lo técnico y económico en los caminos rurales aplicando el método de pavimento Unicapa frente al ripiado.
- Las tres diferentes muestras al ser analizadas, se comprobó que los suelos de Carachimayo A-4 (CL) y Sella Quebrada A-1-b (SP) se encuentra dentro de los parámetros en la prueba de resistencia de compresión y flexión establecidos por el Instituto Salvadoreño de Cemento y Concreto.

| Carachimayo | | | |
|-------------------------|---|---------------------------------------|---|
| Tipo de esfuerzo | Valor mínimo (Kg/cm²) | Valor real (Kg/cm²) | Valor máximo (Kg/cm²) |
| Compresión | 30 | 44,4 | 75 |
| Flexión | 7 | 7,36 | 15 |

Fuente: Elaboración propia

| Sella Quebrada | | | |
|-------------------------|---|---------------------------------------|---|
| Tipo de esfuerzo | Valor mínimo (Kg/cm²) | Valor real (Kg/cm²) | Valor máximo (Kg/cm²) |
| Compresión | 60 | 63,45 | 120 |
| Flexión | 11 | 22,04 | 23 |

Fuente: Elaboración propia

- El suelo de Obrajes A-7-6 (CH) obtuvo valores por debajo de los parámetros mínimos de la resistencia de compresión y flexión, por tanto, se llega a la conclusión que no se descarta este suelo para el diseño del pavimento Unicapa con el 15% de cemento, ya que es posible que haya afectado la alta plasticidad del mismo. Existe tramos realizados por el Instituto Salvadoreño de Cemento y Concreto que abalan que este

mismo suelo es apto para el pavimento Unicapa con la diferencia que el suelo es medianamente plástico, entendiendo que la falla no está en el porcentaje de cemento.

| Obrajes | | | |
|-------------------------|---|---------------------------------------|---|
| Tipo de esfuerzo | Valor mínimo (Kg/cm²) | Valor real (Kg/cm²) | Valor máximo (Kg/cm²) |
| Compresión | 30 | 21,68 | 75 |
| Flexión | 7 | 3,64 | 15 |

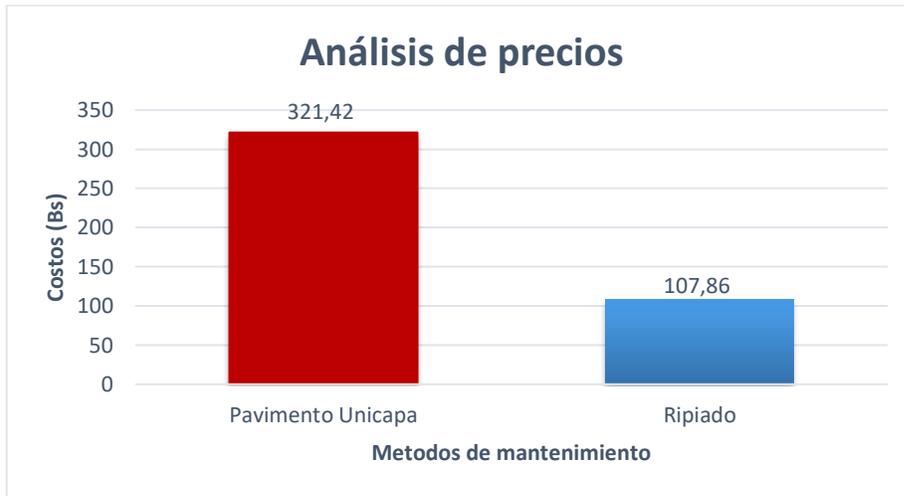
Fuente: Elaboración propia

- El pavimento Unicapa ha demostrado ser un método fácil de diseñar y de construir en los caminos rurales utilizando maquinaria convencional.
- Se encontró información sobre el historial de otros tramos hechos por el método de pavimento Unicapa que después del periodo de diseño, puede utilizarse como base de calidad en la rehabilitación de un pavimento nuevo.
- Se ha estudiado ambos métodos en el aspecto ambiental y se observó que el pavimento Unicapa llega a ser un método que, tomando las recomendaciones necesarias puede llegar a tener un mínimo impacto ambiental en sus procesos de construcción.
- Es importante destacar que el método de pavimento Unicapa está concebido para ser aplicados principalmente al mejoramiento vial de los caminos rurales de bajo tránsito.
- Se debe de entender que el pavimento Unicapa es una propuesta de El Salvador, siendo una solución técnica. en la resistencia y la parte económica factible que cumple con los estándares; si bien al momento de analizar los precios unitarios del ripiado y el pavimento Unicapa, a simple vista el ripiado sigue siendo más barato frente al otro método. Aunque es así, se ha demostrado que la duración del ripiado es muy corta ya sea por la lluvia u otros factores, en el contexto de análisis del ciclo de vida, el pavimento Unicapa es más económico que el ripiado por el periodo de diseño de 3 a 10 años desde el punto de vista estructural siendo una característica muy importante.

- El pavimento Unicapa resulta ser más económico a largo plazo que el rizado en la parte de mantenimiento de ambos.

| Métodos | Costos (Bs) |
|-------------------|-------------|
| Pavimento Unicapa | 321,42 |
| Rizado | 107,86 |

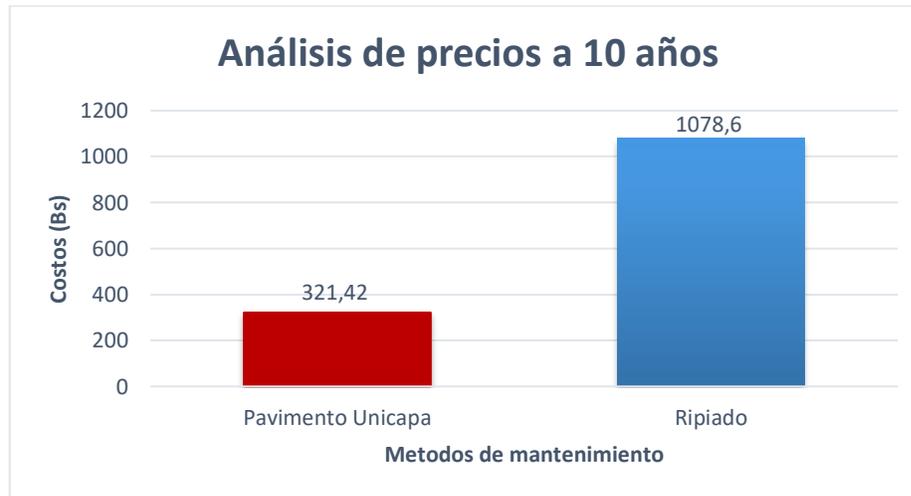
Fuente: Elaboración propia



Fuente: Elaboración propia

| Métodos | Costos (Bs) |
|-------------------|-------------|
| Pavimento Unicapa | 321,42 |
| Rizado | 1078,6 |

Fuente: Elaboración propia

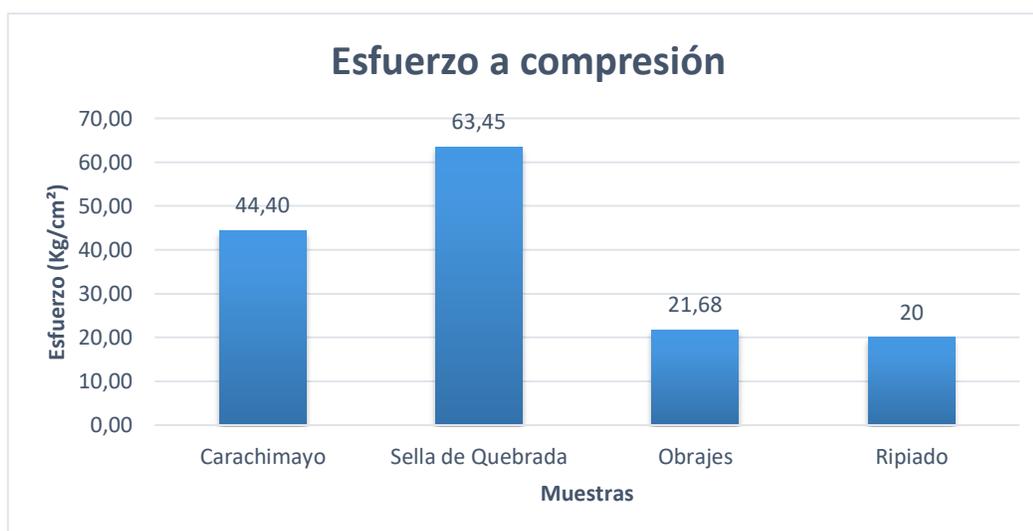


Fuente: Elaboración propia

- Este tipo de pavimento debe ser tomado en cuenta como una solución técnica y económicamente factible para dar solución para los caminos rurales de bajo tráfico.
- Se concluyó que la hipótesis planteada sobre la mezcla de suelo – cemento, utilizando el método del pavimento Unicapa puede llegar a mejorar la resistencia tanto en compresión y flexión aportando una estabilidad estructural mucho mejor con respecto al ripiado en común, también observando que en lo económico el pavimento Unicapa sigue siendo el más aceptable.

| Tramo | Esfuerzo (kg/cm ²) |
|-------------------|--------------------------------|
| Carachimayo | 44,40 |
| Sella de Quebrada | 63,45 |
| Obrajes | 21,68 |
| Ripiado | 20 |

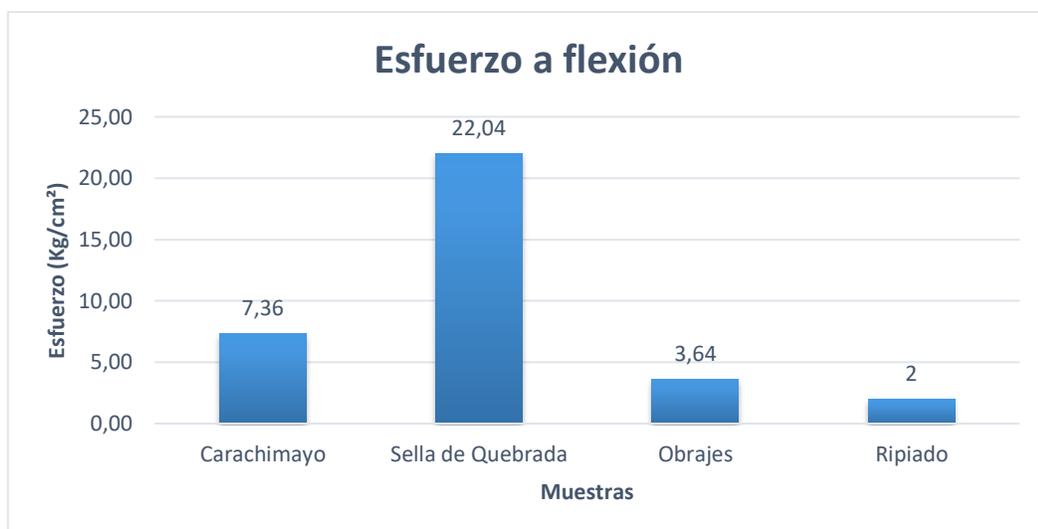
Fuente: Elaboración propia



Fuente: Elaboración propia

| Tramo | Esfuerzo (kg/cm ²) |
|-------------------|--------------------------------|
| Carachimayo | 7,36 |
| Sella de Quebrada | 22,04 |
| Obrajes | 3,64 |
| Ripiado | 2 |

Fuente: Elaboración propia



Fuente: Elaboración propia

- Se concluye que el pavimento Unicapa es un método que se puede utilizar y sacar beneficios solucionando los problemas que día a día está presente en los caminos rurales, un método que merece ser estudiado en gran amplitud para luego aplicarlo; para así, beneficiar en la parte socio-económico de la unión entre comunidades y principales ciudades.

4.2. RECOMENDACIONES

- Tomar en cuenta que esta investigación se realizó con el 15 % de cemento siendo éste el más óptimo de acuerdo al estudio realizado por el Instituto Salvadoreño de Cemento y Concreto.
- Tener cuidado al momento de realizar la compactación T180 proctor modificado con el suelo más el cemento, para hallar la humedad óptima y densidad relativa puesto que son datos importantes para la elaboración de las probetas cilíndricas y vigas.
- Se recomienda al realizar la elaboración de probetas cilíndricas y vigas, tener en cuenta que mientras se esté compactando respectivamente, se pierde humedad y es importante recalcar que este proceso debe ser lo más rápido posible para que no exista alteraciones que puedan afectar a los especímenes.

- El tiempo de desmoldado de los especímenes es recomendable efectuar después de 30 minutos de finalizado el proceso de compactación de la mezcla, fundamentados en la observación propia y en recomendaciones dadas por parte de personal de laboratorio.
- Es muy importante que el curado sea 3 veces al día, procurar que esté en un cuarto donde exista cierta humedad en el aire, caso contrario tapar con bolsas plásticas en su totalidad para mantener su humedad.