

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1. Antecedentes

El pavimento Unicapa de Alto Desempeño es formado por un suelo de sub-rasante, mezclado por un porcentaje óptimo de cemento Portland del 11 al 20%, 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 alto 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.

La presente investigación, consiste en realizar un análisis de Diseño de Pavimentos Unicapa de Alto Desempeño como una alternativa de solución para carreteras de alto tráfico, siendo un método relativamente nuevo en nuestro medio.

Los estudios realizados con cemento de mampostería fueron ampliados en el trabajo de tesis de graduación de Ingeniería Civil denominado Propuesta para el Diseño y Construcción de Pavimentos Unicapa de Alto Desempeño, como alternativa de aplicación a Caminos Rurales. UES 2003.

Lo que el autor propone en la investigación es analizar el método de pavimento Unicapa para el mejoramiento de sub-rasante, extrayendo muestras del tramo y mezclar con un porcentaje óptimo de cemento conocido de tal manera que se pueda determinar las diferencias técnicas y económicas.

El aporte teórico se basa en la investigación que realizó el Instituto Salvadoreño del Cemento y el Concreto (ISCYC), de lograr un pavimento que se constituya en una alternativa aprovechando al máximo de los suelos existentes, y que simultáneamente sea económica y durable para la red de caminos rurales de alto tráfico, y así, beneficiando a las comunidades del área rural, resolviendo ¹el problema de transitabilidad y que exista además un crecimiento socio-económico.

¹ Pavimentos Unicapa de Alto Desempeño, ISCYC, Documento N°1 Octubre de 2000.

1.2. 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 que la vida útil sea menos en los caminos rurales.

En el campo de la ingeniería de carreteras, específicamente en el diseño estructural de pavimentos, se tiene la particularidad de diseñar estructuras para un periodo de tiempo determinado, el cual depende del tipo de vía.

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 de Alto Desempeño que se compone de agua, suelo y 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 de Alto Desempeño es una propuesta de solución para el mantenimiento de los caminos rurales orientados al desempeño y alto tráfico:

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.

1.3. Situación problemática

Actualmente las carreteras en la red Departamental (de tierra) dentro del departamento de Tarija están en situaciones críticas debido al mantenimiento que necesita para cumplir con el requerimiento de seguridad para el tráfico que circula en la misma, que debe de 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; también se conoce en la actualidad que todos los pavimentos de hormigón en nuestro medio tienen un alto costo, lo que ocasiona que en algunos casos se vea estancado el mejoramiento de vías o la construcción de las mismas; motivo por el cual es interesante e importante buscar nuevas alternativas de solución que mejoren la circulación vehicular que presentan estas carreteras de la red Departamental y que sean más rentables.

Por tanto, es posible encontrar nuevas alternativas para el mejoramiento de las condiciones que predominan dichas carreteras de la red Departamental, se propone la solución del pavimento Unicapa de Alto Desempeño, alternativa que simplifica requerimientos de diseño y construcción sabiendo que no existe en el departamento de Tarija dichos pavimentos, por esta razón se realizó un análisis del pavimento Unicapa de Alto Desempeño en carreteras de alto tráfico que se extrajeron del tramo Quebrada Las Vacas-Salinas.

1.4. Problema

En esta investigación se plantea la siguiente interrogante.

¿Cuál es el análisis técnico y económico que tiene un pavimento Unicapa de Alto Desempeño en carreteras de Alto Tráfico para carreteras de la red Departamental?

1.5. Objetivos

1.5.1. Objetivo general

Analizar el Pavimento Unicapa de Alto Desempeño en carreteras de Alto Tráfico en la red Departamental con el fin de mejorar la sub-rasante de pavimentos.

1.5.2. Objetivos específicos

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

- Analizar el respaldo bibliográfico sobre pavimento Unicapa de Alto Desempeño.
- Realizar los ensayos de laboratorio para caracterizar el suelo sub-rasante.
- Aplicar el porcentaje óptimo del 11 al 20 % de cemento a los suelos sub-rasantes.
- Evaluar especímenes sobre resistencia de compresión y flexión.
- Analizar la parte técnica y económica del método de pavimento Unicapa de Alto Desempeño.
- Establecer conclusiones y recomendaciones sobre los resultados.

1.6. Hipótesis

Si, al aplicar la muestra del suelo-cemento del método de pavimento Unicapa entonces las características de resistencia de compresión y flexión podrán aumentar para la aplicación de carreteras de la red Departamental.

1.7. Variables

1.7.1. Definición y Operacionalización de las variables

1.7.1.1. Variable independiente

Caracterización de los diferentes tipos de sub-rasante utilizando los ensayos de contenido de humedad, granulometría, límites de Atterberg, compactación y CBR.

Tabla 1 Variable independiente

Variable	Dimensión	Indicador	Valor / Acción	
Tipos de sub-rasante	Contenido de humedad	%	Es la cantidad de agua contenida 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

1.7.1.2. Variable dependiente

Prueba de compresión utilizando mezclas de suelo-cemento, curado y resistencia.

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

1.8. Unidades de estudio y decisión muestral

1.8.1. Unidades de estudio

La siguiente investigación trata del análisis de diseño de pavimento Unicapa de Alto Desempeño en carreteras de alto tráfico que es una combinación de agua, cemento y suelo que se utiliza para construir carreteras.

1.8.2. Población

Carreteras de alto tráfico de desarrollo de la red Departamental.

1.8.3. Muestra

El tramo de carretera de desarrollo de la red Departamental que se tomaron en la siguiente investigación es:

El Puesto

Salinas

La Cueva

1.8.4. Selección de las técnicas de muestreo

Se conoce como muestreo a la técnica para la selección de una muestra a partir de una población estadística.

En el muestreo, si el tamaño de la muestra es más pequeño que el tamaño de la población, se puede extraer dos o más muestras de la misma población.

En esta investigación es probable realizar con el método probabilístico de la técnica de muestreo estratificado, donde se tiene que ordenar los elementos 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. Los materiales que se utilizaron en los ensayos en dicha investigación son:

El estudio se inició con la caracterización del suelo.

Preparación de la muestra de la sub-rasante (probetas cilíndricas): Suelo natural de sub-rasante con el 11%, 15% y 20 % de cemento.

Preparación de la muestra de la sub-rasante (vigas): Suelo natural de sub-rasante con el 11%, 15% y 20% de cemento.

1.9. Métodos y técnicas empleadas

1.9.1. Métodos

El método utilizado para este trabajo de investigación será el método inductivo.

El método inductivo, como tal, sigue una serie de pasos. Inicia por la observación de determinados hechos, los cuales registra, analiza y contrasta. A continuación, clasifica la

información obtenida, establece patrones, hace generalizaciones, para inferir, de todo lo anterior, una explicación o teoría.

El método inductivo es el más utilizado en el ámbito científico. Es, por un lado, un método relativamente flexible y, por el otro, se presta para la exploración. Este método es utilizado, sobre todo, para formular teorías e hipótesis.

Se estudiará los ensayos necesarios de laboratorio en prueba de resistencia tanto en compresión y flexión.

1.9.2. Técnicas

Las técnicas experimentales son las manera específicas de recolección de datos (incluyendo presentación de estímulos y registro de respuestas), es decir, los diversos procedimientos y tareas experimentales que permiten obtener los datos que serán analizados e interpretados.

Las técnicas son experimentales y fueron aplicadas a los 3 tramos de sub-rasantes extraídas, realizando la caracterización de cada uno de ellos:

Granulometría

Límites de Atterberg

Contenido de humedad

Compactación T-180

Capacidad portante (CBR)

Todos estos ensayos aplicados en este trabajo de investigación estarán detallados debidamente.

De todos los instrumentos y materiales a utilizar se tomará en cuenta los errores personales o del instrumento que se pueden presentar en la obtención de datos.

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

Las técnicas deductivas consideran que la conclusión se halla implícita en las premisas. Esto quiere decir que las conclusiones son una consecuencia necesaria de las premisas: cuando las premisas resultan verdaderas y el razonamiento deductivo tiene validez, no hay forma de que la conclusión no sea verdadera.

En la presente investigación se llegará a un análisis técnico del método Unicapa de Alto Desempeño en carreteras de alto tráfico.

Descripción de los instrumentos para la obtención de datos

Granulometría

- Juego de tamices ASTM
- Balanza
- Horno
- Agitador mecánico
- Taras
- Cuarteador

Límites de Atterberg

Límite líquido: humedad a partir de la cual el suelo pasa a comportarse como un lodo y tiende a fluir bajo su propio peso.

- Cuchara de casa grande
- Tara
- Balanza
- Muestra
- Horno

Límite plástico: mínimo contenido de agua con el que el suelo permanece en estado plástico.

- Muestra alterada e inalterada
- Balanza
- Agua destilada

- Horno
- Tara

Contenido de humedad

- Cápsula de aluminio
- Horno eléctrico, que mantenga el tiempo constante a 105°C
- Balanza con aproximadamente al 0.1 gr
- Espátula

Compactación T-180

- Moldes
- Pisón de metal
- Dispositivo extractor de muestra
- Balanza
- Horno
- Tamices

Capacidad portante (CBR)

- Moldes cilíndricos de acero de 6'' de diámetro interior, a cada molde se le acopla un collarín de 2'' de alto y base perforada.
- Un martillo de 10 libras (4.54Kg) y una caída de 18''.
- Un disco separador
- Un cuchillo para enrasar el material.

1.10. Alcance

La presente investigación utiliza la norma AASHTO para realizar un análisis del método de pavimentos Unicapa de Alto Desempeño en carreteras de alto tráfico con tres sub-rasantes diferentes que son: A-1b (0), A-2-4 (0) y A-1b (0) que se realizó la caracterización respectiva de cada suelo.

Posteriormente la mezcla de suelo-cemento fue con el 11%, 15% y 20% de cemento, dato que fue obtenido en la investigación realizada 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 en base a la elaboración de probetas y vigas para el método pavimento Unicapa de Alto Desempeño, 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 de Alto Desempeño.

Una vez teniendo el análisis del pavimento Unicapa de Alto Desempeño, se verifica encontrando ventajas y desventajas de este nuevo método en lo técnico y económico, para el mejoramiento de los suelos sub-rasantes en las carreteras de desarrollo de la red Departamental.

CAPÍTULO II
ASPECTOS GENERALES DEL PAVIMENTO UNICAPA
DE ALTO DESEMPEÑO EN CARRETERAS
DE ALTO TRÁFICO

2.1. Generalidades

El objetivo principal de este capítulo es presentar los aspectos básicos del método de pavimento Unicapa de Alto Desempeño aplicados para los suelos sub-rasantes en las carreteras de desarrollo de la red Departamental de alto tráfico.

Conociendo el pavimento Unicapa de Alto Desempeño que es un nuevo método que recién están implementando en nuestro país, que es básicamente la mezcla de suelo sub-rasante con un porcentaje óptimo de cemento, el mismo simplifica los requerimientos en el diseño y su construcción.

Este método es identificado por sus características generales, propiedades, clasificaciones de los materiales que las constituyen, del suelo de apoyo de la estructura y del volumen del tráfico que circulará sobre ella en un periodo determinado², para tener resultados del mismo y así analizar en el ámbito técnico y económico para encontrar como alternativa de mejoramiento de las carreteras de desarrollo de la red Departamental de alto tráfico.

2.2. 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

² Instituto Salvadoreño del Cemento y el Concreto. (2000). Pavimento Unicapa de Alto Desempeño.

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) ³

Figura 1 Suelo



Fuente: Lizzeth Geraldine, 14:53:20 UTC

Se debe identificar dos aspectos de estudio al suelo para utilizarlo como material de construcción: sus características y sus propiedades.

Características: se define como aquellos aspectos que se pueden visualizar de manera directa, que además sirven para identificarlos y asignarles alguna clasificación; por ejemplo; textura, rugosidad, tamaño de grano, color, etc.

Propiedades: se define como aquellas cualidades que el suelo en su conjunto adquiere, cuando se le aplica alguna carga, o es afectado con la combinación de otro material como ser el agua; algunas de las propiedades pueden ser; humedad, plasticidad, aumento de la resistencia, densidad, peso específico, otros.

2.2.1. 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,

³ Lizzeth Geraldine. (14:53:20 UTC). Granulometría de suelos. (Ingeniería).

cambian su composición química y mineralógica, así como sus propiedades físicas y mecánicas en el tiempo.

2.2.2. 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.

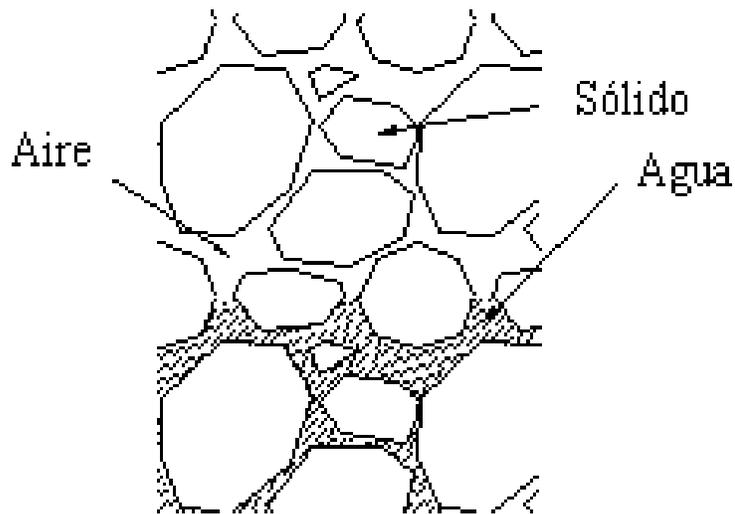
En adición a los suelos transportados y residuales, las turbas se derivan de la descomposición de materiales orgánicos encontrados en áreas de poca altura donde el nivel freático está cerca o arriba de la superficie del terreno. La presencia de un nivel alto del agua freática ayuda o soporta el crecimiento 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)

2.2.3. Composición de los suelos

Un suelo está compuesto por tres partes que son: sólido, líquido 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)⁴

Figura 2 Composición del suelo



Fuente: Eddy Herbas, 2010

⁴ Eddy Herbas. (2010). Fases del suelo.

2.2.4. 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 plásticas.</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

2.2.5. Análisis mecánico del suelo

El análisis mecánico es la determinación del rango del tamaño de partículas presentes en un suelo, expresado como un porcentaje del peso seco total. Se usan generalmente dos métodos para encontrar la distribución del tamaño de las partículas del suelo:

Análisis con cribado, para tamaño de partículas mayores de 0.075 mm de diámetro.

Análisis hidrométrico, para tamaños de partículas menores de 0.075 mm de diámetro.

2.2.6. 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 las 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 solo pueden 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 métodos 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 considera 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 la 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 sub-rasante, sub-base 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)

2.2.7. 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)

2.2.7.1. 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). Fue creada por los organismos viales de Estados Unidos, fue uno de los que generalizaron su utilización a casi todo tipo de construcción civil.

Se basa en que esta clasificación toma de mano la granulometría y la plasticidad de un suelo como las características principales para poder definir asociaciones que obedecen a rangos empíricos de clasificación.

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 al pasar por la criba N° 200 son clasificados en los A-4, A-5, A-6 y A-7. (Das, 2001)

2.2.7.1.1. 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.

Subgrupos 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 N°40 tiene las mismas características de los suelos A-4 y A-5.

Son gravas y arenas (arenas gruesas), que contienen limo y arcilla en cantidades reducidas, cuya plasticidad es baja, pero que excede al Grupo A-1.

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

Grupo A-3

En este grupo se encuentran 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.

2.2.7.1.2. Suelos finos

Contienen más del 35% del material fino que pasa el tamiz N°. 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

Pertenecen 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 N° 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 sub-rasante 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	40 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

2.2.7.2. 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).

2.3. 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 resistente⁵. (Bettina Yaneth Villa Gutiérrez, 2010)⁶

⁵ Asociación Dominicana de Productores de Cemento Portland (2010)
Pavimentos Unicapa de Alto Desempeño en Caminos Rurales

⁶ IBNORCA. (1995). Norma Boliviana-Cemento-Definiciones, clasificación y especificaciones.

Figura 3 Cemento



Fuente: IBNORCA, 1995

2.3.1. Principales características de los cementos

Finura: La finura del cemento estará definida por el tamaño de la partícula del material, esta propiedad se mide por medio de:

- Ensayo de turbidímetro de Wagner (ASTM C- 115)
- Ensayo Blaine de permeabilidad al aire (ASTM C-204)
- Material retenido en tamiz N° 325 (ASTM C-430)

Hidratación: La hidratación es la reacción química que presenta el cemento al ponerse en contacto con el agua. Cada partícula de cemento forma un aumento sobre su superficie, misma que gradualmente se expande hasta enlazarse con el aumento de otras partículas de cemento o hasta adherirse a las sustancias adyacentes. La hidratación prosigue mientras se disponga de espacio para los productos de hidratación y se tenga condiciones favorables humedad y temperatura. A medida que la hidratación continua, el cemento se rigidiza hasta volverse duro y resistente a los efectos de compresión.

Fraguado y endurecimiento: Los productos formados por la hidratación constituyen un gel formando inicialmente una pasta más o menos fluida o plástica, el fraguado se da en dos fases:

- Fraguado Inicial: Cuando la masa empieza a perder plasticidad, incluso se nota cierta consolidación.
- Fraguado Final: Cuando por sí y sin que se someta la pasta a presiones o cargas, estas conservan su forma.

Entre los cementos el más conocido y utilizado es el cemento Portland.

2.3.2. Cemento Portland

Es un conglomerante o cemento hidráulico que cuando se mezcla con grava áridos, agua y fibras de acero discontinuas y discretas tiene la propiedad de conformar una masa pétreo resistente y duradera denominada hormigón. Es el más usual en la construcción y es utilizado como conglomerante para la preparación del hormigón.

2.3.3. 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.

Entre los cementos el más conocido y utilizado es el cemento Portland.

2.3.4. Fabricación del cemento Portland

La fabricación del cemento Portland se da en tres fases:

Preparación de la mezcla de las materias primas.

Producción del Clinker.

Preparación del cemento.

2.3.5. 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 5 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 6 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

2.3.6. Ventajas que ofrece el cemento:

Optimización en los procesos constructivos.

Da la posibilidad de estabilizar los materiales de la zona, disminuyendo costos e impactos ambientales por menor demanda de equipos, materiales, transporte y escombreras.

Puede lograr mitigar la figuración debido a su menor calor de hidratación.

Disminuye los costos en la solución de rodadura gracias a la mejora en el suelo de soporte.

Ofrece un aumento de la vida de servicio del terreno intervenido debido a una mayor estabilidad y menor vulnerabilidad al agua y a la erosión.

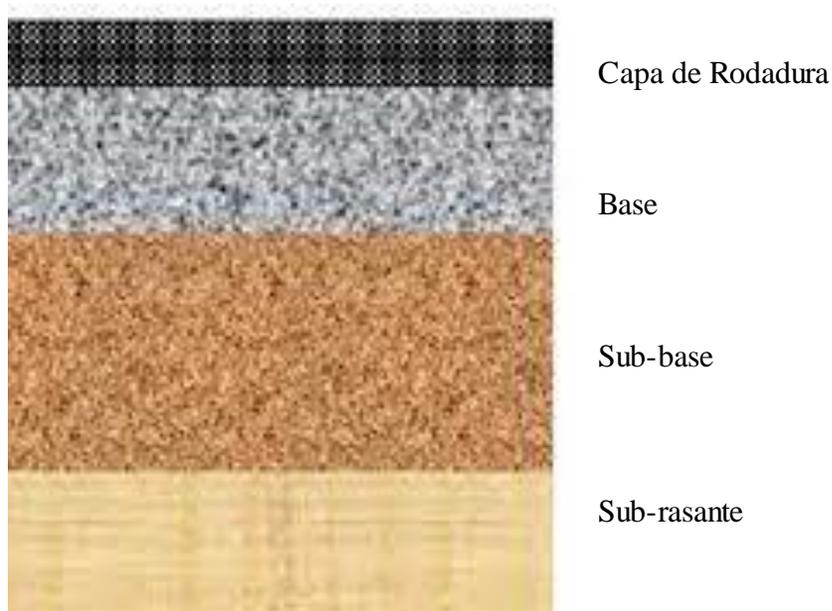
Este tipo de cemento puede también tener en su composición material reciclado de pre-consumo.

2.4. Sub-rasante

La sub-rasante 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 4 Ejemplo de la sub-rasante en un pavimento convencional



Fuente: Quezada-Osoria, s. f.

2.4.1. Categorías de la sub-rasante

Tabla 7 Categorías de la sub-rasante

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

Fuente: Anali C. Escandón Munguía, 2015

Se considerarán como materiales aptos para la coronación de la sub-rasante de los 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 sub-rasante

Las principales funciones de la capa sub-rasante 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. También sirve para economizar los espesores de pavimento, evitar que los materiales finos plásticos del cuerpo del terraplén contaminen al pavimento y que sea absorbido por las terracerías. Entre mejor calidad se tenga en esta capa el espesor del pavimento será más reducido y habrá un ahorro en costos sin mermar la calidad.

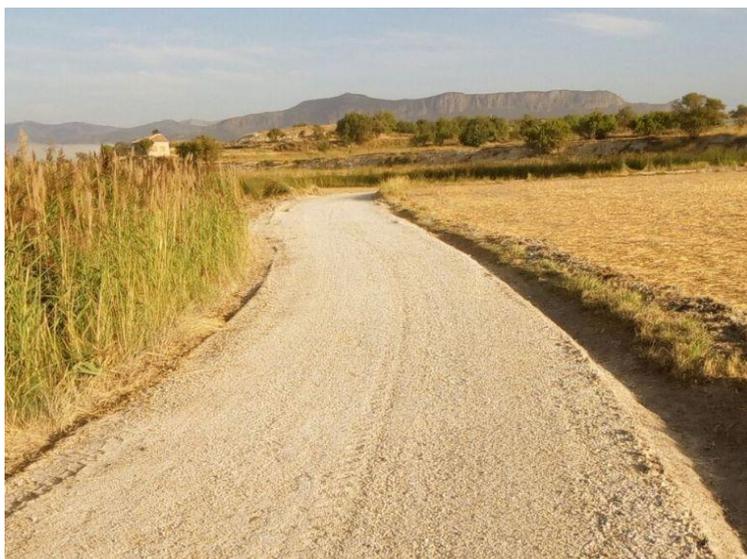
2.5. Carreteras de desarrollo (red Departamental)

Las carreteras de desarrollo de la red Departamental 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.

Las carreteras de desarrollo de la red Departamental han sido afectadas 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.).⁷

⁷ Ortiz, S. T. (s. f.). Ingeniería de Caminos Rurales. 181.

Figura 5 Carreteras de la red Departamental



Fuente: Ortiz, s. f.

2.5.1. Mantenimiento de carreteras de la red Departamental

Realizar mantenimiento a las carreteras y caminos⁸ (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).

⁸ Instituto Boliviano del Cemento y el Hormigón (2003). Mantenimiento de caminos Rurales con Pavimentos Unicapá

Figura 6 Mantenimiento de carreteras de la red Departamental



Fuente: IngeCivil, 2018

2.5.1.1. Tipos de mantenimiento en carreteras de la red Departamental

Existen 4 tipos de mantenimiento de carreteras:

Mantenimiento rutinario.

Mantenimiento preventivo.

Mantenimiento periódico.

Mantenimiento de emergencia.

En cuanto a los mantenimientos para las carreteras de la red Departamental están en el mantenimiento periódico que se hace cada 1 a 5 años, de esta manera asegurar la vida útil del camino. (IngeCivil, 2018)⁹

Las actividades a realizar son las siguientes:

Reposición de ripio.

Perfilado.

Nivelado.

⁹ IngeCivil. (2018, enero 30). Tipos de Matenimiento de Carreteras

2.6. Pavimento unicapa de alto desempeño

2.6.1. 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 2000¹⁰, el proyecto de investigación denominado “Pavimento Unicapa de Alto Desempeño”, con la finalidad de proponer una alternativa de pavimentación que simultáneamente sea económica y durable para la red de caminos rurales de alto tráfico, que aprovechará al máximo los suelos del lugar. En el cual, los objetivos se plantearon para tener como resultado:

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

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

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 de porcentajes de cemento para encontrar el más óptimo,

¹⁰ Instituto Salvadoreño del Cemento y el Concreto. (2000). Pavimentos Unicapa de Alto Desempeño.

demostrando así que el porcentaje óptimo es del 11 al 20% 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 en 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 alta o baja intensidad del tráfico.

2.6.2. Definición

El pavimento Unicapa de Alto Desempeño, puede definirse como el pavimento formado por el suelo existente del camino, mezclado con un porcentaje óptimo de cemento Portland del 11 al 20 %, dependiendo de la granulometría del suelo existente y su índice de plasticidad que forma una sola capa compactada, capaz de soportar las fuerzas de compresión y fricción producidas por un determinado tráfico, proporcionando a la vez una superficie de rodaje adecuada para caminos rurales y/o vías de alta intensidad del tráfico.

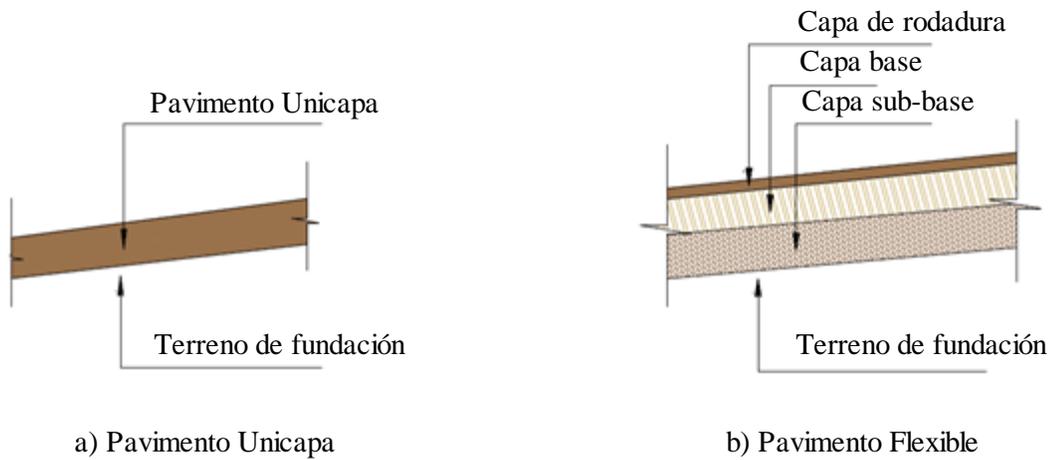
Los pavimentos Unicapa de Alto Desempeño ha sido diseñado específicamente para ofrecer capacidad estructural y seguridad al usuario en caminos con velocidades máximas de 65 km/h y Tráfico Promedio Diario Anual (TPDA) a 500 vehículos. (Instituto Boliviano del Cemento y el Hormigón, 2003).

Hablar de alto desempeño en carreteras, no significa diseñar y construir súper pavimentos, sino que diseñar pavimentos que se comporten satisfactoriamente desde el punto de vista estructural, simplificando proceso de diseños, construcción y control, dando resultado que el costo de estos pavimentos sea muy competitivo.

Para cumplir lo de alto desempeño, el pavimento deberá ser durable, pero para ser durable deberán ser no erosionables, diseñado para tráfico moderado, curado a tiempo y de forma adecuada, pendientes transversales adecuadas, impermeable y con un buen sistema de drenaje al diseño y especificaciones.

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

Figura 7 Tipos de pavimento



Fuente: Instituto Salvadoreño del Cemento y el Concreto, 2000

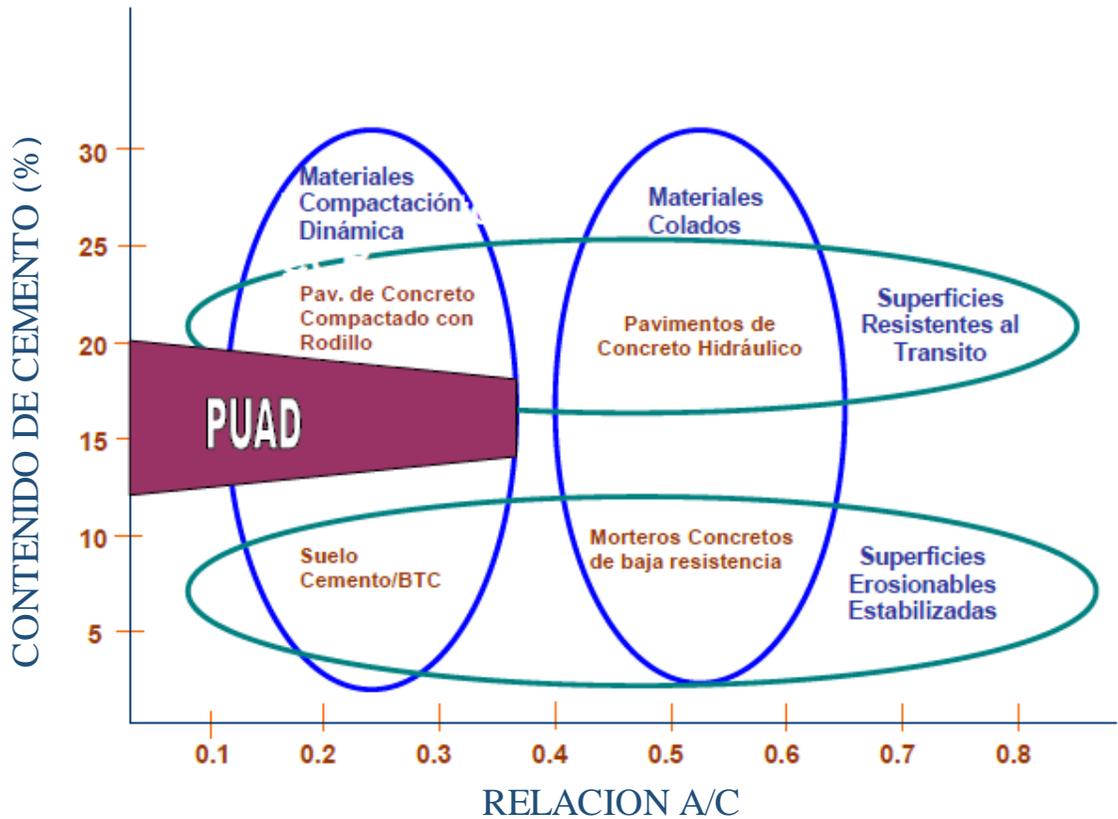
En general, en las superficies de pavimentos Unicapa, aparece en algunos sectores pequeñas fisuras de retracción, especialmente cuando se construye con suelos finos. Estas fisuras no representan ningún riesgo estructural y su aparición es normal.

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.

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, en 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 8 Ubicación de los PU en el conjunto de estructuras de pavimentos disponibles



Fuente: Instituto Salvadoreño del Cemento y el Concreto, 2000

2.6.3. Ventajas del pavimento Unicapa

Los Pavimentos Unicapa de Alto Desempeño poseen diversas ventajas desde el punto de vista material, proceso constructivo, control de calidad y costo; entre las principales se tiene:

Utilización de materiales y suelos del lugar. Es posible utilizar la mayoría de los suelos que se encuentran en la traza de la carretera.

Menor impacto ambiental. Reduce el uso de bancos de préstamo de materiales granulares.

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)

Figura 9 Aspecto de un Pavimento Unicapa de Alto Desempeño



Fuente: Instituto Salvadoreño del Cemento y el Concreto ISCYC

2.6.4. Campo de aplicación

Principalmente se puede aplicar en:

Caminos rurales.

Vías municipales no urbanas.

Calles en zonas rurales.

Caminos agrícolas.

Patios.

Plazas.

Estacionamientos.

2.6.5. Etapas para el diseño del proyecto

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

2.6.5.1. Geotecnia

Debido a que los Pavimentos Unicapa de Alto Desempeño se fundamentan principalmente en utilizar el suelo existente a lo largo del camino, se recomienda inicialmente un reconocimiento o recorrido en detalle a lo largo del proyecto, con la finalidad de identificar cambios en el tipo de suelo existente en la rasante del camino, pendientes, obras de drenaje, etc. Si la situación es tal, que dicho camino posee capas de material de aporte en su longitud total y existe una relativa uniformidad en espesor y tipo de material como ocurre en muchos caminos rurales, la campaña de ensayos de geotecnia puede realizarse a cada uno o dos kilómetros, realizando en cada punto los siguientes ensayos:

El ensayo de placa de carga AASHTO T-222, realizada a una profundidad de 30cm. de la superficie del camino.

Penetrómetro dinámico de cono (DCP), con los cuales se puede determinar el Módulo de Reacción del terreno (k).¹¹

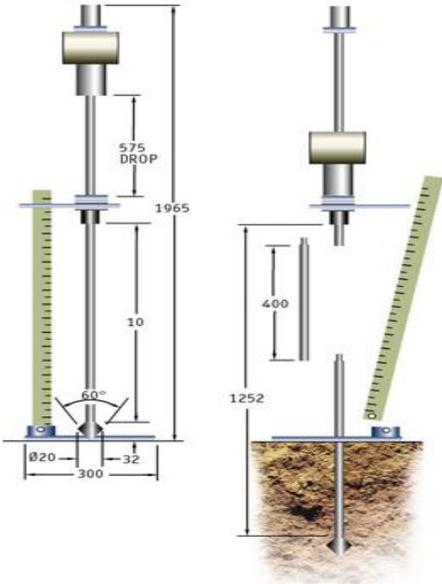
¹¹ ADATEC S.A. (2015). Penetrómetro Dinámico de Cono (DCP)

Figura 10 Placa de carga (AASHTO T-222)



Fuente: Administradora Boliviana de Carreteras, 2011

Figura 11 Penetrómetro dinámico de cono (DCP)

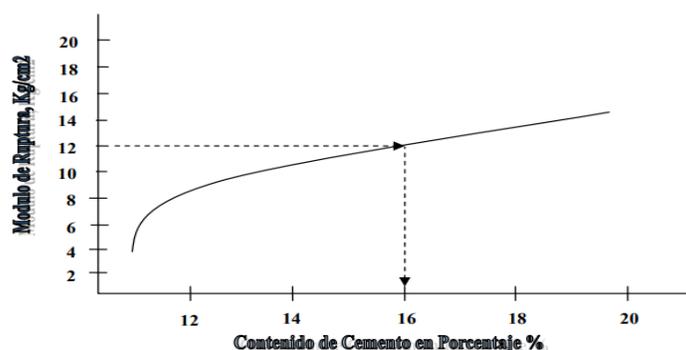


Fuente: ADATEC S.A., 2015

2.6.5.2. Diseño de mezcla

El planteamiento general para el diseño de mezcla de un Pavimento Unicapa de Alto Desempeño se resume en la construcción de un gráfico Módulo de Ruptura vs. Porcentaje de Cemento, en el que según el módulo de ruptura demandado en el diseño estructural, le corresponderá un porcentaje de cemento que deberá utilizarse en el diseño de la mezcla para lograr dicho módulo de ruptura¹².

Figura 12 Módulo de Ruptura vs. Porcentaje de Cemento



Fuente: Pavimento Unicapa de Alto Desempeño (ISCYC.)

2.6.5.3. Diseño estructural

El trabajo de proporcionar una teoría estructural y un método para el diseño de espesores de Pavimento Unicapa de Alto Desempeño, es una labor que ha evolucionado considerablemente desde el primer intento (año 2000) de plantear un método de diseño; actualmente se propone una metodología fundamentada en el método Parmigiani - Di Pace para diseño de pavimentos de concreto compactados con rodillos, la cual ha modificado el ISCYC en algunos parámetros, ya que como se ha comentado los Pavimentos Unicapa de Alto Desempeño no son pavimentos de concreto y dicho método está concebido para determinar esfuerzos admisibles por fatiga en módulos de ruptura y de elasticidad característicos en mezclas de concreto, así mismo existen en los Pavimentos

¹² Parámetros obtenidos a través de diversos ensayos en mezclas de PUAD, realizados en el Centro de Investigación del ISCYC.

Unicapa de Alto Desempeño cambios considerables en la estimación de la vida útil y en otros aspectos relacionados con la estructura del pavimento como el proceso constructivo y el control de calidad¹³.

Valor de soporte de la sub-rasante (K)

El soporte que la sub-rasante presta al pavimento se expresa con el valor del módulo de reacción “K”, de la sub-rasante 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 sino 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

¹³ Monografías de Concreto Compactado con Rodillo de Centro Técnico del Hormigón, Guayaquil Ecuador.

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 7, 14 y 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 rígido, 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 concebidos 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).

Figura 13 Periodo de Diseño de un Pavimento Unicapa de Alto Desempeño



Fuente: Instituto Boliviano del Cemento y el Hormigón

Comportamiento a la fatiga

Como se establece en 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 lo 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 continuo de los 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)

2.6.6. Desempeño estructural y funcional de los Pavimentos Unicapa

De acuerdo al tiempo estimado de vida útil en los Pavimentos Unicapa de Alto Desempeño el deterioro funcional y estructural es alcanzado en una etapa temprana relativamente en comparación con otro tipo de alternativas, como pavimentos de concreto o pavimentos flexibles.

En las superficies de Pavimento Unicapa de Alto Desempeño recién construidas, aparecen pequeñas fisuras de contracción, especialmente cuando se construye con suelos finos y plásticos, dichas fisuras no presentan ningún riesgo estructural; de acuerdo a las observaciones son muy finas y no progresan con el tiempo. Independientemente del tipo de suelo que se utilice para construir un pavimento de este tipo, iniciará una pequeña pérdida de material superficial después de aproximadamente un año de operación, principalmente superficies de Pavimentos Unicapa de Alto Desempeño que fueron curadas con riesgos continuos de agua o utilizando compuestos químicos de curado.

Esta pérdida de material superficial no influye en el comportamiento estructural y funcional de los Pavimentos Unicapa de Alto Desempeño, sin embargo es progresiva y deberá planearse una rehabilitación al año cinco aproximadamente, sin intervenciones de mantenimiento en la calzada durante cinco años de vida útil, únicamente limpieza del drenaje lateral.

Si el Pavimento Unicapa de Alto Desempeño se construye con sus pendientes transversales y longitudinales adecuadas, obras de drenaje superficial lateral, cajas, canaletas, etc., el valor recomendado de pendientes trasversal es de 3%.

Figura 14 Aspecto de un PUAD a un año de Operación. (Desempeño esperado)



Fuente: Pavimento Unicapa de Alto Desempeño, ISCYC, Documento N°1 Octubre de 2000.

2.6.7. Propiedades de ingeniería de los pavimentos Unicapa de Alto Desempeño

Tabla 10 Propiedades del pavimento Unicapa de Alto Desempeño

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 ¹⁴ (diversos tipos de suelo)	0.02% - 0.2%

Fuente: Instituto Salvadoreño del Cemento y el Concreto, 2000

2.6.8. Parámetros del método de diseño estructural

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

Valor de soporte de la sub-rasante “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)

¹⁴ Teoría según Monografía de Concreto Compactado con Rodillo de Centro Técnico del Hormigón, Guayaquil Ecuador.

2.6.9. Cálculo del espesor del pavimento Unicapa de Alto Desempeño

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 (Fcr) 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 debido a la carga y el módulo ruptura a flexión, en función de NR:

$$SR = 1.20 - 0.10 \log NR, \text{ para } NR \geq 100^{15}$$

¹⁵ Teoría según Monografía de Concreto Compactado con Rodillo de Centro Técnico del Hormigón. Guayaquil Ecuador.

Se determina la tensión admisible (σ_{adm})

$$\sigma_{adm} = SR * MR^{16}$$

Donde:

SR= Relaciones de tensiones.

MR= Módulo de ruptura.

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

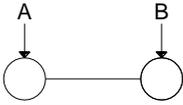
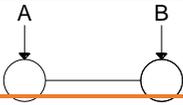
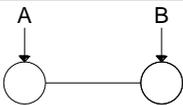
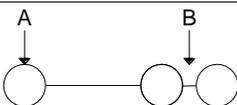
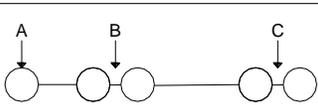
$$a = \left(\frac{P}{p * \pi} \right)^{0.5}$$

Donde:

P= Máxima carga de rueda simple (MN).

p= Presión de inflado de neumáticos (MPa).

Tabla 11 Valores de carga máxima por eje para vehículos de diseño

DENOMINACION	CARGA POR EJE EN TONELADAS	A	B	C
Lc		1.7	3.8	
C2		4.5	9.0	
BUS		5.5	10.0	
C3		5.0	16.0	
T3S2		5.7	16.4	16.4

Fuente: Cuerpo de colaboradores técnicos del ISCYC, 2002

¹⁶ Aplicación de Módulos de Ruptura de PUAD a las formulas Parmigiani –Di Pace

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

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

$$L = \sqrt[4]{\frac{E_c * h^3}{12 * (1 - \mu^2) * k}}^{17}$$

Donde:

E= Módulo de elasticidad (MPa).

h= Espesor asumido (m).

k= Valor de soporte de la sub-rasante (MPa/m).

μ = Coeficiente de Poisson.

Tabla 12 Rangos de Valores de “K”, recomendados para diferentes tipos de Suelo

Clasificación AASTHO	Descripción	Clasificación Unificada	Densidad Seca (lb/ft ³)	CBR (Porcentaje)	Valor de K (psi/pul)
SUELOS DE GRANO GRUESO					
A - 1 - a, Bien Graduada	Grava	GW	125 - 140	60 - 80	300 - 450
A - 1 - a, Pobrement graduada		GP	120 - 130	35 - 60	300 - 400
A - 1 - b	Arena Gruesa	SW	110 - 130	20 - 40	200 - 400
A - 3	Arena Fina	SP	105 - 120	15 - 25	150 - 300
A - 2 Suelo (Material Granular con abundantes partículas finas)					
A - 2 - 4, Gravosa	Gravas con Limos	GM	130 - 145	40 - 80	300 - 500
A - 2 - 5, Gravosa	Arena Gruesa con Limos				
A - 2 - 4, Arenoso	Arena con Limos	SM	120 - 135	20 - 40	300 - 400
A - 2 - 5, Arenoso	Arenas Gruesas con Limos				
A - 2 - 6, Gravosa	Grava con Arcilla	GC	120 - 140	20 - 40	200 - 450
A - 2 - 7, Gravosa	Arena Gruesa con Arcilla				
A - 2 - 6, Arenoso	Arena con Arcilla	SC	105 - 130	10 - 20	150 - 350
A - 2 - 7, Arenoso	Grava con Arena y arcilla				
SUELOS FINOS					
A - 4	Limos	ML	90 - 105	4 - 8	25 - 165*
	Limos/Arenas y Mezcla de Gravas	OL	100 - 125	5 - 15	40 - 220*
A - 5	Limo pobremente graduado	MH	80 - 100	4 - 8	25 - 190*
A - 6	Arcilla Plástica	CL	100 - 125	5 - 15	25 - 255*
A - 7 - 5	Arcilla Moderadamente Plástica	CL, OL	90 - 125	4 - 15	25 - 215*
A - 7 - 6	Arcilla altamente Plástica	CH, OH	80 - 110	3 - 5	40 - 220*

Fuente: Supplement to the AASHTO Guide Desing of Pavement Structures, 1998

¹⁷ Aplicación del Módulo de Elasticidad característico de PUAD en las fórmulas de Westergaard adoptadas por Parmigiani Di Pace

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.

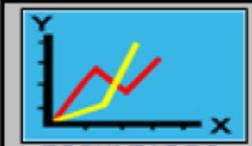
Gráfica 1 Hoja de Excel para el cálculo de espesores del pavimento Unicapa

PAYIMENTO UNICAPA DE ALTO DESEMPEÑO : DISEÑO DE ESPESORES DE PAYIMENTO 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

2.6.10. 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:

2.6.10.1. Preparación del suelo existente

La preparación del suelo tiene como objetivos principal, facilitar la acción de los mezcladores, por un lado, y, por otro, homogeneizar la capa del 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, 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 a 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 solo es posible si se han deshecho los terrones y grumos arcillosos.

Hay suelos que forman 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 ó 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 15 Escarificado del suelo



Fuente: Manuel Antonio Artero Alvarado, 2003

2.6.10.2. 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 máquinas 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 los 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 del extendido.

La extensión del cemento debe efectuarse por bandas paralelas adyacentes, borde contra borde, sobre toda la superficie a tratar y con 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 16 Colocado y la distribución del cemento



Fuente: Instituto Salvadoreño del Cemento y el Concreto, 2000

2.6.10.3. 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 por 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, las que suelen ser mayores 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 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”, que 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 17 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)

2.6.10.4. 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 18 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 18.

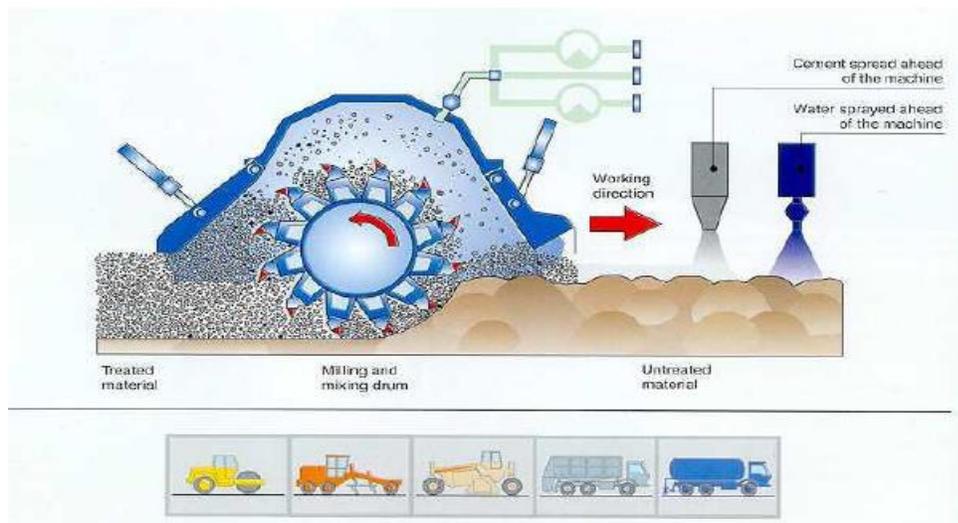
Se utiliza un número determinado de equipos; primeramente se riega el agua con un camión cisterna, después se extiende el cemento con un camión de riego, luego la máquina mezcladora – escarificadora, por medio de un tambor de aspas dentro de la carcasa protectora homogéneamente los diferentes materiales; la mezcla obtenida sale por una compuerta regulable situada en la parte trasera de la carcasa, para que seguidamente la máquina que se encarga 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 19 Pulvimezclador jalada por un tractor



Fuente: Instituto Boliviano del Cemento y el Hormigón, 2009

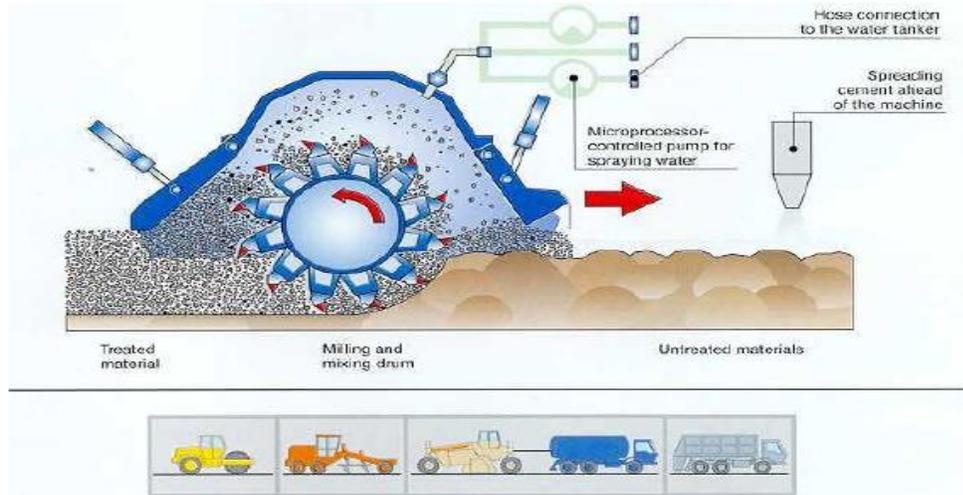
Figura 20 Mezclado – escarificado, aplicando agua y cemento simultáneamente



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 21 Aplicando el cemento y posteriormente escarificando

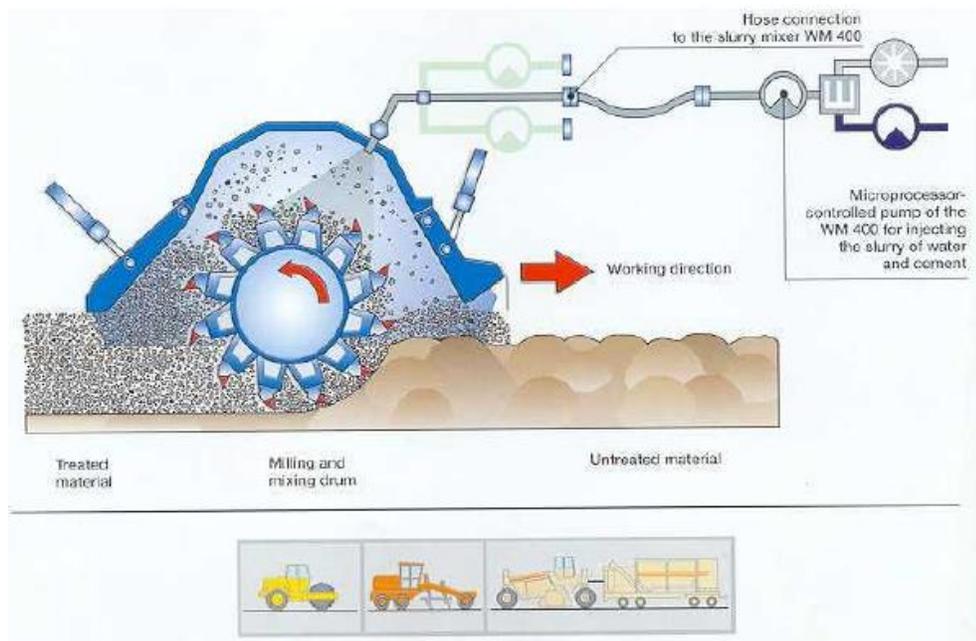


Fuente: Manuel Antonio Artero Alvarado, 2003

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 22 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 a la 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 descrita. (Manuel Antonio Artero Alvarado, 2003)

2.6.10.5. 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 pueden 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 toman 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 unidos por articulación a un rodillo vibratorio, lisos o con patas. (Manuel Antonio Artero Alvarado, 2003)

Figura 23 Proceso de Compactación



Fuente: Instituto Boliviano del Cemento y el Hormigón, 2003

2.6.10.6. 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)

2.6.10.7. 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 24 Juntas de control



Fuente: Instituto Boliviano del Cemento y el Hormigón, 2009

2.6.10.8. 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. El curado es posible realizarlo tambien aplicando riegos continuos de agua por tres días, 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 25 Compuesto químico de curado



Fuente: Manuel Antonio Artero Alvarado, 2003

2.6.10.9. Apertura al tráfico

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

Reparación de Pavimentos Unicapa, procedimiento para Trabajos de Bacheo.

Los bordes verticales se perfilan con un cortador de pavimento, llegando hasta la capa base, donde exista material firme y sin alteración.

Se retira el material afectado del pavimento; en caso de encontrarse con material con exceso de humedad o material suelto, remover el material y si el espesor lo amerita realizar cambio de material y realizar el debido compactado o conformación.

Se sopletea el hueco del bache retirando el polvo del fondo y las paredes verticales, incluso el área alrededor del bache ya cortado anteriormente.

Se aplica un riego de liga, principalmente en las paredes verticales para sellar la instrucción de agua, también en los laterales para realizar el adecuado empalme.

Se deposita la mezcla de bacheo uniformemente con rastrillo o afinador; la mezcla debe estar a temperatura de aplicación para una mejor adherencia y cohesión de las partículas del material.

Se compacta con rodillo o placa vibratoria a la densidad necesaria.

2.6.11. Proceso de dilatación y contracción

Dilatación: El hormigón se comporta frente a las bajas temperaturas como si se tratase de una piedra natural, siendo su porosidad, así como su grado de saturación en agua, las características que determinan su comportamiento frente a una helada. En efecto, al congelarse el agua introducida en los capilares, aumenta de volumen y ejerce un efecto de cuña que fisura al hormigón.

Como los coeficientes de dilatación térmica de las diversas rocas que constituyen los áridos y de la pasta de cemento no son iguales, las variaciones de temperatura provocan en la masa de hormigón movimientos térmicos diferenciales que pueden amplificar su sistema interno de micro fisuras. Por ello, en los hormigones que hayan de estar sometidos a variaciones importantes de temperatura, conviene escoger los materiales componentes de forma que su compatibilidad térmica sea la mayor posible.

Contracción: Es el acortamiento que experimenta el concreto durante el proceso de endurecimiento y secado. Se debe principalmente a la pérdida por evaporación del exceso de agua de mezclado.

La contracción del concreto se conoce como el resultado de la pérdida de humedad. También se ha demostrado que el concreto se expandirá si después de haberse secado o parcialmente secado es sometido a humedad o si es sumergido en el agua.

Es un fenómeno simple aparente del concreto cuando este pierde agua. Es una deformación tridimensional pero se expresa comúnmente como una deformación lineal.

2.6.11.1. Variables que afectan la contracción del concreto

Cantidad de refuerzo. El concreto reforzado se contrae menos que el concreto simple; la diferencia relativa es función del porcentaje de refuerzo.

Aditivos. Este efecto varía dependiendo del tipo de aditivo. Un acelerador tal como cloruro de calcio, usado para acelerar el endurecimiento y la colocación del concreto, aumenta la contracción.

Tipo de cemento. El cemento Portland tipo III de resistencia rápida normalmente se contrae 10% más que un cemento Portland normal (tipo I) o cemento Portland modificado (tipo II).

Agregados. Actúan para restringir la contracción de la pasta de cemento.

Relación agua-cemento. Cuanto mayor es la relación agua-cemento, mayores son los efectos de la contracción.

Tamaño del elemento de concreto. Tanto el valor como la magnitud de la contracción disminuyen con un incremento en el volumen del elemento de concreto.

Condiciones del medio ambiente. La humedad relativa del medio afecta notablemente la magnitud de la contracción; el valor de la contracción es más bajo donde la humedad relativa es alta.

2.6.11.2. Deformaciones por contracción

Contracción intrínseca o espontánea: es la verdadera contracción de fraguado, producto del proceso químico de hidratación del cemento y su propiedad inherente de disminuir volumen en este estado. Ocurre dentro de la masa del concreto, sin contacto con el medio ambiente.

Contracción por secado: considerada como la verdadera contracción. Este tipo de contracción involucra el movimiento y pérdida de agua dentro de los poros

extremadamente pequeños de la pasta hidratada de cemento y desde la estructura de los productos de hidratación o gel.

Contracción por carbonatación: es un tipo de retracción secundaria que suele ocurrir en ambientes o atmósferas ricas en dióxido de carbono por relación de diversos productos de la hidratación del cemento con el CO₂ del medio ambiente.

Contracción por secado del hormigón

Es la deformación más importante no dependiente de las cargas aplicadas que experimenta el hormigón convencional sano y es considerada una de las principales causa de su fisuración. Entre los parámetros no dependientes del hormigón que más afectan la contracción por secado están la humedad relativa, la velocidad y duración del secado y también las dimensiones lineales del elemento estructural.

2.6.11.3. Factores que afectan la contracción por secado

Contenido de agua

A mayor cantidad de agua, mayor secado habrá. Esto nos quiere decir que a mayor contenido de agua, tendremos una mayor contracción, no solo porque se secará durante más tiempo, sino que el concreto, al tener más agua, tendrá más volumen, por lo que la diferencia de volúmenes final será mayor a la de un concreto con contenido menor de agua.

Agregados

Cuanto mayor es el tamaño del agregado, menor es la contracción por secado, ya que estos ocupan más espacios y tienen menor contracción que el agregado fino, por lo que se reduce la contracción. Además, mientras más rígido y menos elástico sea el agregado, mucho menor será la contracción. Mientras más grande y compacto sea el agregado, menor contracción habrá.

Aditivos

A pesar de no tener mucha influencia en la contracción por secado, hay algunos aditivos, como los aceleradores, que aumentan la contracción. Otros, como los reductores de agua,

aumentan también la contracción, esto depende mucho de la manera en cómo trabaja dentro del concreto.

Curado

Este es un factor importante, más por la forma en cómo se ha de aplicar sobre el concreto. La importancia de este radica en no dejar que el agua se evapore en este proceso, ya que esto haría que el concreto se contraiga demasiado. Es por ello que debemos practicar más el curado húmedo, para evitar así la evaporación de agua en el proceso de curado, dejando después que este se eleve a unos niveles normales.

Tiempo y humedad

Para que el agua contenida dentro del concreto salga al exterior o hacia los capilares más grandes del mismo, tiene que regirse del tiempo y de la humedad del ambiente, ya que estos dos influyen en la velocidad de salida de dicha agua.

Geometría del elemento de concreto

Dado que el agua es reacia a salir a la atmósfera, las dimensiones del elemento de concreto influyen en la contracción por secado, ya que si el elemento tiene dimensiones largas, el agua demorará más en salir, y por ende, se absorberá más agua, y habrá menos contracción, lo cual no ocurrirá con un elemento con dimensiones pequeñas.

2.6.12. 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.

2.6.13. 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)

2.6.14. Experiencias en El Salvador sobre el Pavimento Unicapa de Alto Desempeño

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 energías 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 13 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
Tráfico:	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

Figura 26 Tramo Río Chiquito, Las Pilas (2003)



Fuente: Instituto Salvadoreño del Cemento y el Concreto, 2000

Figura 27 Tramo Río Chiquito, Las Pilas – El Salvador, después de 9 años



Fuente: Instituto Salvadoreño del Cemento y el Concreto, 2000

Tabla 14 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
Tráfico:	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

Figura 28 Tramo Suchito – Cinquera, Cuscatlán – El Salvador (2010)



Fuente: Instituto Salvadoreño del Cemento y el Concreto, 2000

Figura 29 Tramo Suchito – Cinquera, Cuscatlán – El Salvador (2012), después de 2 años



Fuente: Instituto Salvadoreño del Cemento y el Concreto, 2000

2.6.15. Experiencia en otros países sobre el Pavimento Unicapa de Alto Desempeño

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

Tabla 15 Propiedades del pavimento Unicapa del tramo Managua, Nicaragua

Nicaragua	
Tramo:	Cedro Galan - Managua
Construcción:	Julio, 2012
Longitud:	500 m
Periodo de diseño:	6 años
Tráfico:	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

Figura 30 Camino Cedro Galan, Managua – Nicaragua



Fuente: Instituto Salvadoreño del Cemento y el Concreto, 2000

Tabla 16 Propiedades del pavimento Unicapa del tramo de Guancaste, Costa Rica

Costa Rica	
Tramo:	El Jobo, La Cruz - Guancaste
Construcción:	2007
Longitud:	400 m
Contenido de cemento:	15 %
Espesor:	0.22 m

Fuente: Carlos Quintanilla, 2012

Figura 31 El Jobo, La Cruz provincia de Guanacaste – Costa Rica



Fuente: Instituto Salvadoreño del Cemento y el Concreto, 2000

Tabla 17 Propiedades del PU 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

Figura 32 San Juan Comalapa – San Martín Jilotepeque, Chimaltenango – Guatemala



Fuente: Instituto Salvadoreño del Cemento y el Concreto, 2000

Tabla 18 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

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

2.6.16. 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 en 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 19 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
Tráfico:	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

Figura 33 Alto Limanipata, La Paz – Bolivia



Fuente: Instituto Boliviano del Cemento y el Hormigón, 2003

Tabla 20 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

Figura 34 Lamboyo, Tarabuco – Zundañez Chuquisaca – Bolivia



Fuente: Instituto Boliviano del Cemento y el Hormigón, 2003

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA DE APLICACIÓN DE QUEBRADA LAS VACAS -SALINAS

3.1. Introducción

Para el desarrollo de la investigación se realizaron pruebas de laboratorio identificadas en tres diferentes tramos los cuales están ubicados en la provincia O'Connor 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.

3.2. Ubicación

El tramo Quebrada de las Vacas – Salinas recae íntegramente en el Departamento de Tarija, en su recorrido longitudinal de Sur a Sur Oeste el tramo atraviesa por la provincia O'Connor de nuestro Departamento.

El tramo básicamente está ubicado en la Primera Sección de la Provincia O'Connor en el Cantón Salinas, perteneciente al Municipio de Entre Ríos.

Se tomaron muestras de suelo natural de tres diferentes lugares:

Muestra 1

El primer suelo, denominado “Muestra 1” se extrajo de la zona El Puesto; geográficamente se encuentra $21^{\circ}20'50.89''$ latitud sur y $64^{\circ}42'55.97''$ de longitud oeste.

Figura 35 Extracción de muestra del tramo La Cueva

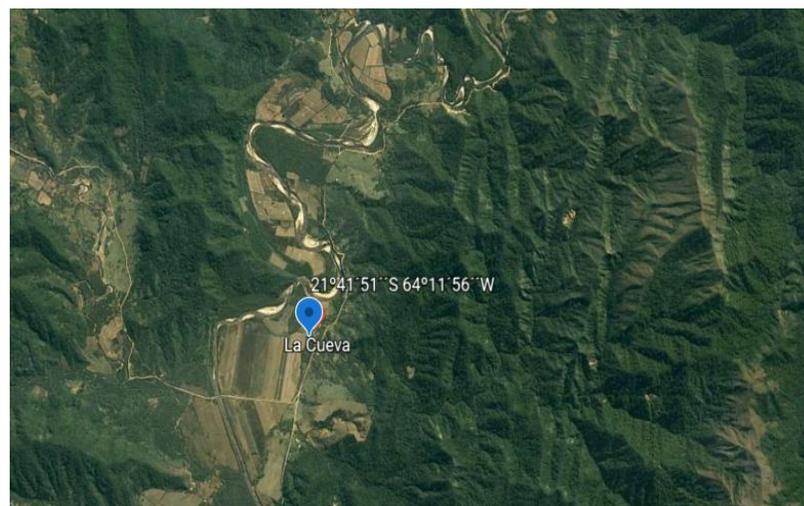


Fuente: Google Earth, s. f.

Muestra 2

El segundo suelo, denominado “Muestra 2” se extrajo de la zona La Cueva; geográficamente se encuentra $21^{\circ}41'51''$ latitud sur y $64^{\circ}11'56''$ de longitud oeste.

Figura 36 Extracción de muestra del tramo La Cueva

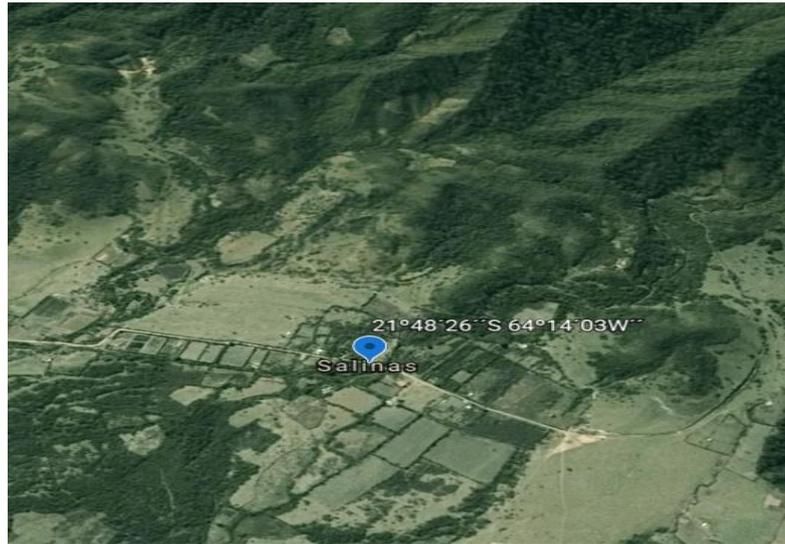


Fuente: Google Earth, s. f.

Muestra 3

El tercer suelo, denominado “Muestra 3” se extrajo de la zona de Salinas; geográficamente se encuentra $21^{\circ}48'26''$ latitud sur y $64^{\circ}14'03''$ de longitud oeste.

Figura 37 Extracción de muestra del tramo de Salinas



Fuente: Google Earth, s. f.

3.3. Caracterización de los suelos sub-rasantes

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 21 Muestra 1- El Puesto

Muestra 1 – El Puesto					
Ensayos		Unidad	Ensayo 1	Ensayo 2	Promedio
Contenido de humedad		%	0.60	0.65	0.63
Límites	Líquido	%	0	0	0
	Plástico	%	0	0	0
	Índice de plasticidad	%	0	0	0
	Índice de grupo	Adim	0	0	0
Granulometría	% retenido de N° 4	%	64.80	64.67	64.74
	% retenido de N° 10	%	58.10	57.92	58.01
	% retenido de N° 40	%	48.17	47.91	48.04
	% retenido de N° 200	%	22.33	21.98	22.16
Compactación	Densidad máxima	gr/cm ³	2.13	2.17	2.15
	Humedad óptima	%	6.83	6.69	6.76
Tipo de suelo					
AASHTO			A-1-b ⁽⁰⁾		
SUCS			SP		

Fuente: Elaboración propia

Tabla 22 Muestra 2 – La Cueva

Muestra 2 La Cueva					
Ensayos		Unidad	Ensayo 1	Ensayo 2	Promedio
Contenido de humedad		%	2.04	2.08	2.06
Límites	Líquido	%	17	18.64	17.82
	Plástico	%	16.41	17.39	16.90
	Índice de plasticidad	%	0.59	1.29	0.94
	Índice de grupo	Adim.	0	0	0
Granulometría	% retenido de N° 4	%	78.43	78.30	78.37
	% retenido de N° 10	%	62.90	62.72	62.81
	% retenido de N° 40	%	37.17	36.94	37.06
	% retenido de N° 200	%	22.67	22.64	22.66
Compactación	Densidad máxima	gr/cm ³	2.16	2.17	2.17
	Humedad óptima	%	7.44	7.44	7.44
Tipo de suelo					
AASHTO			A-1b ⁽⁰⁾		
SUCS			SP		

Fuente: Elaboración propia

Tabla 23 Muestra 3 - Salinas

Muestra 3 – Salinas					
Ensayos		Unidad	Ensayo 1	Ensayo 2	Promedio
Contenido de humedad		%	2.46	2.08	2.27
Límites	Líquido	%	20.82	20.50	20.66
	Plástico	%	15.30	14.40	14.85
	Índice de plasticidad	%	5.51	6.09	50.80
	Índice de grupo	Adim	0	0	0
Granulometría	% retenido de N° 4	%	80.60	80.25	80.43
	% retenido de N° 10	%	72.05	71.65	71.85
	% retenido de N° 40	%	61.20	60.75	60.98
	% retenido de N° 200	%	31	30.49	30.75
Compactación	Densidad máxima	gr/cm ³	2.13	2.13	2.13
	Humedad óptima	%	8.15	8.11	8.13
Tipo de suelo					
AASHTO			A-2-4		
SUCS			SM		

Fuente: Elaboración propia

3.4. Caracterización del cemento

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

Tabla 24 Caracterización del cemento

Caracterización del cemento		
Ensayos	Valores	Unidad
Finura del cemento	2.07	%
Peso específico del cemento	3.04	gr/cm ³

Fuente: Elaboración propia

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

3.5. Elaboración de especímenes

Debido a que en los pavimentos Unicapá no se tiene una normativa que especifique la práctica de moldeado de especímenes de prueba, se plantea en los siguientes una propuesta fundamentada en las características de los pavimentos Unicapá 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 muy baja, no pueden ser colocados porque no tienen fluidez.

Para la elaboración de especímenes y evaluar la resistencia se propuso utilizar:

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

3.6. 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, densidad máxima y, según la norma ACI 211, se hacen las mezclas de suelo, cemento y agua 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”.

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

Al 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 38 Engrasar al molde de la pobreta



Fuente: Elaboración propia

Preparación de la muestra de la sub-rasante

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 y tamizamos por el tamiz 3/4.

La capacidad volumétrica del molde se obtuvo a través de sus dimensiones para la mezcla del suelo natural de sub-rasante con el 11%, 15% y 20% de cemento:

Muestra 1: El Puesto

Con el 11% de cemento de 1.50 kilogramos peso parcial teniendo un peso total (suelo más cemento) de 12.17 kilogramos.

Con el 15% de cemento de 2.05 kilogramos peso parcial teniendo un total (suelo más cemento) de 11.62 kilogramos.

Con el 20% de cemento de 2.73 kilogramos peso parcial teniendo un total (suelo más cemento) de 10.94 kilogramos.

Muestra 2: La Cueva

Con el 11% de cemento de 1.51 kilogramos peso parcial teniendo un peso total (suelo más cemento) de 12.22 kilogramos.

Con el 15% de cemento de 2.06 kilogramos peso parcial teniendo un total (suelo más cemento) de 11.67 kilogramos.

Con el 20% de cemento de 2.74 kilogramos peso parcial teniendo un total (suelo más cemento) de 10.99 kilogramos.

Muestra 3: Salinas

Con el 11% de cemento de 1.49 kilogramos peso parcial teniendo un peso total (suelo más cemento) de 12.05 kilogramos.

Con el 15% de cemento de 2.03 kilogramos peso parcial teniendo un total (suelo más cemento) de 11.51 kilogramos.

Con el 20% de cemento de 2.71 kilogramos peso parcial teniendo un total (suelo más cemento) de 10.84 kilogramos.

Figura 39 Mezcla total del espécimen, suelo y cemento



Fuente: Elaboración propia

En una fuente se mezcló uniformemente el suelo.

Figura 40 Mezcla homogénea



Fuente: Elaboración propia

Adición del agua a la mezcla de suelo-cemento

Según la norma ACI 211 se calculó la cantidad de agua a utilizar para cada muestra con los respectivos porcentajes de cemento.

Figura 41 Adición del agua a la mezcla



Fuente: Elaboración propia

Debe mezclarse homogéneamente y evitar que se hagan grumos.

Figura 42 Mezclar homogéneamente



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 el 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.

Figura 43 Probeta de suelo - cemento



Fuente: Elaboración propia

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

Figura 44 Probeta de suelo - cemento



Fuente: Elaboración propia

Curado de las probetas cilíndricas

A cada probeta, al momento de desmoldarla se le agrega agua 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 evapore y produzca fisuras debilitando al espécimen.

Figura 45 Curado de las probetas



Fuente: Elaboración propia

Se elaboró 9 probetas para cada suelo y pasados los 28 días, se llevó a la prensa hidráulica para calcular un esfuerzo de compresión obteniendo los valores necesarios para el objetivo de la investigación.

3.7. Procedimiento de elaboración de vigas

Con los valores de humedad óptima, densidad máxima del suelo natural y según la norma ACI 211 se hacen las mezclas de suelo sub-rasante, cemento y agua 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 60 cm y con un martillo de 10 lb (4.54 Kg.), altura de caída de 18".

Engrasar el molde de la viga

Al 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 existan pérdidas considerables.

Figura 46 Molde de viga



Fuente: Elaboración propia

Preparación de la muestra de la sub-rasante

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 del suelo natural de sub-rasante con el 11%, 15 % y 20% de cemento:

Muestra 1: El Puesto

Con el 11% de cemento de 3.79 kilogramos peso parcial teniendo un peso total (suelo más cemento) de 30.71 kilogramos.

Con el 15% de cemento de 5.17 kilogramos peso parcial teniendo un peso total (suelo más cemento) de 29.33 kilogramos.

Con el 20% de cemento de 6.90 kilogramos peso parcial teniendo un peso total (suelo más cemento) de 27.60 kilogramos.

Muestra 2: La Cueva

Con el 11% de cemento de 3.84 kilogramos peso parcial teniendo un peso total (suelo más cemento) de 31.14 kilogramos.

Con el 15% de cemento de 5.24 kilogramos peso parcial teniendo un peso total (suelo más cemento) de 29.24 kilogramos.

Con el 20% de cemento de 6.99 kilogramos peso parcial teniendo un peso total (suelo más cemento) de 27.99 kilogramos.

Muestra 3: Salinas

Con el 11% de cemento de 3.79 kilogramos peso parcial teniendo un peso total (suelo más cemento) de 30.71 kilogramos.

Con el 15% de cemento de 5.17 kilogramos peso parcial teniendo un peso total (suelo más cemento) de 29.33 kilogramos.

Con el 20% de cemento de 6.90 kilogramos peso parcial teniendo un peso total (suelo más cemento) de 27.60 kilogramos.

En una bandeja grande se mezcló uniformemente el suelo.

Figura 47 Suelo - cemento



Fuente: Elaboración propia

Adición del agua a la mezcla de suelo-cemento

Según la norma ACI 211 se calculó la cantidad de agua a utilizar para cada muestra con los respectivos porcentajes de cemento.

Figura 48 Adición del agua al suelo - cemento



Fuente: Elaboración propia

Compactación de las vigas

Se 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 49 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 50 Viga de suelo - cemento



Fuente: Elaboración propia

Curado de las vigas

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 evapore y produzca fisuras debilitando al espécimen.

Figura 51 Rociador



Fuente: Imágenes Google

Se elaboró 3 vigas para cada suelo y pasados los 28 días, se llevó a la prensa hidráulica para que calcule el esfuerzo de flexión obteniendo los valores necesarios para el objetivo de la investigación.

3.8. Ensayo de rotura de probetas cilíndricas a compresión

El ensayo se realizó en las instalaciones de la Empresa Consultora EOLO S.R.L. Servicio de Laboratorio de suelos y geotecnia.

La resistencia a compresión fue determinada mediante una prensa mecánica que aplica cargas a una razón uniforme con una capacidad máxima de 100000Kg. 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 C)

Figura 52 Prueba de resistencia en compresión



Fuente: Elaboración propia

Figura 53 Rotura de la probeta



Fuente: Elaboración propia

3.8.1. Valores de esfuerzo de las probetas cilíndricas

Tabla 25 Valores de esfuerzo de rotura en probetas cilíndricas – La Cueva

N°	F. de Vaciado	F. de Rotura	Edad (días)	Altura (cm)	Diámetro (cm)	Área (cm ²)	Carga (Kg)	Esfuerzo (Kg/cm ²)
1	12/11/2020	10/12/2020	28	30.00	15.00	176.71	10289.0	58.22
2	12/11/2020	10/12/2020	28	30.00	15.00	176.71	11218.0	63.48
3	12/11/2020	10/12/2020	28	30.00	15.00	176.71	12208.0	69.08
11% PROMEDIO =								63.60
1	12/11/2020	10/12/2020	28	30.00	15.00	176.71	10978.0	62.12
2	12/11/2020	10/12/2020	28	30.00	15.00	176.71	11689.0	66.15
3	12/11/2020	10/12/2020	28	30.00	15.00	176.71	12979.0	73.45
15% PROMEDIO =								67.24
1	13/11/2020	11/12/2020	28	30.00	15.00	176.71	13978.0	79.10
2	13/11/2020	11/12/2020	28	30.00	15.00	176.71	14895.0	84.29
3	13/11/2020	11/12/2020	28	30.00	15.00	176.71	13998.0	79.21
20% PROMEDIO =								80.87

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 26 Valores de esfuerzo de rotura en probetas cilíndricas – Salinas

Nº	F. de Vaciado	F. de Rotura	Edad (días)	Altura (cm)	Diámetro (cm)	Área (cm ²)	Carga (Kg)	Esfuerzo (Kg/cm ²)
1	13/11/2020	11/12/2020	28	30.00	15.00	176.71	10299.0	58.28
2	13/11/2020	11/12/2020	28	30.00	15.00	176.71	11568.0	65.46
3	13/11/2020	11/12/2020	28	30.00	15.00	176.71	12168.0	68.86
11% PROMEDIO =								64.20
1	14/11/2020	12/12/2020	28	30.00	15.00	176.71	12990.0	73.51
2	14/11/2020	12/12/2020	28	30.00	15.00	176.71	13890.0	78.60
3	14/11/2020	12/12/2020	28	30.00	15.00	176.71	14890.0	84.26
15% PROMEDIO =								78.79
1	14/11/2020	12/12/2020	28	30.00	15.00	176.71	15878.0	89.85
2	14/11/2020	12/12/2020	28	30.00	15.00	176.71	14889.0	84.25
3	14/11/2020	12/12/2020	28	30.00	15.00	176.71	11989.0	67.84
20% PROMEDIO =								80.65

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 27 Valores de esfuerzo de rotura en probetas cilíndricas – El Puesto

Nº	F. de Vaciado	F. de Rotura	Edad (días)	Altura (cm)	Diámetro (cm)	Área (cm ²)	Carga (Kg)	Esfuerzo (Kg/cm ²)
1	16/11/2020	14/12/2020	28	30.00	15.00	176.71	10930.0	61.85
2	16/11/2020	14/12/2020	28	30.00	15.00	176.71	9560.0	54.10
3	16/11/2020	14/12/2020	28	30.00	15.00	176.71	12240.0	69.26
11% PROMEDIO =								61.74
1	16/11/2020	14/12/2020	28	30.00	15.00	176.71	15270.0	86.41
2	16/11/2020	14/12/2020	28	30.00	15.00	176.71	12880.0	72.89
3	16/11/2020	14/12/2020	28	30.00	15.00	176.71	15490.0	87.66
15% PROMEDIO =								82.32
1	17/11/2020	15/12/2020	28	30.00	15.00	176.71	23450.0	132.70
2	17/11/2020	15/12/2020	28	30.00	15.00	176.71	15320.0	86.69
3	17/11/2020	15/12/2020	28	30.00	15.00	176.71	22350.0	126.48
20% PROMEDIO =								115.29

Fuente: Elaboración Propia

3.9. 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 de ensayo, el cual puede ser lecturado fácilmente. (Véase ANEXO C).

Figura 54 Prueba de resistencia en flexión



Fuente: Elaboración Propia

Figura 55 Rotura de viga



Fuente: Elaboración Propia

Tabla 28 Valores de esfuerzo de viga – El Puesto

N°	F. de Vaciado	F. de Rotura	Edad (días)	Altura (cm)	Ancho (cm)	Largo (cm)	Carga (KN)	Esfuerzo	
								(MPa)	(Kg/cm ²)
1	18/12/2020	15/01/2021	28	15.00	15.00	60.00	10.61	1.45	1479
2	18/12/2020	15/01/2021	28	15.00	15.00	60.00	10.90	1.49	15.19
3	18/12/2020	15/01/2021	28	15.00	15.00	60.00	11.10	1.53	15.60
11% PROMEDIO =								1.49	15.19
1	21/12/2020	18/01/2021	28	15.00	15.00	60.00	11.30	1.52	15.50
2	21/12/2020	18/01/2021	28	15.00	15.00	60.00	11.36	1.56	15.91
3	21/12/2020	18/01/2021	28	15.00	15.00	60.00	11.39	1.61	16.42
15% PROMEDIO =								1.56	15.94
1	22/12/2020	19/01/2021	28	15.00	15.00	60.00	12.30	1.64	16.72
2	22/12/2020	19/01/2021	28	15.00	15.00	60.00	12.32	1.66	16.93
3	22/12/2020	19/01/2021	28	15.00	15.00	60.00	12.35	1.69	17.23
20% PROMEDIO =								1.66	16.96

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 29 Valores de esfuerzo de viga – La Cueva

N°	F. de Vaciado	F. de Rotura	Edad (días)	Altura (cm)	Ancho (cm)	Largo (cm)	Carga (KN)	Esfuerzo	
								(MPa)	(Kg/cm ²)
1	11/01/2021	08/02/2021	28	15.00	15.00	60.00	14.00	1.86	18.97
2	11/01/2021	08/02/2021	28	15.00	15.00	60.00	14.20	1.89	19.27
3	11/01/2021	08/02/2021	28	15.00	15.00	60.00	14.51	1.90	19.37
11% PROMEDIO =								1.88	19.20
1	12/01/2021	09/02/2021	28	15.00	15.00	60.00	14.50	1.93	19.68
2	12/01/2021	09/02/2021	28	15.00	15.00	60.00	19.52	1.95	19.88
3	12/01/2021	09/02/2021	28	15.00	15.00	60.00	19.58	2.04	20.80
15% PROMEDIO =								1.97	20.12
1	13/01/2021	10/02/2021	28	15.00	15.00	60.00	19.70	2.06	21.01
2	13/01/2021	10/02/2021	28	15.00	15.00	60.00	19.85	2.08	21.21
3	13/01/2021	10/02/2021	28	15.00	15.00	60.00	19.90	2.11	21.52
20% PROMEDIO =								2.08	21.24

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 30 Valores de esfuerzo de viga – Salinas

N°	F. de Vaciado	F. de Rotura	Edad (días)	Altura (cm)	Ancho (cm)	Largo (cm)	Carga (KN)	Esfuerzo	
								(MPa)	(Kg/cm ²)
1	25/01/2021	22/02/2021	28	15.00	15.00	60.00	11.10	1.52	15.50
2	25/01/2021	22/02/2021	28	15.00	15.00	60.00	11.15	1.56	15.91
3	25/01/2021	22/02/2021	28	15.00	15.00	60.00	11.18	1.59	16.21
11% PROMEDIO =								1.56	15.87
1	26/01/2021	23/02/2021	28	15.00	15.00	60.00	10.90	1.64	16.72
2	26/01/2021	23/02/2021	28	15.00	15.00	60.00	10.93	1.67	17.03
3	26/01/2021	23/02/2021	28	15.00	15.00	60.00	10.36	1.69	17.23
15% PROMEDIO =								1.67	17.00
1	27/01/2021	24/02/2021	28	15.00	15.00	60.00	13.90	1.86	18.97
2	27/01/2021	24/02/2021	28	15.00	15.00	60.00	13.92	1.89	19.27
3	27/01/2021	24/02/2021	28	15.00	15.00	60.00	13.95	1.91	19.48
20% PROMEDIO =								1.89	19.24

Fuente: Elaboración Propia

Las planillas de las pruebas de rotura en compresión fueron realizadas en laboratorio de la EMPRESA CONSULTORA EOLO S.R.L. (SERVICIO DE LABORATORIO DE SUELOS Y GEOTECNIA) y las planillas de pruebas de rotura de flexión fueron realizadas en el laboratorio de la Universidad Autónoma Juan Misael Saracho. Se encuentran al final de esta investigación en la sección de ANEXOS C.

3.10. Análisis estadístico de los valores de prueba de resistencia

3.10.1. Estadística descriptiva de pruebas de compresión

3.10.1.1. Muestra – La Cueva

Tabla 31 Resumen estadístico para La Cueva

Descripción	Valores		
	11%	15%	20%
Recuento	3	3	3
Promedio	63.60	67.24	80.87
Mediana	63.48	66.15	79.21
Varianza	29.49	32.98	8.79
Desviación Estándar	5.43	5.74	2.97
Coefficiente de Variación	8.54%	8.54%	3.67%
Mínimo	58.22	62.12	79.10
Máximo	69.08	73.45	84.29
Rango	10.86	11.33	5.19

Fuente: Elaboración Propia

La varianza se interpreta como una medida de cuan diversos son los datos obtenidos de la resistencia a compresión.

En este caso, los valores del coeficiente de variación son menores al 50%, esto significa que hay una baja dispersión de datos en toda la serie de estudio.

Por tanto el error estándar es de 7.58, 8.19 y 24.96; estos valores permiten conocer la ubicación de nuestros datos con respecto a la media.

En el rango se puede observar que existe una dispersión entre los datos del 20% de cemento; para que los datos sean más homogéneos los valores extremos deben ser más cercanos entre ellos.

3.10.1.2. Muestra – Salinas

Tabla 32 Resumen estadístico para Salinas

Descripción	Valores		
	11%	15%	20%
Recuento	3	3	3
Promedio	64.20	78.79	80.65
Mediana	65.46	78.60	84.25
Varianza	29.17	28.92	130.85
Desviación Estándar	5.24	5.38	11.44
Coefficiente de Variación	8.16%	6.83%	14.18%
Mínimo	58.28	73.15	67.84
Máximo	68.86	84.26	89.85
Rango	10.58	10.75	22.01

Fuente: Elaboración Propia

La varianza se interpreta como una medida de cuan diversos son los datos obtenidos de la resistencia a compresión.

Por tanto, los errores estándar son de 5.43, 5.74 y 2.97; estos valores permiten conocer la ubicación de nuestros datos con respecto a la media.

Los coeficientes de variación son menores al 50% y nos indica que hay una baja dispersión de datos en toda la serie de estudio.

3.10.1.2.1. Muestra – El Puesto

Tabla 33 Resumen estadístico para El Puesto

Descripción	Valores		
	11%	15%	20%
Recuento	3	3	3
Promedio	61.74	82.32	115.29
Mediana	61.85	86.41	126.48
Varianza	57.47	67.08	623.14
Desviación Estándar	7.58	8.19	24.96
Coefficiente de Variación	12.28%	9.95%	21.65%
Mínimo	54.10	72.89	86.69
Máximo	69.26	87.66	132.70
Rango	15.16	14.77	46.01

Fuente: Elaboración Propia

La varianza se interpreta como una medida de cuan diversos son los datos obtenidos de la resistencia a compresión.

Por tanto los errores estándar son de 5.24, 5.38 y 11.44; estos valores permiten conocer la ubicación de nuestros datos con respecto a la media.

Los coeficientes de variación menores al 50% nos indican que hay una baja dispersión de datos en toda la serie de estudio.

3.10.2. Estadística descriptiva de pruebas de flexión

3.10.2.1. Muestra – La Cueva

Tabla 34 Resumen estadístico para La Cueva

Descripción	Valores		
	11%	15%	20%
Recuento	3	3	3
Promedio	19.20	20.12	21.24
Mediana	19.27	19.88	21.21
Varianza	0,04	0,42	0,07
Desviación Estándar	0,21	0,60	0,26
Coefficiente de Variación	1.09%	2,98%	1,22%
Mínimo	18.97	19.68	21.01
Máximo	19.37	20.80	21.52
Rango	0,40	1.12	0,51

Fuente: Elaboración Propia

La varianza se interpreta como una medida de cuan diversos son los datos obtenidos de la resistencia a flexión.

Por tanto, los errores estándar son de 0.41, 0.46 y 0.26; estos valores permiten conocer la ubicación de nuestros datos con respecto a la media.

Los coeficientes de variación son menores al 50% y nos indica que hay una baja dispersión de datos en toda la serie de estudio.

3.10.2.2. Muestra – Salinas

Tabla 35 Resumen estadístico para Salinas

Descripción	Valores		
	11%	15%	20%
Recuento	3	3	3
Promedio	15.87	17.00	19.24
Mediana	15.91	17.03	19.27
Varianza	0.13	0.07	0.07
Desviación Estándar	0.36	0.26	0.26
Coefficiente de Variación	2.27%	1.53%	1.35%
Mínimo	15.50	16.72	18.97
Máximo	16.21	17.23	19.48
Rango	0.71	0.51	0.51

Fuente: Elaboración Propia

La varianza se interpreta como una medida de cuan diversos son los datos obtenidos de la resistencia a flexión.

Por tanto, los errores estándar son de 0.04, 0.42 y 0.07; estos valores permiten conocer la ubicación de nuestros datos con respecto a la media.

Los coeficientes de variación son menores al 50% y nos indican que hay una baja dispersión en datos de toda la serie de estudio.

3.10.2.3. Muestra - El Puesto

Tabla 36 Resumen estadístico para El Puesto

Descripción	Valores		
	11%	15%	20%
Recuento	3	3	3
Promedio	15.19	15.94	16.96
Mediana	15.19	15.91	16.93
Varianza	0.16	0.21	0.07
Desviación Estándar	0.41	0.46	0.26
Coefficiente de Variación	2.70%	2.89%	1.53%
Mínimo	14.79	15.50	16.72
Máximo	15.60	16.42	17.23
Rango	0.81	0.92	0.51

Fuente: Elaboración Propia

La varianza se interpreta como una medida de cuan diversos son los datos obtenidos de la resistencia a flexión.

Por tanto los errores estándar son de 0,36; 0,26 y 0,26, estos valores permiten conocer la ubicación de nuestros datos con respecto a la media.

Los coeficientes de variación son menores al 50% y nos indican que hay una baja dispersión de datos en toda la serie de estudio.

3.11. Análisis de los suelos estudiados

3.11.1. Criterio técnico

Se realizó el análisis granulométrico de 3 diferentes suelos.

El Puesto

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 = 58.10 % y 57.92 %

Porcentaje retenido en el N° 40 = 48.17 % y 47.91 %

Porcentaje retenido en el N° 200 = 22.33 % y 21.98 %

Por la figura de la curva de distribución granulométrica (Véase ANEXO A) se puede decir que es un suelo bien graduado, predominan las arenas gruesas, casi no tiene ligante, suelo sin plasticidad.

Con respecto al C.B.R. de laboratorio obtenido para este suelo (Véase ANEXO A), se puede decir que la sub-rasante es muy buena según la tabla N° 7 que es > 20%.

La Cueva

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 = 62.90 % y 62.72 %

Porcentaje retenido en el N° 40 = 37.17 % y 36.94 %

Porcentaje retenido en el N° 200 = 22.67 % y 22.64 %

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 sub-rasante es muy buena según la tabla N° 7 que es > 20%.

Salinas

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 = 72.05 % y 71.65 %

Porcentaje retenido en el N° 40 = 61.20 % y 60.75 %

Porcentaje retenido en el N° 200 = 31.00 % y 30.49 %

Por la figura de la curva de distribución granulométrica (Véase ANEXO A) el contenido de material fino es menor o igual al 35%, se puede decir que es un suelo granular areno gravoso.

Con respecto al C.B.R. de laboratorio obtenido para este suelo (Véase ANEXO A), se puede decir que la sub-rasante es muy buena según la tabla N° 7 que es > 20%.

3.12. Análisis de los 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 37 Resultados de resistencia a compresión

Esfuerzos a compresión (kg/cm²)			
	La Cueva	Salinas	El Puesto
	58.22	58.28	61.85
	63.48	65.46	54.10
	69.08	68.86	69.26
11%	63.60	64.20	61.74
	62.12	73.51	86.41
	66.15	78.60	72.89
	73.45	84.26	87.66
15%	67.24	78.79	82.32
	79.10	89.85	132.70
	84.29	84.25	86.69
	79.21	67.84	126.48
20%	80.87	80.65	115.29

Fuente: Elaboración propia

Se observa en los resultados de los esfuerzos de compresión de las probetas que para un porcentaje del 11%, 15 % y 20% de cemento en peso con un curado a 28 días se presenta valores máximos:

Tabla 38 Esfuerzo de compresión valores máximos

Tramo	Esfuerzo (Kg/cm²)		
	11%	15%	20%
El Puesto	69.26	87.66	132.70
La Cueva	69.08	73.45	84.29
Salinas	68.86	84.26	89.85

Fuente: Elaboración propia

También se presenta valores mínimos:

Tabla 39 Esfuerzo de compresión valores mínimos

Tramo	Esfuerzo (Kg/cm ²)		
	11%	15%	20%
El Puesto	54.10	72.89	86.69
La Cueva	58.22	62.12	79.10
Salinas	58.28	73.51	67.84

Fuente: Elaboración propia

De acuerdo a los resultados obtenidos se observa que entre el 15 y 20% de cemento tenemos una mayor resistencia en la compresión.

Haciendo un análisis entre el 15 y 20% de cemento en la resistencia del 5% de cemento tenemos:

Primer caso: la resistencia en un 5% de cemento se incrementa a un 6.63% de cemento.

Segundo caso: la resistencia en un 5% de cemento se incrementa a un 14.75% de cemento.

Tercer caso: la resistencia en un 5% de cemento se incrementa a un 51.38% de cemento, esto es debido a que hay valores muy extremos que están dentro de los 20% de cemento.

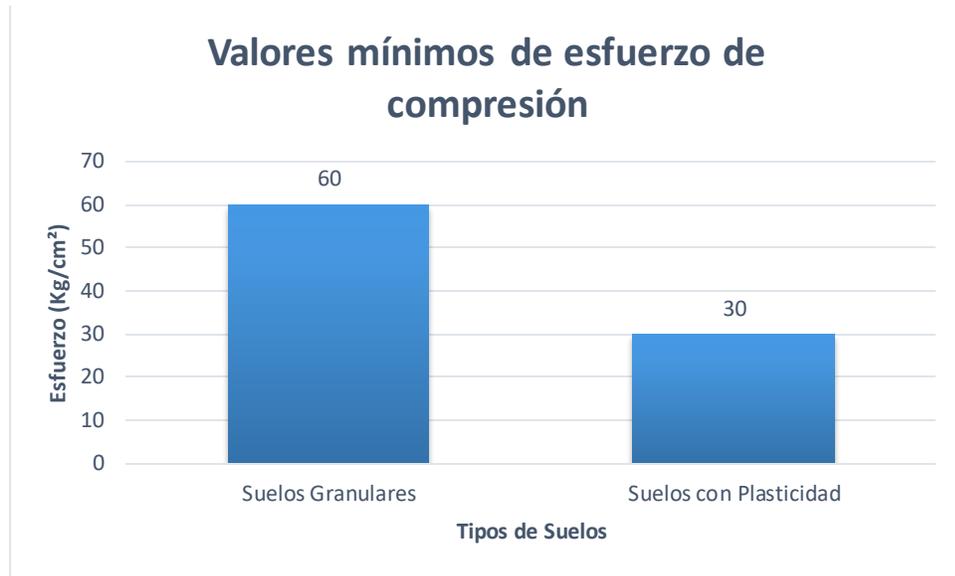
Se observa que el 15% de cemento es el más adecuado porque la resistencia en un 5% de cemento incide a un 6.63% de cemento.

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

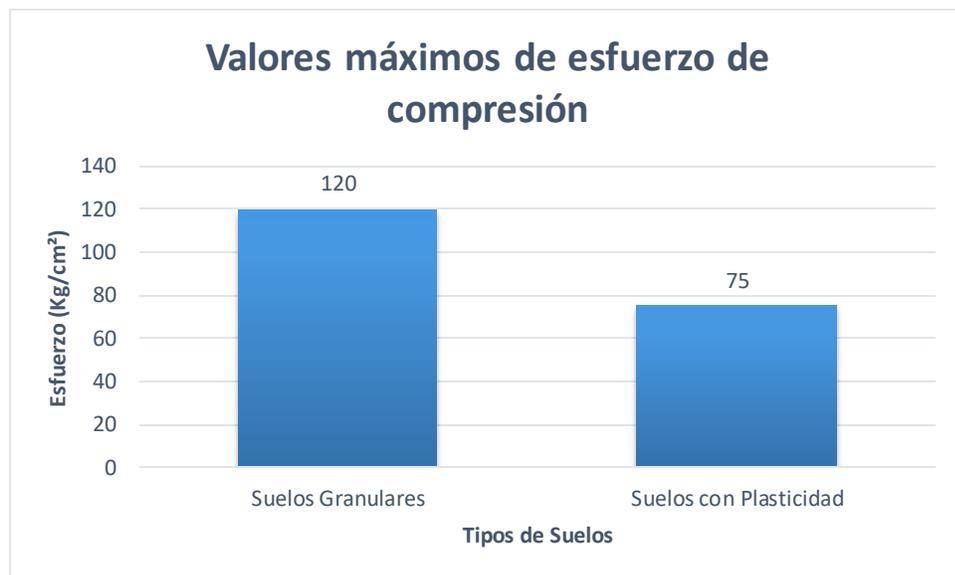
Fuente: (Instituto Salvadoreño del Cemento y el Concreto, 2000)

Gráfica 2 Valores mínimos de esfuerzos de compresión



Fuente: Elaboración propia

Gráfica 3 Valores máximos de esfuerzo de compresión

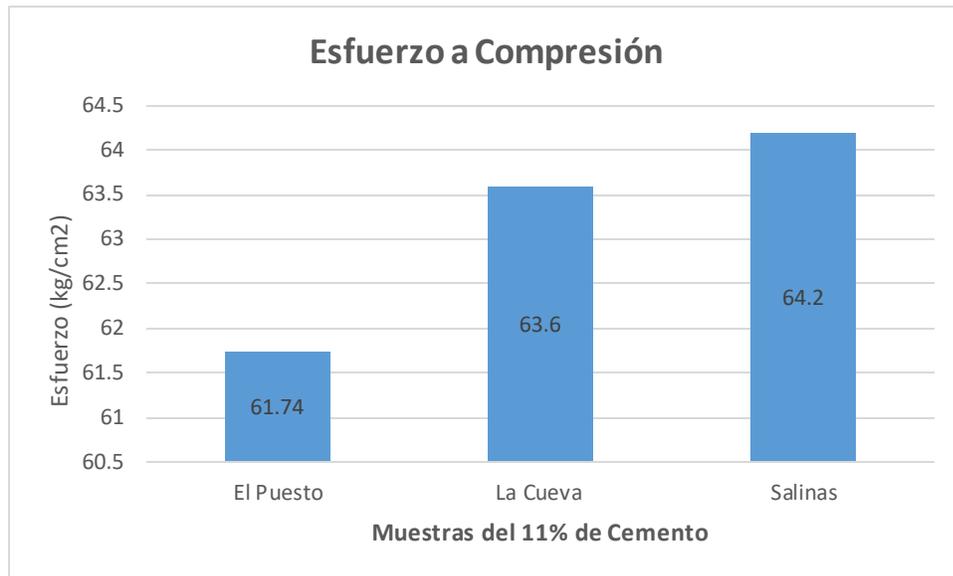


Fuente: Elaboración propia

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

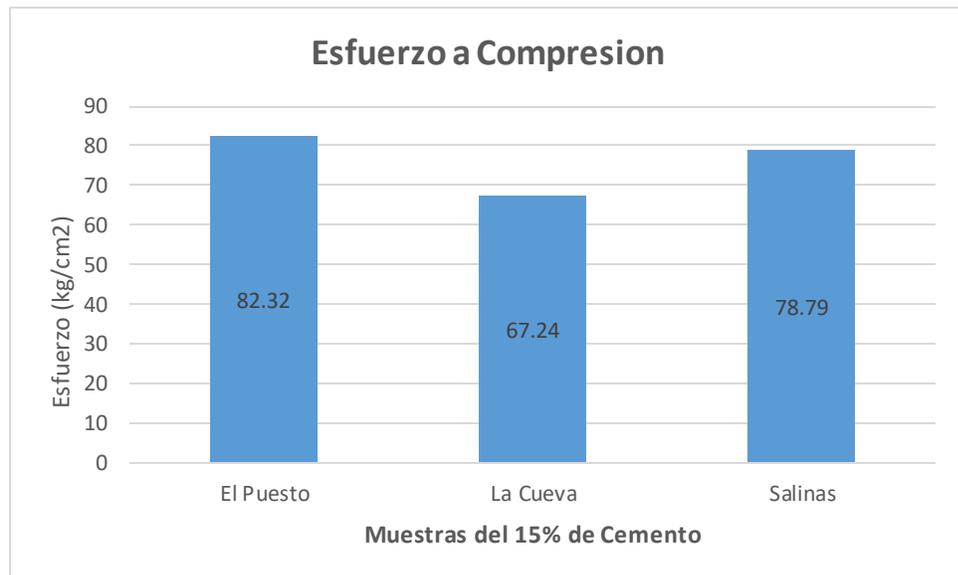
Se realizó una gráfica con los promedios de cada lugar para tener una mejor comprensión sobre los resultados finales de la investigación.

Gráfica 4 Resultados promedios de esfuerzos a compresión



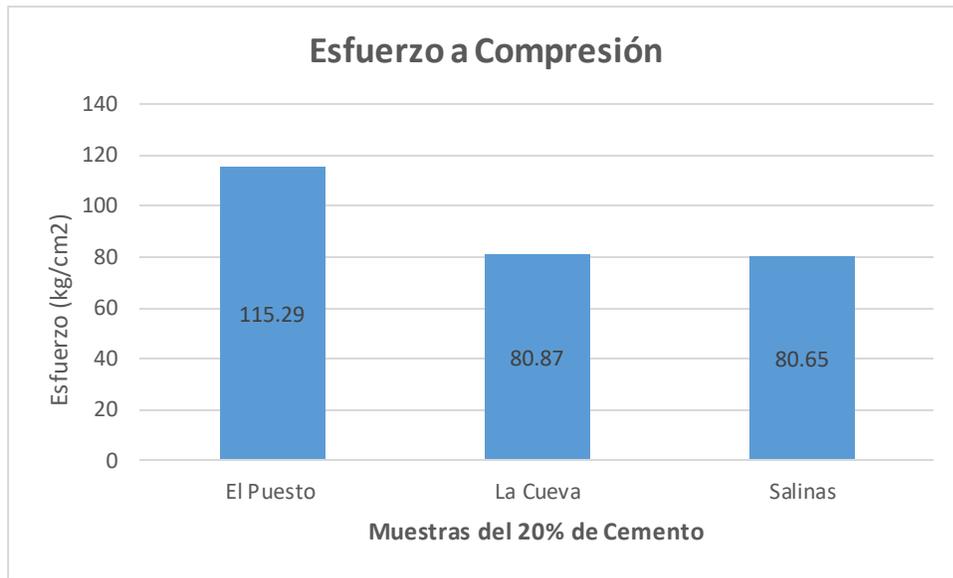
Fuente: Elaboración propia

Gráfica 5 Resultados promedios de esfuerzos a compresión



Fuente: Elaboración propia

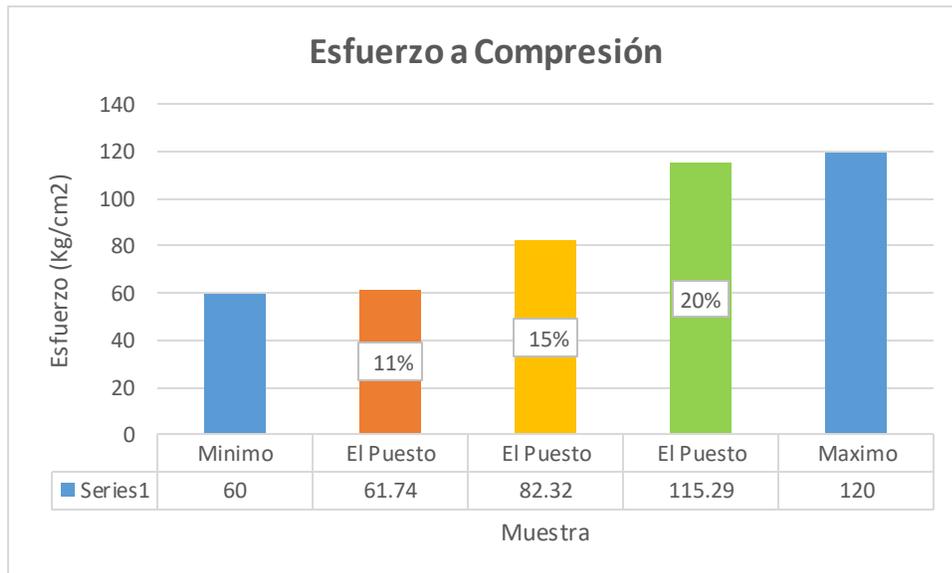
Gráfica 6 Resultados promedios de esfuerzos a compresión



Fuente: Elaboración propia

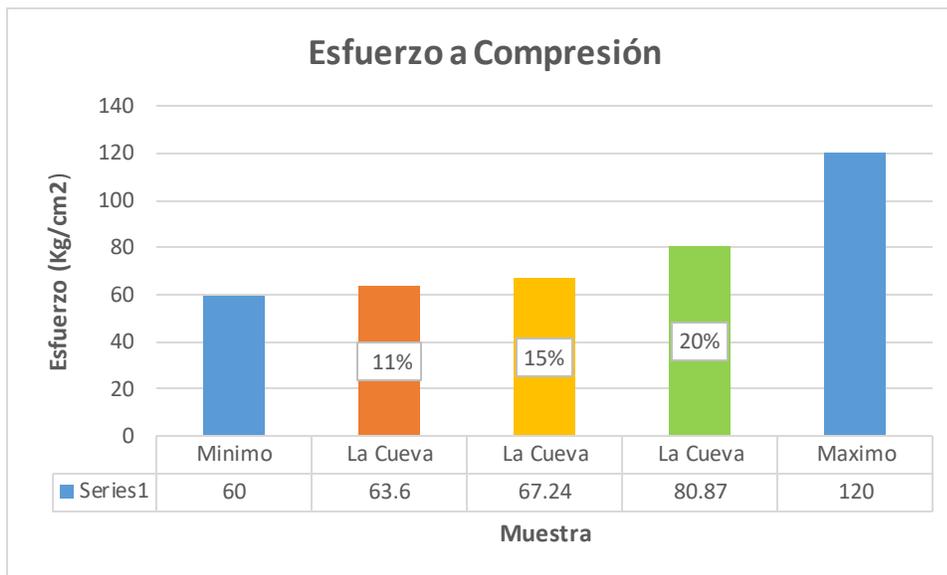
Se pudo verificar si los resultados se encuentran en los parámetros mínimos y máximos de la prueba de resistencia de compresión respecto a cada uno de los tramos estudiados en las siguientes gráficas.

Gráfica 7 Esfuerzo de compresión El Puesto



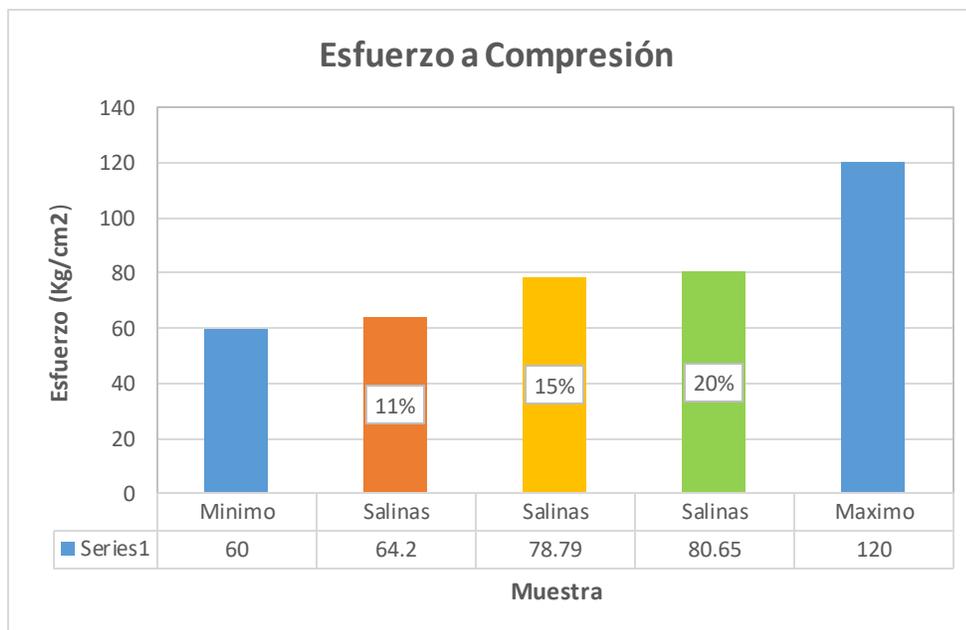
Fuente: Elaboración propia

Gráfica 8 Esfuerzo de compresión La Cueva



Fuente: Elaboración propia

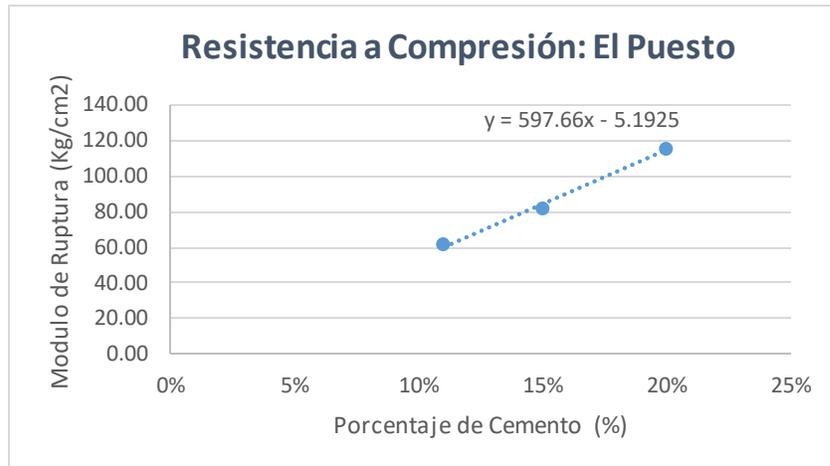
Gráfica 9 Esfuerzo de compresión de Salinas



Fuente: Elaboración propia

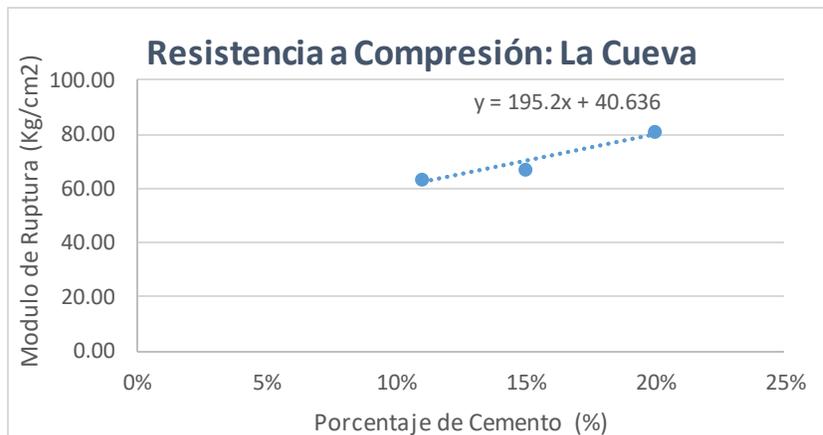
Se puede observar en las gráficas que los suelos de El Puesto, La Cueva y Salinas cumplen con los parámetros de resistencia en compresión teniendo las muestras el 11%, 15% y 20% de cemento.

Gráfica 10 Resistencia versus porcentaje de cemento



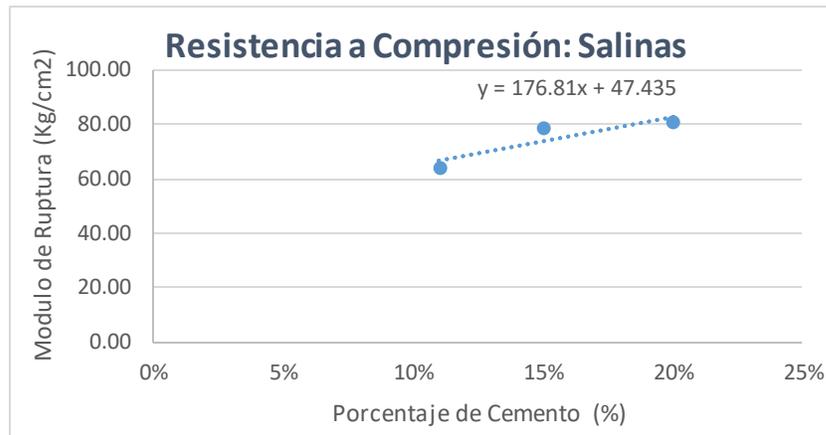
Fuente: Elaboración propia

Gráfica 11 Resistencia versus porcentaje de cemento



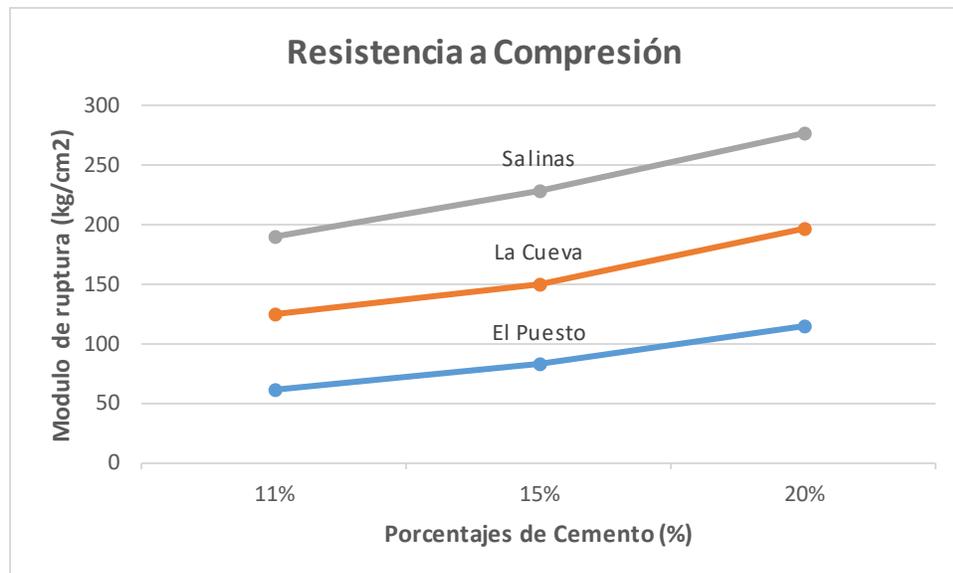
Fuente: Elaboración propia

Gráfica 12 Resistencia versus porcentaje de cemento



Fuente: Elaboración propia

Gráfica 13 Resistencia versus porcentaje de cemento



Fuente: Elaboración propia

Se puede decir que los gráficos fueron contruidos con valores de resistencia a los 28 días.

Los módulos de ruptura utilizados para la construcción de los gráficos fueron obtenidos del ensayo a compresión de las probetas, observando que cada uno de ellos cumple con los parámetros del Instituto Salvadoreño del Pavimento Unicapa de Alto Desempeño.

Se observa que a mayor porcentaje de cemento es mayor la resistencia a compresión.

3.13. Análisis de resultados 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 40 Resultados de resistencia a flexión

Esfuerzos a compresión (kg/cm²)			
	La Cueva	Salinas	El Puesto
	18.97	15.50	14.79
	19.27	15.91	15.19
	19.37	16.21	15.60
11%	19.20	15.87	15.19
	19.68	16.72	15.50
	19.88	17.03	15.91
	20.80	17.23	16.42
15%	20.12	17.00	15.94
	21.01	18.97	16.72
	21.21	19.27	16.93
	21.52	19.48	17.23
20%	21.24	19.24	16.96

Fuente: Elaboración propia

Se observa en los resultados de los esfuerzos de flexión de las vigas que para un porcentaje del 11%, 15 % y 20% de cemento en peso con un curado a 28 días se presenta valores máximos:

Tabla 41 Esfuerzo de flexión valores máximos

Tramo	Esfuerzo					
	(MPa)			(Kg/cm²)		
	11%	15%	20%	11%	15%	20%
El Puesto	1.53	1.61	1.69	15.60	16.42	17.23
La Cueva	1.90	2.04	2.11	19.37	20.80	21.52
Salinas	1.59	1.69	1.91	16.21	17.23	19.48

Fuente: Elaboración propia

También se presenta valores mínimos:

Tabla 42 Esfuerzo de flexión valores mínimos

Tramo	Esfuerzo					
	(MPa)			(Kg/cm ²)		
	11%	15%	20%	11%	15%	20%
El Puesto	1.45	1.52	1.64	14.79	15.50	16.72
La Cueva	1.86	1.93	2.06	18.97	19.68	21.01
Salinas	1.52	1.64	1.86	15.50	16.72	18.97

Fuente: Elaboración propia

Según los valores obtenidos en nuestra investigación se observa que existe mayor resistencia a flexión en un 15 y 20% de cemento.

Haciendo un análisis entre el 15 y 20% de cemento en la resistencia del 5% de cemento tenemos:

Primer caso: la resistencia en un 5% de cemento se incrementa a un 3.46% de cemento.

Segundo caso: la resistencia en un 5% de cemento se incrementa a un 4.93% de cemento.

Tercer caso: la resistencia en un 5% de cemento se incrementa a un 13.05% de cemento.

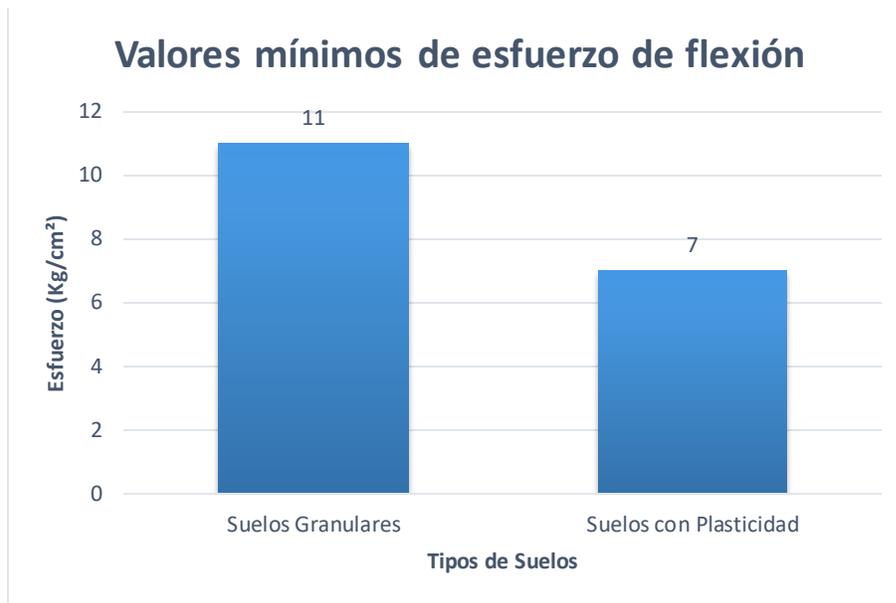
Observando que el 15% de cemento es el más adecuado porque la resistencia en un 5% de cemento incide a 3.46% de cemento.

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

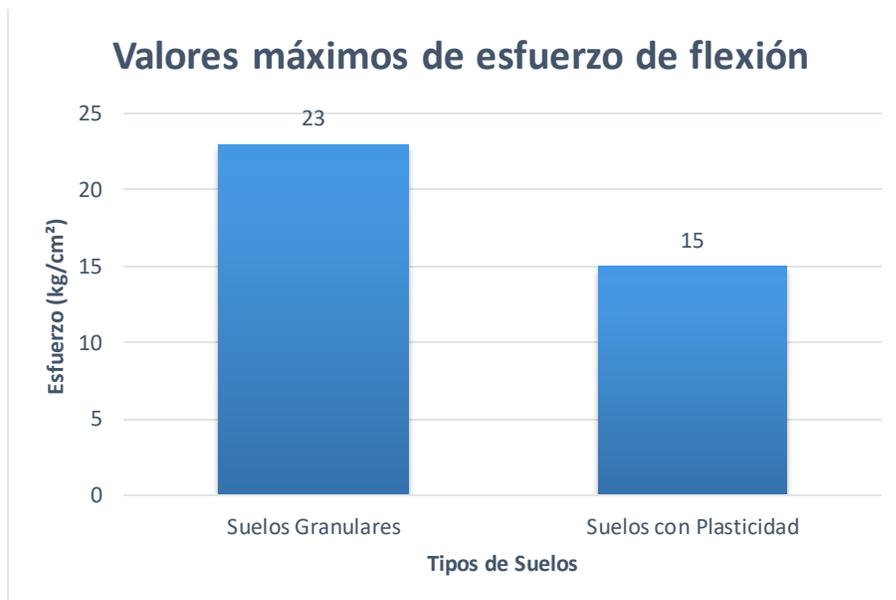
Fuente: (Instituto Salvadoreño del Cemento y el Concreto, 2000)

Gráfica 14 Valores mínimos de esfuerzo de flexión



Fuente: Elaboración propia

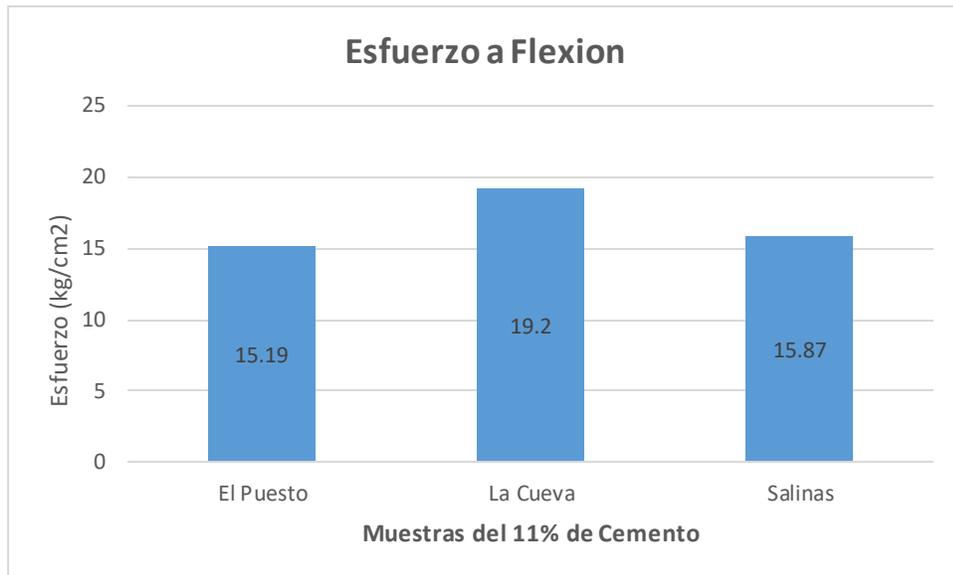
Gráfica 15 Esfuerzos máximos de esfuerzo de flexión



Fuente: Elaboración propia

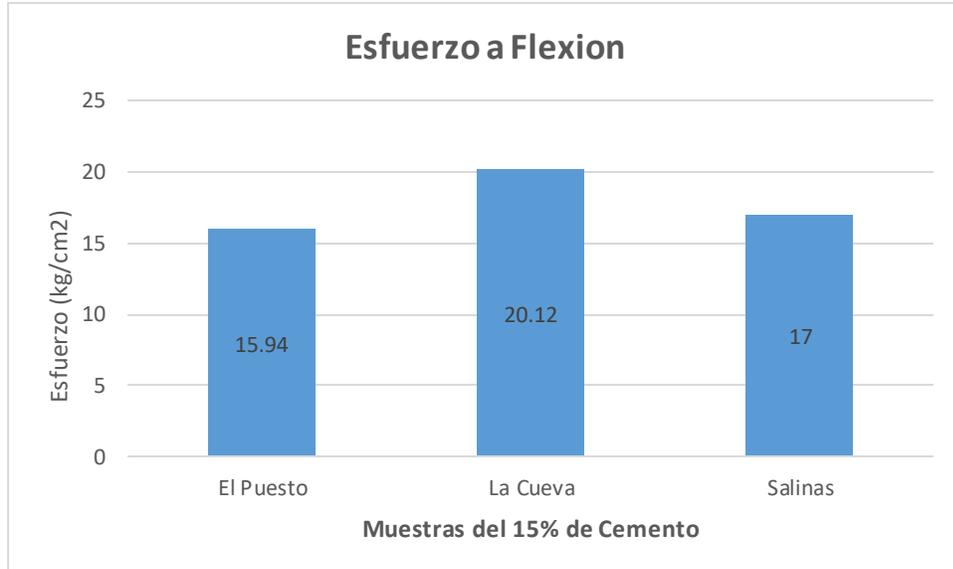
En la siguiente gráfica se muestra los valores promedios de los 3 diferentes tipos tramos extraídos y estudiados.

Gráfica 16 Resultados promedios de esfuerzos a flexión



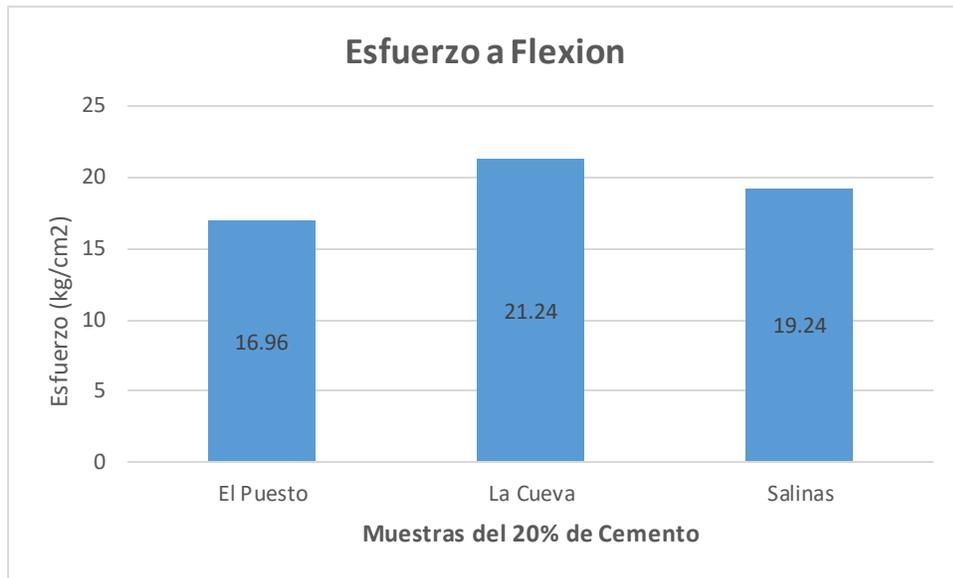
Fuente: Elaboración propia

Gráfica 17 Resultados promedios de esfuerzos a flexión



Fuente: Elaboración propia

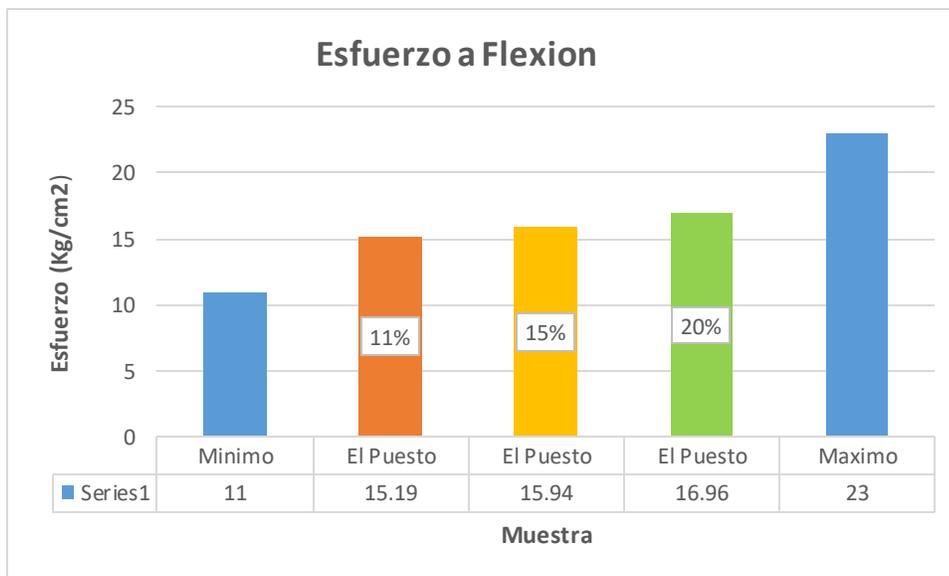
Gráfica 18 Resultados promedios de esfuerzos a flexión



Fuente: Elaboración propia

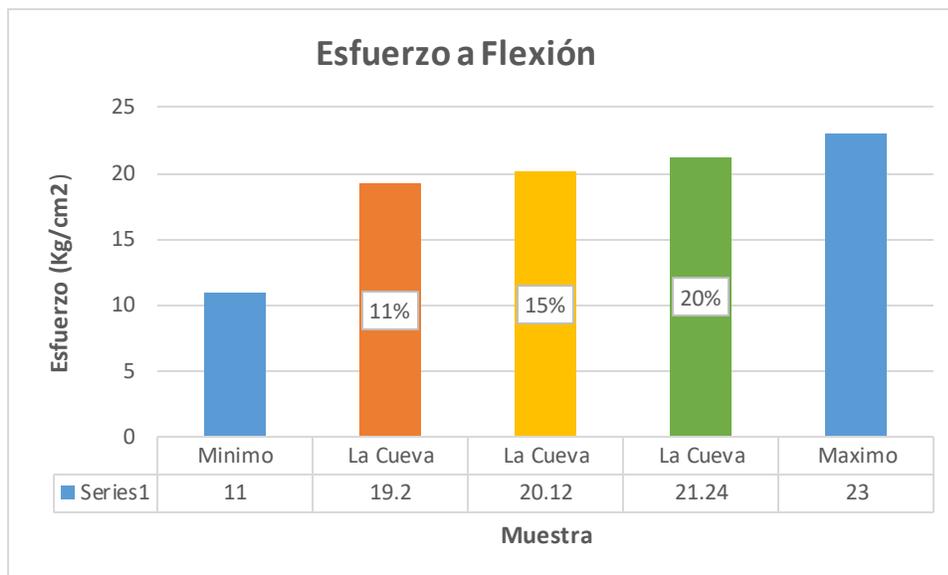
Se pudo verificar si los resultados se encuentran en los parámetros mínimos y máximos de la prueba de resistencia de flexión respecto a cada uno de los tramos estudiados en las siguientes gráficas.

Gráfica 19 Esfuerzo de flexión El Puesto



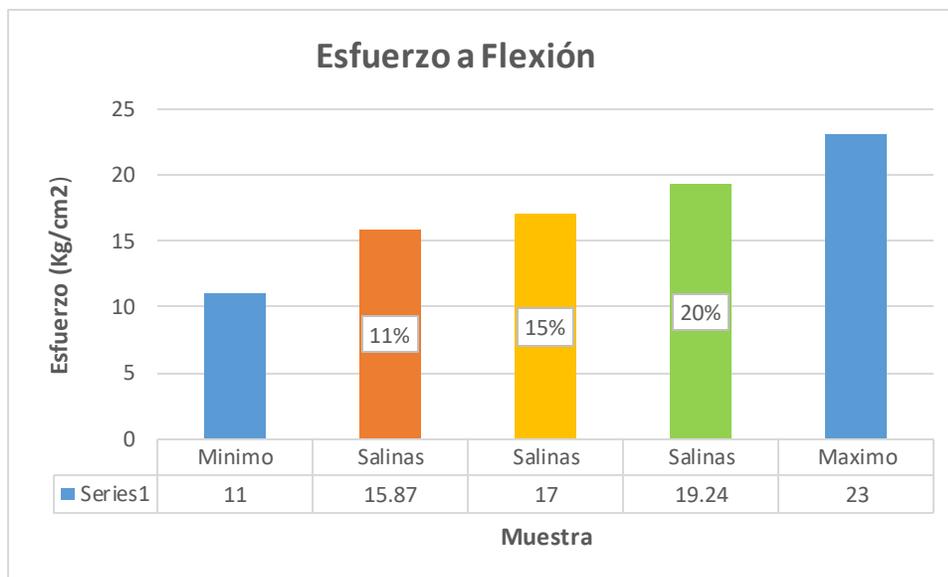
Fuente: Elaboración propia

Gráfica 20 Esfuerzo de flexión La Cueva



Fuente: Elaboración propia

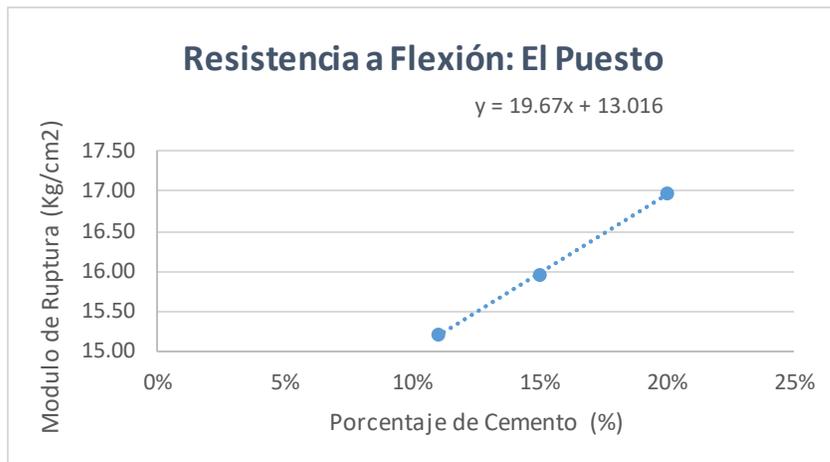
Gráfica 21 Esfuerzo de flexión de Salinas



Fuente: Elaboración propia

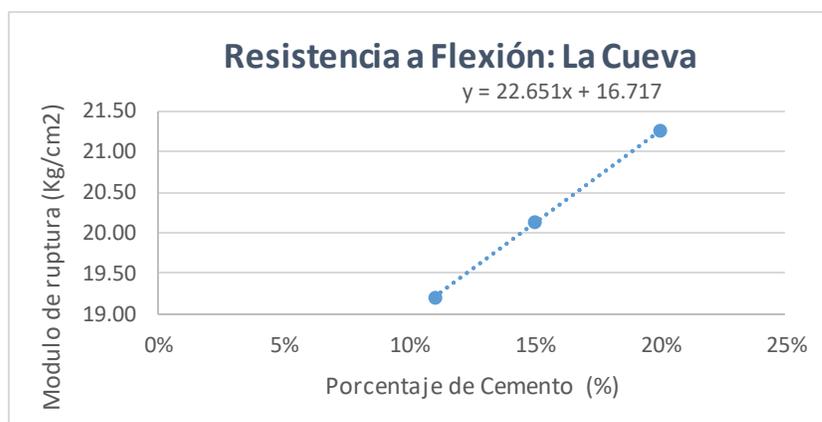
Se puede observar en las gráficas que los suelos de El Puesto, La Cueva y Salinas cumplen con los parámetros de resistencia en flexión teniendo estas muestras el 11%, 15% y 20% de cemento.

Gráfica 22 Resistencia versus porcentaje de cemento



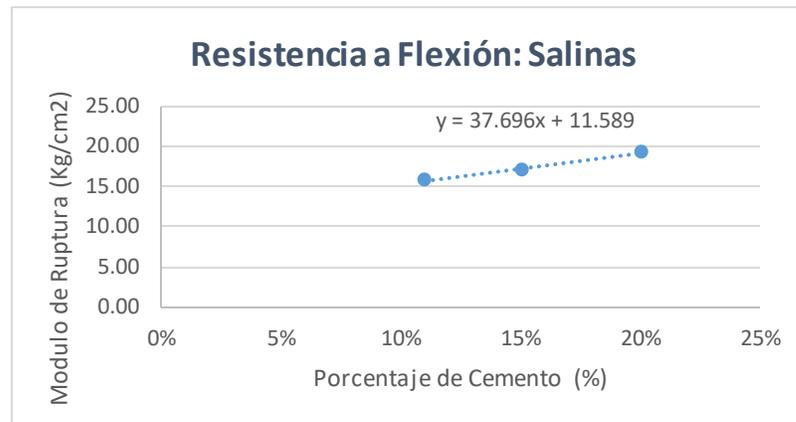
Fuente: Elaboración propia

Gráfica 23 Resistencia versus porcentaje de cemento



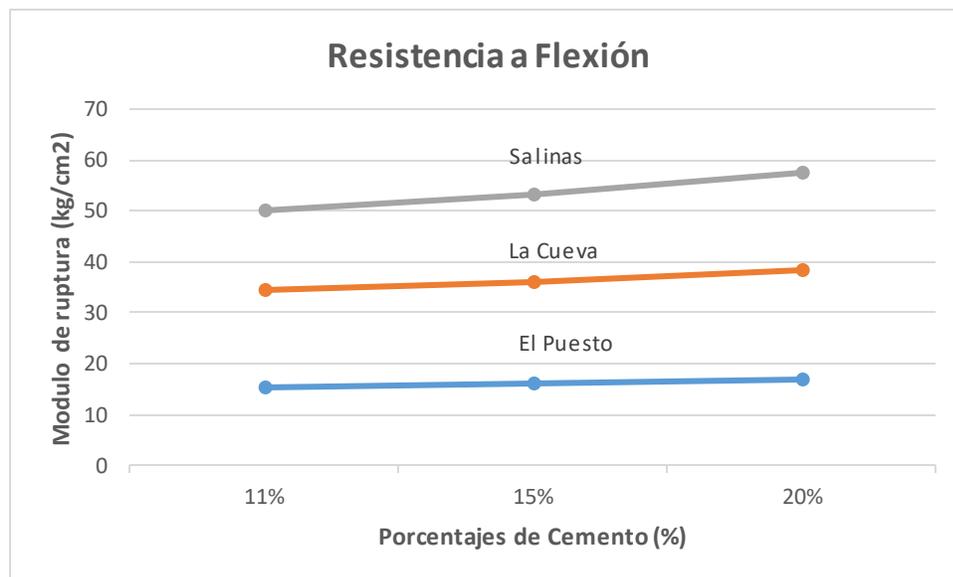
Fuente: Elaboración propia

Gráfica 24 Resistencia versus porcentaje de cemento



Fuente: Elaboración propia

Gráfica 25 Resistencia versus porcentaje de cemento



Fuente: Elaboración propia

Se puede decir que los gráficos fueron construidos con valores de resistencia a los 28 días.

Los módulos de ruptura utilizados para la construcción de los gráficos fueron obtenidos del ensayo de flexión de vigas, observando cada uno de ellos cumplen con los parámetros del Instituto Salvadoreño del Pavimento Unicap de Alto Desempeño.

Se observa que a mayor porcentaje de cemento es mayor la resistencia a flexión.

3.14. Estudios previos para el diseño del pavimento unicapa de alto desempeño

3.14.1. Estudio de Tráfico

Como parte de los estudios previos para la elaboración del Proyecto Camino Quebrada de las Vacas – Salinas, se presenta a continuación el Estudio de Tráfico, documento que tiene el propósito fundamental de determinar el Tráfico Promedio Diario (TPD).

3.14.1.1. Tiempo y duración de aforo

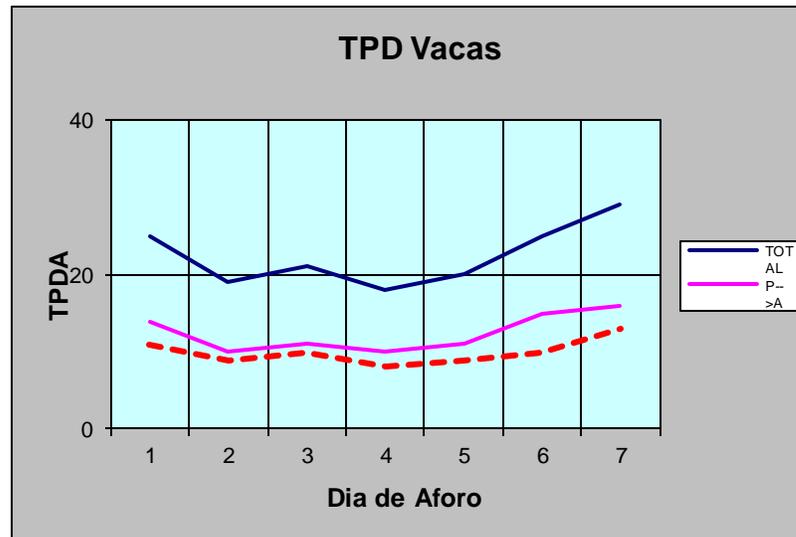
Para obtener resultados confiables se han realizado los trabajos de aforo vehicular en 7 días continuos según la norma de la ABC, (véase ANEXO D).

Tabla 43 Aforo vehicular

Día		Vacas		
		V → S	S → V	Total
1	Lunes	14	11	25
2	Martes	10	9	19
3	Miércoles	11	10	21
4	Jueves	10	8	18
5	Viernes	11	9	20
6	Sábado	15	10	25
7	Domingo	16	13	29
Promedio		12	10	22
%		55.4	44.6	100.0

Fuente: Elaboración propia sobre la base de datos de campo

Gráfica 26 TPD Promedio



Fuente: Elaboración propia

3.14.2. Estudio Geotécnico

Para el estudio geotécnico se obtuvo el CBR de cada uno de los tramos, se sacó el promedio y con ese valor se fue a la tabla N° 12 para determinar los valores de K (valor soporte de la sub-rasante) que son los siguientes:

Tabla 44 Ensayos de CBR

Muestra 1 – El Puesto					K
CBR	Unidad	Ensayo 1	Ensayo 2	Promedio	MPa
	%	36.84	37.47	37.16	100.78
Muestra 2 – La Cueva					K
CBR	Unidad	Ensayo 1	Ensayo 2	Promedio	MPa
	%	30.10	26.16	28.13	76.29
Muestra 3 - Salinas					K
CBR	Unidad	Ensayo 1	Ensayo 2	Promedio	MPa
	%	44.88	53.11	48.99	93.55

Fuente: Elaboración propia

3.14.2.1. Diseño del espesor del Pavimento Unicapa de Alto Desempeño

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

$$N = PD * 365 * A$$

PD= debido al tráfico se estima una vida útil de 10 años

A= el número de repeticiones de carga, en este caso se ha considerado 22 repeticiones diarias según la tabla N° 43.

$$N = 10 * 365 * 22 = 80300$$

Se calcula el factor de crecimiento (F_{cr}) en función de i y PD:

Basándose en este conjunto de variables económicas se ha encontrado una tasa acumulativa anual del 4.3%, que se utilizó para proyectar el TPD para el horizonte del proyecto.

Tabla 45 Tasa de Crecimiento Promedio, Tramo: Vacas ⇔ Salinas

Factores	Local %	Nacional %
Consumo anual de diesel	2.25	6.05
Consumo anual de gasolina	2.1	4.15
Consumo anual de combustibles	3.035	3.29
Parque automotor	5.7	7.79
Número de vehículos-km-año	8.2	12.12
Producto Interno Bruto	4.2	4.75
Tasa Promedio	4.3	6.093

Fuente: SNC, INE

Se han proyectado los TPDA a la tasa acumulativa anual de 4.3% anteriormente indicado, para un horizonte de vida útil del proyecto de 10 años.

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

i =el crecimiento de tráfico anual será considerado igual a 4.3%, según tabla N° 45.

$$F_{cr} = \frac{(1 + 0.043)^{10} - 1}{0.043} = 12.17$$

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:

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

$$NR = 80300 * \left(1 + \frac{12.17}{100}\right) = 90072.51$$

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

$$SR = 1.20 - 0.10 \log NR$$

$$SR = 1.20 - 0.10 \log 90072.51 = 0.70$$

Se determina la tensión admisible (σ_{adm}):

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

El valor del módulo de ruptura, se ha considerado como el esfuerzo promedio a 28 días de cada muestra con sus respectivos porcentajes de cemento.

Muestra 1. El Puesto

$$11\% \text{ de cemento el } M_R = \frac{15.19Kg}{cm^2} = 1.49MPa$$

$$\sigma_{adm} = 0.70 * 1.49 = 1.04 MPa$$

$$15\% \text{ de cemento el } M_R = \frac{15.94Kg}{cm^2} = 1.56MPa$$

$$\sigma_{adm} = 0.70 * 1.56 = 1.09 MPa$$

$$20\% \text{ de cemento el } M_R = \frac{16.96Kg}{cm^2} = 1.66MPa$$

$$\sigma_{adm} = 0.70 * 1.66 = 1.16 MPa$$

Muestra 2. La Cueva

$$11\% \text{ de cemento el } M_R = \frac{19.20Kg}{cm^2} = 1.88MPa$$

$$\sigma_{adm} = 0.70 * 1.88 = 1.32 MPa$$

$$15\% \text{ de cemento el } M_R = \frac{20.12Kg}{cm^2} = 1.97MPa$$

$$\sigma_{adm} = 0.70 * 1.97 = 1.38 MPa$$

$$20\% \text{ de cemento el } M_R = \frac{21.24Kg}{cm^2} = 2.08MPa$$

$$\sigma_{adm} = 0.70 * 2.08 = 1.46 MPa$$

Muestra 3. Salinas

$$11\% \text{ de cemento el } M_R = \frac{15.87Kg}{cm^2} = 1.56MPa$$

$$\sigma_{adm} = 0.70 * 1.56 = 1.09 MPa$$

$$15\% \text{ de cemento el } M_R = \frac{17.00Kg}{cm^2} = 1.67MPa$$

$$\sigma_{adm} = 0.70 * 1.67 = 1.17 MPa$$

$$20\% \text{ de cemento el } M_R = \frac{19.24Kg}{cm^2} = 1.89MPa$$

$$\sigma_{adm} = 0.70 * 1.89 = 1.32 MPa$$

Se calcula el radio "a" del área equivalente de contacto:

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

P = la máxima carga de rueda simple, $P = \frac{9Ton}{4} = 2.25Ton = 0.022MN$ según la tabla N° 11.

p = usualmente la presión de inflado de neumáticos para un C2, es igual a 95 lb/pulg²

$$p = 0.66MPa$$

$$a = \left(\frac{0.022}{0.66 * \pi} \right)^{0.5} = 0.103mts.$$

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

Se asumirá un espesor tentativo inicial h= 0.22mts. y 0.24mts.

Se calcula el Radio de Rigidez Relativa de Westergaard:

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

Coefficiente de Poisson, $\mu = 0.15$ (valor aproximado promedio para un PUAD).

El módulo de elasticidad es un valor característico, según la norma ACI $E_c = 15100\sqrt{f_c}$
 f_c se ha considerado como el esfuerzo promedio de compresión a 28 días de cada muestra con sus respectivos porcentajes de cemento.

Muestra 1. El Puesto

$$E_{c\ 11\%} = 15100\sqrt{61.74} = 11635.35\ MPa$$

$$E_{c\ 15\%} = 15100\sqrt{82.32} = 13435.34\ MPa$$

$$E_{c\ 20\%} = 15100\sqrt{115.29} = 15899.81\ MPa$$

Valor de soporte de la sub-rasante, según la tabla N° 44. $K = 100.78\ MPa$

$$L_{11\%} = \sqrt[4]{\frac{11635.35 * 0.24^3}{12 * (1 - 0.15^2) * 100.78}} = 0.61$$

$$L_{15\%} = \sqrt[4]{\frac{13435.34 * 0.24^3}{12 * (1 - 0.15^2) * 100.78}} = 0.63$$

$$L_{20\%} = \sqrt[4]{\frac{15899.81 * 0.24^3}{12 * (1 - 0.15^2) * 100.78}} = 0.66$$

Muestra 2. La Cueva

$$E_{c\ 11\%} = 15100\sqrt{63.60} = 11809.31\ MPa$$

$$E_{c\ 15\%} = 15100\sqrt{67.24} = 12142.55\ MPa$$

$$E_{c\ 20\%} = 15100\sqrt{80.87} = 13316.49\ MPa$$

Valor de soporte de la sub-rasante, según tabla N° 44, $K = 76.29\ MPa$

$$L_{11\%} = \sqrt[4]{\frac{11809.31 * 0.22^3}{12 * (1 - 0.15^2) * 76.29}} = 0.61$$

$$L_{15\%} = \sqrt[4]{\frac{12142.55 * 0.22^3}{12 * (1 - 0.15^2) * 76.29}} = 0.62$$

$$L_{20\%} = \sqrt[4]{\frac{13316.49 * 0.22^3}{12 * (1 - 0.15^2) * 76.29}} = 0.63$$

Muestra 3. Salinas

$$E_{c 11\%} = 15100 \sqrt{64.20} = 11864.88 \text{ MPa}$$

$$E_{c 15\%} = 15100 \sqrt{78.79} = 13144.12 \text{ MPa}$$

$$E_{c 20\%} = 15100 \sqrt{80.65} = 13298.36 \text{ MPa}$$

Valor de soporte de la sub-rasante, según tabla N° 44, K= 93.55 MPa

$$L_{11\%} = \sqrt[4]{\frac{11864.88 * 0.24^3}{12 * (1 - 0.15^2) * 93.55}} = 0.62$$

$$L_{15\%} = \sqrt[4]{\frac{13144.12 * 0.24^3}{12 * (1 - 0.15^2) * 93.55}} = 0.64$$

$$L_{20\%} = \sqrt[4]{\frac{13298.36 * 0.24^3}{12 * (1 - 0.15^2) * 93.55}} = 0.64$$

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

$$Y = 0,33635 - 0,065(s/a) + [0,016(s/a) - 0,58] \ln(a/L)$$

Separación entre los centros de las ruedas, s; este valor depende de la configuración de ruedas del vehículo; para un C2 esta distancia se mide en una rueda doble.

s = 0.50m. (valor comúnmente encontrado en configuraciones de ruedas doble)

Muestra 1. El Puesto

$$Y_{11\%} = 0.33635 - 0.065(0.5/0.103) + [0.016(0.5/0.103) - 0.58] \ln(0.103/0.61)$$

$$Y_{11\%} = 0.91$$

$$Y_{15\%} = 0.33635 - 0.065(0.5/0.103) + [0.016(0.5/0.103) - 0.58] \ln(0.103/0.63)$$

$$Y_{15\%} = 0.93$$

$$Y_{20\%} = 0.33635 - 0.065\left(\frac{0.5}{0.103}\right) + \left[0.016\left(\frac{0.5}{0.103}\right) - 0.58\right] \ln\left(\frac{0.103}{0.66}\right)$$

$$Y_{20\%} = 0.95$$

Muestra 2. La Cueva

$$Y_{11\%} = 0.33635 - 0.065\left(\frac{0.5}{0.103}\right) + \left[0.016\left(\frac{0.5}{0.103}\right) - 0.58\right] \ln\left(\frac{0.103}{0.61}\right)$$

$$Y_{11\%} = 0.91$$

$$Y_{15\%} = 0.33635 - 0.065\left(\frac{0.5}{0.103}\right) + \left[0.016\left(\frac{0.5}{0.103}\right) - 0.58\right] \ln\left(\frac{0.103}{0.62}\right)$$

$$Y_{15\%} = 0.92$$

$$Y_{20\%} = 0.33635 - 0.065\left(\frac{0.5}{0.103}\right) + \left[0.016\left(\frac{0.5}{0.103}\right) - 0.58\right] \ln\left(\frac{0.103}{0.63}\right)$$

$$Y_{20\%} = 0.93$$

Muestra 3. Salinas

$$Y_{11\%} = 0.33635 - 0.065\left(\frac{0.5}{0.103}\right) + \left[0.016\left(\frac{0.5}{0.103}\right) - 0.58\right] \ln\left(\frac{0.103}{0.62}\right)$$

$$Y_{11\%} = 0.92$$

$$Y_{15\%} = 0.33635 - 0.065\left(\frac{0.5}{0.103}\right) + \left[0.016\left(\frac{0.5}{0.103}\right) - 0.58\right] \ln\left(\frac{0.103}{0.64}\right)$$

$$Y_{15\%} = 0.94$$

$$Y_{20\%} = 0.33635 - 0.065\left(\frac{0.5}{0.103}\right) + \left[0.016\left(\frac{0.5}{0.103}\right) - 0.58\right] \ln\left(\frac{0.103}{0.64}\right)$$

$$Y_{20\%} = 0.94$$

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

Muestra 1. El Puesto

$$\sigma_{11\%} = \frac{2*0.022}{0.24^2} * 0.91 = 0.70$$

$$\sigma_{15\%} = \frac{2*0.022}{0.24^2} * 0.93 = 0.71$$

$$\sigma_{20\%} = \frac{2*0.022}{0.24^2} * 0.95 = 0.73$$

Muestra 2. La Cueva

$$\sigma_{11\%} = \frac{2*0.022}{0.22^2} * 0.91 = 0.83$$

$$\sigma_{15\%} = \frac{2*0.022}{0.22^2} * 0.92 = 0.84$$

$$\sigma_{20\%} = \frac{2*0.022}{0.22^2} * 0.93 = 0.85$$

Muestra 1. Salinas

$$\sigma_{11\%} = \frac{2*0.022}{0.24^2} * 0.92 = 0.70$$

$$\sigma_{15\%} = \frac{2*0.022}{0.24^2} * 0.94 = 0.72$$

$$\sigma_{20\%} = \frac{2*0.022}{0.24^2} * 0.94 = 0.72$$

Se compara el valor de σ con σ_{adm}

Muestra 1. El Puesto

11% de cemento: como $\sigma_{adm} = 1.04 > \sigma = 0.70$, significa que el espesor del PUAD es adecuado.

Gráfica 27 Cálculo de espesor del Pavimento Unicapa con el 11% de cemento

PAVIMENTO UNICAPA DE ALTO DESEMPEÑO : DISEÑO DE ESPESORES DE PAVIMENTO Fecha 01/05/2021

PROYECTO:

PROCEDIMIENTO PROPUESTO POR EL ISCYC, FUNDAMENTADO EN EL METODO PARMIGIANI - DI PACE

VEHICULO DE DISEÑO **C2** C2

PARAMETROS

Módulo Elástico (a 60 días)	E =	11.635	MPa
Espesor tentativo del pavimento	h =	0.24	m
Coefficiente de Poisson	μ =	0.15	
Módulo de reacción de la subrasante	K =	100.78	MPa / m
Carga de cada rueda	P =	0.022	MN
Presión de inflado de neumático	p =	0.66	MPa
Número de Ruedas (en cada punta de eje)	Nr = (1 ó 2)	2	
Radio del área equivalente	a =	0.103	m
Radio de rigidez relativa	l =	0.607	m
Separación entre centros de ruedas	s =	0.5	m
	s/a =	4.85	
	a/l =	0.170	

Formula Modificada por ISCYC

	y =	0.91213	
	σ =	0.70	MPa

FATIGA POR FLEXION

Módulo de rotura a flexión (a 60 días)	Mr =	1.49	MPa
Número diario de repeticiones de la carga	A =	22	
Período de diseño	PD =	10	Años
Aumento de tráfico anual	% =	4.8	
Factor de Crecimiento	Fcr =	12.46	
Número de repeticiones en período diseñ	NR =	90,306	
Relación Tensión / Módulo de rotura	SR =	0.7044	
Tensión admisible	σ =	1.05	MPa

Es el Espesor Correcto ? **VERDADERO** **OK !**

ESPESOR DE DISEÑO = **0.24** **Metros**

ALGUNOS PARAMETROS DE DISEÑO



RESULTADOS GRAFICOS

GENERALIDADES DEL PROCESO CONSTRUCTIVO

PROCEDIMIENTOS DE LABORATORIO

CONTROL DE CALIDAD

ANALISIS DE COSTOS

Modificada Marzo del 2003 por :
ISCYC

Fuente: Elaboración propia

15% de cemento: como $\sigma_{adm} = 1.09 > \sigma = 0.71$, significa que el espesor del PUAD es adecuado.

Gráfica 28 Cálculo de espesor del Pavimento Unicapa con el 15% de cemento

PAVIMENTO UNICAPA DE ALTO DESEMPEÑO : DISEÑO DE ESPESORES DE PAVIMENTO
 PROYECTO: Fecha 03/05/2021
 PROCEDIMIENTO PROPUESTO POR EL ISCYC, FUNDAMENTADO EN EL METODO PARMIGIANI - DI PACE

VEHICULO DE DISEÑO: **C2** C2

PARAMETROS

Módulo Elástico (a 60 días)	E =	<input type="text" value="13,435"/>	MPa
Espesor tentativo del pavimento	h =	<input type="text" value="0.24"/>	m
Coefficiente de Poisson	μ =	<input type="text" value="0.15"/>	
Módulo de reacción de la subrasante	K =	<input type="text" value="100.78"/>	MPa / m
Carga de cada rueda	P =	<input type="text" value="0.022"/>	MN
Presión de inflado de neumático	p =	<input type="text" value="0.66"/>	MPa
Número de Ruedas (en cada punta de eje)	Nr = (1 ó 2)	<input type="text" value="2"/>	
Radio del área equivalente	a =	<input type="text" value="0.103"/>	m
Radio de rigidez relativa	l =	<input type="text" value="0.630"/>	m
Separación entre centros de ruedas	s =	<input type="text" value="0.5"/>	m
	s/a =	<input type="text" value="4.85"/>	
	a/l =	<input type="text" value="0.164"/>	

Formula Modificada por ISCYC

	y =	<input type="text" value="0.93020"/>	
	σ =	<input type="text" value="0.71"/>	MPa

FATIGA POR FLEXION

Módulo de rotura a flexión (a 60 días)	Mr =	<input type="text" value="1.56"/>	MPa
Número diario de repeticiones de la carga	A =	<input type="text" value="22"/>	
Período de diseño	PD =	<input type="text" value="10"/>	Años
Aumento de tráfico anual	% =	<input type="text" value="4.8"/>	
Factor de Crecimiento	Fcr =	<input type="text" value="12.46"/>	
Número de repeticiones en período diseñ	NR =	<input type="text" value="90.306"/>	
Relación Tensión / Módulo de rotura	SR =	<input type="text" value="0.7044"/>	
Tensión admisible	σ =	<input type="text" value="1.10"/>	MPa

Es el Espesor Correcto ? VERDADERO OK!

ESPESOR DE DISEÑO = **Metros**

ALGUNOS PARAMETROS DE DISEÑO

RESULTADOS GRAFICOS


GENERALIDADES DEL PROCESO CONSTRUCTIVO

PROCEDIMIENTOS DE LABORATORIO

CONTROL DE CALIDAD

ANALISIS DE COSTOS

Modificada Marzo del 2003 por :
ISCYC

Fuente: Elaboración propia

20% de cemento: como $\sigma_{adm} = 1.16 > \sigma = 0.73$, significa que el espesor del PUAD es adecuado.

Gráfica 29 Cálculo de espesor del Pavimento Unicapa con el 20% de cemento

PAVIMENTO UNICAPA DE ALTO DESEMPEÑO : DISEÑO DE ESPESORES DE PAVIMENTO Fecha 03/05/2021

PROYECTO: PROCEDIMIENTO PROPUESTO POR EL ISCYC, FUNDAMENTADO EN EL METODO PARMIGIANI - DI PACE

VEHICULO DE DISEÑO: C2 C2

PARAMETROS

Módulo Elástico (a 60 días)	E =	15.900	MPa
Espesor tentativo del pavimento	h =	0.24	m
Coefficiente de Poisson	μ =	0.15	
Módulo de reacción de la subrasante	K =	100.78	MPa/m
Carga de cada rueda	P =	0.022	MN
Presión de inflado de neumático	p =	0.66	MPa
Número de Fluedas (en cada punta de eje)	Nr = (1 ó 2)	2	
Radio del área equivalente	a =	0.103	m
Radio de rigidez relativa	l =	0.657	m
Separación entre centros de ruedas	s =	0.5	m
	s/a =	4.85	
	a/l =	0.157	

Formula Modificada por ISCYC

	y =	0.95135	
	σ =	0.73	MPa

FATIGA POR FLEXION

Módulo de rotura a flexión (a 60 días)	M _r =	1.66	MPa
Número diario de repeticiones de la carga	A =	22	
Período de diseño	PD =	10	Años
Aumento de tráfico anual	% =	4.8	
Factor de Crecimiento	F _{cr} =	12.46	
Número de repeticiones en período diseñ	NR =	30,306	
Relación Tensión / Módulo de rotura	SR =	0.7044	
Tensión admisible	σ =	1.17	MPa

Es el Espesor Correcto ? VERDADERO OK!

ESPESOR DE DISEÑO = 0.24 Metros

ALGUNOS PARAMETROS DE DISEÑO



RESULTADOS GRAFICOS

GENERALIDADES DEL PROCESO CONSTRUCTIVO

PROCEDIMIENTOS DE LABORATORIO

CONTROL DE CALIDAD

ANALISIS DE COSTOS

Modificada Marzo del 2003 por : ISCYC

Fuente: Elaboración propia

Muestra 2. La Cueva

11% de cemento: como $\sigma_{adm} = 1.32 > \sigma = 0.83$, significa que el espesor del PUAD es adecuado.

Gráfica 30 Cálculo de espesor del Pavimento Unicapa con el 11% de cemento

PAVIMENTO UNICAPA DE ALTO DESEMPEÑO : DISEÑO DE ESPESORES DE PAVIMENTO Fecha 03/05/2021

PROYECTO:

PROCEDIMIENTO PROPUESTO POR EL ISCYC, FUNDAMENTADO EN EL METODO PARMIGIANI - DI PACE

VEHICULO DE DISEÑO: C2 C2

PARAMETROS

Módulo Elástico (a 60 días)	E =	11,809	MPa
Espesor tentativo del pavimento	h =	0.22	m
Coefficiente de Poisson	μ =	0.15	
Módulo de reacción de la subrasante	K =	76.29	MPa/m
Carga de cada rueda	P =	0.022	MN
Presión de inflado de neumático	p =	0.66	MPa
Número de Puedas (en cada punta de eje)	Nr = (1 ó 2)	2	
Radio del área equivalente	a =	0.103	m
Radio de rigidez relativa	l =	0.612	m
Separación entre centros de ruedas	s =	0.5	m
	s/a =	4.85	
	a/l =	0.168	

Formula Modificada por ISCYC

y = 0.91618

$\sigma = 0.83$ MPa

FATIGA POR FLEXION

Módulo de rotura a flexión (a 60 días)	Mr =	1.88	MPa
Número diario de repeticiones de la carga	A =	22	
Período de diseño	PD =	10	Años
Aumento de tráfico anual	% =	4.8	
Factor de Crecimiento	Fcr =	12.46	
Número de repeticiones en período diseñ	NR =	90,306	
Relación Tensión / Módulo de rotura	SR =	0.7044	
Tensión admisible	$\sigma =$	1.32	MPa

Es el Espesor Correcto? **VERDADERO** **OK!**

ESPESOR DE DISEÑO = 0.22 Metros

Modificada Marzo del 2003 por : ISCYC

ALGUNOS PARAMETROS DE DISEÑO

RESULTADOS GRAFICOS

GENERALIDADES DEL PROCESO CONSTRUCTIVO

PROCEDIMIENTOS DE LABORATORIO

CONTROL DE CALIDAD

ANALISIS DE COSTOS

Fuente: Elaboración propia

15% de cemento: como $\sigma_{adm} = 1.38 > \sigma = 0.84$, significa que el espesor del PUAD es adecuado.

Gráfica 31 Cálculo de espesor del Pavimento Unicapa con el 15% de cemento

PAVIMENTO UNICAPA DE ALTO DESEMPEÑO : DISEÑO DE ESPESORES DE PAVIMENTO Fecha 03/05/2021

PROYECTO:

PROCEDIMIENTO PROPUESTO POR EL ISCYC, FUNDAMENTADO EN EL METODO PARMIGIANI - DI PACE

VEHICULO DE DISEÑO **C2**

PARAMETROS

Módulo Elástico (a 60 días)	E =	<input type="text" value="12.143"/>	MPa
Espesor tentativo del pavimento	h =	<input type="text" value="0.22"/>	m
Coefficiente de Poisson	μ =	<input type="text" value="0.15"/>	
Módulo de reacción de la subrasante	K =	<input type="text" value="76.29"/>	MPa / m
Carga de cada rueda	P =	<input type="text" value="0.022"/>	MN
Presión de inflado de neumático	p =	<input type="text" value="0.66"/>	MPa
Número de Ruedas (en cada punta de eje	Nr = (1 ó 2)	<input type="text" value="2"/>	
Radio del área equivalente	a =	<input type="text" value="0.103"/>	m
Radio de rigidez relativa	l =	<input type="text" value="0.617"/>	m
Separación entre centros de ruedas	s =	<input type="text" value="0.5"/>	m
	s/a =	<input type="text" value="4.85"/>	
	a/l =	<input type="text" value="0.167"/>	

Formula Modificada por ISCYC

y =
 σ = MPa

FATIGA POR FLEXION

Módulo de rotura a flexión (a 60 días)	Mr =	<input type="text" value="1.97"/>	MPa
Número diario de repeticiones de la carga	A =	<input type="text" value="22"/>	
Período de diseño	PD =	<input type="text" value="10"/>	Años
Aumento de tráfico anual	% =	<input type="text" value="4.8"/>	
Factor de Crecimiento	Fcr =	<input type="text" value="12.46"/>	
Número de repeticiones en período diseñ	NR =	<input type="text" value="90.306"/>	
Relación Tensión / Módulo de rotura	SR =	<input type="text" value="0.7044"/>	
Tensión admisible	σ =	<input type="text" value="1.39"/>	MPa

Es el Espesor Correcto ?

ESPESOR DE DISEÑO = **Metros**

ALGUNOS
PARAMETROS
S DE DISEÑO

RESULTADOS
GRAFICOS

GENERALIDADES DEL PROCESO CONSTRUCTIVO

PROCEDIMIENTOS DE LABORATORIO

CONTROL DE CALIDAD

ANALISIS DE COSTOS

Modificada Marzo del 2003 por :
ISCYC

Fuente: Elaboración propia

20% de cemento: como $\sigma_{adm} = 1.46 > \sigma = 0.85$, significa que el espesor del PUAD es adecuado.

Gráfica 32 Cálculo de espesor del Pavimento Unicapa con el 20% de cemento

PAVIMENTO UNICAPA DE ALTO DESEMPEÑO : DISEÑO DE ESPESORES DE PAVIMENTO
 PROYECTO: Fecha 03/05/2021

PROCEDIMIENTO PROPUESTO POR EL ISCYC, FUNDAMENTADO EN EL METODO PARMIGIANI - DI PACE

VEHICULO DE DISEÑO C2 C2

PARAMETROS

Módulo Elástico (a 60 días)	E =	<input type="text" value="13.316"/>	MPa
Espesor tentativo del pavimento	h =	<input type="text" value="0.22"/>	m
Coefficiente de Poisson	μ =	<input type="text" value="0.15"/>	
Módulo de reacción de la subrasante	K =	<input type="text" value="76.29"/>	MPa/m
Carga de cada rueda	P =	<input type="text" value="0.022"/>	MN
Presión de inflado de neumático	p =	<input type="text" value="0.66"/>	MPa
Número de Ruedas (en cada punta de eje)	Nr = (1 ó 2)	<input type="text" value="2"/>	
Radio del área equivalente	a =	<input type="text" value="0.103"/>	m
Radio de rigidez relativa	l =	<input type="text" value="0.631"/>	m
Separación entre centros de ruedas	s =	<input type="text" value="0.5"/>	m
	s/a =	<input type="text" value="4.85"/>	
	a/l =	<input type="text" value="0.163"/>	

Formula Modificada por ISCYC

y =
 σ = MPa

FATIGA POR FLEXION

Módulo de rotura a flexión (a 60 días)	Mr =	<input type="text" value="2.08"/>	MPa
Número diario de repeticiones de la carga	A =	<input type="text" value="22"/>	
Periodo de diseño	PD =	<input type="text" value="10"/>	Años
Aumento de tráfico anual	% =	<input type="text" value="4.8"/>	
Factor de Crecimiento	Fcr =	<input type="text" value="12.46"/>	
Número de repeticiones en período diseñ	NR =	<input type="text" value="90.306"/>	
Relación Tensión / Módulo de rotura	SR =	<input type="text" value="0.7044"/>	
Tensión admisible	σ =	<input type="text" value="1.47"/>	MPa

Es el Espesor Correcto ? VERDADERO OK!

ESPESOR DE DISEÑO = **Metros**

ALGUNOS PARAMETROS DE DISEÑO

RESULTADOS GRAFICOS

GENERALIDADES DEL PROCESO CONSTRUCTIVO

PROCEDIMIENTOS DE LABORATORIO

CONTROL DE CALIDAD

ANALISIS DE COSTOS

Modificada Marzo del 2003 por : ISCYC

Fuente: Elaboración propia

Muestra 3. Salinas

11% de cemento: como $\sigma_{adm} = 1.09 > \sigma = 0.70$, significa que el espesor del PUAD es adecuado.

Gráfica 33 Cálculo de espesor del Pavimento Unicapa con el 11% de cemento

PAVIMENTO UNICAPA DE ALTO DESEMPEÑO : DISEÑO DE ESPESORES DE PAVIMENTO Fecha 03/05/2021

PROYECTO:
PROCEDIMIENTO PROPUESTO POR EL ISCYC, FUNDAMENTADO EN EL METODO PARMIGIANI - DI PACE

VEHICULO DE DISEÑO C2 C2

PARAMETROS

Módulo Elástico (a 60 días)	E =	11,865	MPa	
Espesor tentativo del pavimento	h =	0.24	m	
Coefficiente de Poisson	μ =	0.15		
Módulo de reacción de la subrasante	K =	93.55	MPa / m	
Carga de cada rueda	P =	0.022	MN	
Presión de inflado de neumático	p =	0.66	MPa	
Número de Ruedas (en cada punta de eje)	Nr = (1 ó 2)	2		
Radio del área equivalente	a =	0.103	m	
Radio de rigidez relativa	l =	0.622	m	
Separación entre centros de ruedas	s =	0.5	m	
	s/a =	4.85		
	a/l =	0.166		

Formula Modificada por ISCYC

y = 0.92393 MPa

σ = 0.71 MPa

FATIGA POR FLEXION

Módulo de rotura a flexión (a 60 días)	Mr =	1.56	MPa	
Número diario de repeticiones de la carga	A =	22		
Período de diseño	PD =	10	Años	
Aumento de tráfico anual	% =	4.8		
Factor de Crecimiento	Fcr =	12.46		
Número de repeticiones en período diseñ	NR =	90,306		
Relación Tensión / Módulo de rotura	SR =	0.7044		
Tensión admisible	σ =	1.10	MPa	

Es el Espesor Correcto ? VERDADERO OK!

ESPESOR DE DISEÑO = 0.24 **Metros**

ALGUNOS PARAMETROS DE DISEÑO

RESULTADOS GRAFICOS

GENERALIDADES DEL PROCESO CONSTRUCTIVO

PROCEDIMIENTOS DE LABORATORIO

CONTROL DE CALIDAD

ANALISIS DE COSTOS

Modificada Marzo del 2003 por : ISCYC

Fuente: Elaboración propia

15% de cemento: como $\sigma_{adm} = 1.17 > \sigma = 0.72$, significa que el espesor del PUAD es adecuado.

Gráfica 34 Cálculo de espesor del Pavimento Unicapa con el 15% de cemento

PAVIMENTO UNICAPA DE ALTO DESEMPEÑO : DISEÑO DE ESPESORES DE PAVIMENTO Fecha 03/05/2021

PROYECTO:

PROCEDIMIENTO PROPUESTO POR EL ISCYC, FUNDAMENTADO EN EL METODO PARMIGIANI - DI PACE

VEHICULO DE DISEÑO C2 C2

PARAMETROS

Módulo Elástico (a 60 días)	E =	13.144	MPa
Espesor tentativo del pavimento	h =	0.24	m
Coefficiente de Poisson	μ =	0.15	
Módulo de reacción de la subrasante	K =	93.55	MPa/m
Carga de cada rueda	P =	0.022	MN
Presión de inflado de neumático	p =	0.66	MPa
Número de Ruedas (en cada punta de eje	Nr = (1 ó 2)	2	
Radio del área equivalente	a =	0.103	m
Radio de rigidez relativa	l =	0.638	m
Separación entre centros de ruedas	s =	0.5	m
	s/a =	4.85	
	a/l =	0.161	

Formula Modificada por ISCYC

y =	0.93679	
σ =	0.72	MPa

FATIGA POR FLEXION

Módulo de rotura a flexión (a 60 días)	Mr =	1.67	MPa
Número diario de repeticiones de la carga	A =	22	
Período de diseño	PD =	10	Años
Aumento de tráfico anual	% =	4.8	
Factor de Crecimiento	Fcr =	12.46	
Número de repeticiones en período diseñ	NR =	90,306	
Relación Tensión / Módulo de rotura	SR =	0.7044	
Tensión admisible	σ =	1.18	MPa

Es el Espesor Correcto ? **VERDADERO** **OK !**

ESPESOR DE DISEÑO = **0.24** **Metros**

ALGUNOS PARAMETROS DE DISEÑO

RESULTADOS GRAFICOS

GENERALIDADES DEL PROCESO CONSTRUCTIVO

PROCEDIMIENTOS DE LABORATORIO

CONTROL DE CALIDAD

ANALISIS DE COSTOS

Modificada Marzo del 2003 por : ISCYC

Fuente: Elaboración propia

20% de cemento: como $\sigma_{adm} = 1.32 > \sigma = 0.72$, significa que el espesor del PUAD es adecuado.

Gráfica 35 Cálculo de espesor del Pavimento Unicapa con el 20% de cemento

PAVIMENTO UNICAPA DE ALTO DESEMPEÑO : DISEÑO DE ESPESORES DE PAVIMENTO Fecha 03/05/2021

PROYECTO:

PROCEDIMIENTO PROPUESTO POR EL ISCYC, FUNDAMENTADO EN EL METODO PARMIGIANI - DI PACE

VEHICULO DE DISEÑO C2 C2

PARAMETROS

Módulo Elástico (a 60 días)	E =	13.298	MPa
Espesor tentativo del pavimento	h =	0.24	m
Coefficiente de Poisson	μ =	0.15	
Módulo de reacción de la subrasante	K =	93.55	MPa/m
Carga de cada rueda	P =	0.022	MN
Presión de inflado de neumático	p =	0.66	MPa
Número de Fuedas (en cada punta de eje	Nr = (162)	2	
Radio del área equivalente	a =	0.103	m
Radio de rigidez relativa	l =	0.640	m
Separación entre centros de ruedas	s =	0.5	m
	s/a =	4.85	
	a/l =	0.161	

Formula Modificada por ISCYC

y = 0.93826

$\sigma = 0.72$ MPa

FATIGA POR FLEXION

Módulo de rotura a flexión (a 60 días)	Mr =	1.89	MPa
Número diario de repeticiones de la carga	A =	22	
Periodo de diseño	PD =	10	Años
Aumento de tráfico anual	% =	4.8	
Factor de Crecimiento	Fcr =	12.46	
Número de repeticiones en período diseñ	NR =	90.306	
Relación Tensión / Módulo de rotura	SR =	0.7044	
Tensión admisible	$\sigma =$	1.33	MPa

Es el Espesor Correcto ? VERDADERO OK!

ESPESOR DE DISEÑO = 0.24 Metros

Modificada Marzo del 2003 por : ISCYC

ALGUNOS
PARAMETRO
S DE DISEÑO


**RESULTADOS
GRAFICOS**

GENERALIDADES DEL PROCESO CONSTRUCTIVO

PROCEDIMIENTOS DE LABORATORIO

CONTROL DE CALIDAD

ANALISIS DE COSTOS

Fuente: Elaboración propia

Tabla 46 Teniendo como resultado el siguiente

	h (m)			σ_{adm} (MPa)			σ (MPa)		
	11%	15%	20%	11%	15%	20%	11%	15%	20%
% de Cemento	11%	15%	20%	11%	15%	20%	11%	15%	20%
El Puesto	0.24	0.24	0.24	1.04	1.09	1.16	0.70	0.71	0.73
La Cueva	0.22	0.22	0.22	1.32	1.38	1.46	0.83	0.84	0.85
Salinas	0.24	0.24	0.24	1.09	1.17	1.32	0.70	0.72	0.72

Fuente: Elaboración propia

Con fines de diseño se adopta un espesor tentativo de pavimento de 0.24 m para todo el tramo de Quebrada Las Vacas – Salinas garantizando la transitabilidad y durabilidad del mismo.

3.14.2.2. Cálculo de ejes equivalentes en el tramo de aplicación

$$W_{18} = TPD * 365 * (1 + i)^n$$

Tenemos un TPD según tabla N° 43 de 22veh/día.

Una tasa de crecimiento según tabla N° 45 de 4.3%.

Vida útil del proyecto que son 10 años.

$$W_{18} = 22 * 365 * (1 + 0.043)^{10}$$

$$W_{18} = 12234$$

Calculo de ejes equivalentes que pasaran en la vida útil.

$$TPD_{10 \text{ AÑOS}} = TPD(1 + i)^{10}$$

$$TPD_{10 \text{ AÑOS}} = 22(1 + 0.043)^{10}$$

$$TPD_{10 \text{ AÑOS}} = 34 \text{ Veh/dia}$$

Se demuestra que el tráfico en volumen no es mayor a 500veh/día por lo tanto se considera bajo tráfico; sin embargo el 100% de vehículos es pesado que transporta productos entre Salinas, Entre Ríos, otros y todo el Departamento de Tarija, por lo tanto consideramos a todo el tráfico para el cálculo de los ejes equivalentes como tráfico pesado. Todo el transporte aforado es pesado y por seguridad del pavimento lo consideramos alto tráfico.

3.15. Análisis económico

En esta investigación se realizó el análisis de costos del pavimento Unicapa y se comparó con el costo de un ripiado común.

Los precios de los materiales, mano de obra y equipo que 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.

Gráfica 39 Análisis del Precio Unitario del Pavimento Unicapa

4.- Gastos generales y administrativos				
				Costo total
	Gastos generales - % DE 1+2+3	9.00%	375.1068	33.760
Total gastos generales y administrativos				33.760
5.- Utilidad				
				Costo total
	Utilidad - % de 1+2+3+4	9.00%	408.8664	36.798
Total utilidad				36.798
6.- Impuestos				
				Costo total
	Impuestos IT - % de 1+2+3+4+5 (3.09%)	3.09%	445.6644	13.771
Total impuestos				13.771
Total precio unitario 1+2+3+4+5+6				459.44
Total precio unitario adoptado (Con dos (2) decimales)				459.44

Fuente: Elaboración propia

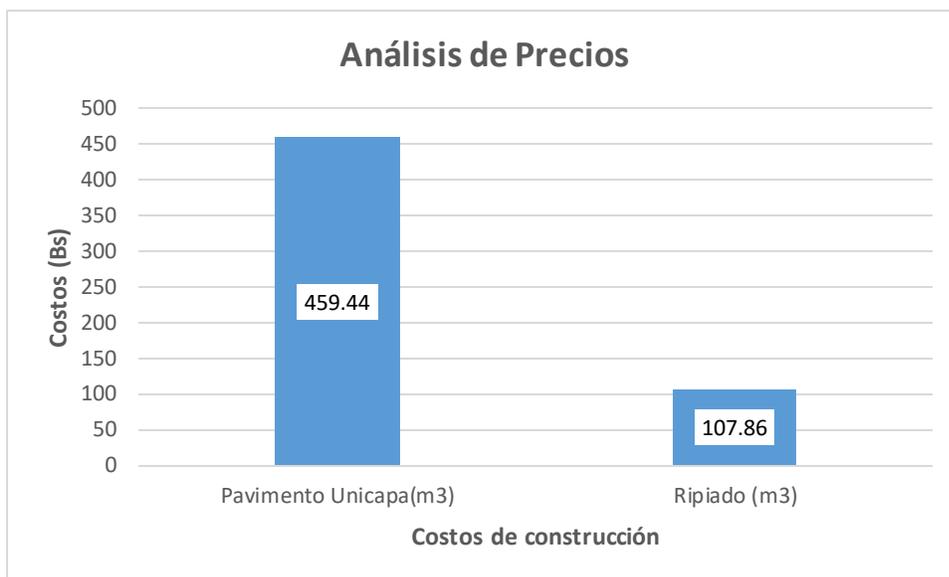
Tabla 47 Presupuesto general

Presupuesto general						
Nro.	Ítem	Unidad	Cantidad	Precio unitario (numeral)	Precio unitario (literal)	Precio total (numeral)
1	Ripiado	m³	1	107.86	Ciento y siete 86/100 Bolivianos	107.86
2	Pavimento Unicapa	m³	1	459.44	Cuatrocientos cincuenta y nueve 44/100 Bolivianos	459.44

Fuente: Elaboración propia

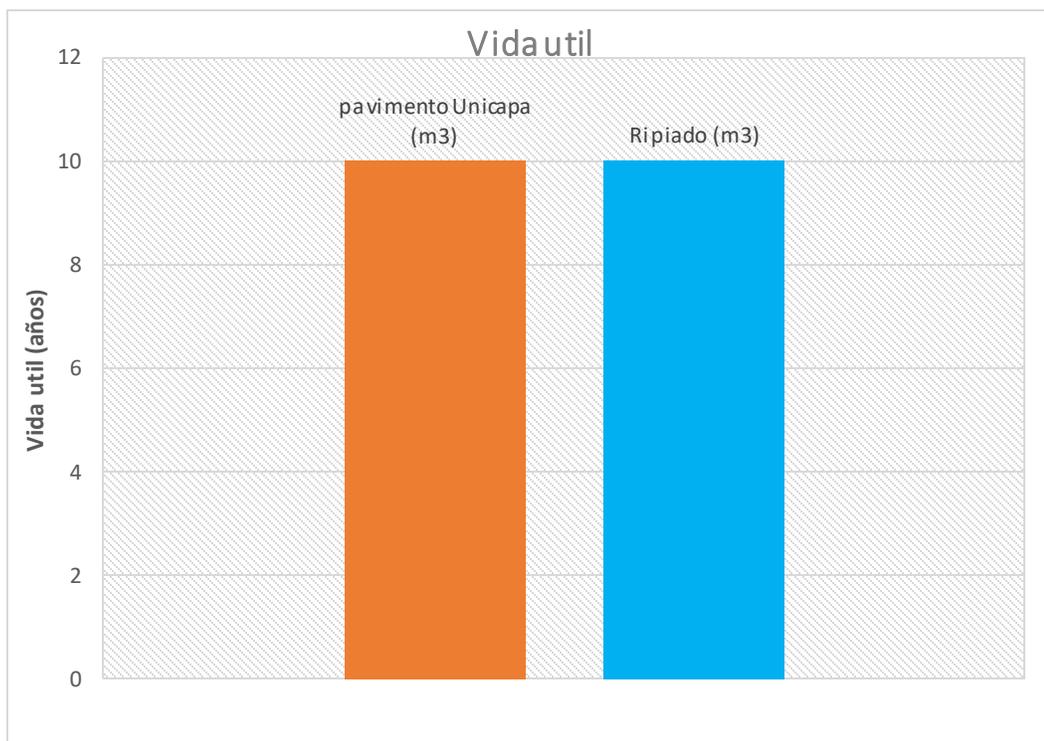
En la tabla del presupuesto general, se observa la diferencia entre ambos costos y se puede obtener ventajas y desventajas de los mismos en el criterio económico entre el pavimento Unicapa y el ripiado común.

Gráfica 40 Análisis de precios



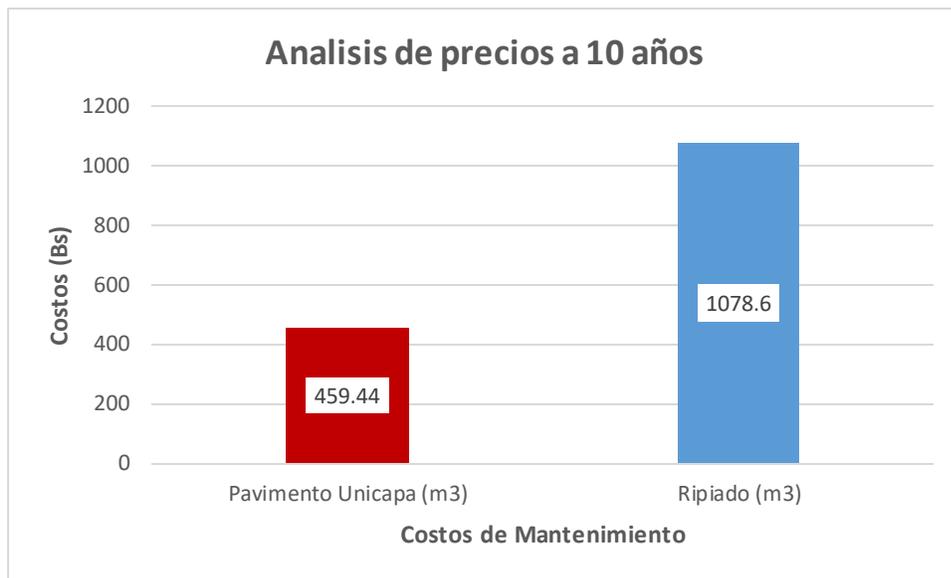
Fuente: Elaboración propia

Gráfica 41 Análisis de Vida útil



Fuente: Elaboración propia

Gráfica 42 Análisis de precios a 10 años



Fuente: Elaboración propia

Se observa que el pavimento Unicapa resulta ser más económico a largo plazo que el ripiado común.

Podemos decir que este tipo de pavimento es una solución en la resistencia y parte económicamente factible para dar solución a las carreteras de la red Departamental.

3.16. Análisis comparativo entre el pavimento unicapa de alto desempeño y el ripiado

A continuación, se presenta un cuadro de diferencia del Pavimento Unicapa de Alto Desempeño y el Rapiado que aportan a las carreteras de la red Departamental.

Tabla 48 Análisis comparativo del pavimento Unicapa y el ripiado

Descripción	Pavimento Unicapa	Rapiado
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

3.17. Ventajas y desventajas del pavimento unicapa de alto desempeño y el ripiado

A continuación, se muestra una tabla de ventajas y desventajas del Pavimento Unicapa de Alto Desempeño y el ripiado, para encontrar la diferencia y analizar el método más correcto en la aplicación de las carreteras de la Red Departamental en cuanto a construcción y costo.

Tabla 49 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 sacados de 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 tanto del Pavimento Unicapa de Alto Desempeño y del Ripiado, teniendo como resultado que el pavimento

Unicapa de Alto Desempeño es un método que aporta muchas ventajas para aplicar a los caminos de la Red Departamental.

3.18. Diferencia entre suelo - cemento, suelo estabilizado con cemento y el pavimento unicapa

Tabla 50 Diferencia entre suelo-cemento, suelo estabilizado con cemento y el PU

Suelo-cemento	Suelo estabilizado con cemento	Pavimento Unicapa
Es el resultado de una mezcla de suelo pulverizado con determinadas cantidades de cemento portland y agua se compactan y curan, para obtener densidades altas y para que se produzca su endurecimiento más efectivo. El contenido de cemento en peso suele ser del orden del 3 al 7% en peso de materiales secos. Se usa normalmente como capa de apoyo de otros materiales tratados con cemento o de concreto hidráulico.	Es la mezcla íntima, convenientemente compactada, de suelo, cemento, agua y eventualmente adiciones, a la cual se le exigen unas determinadas condiciones de insusceptibilidad al agua, resistencia y durabilidad. Se usan en sub-rasantes especialmente en estructuras de pavimentos para tráficos pesados.	Es una estructura de pavimento de una sola capa, construida utilizando el suelo existente en la rodadura de un camino, mezclado y compactado con un porcentaje de cemento portland (11 a 20%), capaz de soportar las fuerzas de compresión y fricción producidas por un determinado tráfico de diseño y proporcionar una superficie de rodaje adecuado. Se compone de agua, cemento y suelo. La vida útil de estos pavimentos es de 3 a 10 años.

Fuente: Elaboración propia

3.19. Recomendaciones ambientales

3.19.1. Método del pavimento Unicapa de Alto Desempeño

Se toma algunas recomendaciones para el cuidado del medio ambiente al momento de ejecutar el método de pavimento Unicapa de Alto Desempeño; 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 el objetivo principal que fue analizar el método de pavimento Unicapa de Alto Desempeño en el tramo Quebrada Las Vacas - Salinas.
- Una vez realizado los ensayos de la caracterización se pudo identificar que la muestra 1- El Puesto es un suelo areno gravoso con moderada cantidad de fino, no presenta plasticidad. La muestra 2 – La Cueva es un suelo granular arenoso con grava y finos moderados, presenta plasticidad baja. Y la muestra 3 – Salinas, es un suelo granular, areno gravoso con bastante cantidad de finos con plasticidad media.
- Las tres diferentes muestras al ser analizadas, se comprobó que los suelos de El Puesto A-1-b (SW), La Cueva A-1-b (SW) y Salinas A-2-4 (GM) se encuentran dentro de los parámetros en la prueba de resistencia de compresión y flexión establecidos por el Instituto Salvadoreño de Cemento y Concreto.

El Puesto					
Tipo de esfuerzo	Valor mínimo (Kg/cm ²)	Valor real (Kg/cm ²)			Valor máximo (Kg/cm ²)
		11%	15%	20%	
Compresión	60	61.74	82.32	115.29	120
Flexión	11	15.19	15.94	16.96	23

Fuente: Elaboración propia

La Cueva					
Tipo de esfuerzo	Valor mínimo (Kg/cm ²)	Valor real (Kg/cm ²)			Valor máximo (Kg/cm ²)
		11%	15%	20%	
Compresión	60	63.60	67.24	80.87	120
Flexión	11	19.20	20.12	21.24	23

Fuente: Elaboración propia

Salinas					
Tipo de esfuerzo	Valor mínimo (Kg/cm ²)	Valor real (Kg/cm ²)			Valor máximo (Kg/cm ²)
		11%	15%	20%	
Compresión	60	64.20	78.79	80.65	120
Flexión	11	15.87	17.00	19.24	23

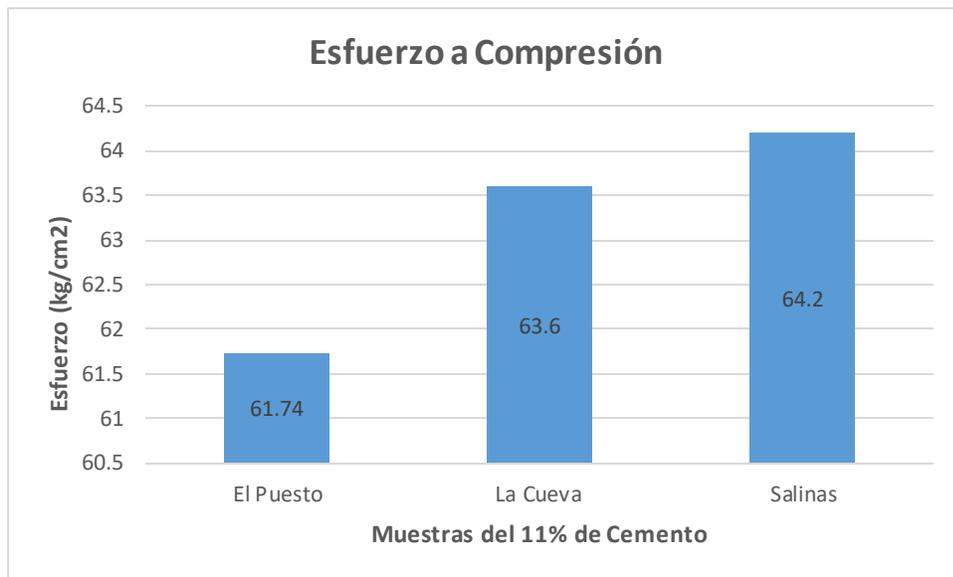
Fuente: Elaboración propia

- Esta investigación se realizó con el 11%, 15 % y 20% de cemento para evaluar la influencia del porcentaje de cemento. Como se ha analizado anteriormente los esfuerzos a flexión y compresión, observándose en los resultados que el valor más adecuado es el 15% de cemento, esto debido a que el porcentaje de incidencia en los valores de flexión y compresión son mínimos o muy bajos y económicamente se demostró que el 5% de cemento incide enormemente en el costo final del pavimento Unicapa pudiendo hacerlo inviable en su construcción.
- Como se trata de un mismo tramo se adopta el valor calculado en el tramo de mayor sollicitación de espesor de pavimento, este valor se replica para todo el tramo y es de 0.24m; con el fin de garantizar la durabilidad del mismo.
- Es importante destacar que el método de pavimento Unicapa está concebido para ser aplicado principalmente al mejoramiento vial de las carreteras de la red Departamental considerando que es un método fácil de diseñar y de construir.
- 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 dicho método 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.

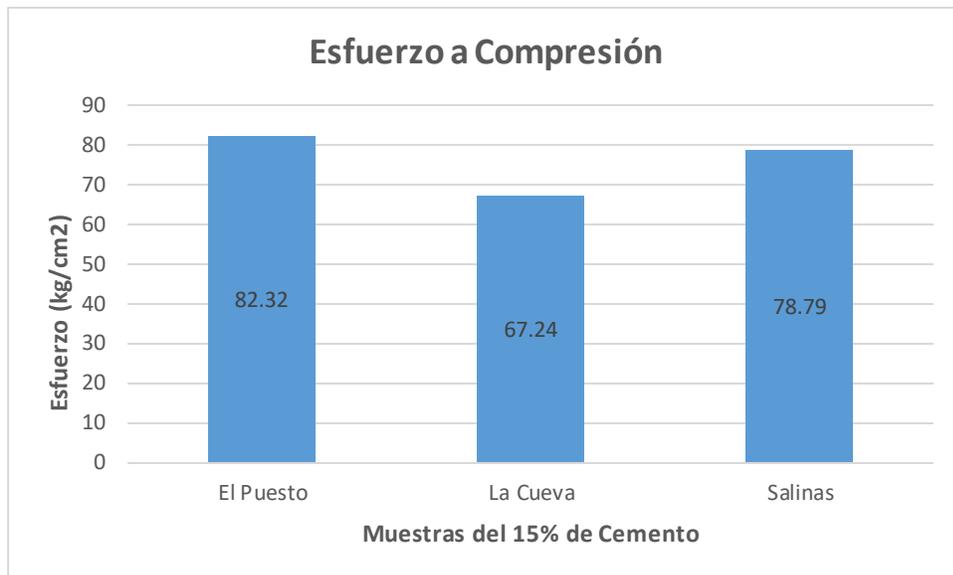
- Se concluyó que la hipótesis planteada sobre la mezcla de suelo – cemento, utilizando el método del pavimento Unicapa puede llegar a mejorar la resistencia tanto en compresión y flexión aportando una estabilidad estructural.

Tramo	Esfuerzo (kg/cm ²)		
	11%	15%	20%
El Puesto	61.74	82.32	115.29
La Cueva	63.60	67.24	80.87
Salinas	64.20	78.79	80.65

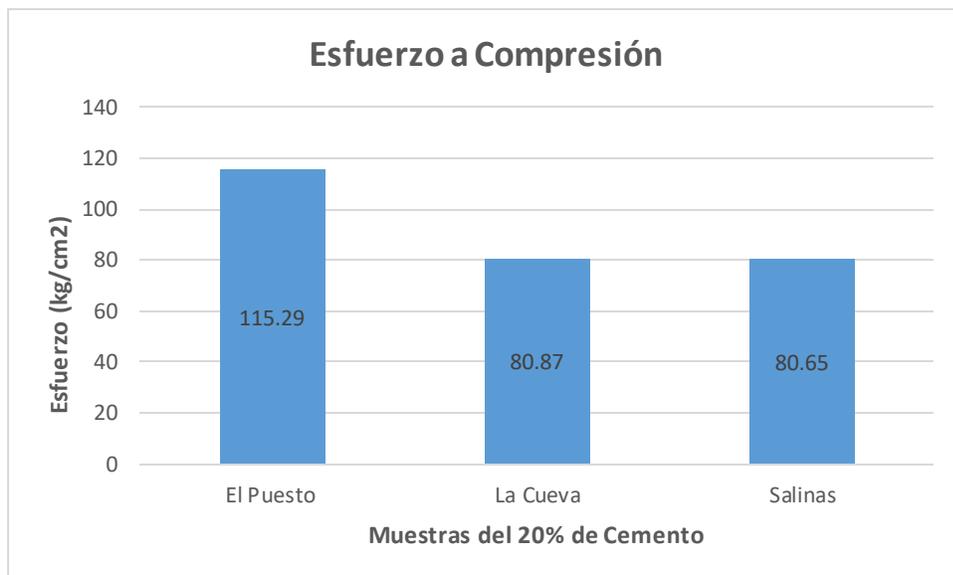
Fuente: Elaboración propia



Fuente: Elaboración propia



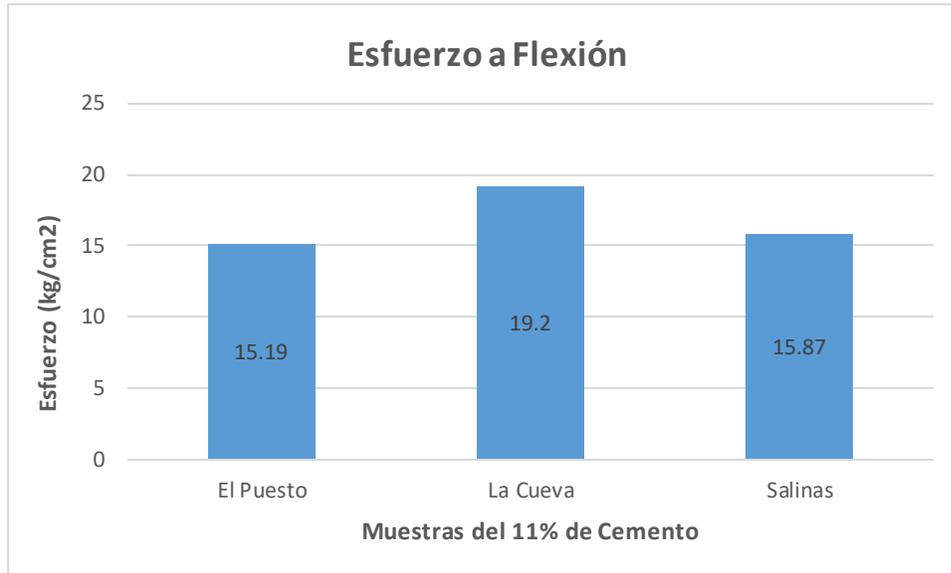
Fuente: Elaboración propia



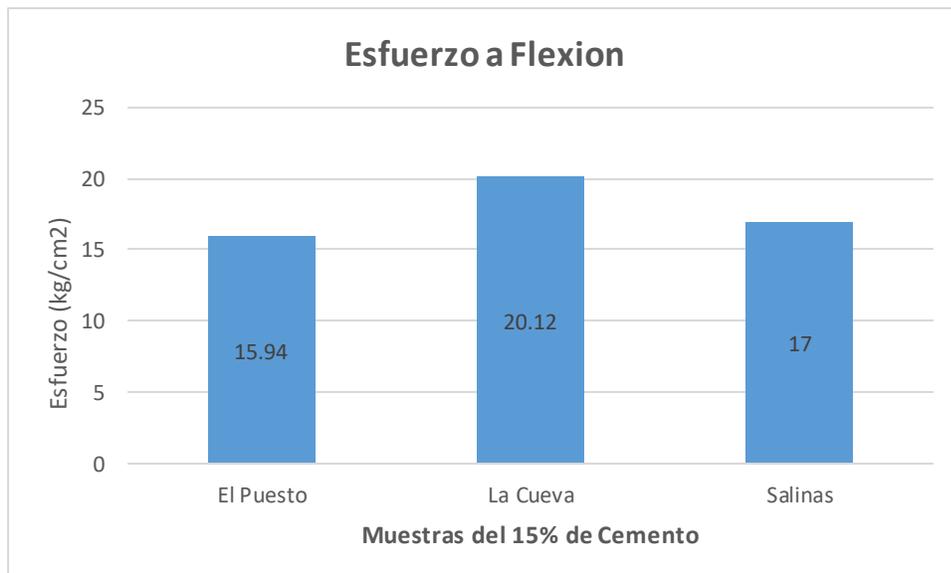
Fuente: Elaboración propia

Tramo	Esfuerzo (kg/cm ²)		
	11%	15%	20%
El Puesto	15.19	15.94	16.96
La Cueva	19.20	20.12	21.24
Salinas	15.87	17.00	19.24

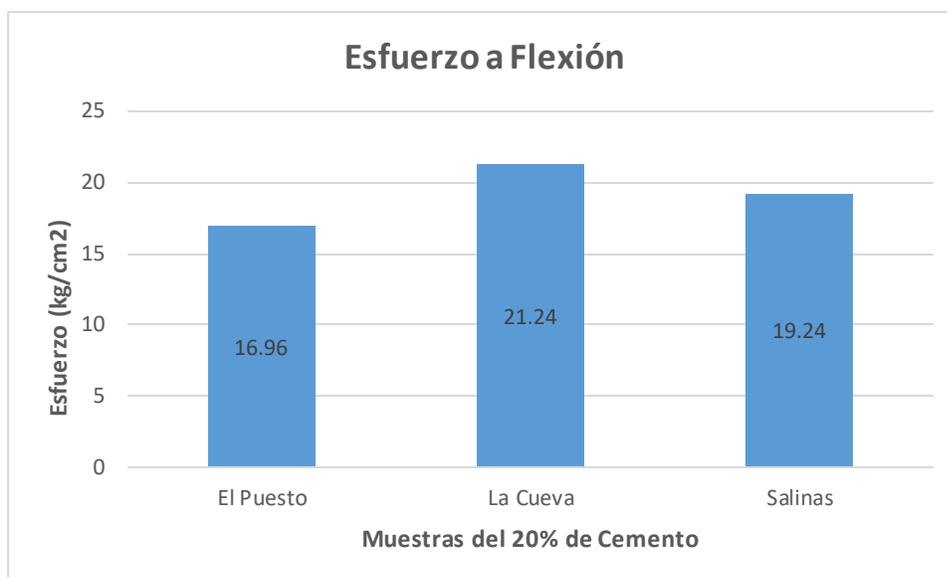
Fuente: Elaboración propia



Fuente: Elaboración propia



Fuente: Elaboración propia



Fuente: Elaboración propia

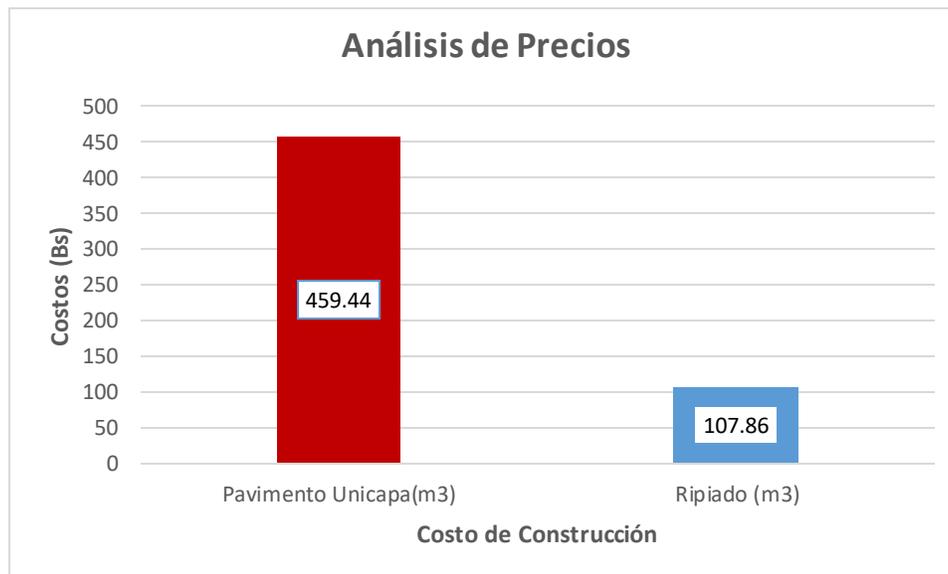
- Una conclusión muy importante de nuestro proyecto fue los aspectos técnicos y económicos en la conformación de mezclas Unicapa para el tramo de estudio, ya que si bien la normativa utilizada recomienda valores entre 11 a 20% de cemento portland, recomendando por experiencia en sus tramos ya ejecutados el valor medio de 15%, con el fin de darle valor adicional al trabajo desarrollado se hizo la investigación con los tres valores indicados 11, 15, y 20% de cemento, analizando su comportamiento desde lo técnico hasta lo económico concluyendo que desde el punto de vista técnico cuanto más porcentaje de cemento se coloca a la mezcla unicapa mejores resultados de resistencia y desde lo económico cuanto menor el porcentaje de cemento en la mezcla menos el costo, por ello coincidimos con nuestros resultados en el tramo en estudio que el más adecuado es un 15% de cemento tanto en la parte técnica y económica de la mezcla.
- Se debe 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; es importante indicar que la funcionalidad de un pavimento Unicapa tiende a tener un menor desgaste de llanta y una comodidad para el usuario frente al ripiado, 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 ripiado en la parte de mantenimiento de ambos.

• Métodos	Costos (Bs)
Pavimento Unicapa	459.44
Ripiado	107.86

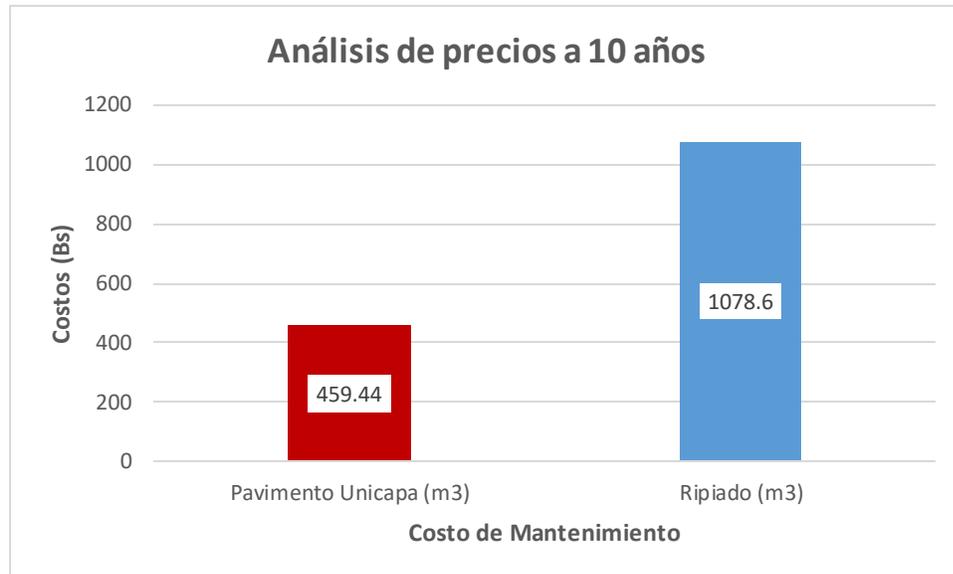
Fuente: Elaboración propia



Fuente: Elaboración propia

Métodos	Costos (Bs)
Pavimento Unicapa	459.44
Ripado	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 a las carreteras de la red Departamental.
- 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 las carreteras de la red Departamental, un método que merece ser estudiado en gran amplitud para luego aplicarlo; para así, beneficiar en la parte socio-económica de la unión entre comunidades y principales ciudades.

4.2. Recomendaciones

- Tener cuidado al momento de realizar la compactación T180 proctor modificado con el suelo natural, 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.
- Se recomienda considerar todas las recomendaciones ambientales mencionadas anteriormente.