

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1. Antecedentes

El pavimento unicapa de alto desempeño, está conformado por una mezcla de una subrasante y cemento Portland en un porcentaje que se encuentra entre el 11% y el 20%, como su nombre lo indica está constituido por una sola capa que debe ser compactada a una humedad óptima. Es una alternativa de pavimento para la red vial no pavimentada y de bajo tráfico del país y de la región; que tiene la condición de soportar las fuerzas de compresión y fricción producidas por un determinado tráfico de diseño y proporcionar una superficie de rodaje adecuada.

La idea de crear este tipo de pavimento, surgió el año 2001 como un proyecto de investigación del ISCYC (Instituto Salvadoreño del Cemento y el Concreto) con el objetivo de proponer una alternativa económica de pavimentación que aprovechará al máximo los suelos existentes, se realizaron tramos experimentales en diferentes lugares del Salvador entre los cuales podemos mencionar el tramo Rio Chiquito – Las Pilas con una longitud de aproximadamente 5.500 metros.

En Nicaragua el año 2013, en el municipio de Managua tramo San Rafael del Sur, se realizó el método del pavimento unicapa con una longitud aproximada de 400 metros en un área de 5.600 m².

En Costa Rica el año 2014, en la municipalidad de Santa Cruz, Guanacaste, se empleó la técnica del pavimento unicapa en una longitud de 400 metros y un área de 7.500 m².

En Bolivia 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, se realizó por la Administradora Boliviana de Carreteras de Chuquisaca ejecutando el tramo de “Tarabuco – Zudañez” en el año 2011, en Santa Cruz se realizó el año 2012 un tramo experimental en el estacionamiento de la planta de cemento Warnes Santa Cruz – Bolivia un área total de 9.605 m², En Oruro en el sector de la Joya la ABC realizo un proyecto el cual tenía una

extensión de 1.200 metros el año 2014, también el año 2019 se realiza el tramo en el acceso de la Planta ECEBOL – Oruro con un tramo experimental de 900 metros y se realizó también en el año 2019 el acceso de la planta SOBOCE – Viacha con una longitud de 600 metros.

Con la investigación, se pretende analizar mezcla suelo - cemento utilizando la técnica de pavimento unicapa de alto desempeño y realizar una comparación con otros diferentes tipos de capas de rodadura las cuales son: Pavimento rígido, pavimento flexible, tratamiento superficial simple y un afirmado, para determinar su viabilidad técnica y económica en su aplicación en obras civiles.

1.2. Situación problemática

Los pavimentos unicapa de alto desempeño poseen, al igual que otras alternativas de pavimentos, un particular comportamiento estructural y funcional durante su vida útil.

Los caminos constituyen uno de los factores más importantes para el desarrollo económico y social de cualquier región, es por eso que se busca realizar un camino con buenas características mecánicas y económicas que pueda ser durable a través del tiempo y aguantar los distintos factores como el peso, la fricción o el clima.

Si no se realiza un estudio sobre qué alternativas de construcción de un camino es la más viable, la construcción de estos se las realizaría con costos altos, debido a las largas distancias en las cuales se encuentran los materiales que utilizarían en dicha obra.

Por lo tanto, comparar las alternativas que se pueden utilizar para la construcción de caminos es importante para dar una mejor solución mecánica y económica.

1.2.1. Formulación de problema

¿Cómo la comparación de pavimentos unicapa podrá mostrar sus ventajas y desventajas respecto a otras alternativas de capas de rodadura como el pavimento rígido, el pavimento flexible, el tratamiento superficial simple y un afirmado?

1.2.2. Delimitación de tiempo

Se puede apreciar que el tiempo de este problema será temporal hasta que las condiciones del tramo estudiado cambien.

1.2.3. Delimitación del espacio

- Área de trabajo; se encuentra en el área de mecánica de suelos aplicada.
- Base de operación; laboratorio de mecánica de suelos.
- Aplicación; construcción de carreteras.

1.3. Justificación

Los caminos son factores de desarrollo importantes en nuestro medio, sin embargo, toman en cuenta más las vías principales para su diseño, construcción y mantenimiento dejando de lado a los caminos rurales que también son importantes para la red vial y para el desarrollo socio-económico de la población. Los caminos rurales que se encuentran en malas condiciones por la falta de mantenimiento, causando el deterioro, dificultando la transitabilidad y dando como resultado que la vida útil sea menor.

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.

Es por eso que se pretende encontrar una buena alternativa para la construcción para la construcción de la red vial no pavimentada y de bajo tráfico y así fomentar el desarrollo socio-económico.

1.4. Objetivos

La presente investigación tiene los siguientes objetivos:

1.4.1. Objetivo general

Comparar el pavimento unicapa con otras alternativas de capas de rodadura a través de indicadores de diseño para definir sus cualidades respecto a los costos y características de diseño.

1.4.2. Objetivos específicos

- Caracterizar los componentes del pavimento unicapa.

- Determinar las resistencias del pavimento unicapa.
- Comparar las características del pavimento unicapa respecto a las características de un pavimento rígido, pavimento flexible, tratamiento superficial simple y afirmado.
- Obtener un análisis económico en costos de transporte y precios de los materiales.

1.5. Hipótesis

Si, al realizar la comparación del pavimento unicapa se establece la mejor alternativa para uso de capa de rodadura en función de sus resistencias o criterios técnico y económico.

1.6. Operacionalización de las variables

Variable 1: Análisis económico.

Variable 2: Viabilidad técnica: resistencia.

Conceptualización de variables

Variable 1	Concepto	Dimensión	Indicador	Valor / acción
Análisis económico	El análisis económico varía en función del precio y distancia a movilizar de los ítems.	Costo del material de construcción.	Bolivianos (Bs).	Obtener precios actualizados de los materiales de construcción.
		Distancia del transporte de material.	Kilómetros (km).	Realizar mediciones de las distancias máximas de transporte del material para determinar su costo.
		Costo de equipo y mano de obra.	Bolivianos (Bs).	Obtener precios actualizados de los equipos y de la mano de obra.

Variable 2	Concepto	Dimensión	Indicador	Valor / acción
Viabilidad técnica: resistencia.	La viabilidad técnica variará su resistencia según su resistencia.	Resistencia del suelo.	Pascal (Pa).	Determinado con ensayos de CBR.
		Cemento Portland.	Porcentaje (%).	Calculado en base a la cantidad de masa de suelo.
		Mezcla suelo - cemento.	Gramos (g).	Realizar por separado en función a los valores determinados.
		Resistencia a compresión del pavimento unicapa.	Pascal (Pa).	Determinado con ensayo a compresión en laboratorio.
		Resistencia a flexotracción del pavimento unicapa.	Pascal (Pa).	Determinado con ensayo a compresión en laboratorio.

1.7. Identificación del tipo de investigación

La investigación es cuantitativa de tipo descriptiva, porque se encarga de puntualizar las características de la población que se está estudiando.

1.8. Unidades de estudio y decisión muestral

Unidades de estudio

La siguiente investigación se planteó realizar una comparación de los parámetros técnicos y económicos del pavimento unicapa respecto a otras alternativas como capa de rodadura.

Población

Capas de rodadura.

Muestra

Pavimento unicapa.

1.9. Alcance

La investigación realizó el diseño de un pavimento unicapa con 16% de cemento y para compararlo con un afirmado, un tratamiento superficial simple, un pavimento flexible y un pavimento rígido, la investigación se diseñó con la subrasante más desfavorable obtenida en el tramo local que conecta el sector de La Tablada y Turumayo el cual se clasifica como A-2-4₍₀₎.

CAPÍTULO II

**ASPECTOS GENERALES DEL
PAVIMENTO UNICAPA Y DE
OTRAS ALTERNATIVAS DE
CAPAS DE RODADURA**

CAPÍTULO II

ASPECTOS GENERALES DEL PAVIMENTO UNICAPA Y DE OTRAS ALTERNATIVAS DE CAPAS DE RODADURA

2.1. Pavimentos

Un pavimento es una estructura vial formada por una o varias capas superpuestas relativamente horizontales, que se diseñan y construyen técnicamente con materiales apropiados y adecuadamente compactados; capaz de resistir las cargas impuestas por el tránsito y la acción del medio ambiente y de transmitir al suelo de apoyo (subrasante, la cual es obtenida por el movimiento de tierras en el proceso de exploración) los esfuerzos que las cargas repetidas del tránsito duramente el periodo para el cual fue diseñada la estructura del pavimento.

Figura 1. Pavimento de carretera.



Fuente: Elaboración propia.

La definición de pavimento dada por la Administradora Boliviana de Carreteras (ABC) es: "Estructura formada por una o más capas de materiales seleccionados y eventualmente tratados, que se colocan sobre la subrasante con el objetivo de proveer una superficie de rodadura adecuada y segura bajo diferentes condiciones ambientales y que soporta las sollicitaciones que impone el tránsito." (ABC, 2007).

2.2. Funciones de los pavimentos

El pavimento tiene la función de proveer una superficie de rodamiento al tránsito y distribuir las cargas del tránsito aplicadas al pavimento, estas cargas no deben sobrepasar las tensiones admisibles de las capas que componen el pavimento ni tampoco de los suelos de fundación.

Los pavimentos están formados por diferentes capas de resistencia que van decreciendo con la profundidad. En general el pavimento se compone de: carpeta de rodamiento (asfáltica o de hormigón), base y sub base apoyado todo este conjunto sobre la subrasante. En algunos casos puede faltar alguna de estas capas (HGUERRERO Constructores y Consultores, 2020).

2.3. Características de los pavimentos

Resistencia mecánica. - La resistencia del pavimento esta proporcionada por los materiales que la componen; el espesor que el pavimento representa hace que los esfuerzos que lleguen al terreno de soporte sean tolerables por éste. La determinación de la resistencia de los materiales que conforman un pavimento es difícil; esto porque influyen en ésta no sólo las propiedades mecánicas de ellos, sino también su interacción con los efectos de intemperie, siendo el más importante la incidencia de su contenido de humedad; también influyen notoriamente el tipo de cargas que se les aplica y la velocidad con que ello se hace.

Deformabilidad adecuada. - Es importante conocer que un pavimento deformado puede dejar de cumplir sus funciones; debido a estas deformaciones excesivas pueden estar asociadas a estados de falla. La deformación máxima permisible se tiene en cuenta en los métodos de diseño, con base en un valor prefijado; la estructura se diseña de manera que solo se alcance dicho valor al final de la vida útil prevista.

Durabilidad. - Para un correcto diseño del pavimento, es necesario tener relevancia sobre la duración y buen comportamiento del mismo. Esto está ligado a diferentes factores económicos y sociales de la vía.

Drenaje. - Los elementos de drenaje y subdrenaje en el pavimento son uno de los aspectos más importantes en la vida útil del mismo. Estos elementos en el pavimento forman parte del diseño y siempre deben ser considerados.

Economía. - Como toda estructura en la ingeniería, los pavimentos deben tener un equilibrio entre resistencia y estabilidad con el costo total del mismo, por ello es importante tener en cuenta el proceso de construcción (Rincón & Piragauta, 2007).

2.4. Tipos de pavimentos y tratamientos

La clasificación de los pavimentos se la realiza de acuerdo con la forma como se transmite al suelo de soporte debido a los esfuerzos generados por los vehículos.

2.4.1. Pavimentos flexibles

Se denominan flexibles ya que están conformadas por una carpeta asfáltica apoyada sobre una o varias capas de gran flexibilidad, estas capas admiten grandes deformaciones sin rotura bajo la aplicación de la carga. Las capas transmiten los esfuerzos al terreno de soporte mediante un mecanismo de disipación de tensiones, las cuales van disminuyendo paulatinamente con la profundidad.

Figura 2. Pavimento flexible.

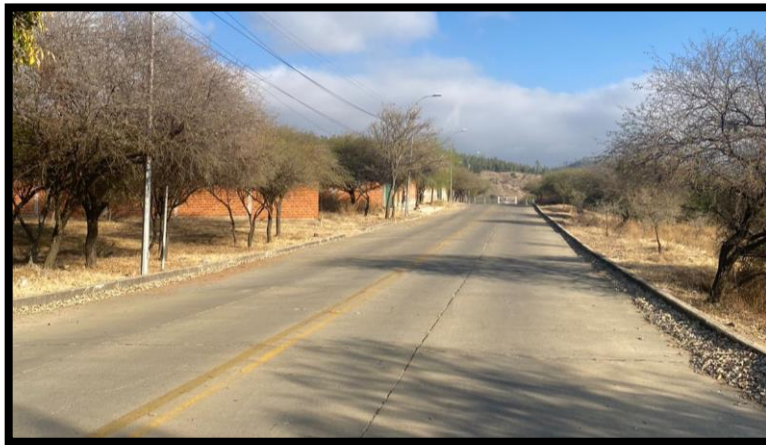


Fuente: Elaboración propia.

2.4.2. Pavimentos rígidos

Constituidos por una placa o losa de concreto hidráulico de gran rigidez (admite pequeñas deformaciones bajo efecto de la carga), la losa transmite los esfuerzos al terreno de soporte repartiéndolos en un área muy amplia. Cuando el suelo que forma la subrasante es de mala calidad, es necesario colocar bajo la losa un material de sub base de grava bien graduada y compactada o de suelo estabilizado para conseguir una mejor distribución de las cargas.

Figura 3. Pavimento rígido.



Fuente: Elaboración propia.

2.4.3. Pavimento unicapa

La filosofía de este pavimento se puede considerar en cierto modo similar a la de los de concreto compactado, pero empleando un suelo natural como material de partida en vez de agregados procesados. El suelo - cemento es una de las técnicas con más campo de acción y más conocidas en El Salvador, precisamente es en este país donde planteó en el año 2000, la posibilidad de crear 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 % y 20% en peso, cuando este pavimento es compactado al porcentaje de diseño es capaz de soportar las cargas y el desgaste producido por el tráfico, proporcionando a la vez una superficie de rodadura adecuada, denominándose esta técnica como pavimentos unicapa.

Figura 4. Procedimiento para la elaboración del pavimento unicapa.



Fuente: La Patria; Proyecto de pavimento “unicapa” tiene un avance del 75.

El campo de aplicación en este tipo de pavimento esta específicamente en la red vial no pavimentada, y conforma una alternativa a las tradicionales intervenciones de colocación de balasto que se realizan dos veces por año (antes y después de la época lluviosa), los pavimentos unicapa se diseñan por lo general para un periodo de 5 años, en este tiempo no se realizan intervenciones de mantenimiento en la calzada del pavimento, únicamente limpieza de drenajes, rehabilitando la estructura del pavimento posterior al año 5 de operación, colocando sobre el pavimento unicapa una capa de rodadura de concreto hidráulico o concreto asfáltico. La rehabilitación de este tipo de pavimentos resulta ser muy económica, ya que el espesor de capa de rodadura tiende a resultar considerablemente menor, debido a la alta capacidad de soporte y vida remanente del pavimento al final del periodo de diseño.

Se debe tener claro que las propiedades estructurales de los pavimentos unicapa dependen básicamente de los siguientes aspectos: tipo de suelo, contenido de cemento, energía de compactación y curado, los valores usuales de resistencia a compresión varían de 5,0 - 13 MPa, Módulo de Ruptura de 1,0 -2,3 MPa, Módulo de Elasticidad de 15.000 – 40.000 MPa.

Figura 5. Pavimento unicapa.



Fuente: XVII Reunión del Concreto, RC 2018.

De acuerdo a los pavimentos ya construidos con esta técnica, en la mayoría de los casos de mezclas elaboradas con suelos granulares no plásticos, los agregados trabajan de forma similar a las mezclas de concreto hidráulico. Las experiencias con suelos finos de mediana a alta plasticidad también han resultado muy exitosas (ISCYC, 2006).

2.4.4. Tratamiento superficial

De acuerdo a Aguilar N. & Salas G. (2012): “Se define un tratamiento superficial como una superficie asfáltica que resulta de una o más aplicaciones sucesivas y alternadas de ligante asfáltico y áridos sobre una base granular o sobre un pavimento existente de asfalto o de hormigón, teniendo por finalidad el mejorar o conservar las características físicas y mecánicas de las superficies así tratadas. De acuerdo al número de aplicaciones de asfalto y áridos, estos reciben el nombre de tratamiento superficial simple, doble, triple o múltiple. También se consideran tratamientos superficiales a algunos Tipos de mezcla asfáltica-agregados. Todos los tratamientos superficiales sellan y prolongan la vida de las carreteras.”

El tratamiento asfáltico de superficie (asphalt surface treatment) es un término amplio que engloba diferentes tipos de aplicaciones con asfalto y agregado, usualmente de menos de 25 mm (1 in) de espesor y aplicado a cualquier tipo de superficie del camino. La superficie del camino puede ser un asfalto existente o un pavimento de hormigón de cemento Portland, así también una base granular imprimada; los tratamientos de superficie

aplicados a un pavimento existente son a menudo llamados riego de sellado (Aguilar N. & Salas G., 2012).

Los tratamientos asfálticos de superficie que son adecuadamente construidos, son económicos, fáciles de aplicar y de larga vida de duración. Es así que otorgan años de servicio a las superficies de los caminos; pero cada uno de ellos tiene uno o más propósitos especiales. Un tratamiento de superficie no es en sí mismo un pavimento.

Principalmente, el tratamiento superficial es una técnica de mantenimiento económicamente efectiva para prolongar la vida de servicio del pavimento. Es capaz de resistir la abrasión del tráfico y provee impermeabilización para la estructura inferior. Un tratamiento de superficie agrega poca resistencia estructural y, por lo tanto, generalmente no se lo toma en cuenta al determinar la capacidad portante de un pavimento (Aguilar N. & Salas G., 2012).

Se debe tener claro que un tratamiento superficial provee una excelente superficie de resistencia al deslizamiento, pero aun empleándolo correctamente, no es la solución para todos los problemas que tiene un pavimento. Para su diseño es importante tomar en cuenta las condiciones climáticas y los materiales a elegir para el diseño del mismo. Por ello se debe tener claro las ventajas y desventajas del tratamiento superficial con emulsiones asfálticas y así no tener problemas en sus años de servicio.

a) Tratamiento superficial simple

Básicamente, un tratamiento superficial simple consiste en la aplicación uniforme de un ligante asfáltico, sobre una estructura de pavimento o base granular, seguida por una capa de agregado de tamaño uniforme.

Cuando se aplica sobre una base granular, esta alternativa se utiliza para reducir la pérdida de material por escorrentía superficial, impermeabilizar la superficie y reducir la cantidad de partículas de polvo dispersas en el aire que se generan con el tránsito vehicular (Gómez, 2017).

b) Tratamiento superficial múltiple

Los tratamientos superficiales múltiples básicamente son una sobreposición de múltiples tratamientos superficiales simples, donde cada capa se construye como si fuese un tratamiento superficial simple.

Al momento de su construcción se procura que los agregados de cada capa tengan aproximadamente la mitad del tamaño de los agregados que conforman la capa anterior. Al igual que los TS-1, esta solución puede aplicarse sobre bases granulares y superficies pavimentadas.

Este tipo de tratamiento superficial se utiliza principalmente cuando se necesita obtener un acabado más uniforme del que pueda obtenerse con un TS-1 o en lugares que presentan condiciones climáticas adversas (Gómez, 2017).

2.4.5. Afirmado

El afirmado es una capa compactada de material granular natural o procesado con gradación específica que soporta directamente las cargas y esfuerzos del tránsito, es una mezcla de tres tamaños o tipos de material: piedra, arena y finos o arcilla. Si no existe una buena combinación de estos tres tamaños, el afirmado será pobre.

El afirmado requiere de un porcentaje de piedra para soportar las cargas. Asimismo, necesita un porcentaje de arena clasificada, según tamaño, para llenar los vacíos entre las piedras y dar estabilidad a la capa y, obligatoriamente un porcentaje de finos plásticos para cohesionar los materiales de la capa de afirmado.

Hay dos principales aplicaciones en el uso de afirmados: Su uso como superficie de rodadura en carreteras no pavimentadas o su uso como capa inferior granular o como colchón anticontaminante.

Como superficie de rodadura, un afirmado sin suficientes finos está expuesto a perderse porque es inestable. En construcción de carreteras, se requiere un porcentaje limitado pero suficiente de materiales finos y plásticos que cumplan la función de aglutinar para estabilizar la mezcla de gravas.

Un buen afirmado para capa inferior, tendrá mayor tamaño máximo de piedras que en el caso de la capa de superficie y muy poco porcentaje de arcillas y de materiales finos en general. La razón de ello es que la capa inferior debe tener buena resistencia para soportar las cargas del tránsito y, además, debe tener la cualidad de ser drenante.

2.5. Cemento asfáltico

Es un material oscuro de origen natural, que actúa como ligante en las mezclas asfálticas. Es resistente a una gran cantidad de ácidos y es impermeable, lo que lo hace idóneo para la construcción de superficies de rodadura en los pavimentos flexibles.

El cemento asfáltico es un ligante denso que a la temperatura ambiente es semisólido, usualmente pegajoso y de color variable entre café muy oscuro y negro.

Una de sus principales características es su viscosidad, la cual cambia dependiendo de la temperatura a la cual se encuentre sometido. Otra característica importante es su durabilidad, la cual hace referencia a la resistencia al envejecimiento, es decir su capacidad de conservar sus características iniciales con el pasar de los tiempos.

El cemento asfáltico se prepara comercialmente en 5 grados o rangos de consistencia definidos a partir del ensayo de penetración. La designación corriente de los cinco grados de cemento asfáltico utilizados en pavimentación y su significado será como se muestra a continuación:

- PEN 40 – 50 Cemento asfáltico con penetración entre 40 a 50 décimas de mm.
- PEN 60 – 70 Cemento asfáltico con penetración entre 60 a 70 décimas de mm.
- PEN 85 – 100 Cemento asfáltico con penetración entre 85 a 100 décimas de mm.
- PEN 120–150 Cemento asfáltico con penetración entre 120 a 150 décimas de mm.
- PEN 200–300 Cemento asfáltico con penetración entre 200 a 300 décimas de mm.

2.6. Emulsión asfáltica

Se llama emulsión asfáltica a la dispersión de un sólido o un líquido (fase dispersa) en forma de glóbulos minúsculos, en un líquido no miscible con el elemento disperso (fase continua). Cuando las dos fases permanecen en equilibrio sin que las partículas en suspensión se aglomeren o se sedimenten, se dice que la emulsión es estable. Ciertas emulsiones exigen la presencia de un agente emulsificador para conservar la estabilidad.

Las emulsiones asfálticas son dispersiones en agua de glóbulos asfálticos de dos a cinco micrones de diámetro, que se mantienen estables en presencia de un agente emulsificante que pueden ser ácidos grasos o resinas con bases fuertes que son normalmente utilizados para la fabricación de emulsiones aniónicas o los resultantes de la acción de ácidos minerales sobre compuestos amínicos que son usados para la elaboración de emulsiones catiónicas.

El contenido de asfalto de las emulsiones bituminosas para la pavimentación varía normalmente entre 50% y el 65% del peso total.

Los glóbulos de asfalto contenidos en una emulsión están cargados con electricidad que pueden ser positivas o negativas dando origen a las emulsiones catiónicas o aniónicas respectivamente.

Cuando dos fases de una emulsión asfáltica se disocian completamente separándose netamente de la fase acuosa se dice que ocurre un rompimiento de la emulsión.

El rompimiento de una emulsión asfáltica es provocado por una modificación en el equilibrio electroestático que mantiene a los glóbulos de asfalto en suspensión en la fase acuosa y que puede deberse a la evaporación de esta última, a cambios notables de su pH o a la reacción entre la fase acuosa y el material pétreo.

Propiedades de las emulsiones asfálticas

Las emulsiones asfálticas poseen propiedades que condicionan las características de la misma y su comportamiento. Entre las principales propiedades están las siguientes:

- Estabilidad al almacenamiento.
- Estabilidad ante los agregados pétreos.
- Grado de adhesividad.
- Viscosidad.
- Características reológicas.

2.6.1. Tipos de emulsión asfáltica

Según la estabilidad de las emulsiones asfálticas, estas se pueden clasificar en emulsión de rompimiento rápido, de rompimiento medio y de rompimiento lento.

Emulsión de rotura rápida: Es un sistema constituido por la dispersión de una fase asfáltica en una fase acuosa, presentando partículas cargadas positivamente. Normalmente se utiliza en los siguientes tipos de servicio: tratamiento superficial simple, tratamiento superficial múltiple, capa de sellado / baño diluido, pintura adhesiva y macadán bituminoso.

Estas emulsiones están diseñadas para reaccionar rápidamente con el árido revirtiendo su estado de emulsión al de asfalto, formando una película relativamente gruesa. Estas emulsiones se aplican normalmente mediante riego, presentando una excelente performance en diferentes zonas geográficas a distintas altitudes y climas.

Generalmente se aplica a temperatura ambiente, que puede variar entre 25° C y 70° C; sin embargo, siempre se debe respetar la temperatura de aplicación ideal en función de su viscosidad. Nunca deben calentarse por encima de los 70° C.

Emulsión de rotura media: Estas emulsiones están diseñadas para mezclarse con agregados gruesos y no rompen inmediatamente al entrar en contacto con el árido. Se utilizan en mezclas que permanecen trabajables por algunos minutos, las cuales deben realizarse en plantas, ya sean móviles o fijas.

Emulsión de rotura lenta: Estas emulsiones están diseñadas para máxima estabilidad de mezclado. Se utilizan con agregados de gradación densa y alto contenido de finos. Poseen largos periodos de trabajabilidad para asegurar una buena mezcla con los agregados. Los grados de rotura lenta presentan bajas viscosidades. Las emulsiones lentas dependen totalmente de la evaporación para alcanzar la coalescencia de las partículas de asfalto. Para acelerar el proceso de ruptura se puede agregar cemento o cal hidratada a los agregados.

2.7. Agregados pétreos

La denominación técnica de “agregados pétreos” en pavimentos se refiere a un conglomerado de partículas inertes de gravas, arenas y finos. En términos generales, en un ensayo de granulometría por cribado o tamizado, las partículas con diámetro entre 2 mm y 6,4 cm son reconocidas como gravas. Aquellas con diámetro entre 0,075 mm y 2

mm son reconocidas como arenas (gruesas y finas) y las que son de diámetro inferior a 0,075 mm son reconocidas como tamaño de arcilla.

Los agregados pétreos en un pavimento flexible, se encuentran en diferentes granulometrías, desde la base, hasta la carpeta asfáltica, teniendo en cuenta que en la capa donde se exigen más es donde se ubica la mezcla asfáltica. “En estos últimos materiales los agregados conforman entre el 88% y el 96% de la masa y más del 75% del volumen”.

Los agregados deben cumplir con ciertas características para que así nuestras mezclas se desempeñen de mejor manera, ya que de ellos depende una gran parte del comportamiento de las mezclas.

La idoneidad de estos agregados recae sobre sus características tales como la granulometría, durabilidad, textura, porosidad, forma, afinidad con el asfalto, etc.

2.8. Diseño de mezclas asfálticas

En el estudio de mezclas asfálticas no resulta importante tan solo entender a los agregados y al asfalto por separado, sino su funcionamiento en conjunto a través de su mezcla en porciones adecuadas que puedan tener un buen desempeño apegado a las especificaciones técnicas.

El método Marshall de diseño de mezcla HMA fue desarrollado originalmente por Bruce Marshall en la década de 1940, mientras trabajaba para el Departamento de Carreteras del Estado de Mississippi. El procedimiento fue posteriormente adoptado y refinado por el Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos (USACE). Una amplia gama de ingenieros y organizaciones han propuesto mejoras y variaciones a este procedimiento de diseño, las publicaciones del Instituto de Asfalto son consideradas por muchos como las mejores referencias para este y muchos otros métodos de diseño mixto (NCRHP, 2011).

2.9. Clasificación de carreteras

Las carreteras se clasifican de distintas maneras en diferentes lugares del mundo, ya sea mediante el objeto que se persigue con ellas, o/y de acuerdo a su transitabilidad, donde en Bolivia se distinguen tres clasificaciones: Por su administración, clasificación técnica, por su transitabilidad.

2.9.1. Clasificación por administración

Por el aspecto administrativo las carreteras se clasifican en: Red fundamental, red departamental, red vecinal.

a) Red fundamental

Está conformado por carreteras que vincula capitales de departamentos y también por las carreteras que nos vinculan por el exterior del país y estas son administradas por la Administradora Boliviana de Carreteras (A.B.C.), anteriormente el S.N.C.

b) Red departamental

También llamado red complementaria, la cual está conformado por carreteras que se dependen de la red fundamental, estos caminos son administrados por los Servicios Departamentales de Caminos (SEDECA), en los diferentes departamentos.

c) Red vecinal

Está conformada por caminos, que se dependen de la red departamental o complementaria, y son administrados por los diferentes gobiernos municipales.

2.9.2. Clasificación técnica

Esta clasificación permite distinguir en forma precisa la categoría de un camino, para esto se toma en cuenta los volúmenes de tráfico y las especificaciones geométricas aplicadas.

a) Volúmenes de tráfico

Se refiere al número de vehículos que pasa por un determinado punto, en un determinado tiempo. Los volúmenes de tráfico utilizan diversas unidades de medición; vehículos por hora (VPH), vehículos por día (VPD). Donde los vehículos por día también representan lo que es el tráfico promedio diario anual. (TPDA).

b) Especificaciones geométricas

Están relacionadas con el ancho, alineamiento y pendiente, que determinan la velocidad de diseño de una carretera. En base a estos dos parámetros la ABC y la norma AASHTO establece las siguientes categorías para las diferentes carreteras en Bolivia.

2.9.3. Clasificación por transitabilidad

Esta clasificación corresponde a las etapas de construcción de una carretera, la cual se divide en tres tipos de camino: Caminos de tierra, caminos revestidos, caminos con pavimento.

a) Caminos de tierra

Está definida cuando se ha construido la sección de la carretera hasta el nivel de la subrasante.

b) Caminos revestidos

Esta referida al colocado (Ripiado), de una o varias capas de material granular (Ripio=cascajo) sobre la subrasante.

c) Caminos pavimentados

Estos caminos son una estructura de pavimento (paquete estructural), donde es colocado sobre la subrasante.

2.10. Suelo

De acuerdo a Duque Escobar G. (2016), define el suelo en ingeniería civil como: “son los sedimentos no consolidados de partículas sólidas fruto de la alteración de las rocas, o los suelos transportados por agentes como el agua, el hielo o el viento, con la contribución de la gravedad como fuerza direccional selectiva y que puede tener, o no materia orgánica. El suelo es un cuerpo natural heterogéneo.”

2.10.1. Tipos de suelo

En general, los materiales que constituyen la corteza terrestre son clasificados por el ingeniero civil en dos categorías: suelos y roca. Según cual sea el origen de sus elementos, los suelos se dividen en dos amplios grupos: suelo residual y suelo transportado.

Si los productos de la descomposición de las rocas se encuentran aún en el mismo lugar de origen, constituye el *suelo residual*. Caso contrario, forman un *suelo transportado*, sea el que sea el agente de transporte.

Los suelos residuales son normalmente firmes y estables en climas semiáridos y templados, y no se extienden hasta gran profundidad. Por otro lado, en climas calientes y húmedos, en particular donde el tiempo de exposición es largo, los suelos pueden extenderse hasta profundidades de decenas de metros y ser firmes y estables; pero también pueden componerse de materiales altamente compresibles.

Los suelos de origen orgánico casi siempre se han formado in situ, esto por la consecuencia de la descomposición de vegetales, o por la acumulación de fragmentos de esqueletos inorgánicos o de ciertos organismos. La expresión suelo orgánico se aplica generalmente a suelos transportados, producto de la descomposición de las rocas, que contienen cierta cantidad de materia orgánica vegetal descompuesta.

2.10.2. Propiedades físicas de los suelos

a) Densidad

La densidad es una de las principales propiedades físicas de cualquier material, y se trata del peso por unidad de volumen del suelo. En los suelos se tiene dos distintos tipos de densidad, que son la densidad real y la densidad aparente.

b) Estructura

Esta se refiere a la forma en que las partículas del suelo se juntan para formar los agregados. De acuerdo a esto es que los suelos se distinguen como suelos de estructura esferoidal, laminar, prismática, blocosa y granular.

Básicamente la estructura del suelo se define por la forma en que se agrupan las partículas individuales de arena, limo y arcilla. Cuando cada una de estas partículas se agrupan, toman el aspecto de partículas mayores y se denominan agregados.

c) Granulometría

El proceso de separar un agregado de suelo en sus diferentes fracciones, cada una consistente en granos de tamaños distintos, dentro de ciertos límites, se denomina como análisis mecánico o análisis granulométrico. Estos generalmente son llamados grava, arena, limo o arcilla, dependiendo del tamaño predominante de las partículas dentro del

suelo. En la actualidad el Sistema Unificado es universalmente aceptado y ha sido adoptado por la Sociedad Americana para Pruebas y Materiales.

Para su clasificación, se tienen dos sistemas importantes, el Sistema de Clasificación Unificado y AASHTO, como se muestra a continuación:

➤ Sistema de Clasificación Unificado (SUCS):

- Grava: 75 mm a 4,75 mm.
- Arena: 4,75 mm a 0,075 mm.
- Limo y arcilla (finos): < 0,075 mm.

➤ AASHTO:

- Grava: 75 mm a 2 mm.
- Arena: 2 mm a 0,05 mm.
- Limo: 0,05 mm a 0,002 mm.
- Arcilla: < 0,002 mm.

d) Angulo de fricción interna

Este parámetro corresponde a la pendiente de la envolvente de falla en el ensayo triaxial. Este depende de un gran número de factores, incluyendo la composición mineralógica, granulometría, textura de partículas, forma de partículas y densidad relativa. Pero tiene una interpretación física sencilla que está relacionado con el ángulo de reposo o máximo ángulo posible en la pendiente de un conjunto de dicho material granular.

e) Cohesión

Este es un parámetro que aporta resistencia mecánica del suelo y mide la adherencia que existe entre las partículas internas del mismo, este depende del número de puntos de contacto que haya entre cada una de las partículas que conforman el suelo.

2.10.3. Composición del suelo

El suelo está compuesto de materia en estado sólido, líquido y gaseoso. Principalmente la parte sólida está formada por las partículas de minerales del suelo, la parte líquida es el agua, aunque también puede existir otros líquidos de menor importancia, y por último la parte gaseosa comprende el aire (espacios vacíos) pero también pueden estar presentes otros gases dependiendo del ambiente y el lugar donde se encuentre el suelo.

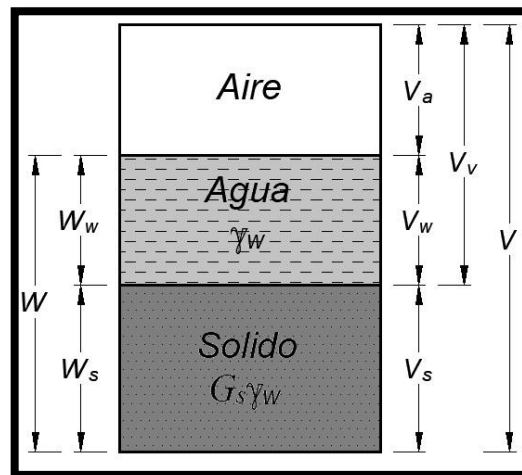
En la figura de a continuación se muestra un elemento de suelo en estado natural que tiene un volumen V y un peso W . Para su análisis se separa el suelo en sus tres fases, es decir, solido, agua y aire. Por lo tanto, el volumen total de la muestra de suelo está definido de acuerdo a la siguiente expresión:

$$V = V_s + V_v = V_s + V_w + V_a$$

Donde:

- V_s = Volumen de sólidos del suelo.
- V_v = Volumen de vacíos.
- V_w = Volumen de aguas de vacíos.
- V_a = Volumen de aire de vacíos.

Figura 6. Elemento de tres fases del elemento del suelo.



Fuente: Fundamentos de Ingeniería Geotécnica, Braja M. Das, 4ta edición.

Teniendo en cuenta que el peso del aire es insignificante, tenemos la siguiente expresión para el peso total de la muestra del suelo:

$$W = W_s + W_w$$

Donde:

- W_s = Peso de sólidos del suelo.
- W_w = Peso del agua.

2.10.4. Propiedades mecánicas de los suelos

Resistencia mecánica. -

La humedad en los suelos es muy importante ya que determina la capacidad de estos para poder resistir las cargas y de esta manera mantener su estructura en condiciones de trabajo estables. Por ejemplo, los limos tienen condiciones estables de trabajo en un rango de humedad del 10% a 25%, las arcillas en un rango de 20% a 30%, cuando se tienen excesos de humedad se debilitan y pierden resistencia que se traducen posteriormente en hundimientos, grietas, hinchamientos, etc.

Las condiciones climáticas son muy determinantes en cuanto a la humedad de los suelos, en época lluviosa los suelos se vuelven débiles ya que el agua absorbido por el mismo hace perder resistencia hasta llegar a la saturación. En épocas secas los suelos pierden humedad y por lo tanto tienen mayor resistencia, pero pierden volumen por el tema del agua, pero por lo mencionado anteriormente cuando los vehículos circulan por el suelo, la acción abrasiva de las llantas genera un movimiento en las partículas que las desprende y producen capas de polvo, por ello el deterioro superficial llega a ser severo.

Granulometría. -

El propósito del análisis granulométrico es determinar el tamaño de las partículas o granos que constituyen un suelo y así fijar la cantidad de granos de distintos tamaños que contiene el suelo traducido en un porcentaje de su peso total. El método más directo que existe actualmente para separar un suelo en fracciones de distinto tamaño, consiste en pasar la muestra de suelo en un juego de tamices (Terzagui & Peck, 1978).

Generalmente se utilizan dos métodos para encontrar la distribución de tamaño de las partículas del suelo: análisis por tamices para tamaños de partículas mayores a 0,075 mm de diámetro, y análisis de hidrómetro para tamaños de partículas menores que 0,075 mm de diámetro.

Los tamices utilizados generalmente tienen un diámetro de 203 mm, para su determinación primeramente se debe secar el suelo en el horno para así luego romper los grumos que se formen y agitarlo a través del juego de tamices. Los números de tamices estándar y los tamaños de sus aberturas se dan en la siguiente tabla:

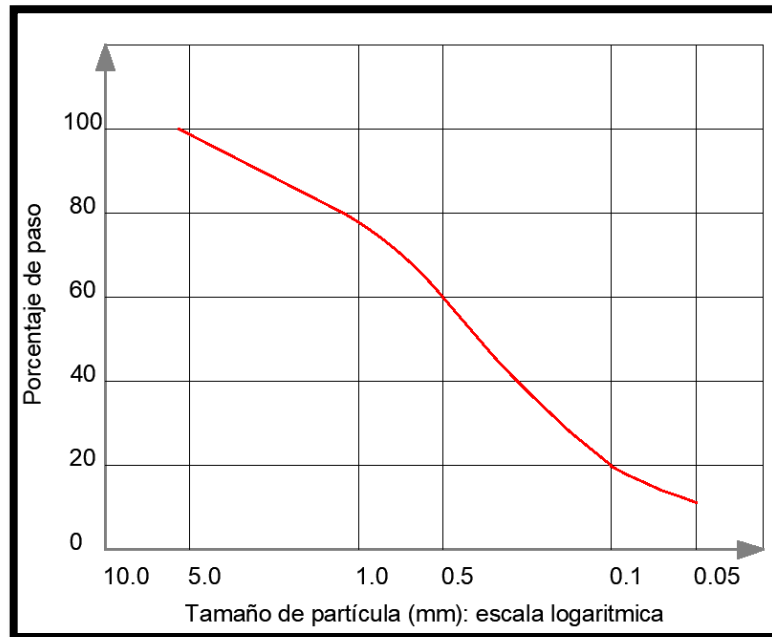
Tabla 1. Tamaños estándar de los tamices.

Tamiz N°.	Abertura (mm)
4	4,75
6	3,35
8	2,36
10	2
16	1,18
20	0,85
30	0,6
40	0,425
50	0,3
60	0,25
80	0,18
100	0,15
140	0,106
170	0,088
200	0,075
270	0,053

Fuente: Fundamentos de Ingeniería Geotécnica 4ta Edición, Braja M. Das, CENGAGE Learning.

El tamiz de tamaño más pequeño que se utiliza para este tipo de prueba es el tamiz N°. 200. Una vez que se agiten los tamices, se debe determinar la masa de suelo retenido en cada tamiz. Posteriormente se deben realizar los cálculos correspondientes para el análisis granulométrico y representar los cálculos en un papel de gráfico semilogarítmico con el por ciento más fino como la ordenada (escala aritmética) y el tamaño de la abertura del tamiz como la abscisa (escala logarítmica). Este gráfico se conoce como la curva de distribución de tamaño de partícula como se muestra en la figura de a continuación (Braja M. Das, 2013).

Figura 7. Curva de distribución de tamaño de partícula.



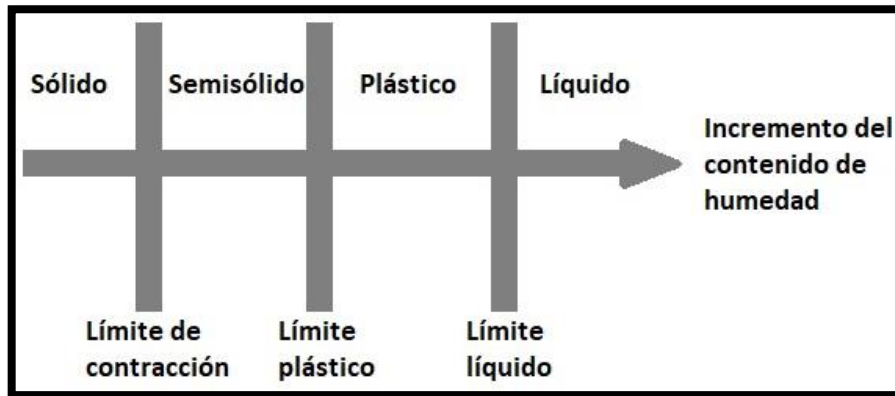
Fuente: Fundamentos de Ingeniería Geotécnica, Braja M. Das, 4ta edición.

Como se mencionó anteriormente, para los granos finos se realiza en análisis de hidrómetro el cual consiste en la sedimentación de los granos del suelo en agua. Básicamente lo que se consigue con el hidrómetro es que las partículas se depositen a diferentes velocidades en función de su forma, tamaño y peso. Para su análisis se supone que las partículas de suelo son esferas y que la velocidad de las partículas puede ser expresada por la Ley de Stokes.

Consistencia. -

La naturaleza cohesiva de los suelos se debe al agua que absorben las partículas de arcilla, esta presencia de los minerales de arcilla en los granos finos hace que el suelo se pueda remover en presencia de algo de humedad sin que se desmorone. En 1900, el científico Albert Mauritz Atterberg desarrollo un método para poder describir la consistencia de los suelos de grano fino, esto a partir de diferentes contenidos de humedad en el suelo. Dependiendo del contenido de humedad en el suelo, la naturaleza del comportamiento puede ser dividido en cuatro estados básicos: solido, semisólido, plástico y líquido. A partir de esto es que se tiene los llamados límites de Atterberg: límite de contracción, limite plástico y limite líquido. De acuerdo a esto se tiene el siguiente esquema:

Figura 8. Límites de Atterberg.



Fuente: Fundamentos de Ingeniería Geotécnica, Braja M. Das, 4ta edición.

A partir de lo anterior, es que se lleva a cabo la transición de estado sólido al estado semisólido que se lo define como límite de contracción. El límite plástico está definido como el punto de transición entre el estado semisólido y estado plástico; finalmente, para el límite líquido que está definido entre la transición de estado plástico y estado líquido (Braja M. Das, 2013).

Otro parámetro importante con respecto a la consistencia es el índice de plasticidad, este está definido como la diferencia entre el límite líquido y el límite plástico de un suelo:

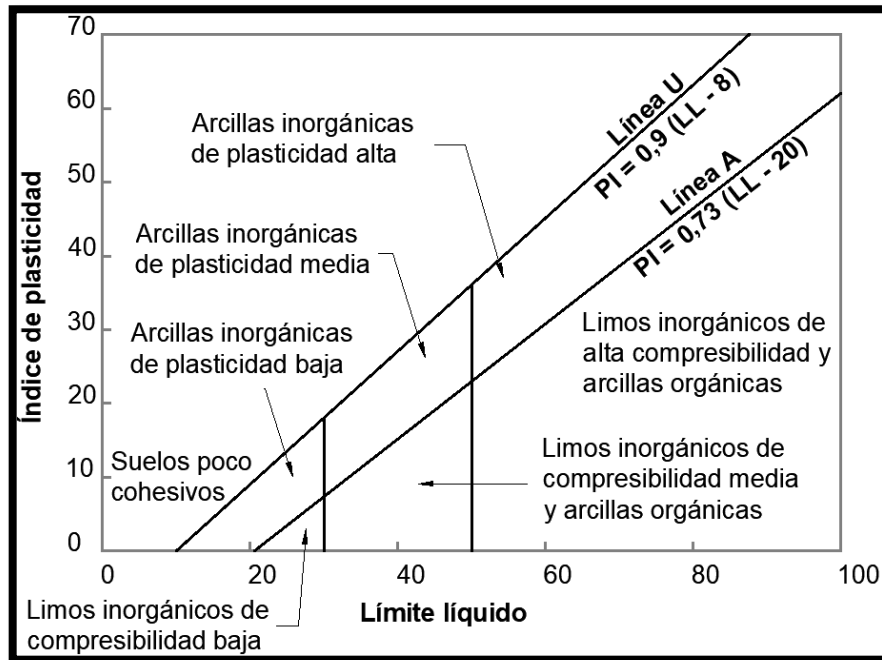
$$IP = LL - LP$$

Donde:

- IP = Índice de plasticidad.
- LL = Límite líquido.
- LP = Límite plástico.

Los límites líquido y plástico se pueden determinar por pruebas de laboratorio relativamente sencillas, estas proporcionan información sobre la naturaleza de los suelos cohesivos. En 1932, Casagrande estudio la razón del índice de plasticidad con el límite líquido de una amplia variedad de suelos naturales. A partir de estos resultados se propuso una carta de plasticidad como se muestra en la figura de a continuación:

Figura 9. Carta de plasticidad.



Fuente: Fundamentos de Ingeniería Geotécnica, Braja M. Das, 4ta edición.

De este cuadro se tiene una característica importante que es la línea A empírica, que está dada por la ecuación $PI = 0,73 * (LL - 20)$. Esta línea A separa las arcillas inorgánicas de los limos inorgánicos. Por otro lado, se considerará también la línea U que se encuentra por encima de la línea A, esta línea U es aproximadamente el límite superior de la relación del índice de plasticidad al límite líquido, la ecuación de esta línea está dada por $PI = 0,9 * (LL - 8)$.

Resistencia al corte. -

En un suelo, la resistencia cortante es la resistencia interna por unidad de área que la masa de suelo puede ofrecer a la falla y al deslizamiento en cualquier plano de su composición interior. En general, la resistencia al corte de un suelo está en función de:

- La cohesión entre las partículas del suelo.
- La resistencia a la fricción entre las partículas sólidas.
- El contenido de humedad y la presión del agua intersticial en la masa del suelo.

En 1900 Mohr presento una teoría para la ruptura en los materiales, básicamente esta teoría indica que un material falla debido a una combinación crítica entre esfuerzo normal y esfuerzo cortante. Según esto se puede expresar la relación de la siguiente forma:

$$\tau_f = f(\sigma)$$

Donde:

- τ_f = Esfuerzo cortante en el plano de falla.
- σ = Esfuerzo normal en el plano de falla.

Para la mayoría de los problemas de mecánica de suelos, es suficiente aproximarse al esfuerzo cortante sobre el plano de falla mediante una función lineal del esfuerzo normal (Coulomb, 1776 como se citó en Braja M. Das, 2013). La ecuación que describe lo anterior se denomina criterio de falla de Mohr-Coulomb:

$$\tau_f = c + \sigma * \tan\phi$$

Donde:

- c = Cohesión.
- Φ = Ángulo de fricción interna.

La ecuación anterior está considerada para un suelo saturado, pero en la mecánica de suelos solo se tendrá en cuenta el sólido por lo cual se tomará el esfuerzo efectivo σ' .

Es decir:

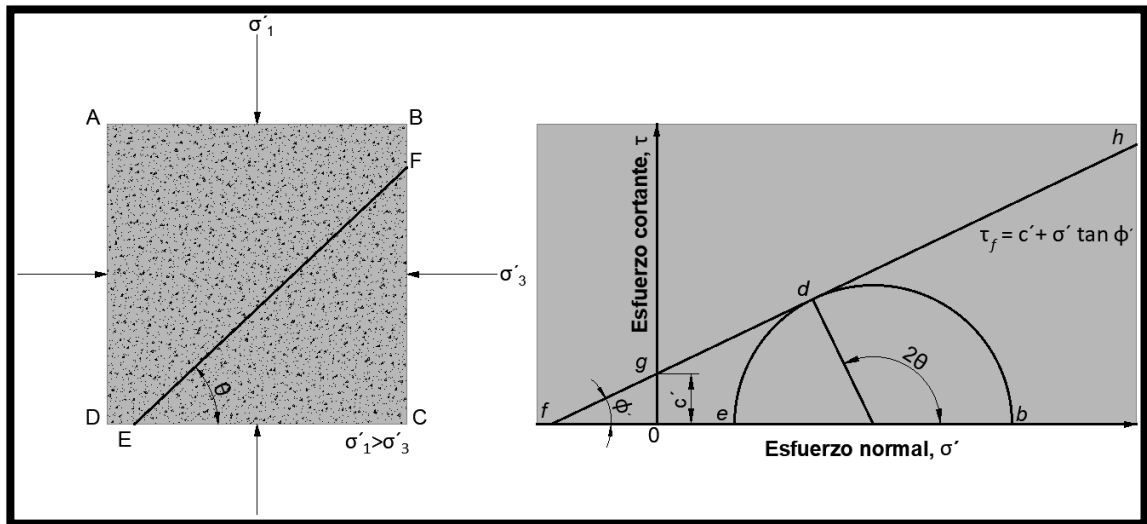
$$\tau_f = c' + (\sigma' - u) * \tan\phi' = c' + \sigma' * \tan\phi'$$

Donde:

- c' = Esfuerzo de cohesión efectivo.
- Φ' = Ángulo de fricción efectivo.

Los planos principales pueden representarse en el círculo de Mohr, en la figura de a continuación se podrá ver los esfuerzos principales mayor y menor representados en una muestra de suelo y en el círculo de Mohr, En la figura, la línea fgh es la envolvente de falla que está definida por la ecuación anterior

Figura 10. Inclinación del plano de falla en el suelo con respecto al plano principal mayor.



Fuente: Fundamentos de Ingeniería Geotécnica, Braja M. Das, 4ta edición.

Compactación. -

La compactación es un proceso mecánico con la finalidad de mejorar las características del comportamiento del suelo. En el caso de vías una de las mejoras que se da en el comportamiento del suelo es la deformabilidad, esto implica disminuir la compresión de los suelos y así incrementar su estabilidad volumétrica; otra característica que se mejora es la resistencia al esfuerzo cortante y así garantizar un balance en el comportamiento del suelo.

Por otro lado, con la compactación también se consigue disminuir la permeabilidad y así no tener problemas de infiltración en la estructura que afecten a la totalidad del proyecto (Rico Rodriguez & Del Castillo Mejia, 1992).

En general, la compactación es la consolidación del suelo por la eliminación del aire, esto requiere una energía mecánica. Para poder medir el grado de compactación, se lo realiza a partir de su peso unitario seco. El principio básicamente es que cuando se añade agua a la tierra durante la compactación, el agua actúa como un agente que permite a las partículas poder deslizarse una sobre otra y así ocupar en mayor medida los espacios vacíos que se tienen en el suelo.

A partir de esto se debe encontrar la humedad óptima para obtener el peso unitario seco máximo del suelo.

La prueba de laboratorio que se utiliza generalmente para obtener el peso unitario seco máximo de compactación y el contenido óptimo de humedad se denomina prueba Proctor de compactación. Se tienen dos pruebas denominadas: Prueba Proctor estándar y prueba Proctor modificada.

➤ Prueba Proctor estándar.

El procedimiento para la prueba Proctor estándar está dada en la norma ASTM D-698 y norma AASHTO T-99. Básicamente, para esta prueba se utiliza un molde ya definido con un volumen de 943,3 cm³, en la prueba el molde se une a una placa base en la parte inferior y a una extensión en la parte superior. El suelo se mezcla con cantidades variables de agua y luego es compactado en tres capas iguales por un martillo definido que entrega 25 golpes a cada capa. El martillo pesa 24,4 N y tiene una caída de 304,8 mm.

➤ Prueba Proctor modificada.

Esta prueba Proctor modificada fue realizada para representar mejor las condiciones de campo. Esta prueba está dada en la norma ASTM D-1557 y la norma AASHTO T-180. Para esta prueba se utiliza el mismo molde que a prueba estándar, sin embargo, el suelo es compactado en cinco capas por un martillo de peso 44,5 N y que tiene una caída de 457,2 mm, el número de golpes es el mismo que en la prueba anterior, 25 golpes (Braja M. Das, 2013).

Prueba CBR. -

Es un método de ensayo que se usa con la finalidad de evaluar la resistencia potencial de la subrasante, sub base y material de base, también se incluye materiales reciclados para pavimentos y campos de aterrizaje. En la norma esta prueba o ensayo se encuentra como ASTM D1883 y AASHTO T193, donde las siglas CBR provienen de Californian Bearing Ratio (Ministerio de Transportes y Comunicaciones Perú, 2016).

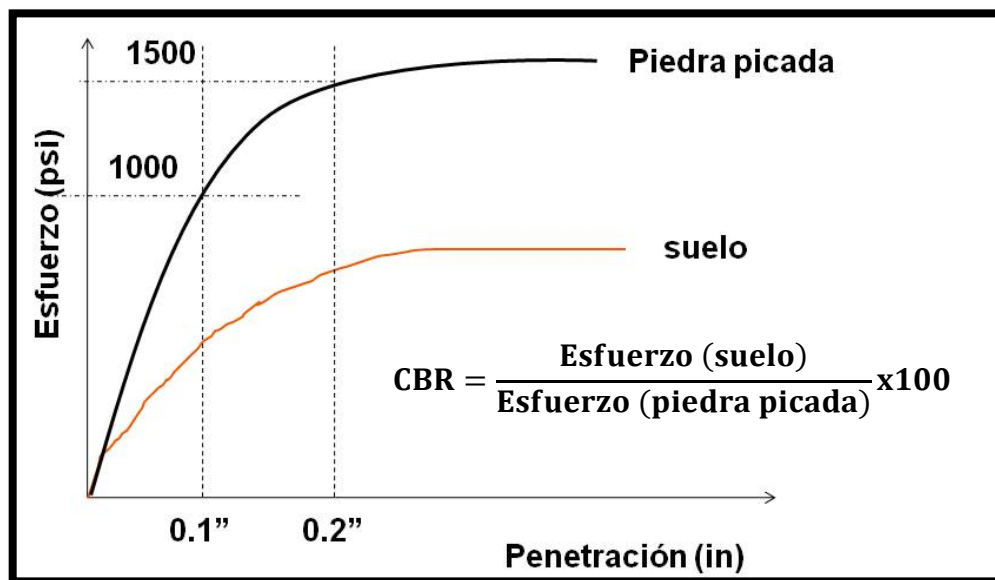
Para el ensayo CBR se tiene dos formas diferentes de obtenerlo, CBR en laboratorio y CBR in situ, primeramente, se tiene el ensayo CBR en laboratorio que determina la capacidad soportante del suelo de acuerdo con las normas ASTM D 1883/AASHTO T-

193 en el cual se mide la resistencia al esfuerzo cortante de un suelo (subrasante), sub base y/o base granular de un pavimento, donde estas están bajo condiciones controladas de humedad y densidad.

El CBR in situ o llamado también ensayo de anillo de carga es realizado solamente en la subrasante y nos sirve para correlacionarlo con el CBR en laboratorio, esto de acuerdo a la norma TB ENG 37 del Cuerpo de Ingenieros de Estados Unidos (Ulloa Calderón, 2011). Este ensayo in situ es utilizado para evaluar y diseñar la estructura de un pavimento flexible, además de otras aplicaciones como caminos no pavimentados (Ministerio de Transportes y Comunicaciones Perú, 2016).

En resumen, el procedimiento para ensayo de CBR es el siguiente: Se penetra un pistón en el suelo, que está contenido en un molde estándar, la tasa o velocidad de penetración es especificada en la norma. Este ensayo prosigue hasta una penetración de 5 mm y se traza la curva de esfuerzos (cargas) en función de las deformaciones (hundimientos). Finalmente, esta curva debe ser comparada con la obtenida para un material estándar triturado, a continuación, se muestra un esquema de la curva mencionada anteriormente:

Figura 11. Curva CBR comparada con material triturado para la obtención de su valor.



Fuente: Blog RAMCODES, 2013.

2.11. Cemento

El cemento es un conglomerante hidráulico artificial, de naturaleza inorgánica y mineral, esta obtenido a partir de materias primas naturales y de subproductos industriales, que se utilizan en la construcción, edificación y obras públicas, así también en industrias afines de materiales de construcción (NB011, 2012).

Este producto es amasado con el agua, en el cual fraguan y endurecen tanto expuestos al aire como sumergido en el agua, ya que los compuestos resultantes de su hidratación son estables en tales condiciones (Jiménez Montoya, 2018).

2.11.1. Componentes del cemento

Clínker Portland. -

Este producto está formado en su mayor parte por silicatos de calcio, se obtiene a través de la cocción hasta la fusión parcial (clinkerización) de una mezcla bien proporcionada y homogeneizada compuesta de cal y sílice con pequeñas proporciones de alúmina y óxido férrico.

Materiales puzolánicos. -

Los materiales puzolánicos pueden ser materias naturales o productos artificiales que pueden combinarse con cal grasa, hidráulica o de hidrólisis de los cementos (Portlandita), a temperatura ambiente y en presencia de agua, para así formar compuestos hidráulicos similares a los originados en la hidratación de los constituyentes del Clínker Portland.

➤ Puzolanas naturales

Son rocas tobáceas, volcánicas vítreas, de naturaleza traquítica alcalina o pumítica. También pueden ser las harinas fósiles de naturaleza silícica, como por ejemplo la diatomita.

➤ Puzolanas artificiales

Las puzolanas artificiales se obtienen por medio de tratamientos térmicos de arcillas, pizarras y otros materiales similares. En este grupo también se encuentran subproductos de algunas industrias tales como polvo de ladrillo, cenizas volantes, etc.

Fíller calizo. -

Estos son materiales de naturaleza inorgánica y de origen mineral carbonatado están compuestos principalmente por carbonato cálcico en forma de calcita, y están molidos conjuntamente con Clínker de cemento Portland que afectan favorablemente a las propiedades del cemento.

Reguladores de fraguado. -

Son materiales naturales o productos artificiales que al ser juntado con los Clínker Portland y a otros componentes eventuales de los cementos, proporcionan cementos con un fraguado adecuado. El regulador de fraguado más usado es el sulfato cálcico en alguna de sus variedades, o en mezcla de ellas (NB011, 2012).

Aditivos de los cementos. -

Estos son productos que se pueden utilizar en la fabricación del cemento, y son para facilitar la molienda del mismo o para aportar algún comportamiento específico en el cemento. No se deben confundir estos con los aditivos del hormigón (Jiménez Montoya, 2018).

2.11.2. Tipos de cemento en Bolivia

En Bolivia, de acuerdo a la norma NB011 solo se fabrican tres tipos de cementos, los cuales son los siguientes:

Cemento Portland, tipo I. -

Este tipo de conglomerante hidráulico está constituido a base de: Clínker Portland en una proporción no menor del 95% y de cualquier componente adicional descrito anteriormente, siempre y cuando no sea mayor del 5% en masa. Este núcleo principal de este tipo de cemento no incluye regulador de fraguado ni un eventual aditivo.

Cemento Portland con puzolana, tipo IP. -

Este cemento está constituido a base de: Clínker Portland en proporción no menor del 70% ni mayor del 94% en masa, y la puzolana natural en proporción no menor del 6% ni mayor a 30% en masa y los componentes adicionales en una proporción comprendida

entre el 0% y 5% en masa. Este núcleo principal de este tipo de cemento no incluye regulador de fraguado ni un eventual aditivo.

Cemento Portland con filler calizo, tipo IF. -

Este conglomerante hidráulico está constituido a base de: Clínker Portland en proporción no menor del 80% ni mayor al 94% en masa, y filler calizo en proporción no menor del 6% ni mayor a 15% en masa y los componentes adicionales debe estar en una proporción comprendida entre el 0% y el 5% en masa. Este núcleo principal de este tipo de cemento no incluye regulador de fraguado ni un eventual aditivo.

Cemento puzolánico, tipo P. -

Este cemento está constituido a base de: Clínker Portland en proporción no menor del 60% en masa y de puzolanas naturales, cenizas volantes u otros materiales puzolánicos en proporción total no mayor del 40% en masa, además si contiene otro constituyente adicional, deberá estar en una proporción no mayor del 5%. Este núcleo principal de este tipo de cemento no incluye regulador de fraguado ni un eventual aditivo (NB011, 2012).

2.11.3. Composición química del cemento

Las propiedades y características del cemento Portland están íntimamente ligadas a su composición y a su constitución potencial. Su composición se determina por un análisis y esta expresada de forma de óxidos. Una composición química típica del Clínker del cemento Portland es el que se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 2. Componentes principales del cemento portland.

Componente	Sigla	Porcentaje
Cal combinada	CaO	62,5
Sílice	SiO ₂	21
Alúmina	Al ₂ O ₃	6,5
Hierro	Fe ₂ O ₃	2,5
Azufre	SO ₃	2
Cal libre	CaO	0
Magnesia	MgO	2
Pérdida al fuego	P.F.	2
Residuo insoluble	R.I.	1,5
Álcalis	Na ₂ O + K ₂ O	0,5

Fuente: Hormigón Armado, Jiménez Montoya 16ª Edición.

Los cuatro primeros componentes de la tabla anterior son los componentes principales del cemento, la cal tiene un carácter básico y los otros tres componentes son de carácter ácido. Los restantes componentes son componentes indeseables en el cemento, pero son parte del mismo y no se los puede excluir.

Los anteriores componentes principales que se mostraron en la tabla no se encuentran libremente en el cemento, si no que están combinados.

Los compuestos que se forman y que son los principales constituyentes del cemento Portland son:

- Silicato tricálcico (SiCa₃).
- Silicato bicálcico (SiCa₂).
- Aluminato tricálcico (AlCa₃).
- Ferritoaluminato tetracálcico (AlFeCa₄).

Cuando se produce la hidratación de los silicatos se produce la cal libre que tienen un elevado pH ($\text{pH} \geq 12$), este elevado pH asegura la protección química de las armaduras en el hormigón armado. Sin embargo, el hidróxido cálcico constituye un punto débil para el

material en ambiente agresivos. El Clínker de cemento Portland en general contiene los siguientes porcentajes de los elementos:

Tabla 3. Compuestos principales del cemento Portland.

Componente	Sigla	Porcentaje (%)
Silicato tricálcico	SiCa ₃	40 a 50
Silicato bicálcico	SiCa ₂	20 a 30
Aluminato tricálcico	AlCa ₃	10 a 15
Aluminoferrito tetracálcico	AlFeCa ₄	5 a 10

Fuente: Hormigón Armado, Jiménez Montoya 16^a Edición.

Las propiedades de cada uno de estos componentes se detallan a continuación:

a) Silicato tricálcico, SiCa₃

Este es el compuesto principal del clínker ya que desarrolla una resistencia inicial elevada, siendo su calor de hidratación igualmente elevado. La velocidad de su fraguado es lenta y su endurecimiento bastante rápido. A consecuencia de todo lo anterior es que este compuesto aparece en una gran proporción en los cementos de endurecimiento rápido y en los de altas resistencias iniciales.

b) Silicato bicálcico, SiCa₂

Este componente es el que otorga su resistencia a largo plazo al cemento, esto se da porque su velocidad de fraguado es lenta y su endurecimiento aún más lento. De los cuatro componentes principales es el que más bajo calor de hidratación tiene.

c) Aluminato tricálcico, AlCa₃

Este componente brinda al cemento un con calor de hidratación muy grande, una gran velocidad del fraguado y una gran retracción. Por lo anterior es que este compuesto gobierna la resistencia a corto plazo, y por ello es buena frente a ciertas aguas agresivas y muy débil frente a los sulfatos.

Con el objetivo de frenar la rápida reacción de este componente con el agua y además regular el tiempo de fraguado, es que se añade al clínker un sulfato (piedra de yeso).

d) Aluminoferrito tetracálcico, $AlFeCa_4$

Este componente prácticamente no participa en las resistencias mecánicas y su presencia en el cemento se debe a utilizar fundente que contienen hierro en la fabricación del clínker (Jiménez Montoya, 2018).

2.11.4. Principales características de los cementos

Las principales características físicas y mecánicas del cemento son: fraguado, finura de molido.

Fraguado. -

La velocidad de fraguado en el cemento viene limitada por las normas, en las que establecen un periodo de tiempo a partir del amasado, en este periodo de tiempo se produce el principio y el fin de fraguado. Para ello la norma define un modo convencional mediante la aguja de Vicat.

Para esta prueba se realizan penetraciones de la aguja sobre una probeta de pasta normal de cemento, en función del tiempo, nos da una idea del proceso de fraguado. Para resultados de ensayo se puede dibujar un diagrama como se muestra a continuación:

Figura 12. Curva de fraguado de un cemento Portland medio.



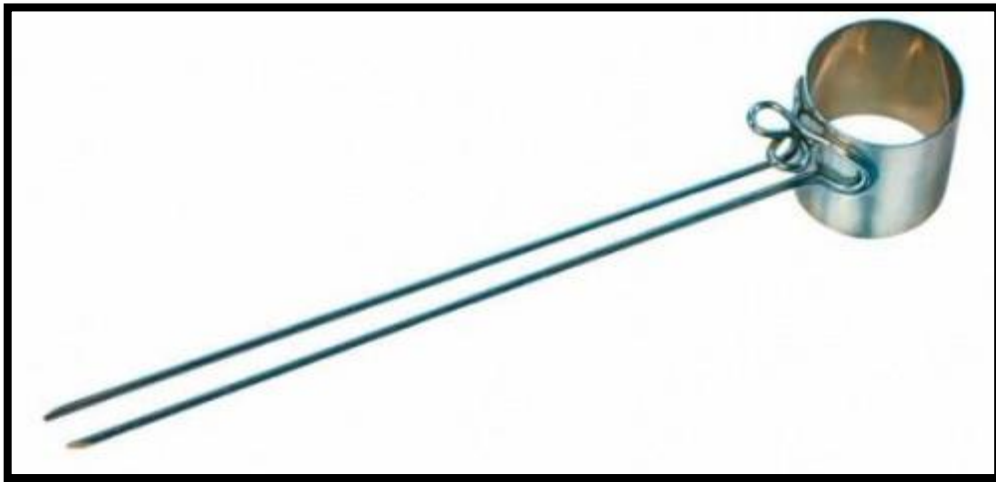
Fuente: Hormigón Armado, Jiménez Montoya 16ª Edición.

Expansión. -

Esta propiedad se la determina con ensayos de estabilidad de volumen con el objetivo de determinar el riesgo de expansión, a corto plazo, que puede tener un cemento fraguado debido a la hidratación del óxido de calcio o del óxido magnésico libres.

El método de ensayo comúnmente usado para determinar esta propiedad es el de las agujas de Le Chatelier. Este ensayo consiste en un pequeño molde cilíndrico abierto por una generatriz y terminado en dos agujas para amplificar la expansión. Una vez que se pone el cemento en el molde se lo mantiene 24 horas en una cámara húmeda. El aumento de la distancia de las dos puntas de la aguja después de sumergido el molde en agua en ebullición, durante tres horas, determina la medida de la expansión.

Figura 13. Aguja de Le Chatelier.



Fuente: COTECNO, Molde Le Chatelier EN 196 obtenido.

Finura de molido. -

Esta característica del cemento está íntimamente ligada con el valor hidráulico del cemento, además, esta propiedad influye directamente con la velocidad de las reacciones químicas que tienen lugar durante su fraguado y primer endurecimiento.

En caso de que se tenga una finura excesiva del cemento, su retracción y calor de fraguado son muy elevados, esto resulta perjudicial para el hormigón. Aun teniendo en cuenta que una gran finura del cemento aumenta su resistencia mecánica, se debe tener en cuenta que el exceso no es favorable, por ello el cemento Portland debe estar finamente molido, pero no en exceso.

Lo que se debería lograr es que el cemento alcance su resistencia a las distintas edades, por la calidad del clinker y no así por la finura del cemento (Jiménez Montoya, 2018).

Resistencias mecánicas. -

Cuando se refiere a la resistencia de un cemento, se entiende por a un mortero normalizado, amasado con arena de características y granulometría determinadas. La norma boliviana NB 470 establece obtener la tensión de rotura de probetas cubicas de mortero plástico de cemento hecho con arena silíceo, la cual tiene fundamento en la norma norteamericana ASTM C109. Se ensayan 3 probetas para 7 días y 3 probetas para 28 días. La relación cemento: arena es fija con un valor de 1:2.75 en peso. La relación agua/cemento depende de la fluidez, una vez realizada las probetas cubicas, estas permanecen en cámara húmeda durante 24 horas después del vaciado y se desmoldan para ser curadas en agua saturada con cal hasta la fecha de rotura.

Figura 14. Dispositivo para ensayos a compresión de cementos y morteros.



Fuente: ADATEC, Dispositivos para ensayos a compresión de cementos y morteros.

2.12. Conformación Suelo – Cemento

Desde hace muchos años, en diferentes carreteras del mundo, la utilización del cemento Portland en la construcción de bases y sub bases ha sido muy extensa. A través de la historia, estas carreteras han demostrado las múltiples ventajas de los materiales estabilizados con cemento, una de ellas el incremento en las propiedades del material y la reducción de la susceptibilidad a la humedad.

En los últimos años el uso del suelo – cemento ha tenido un gran crecimiento debido a las múltiples aplicaciones que se le ha dado, además con la experiencia obtenida y los programas de investigación ha dado paso a evolucionar los equipos y procedimientos de construcción del mismo. También, una de las ventajas de esta técnica es el punto de vista ambiental, ya que nos permite la utilización de materiales existentes en las vías a construir o rehabilitar, de esta manera se evita la explotación adicional de fuentes de materiales (ISCYC, 2006).

De acuerdo a la norma ACI 230.1R, nos define el suelo – cemento como “una mezcla de suelo y cantidades medidas de cemento Portland y agua, compactada a una alta densidad”, también se puede definir como un material que se produce al mezclar, compactar y curar una mezcla de suelo/agregado, cemento Portland, otros materiales cementicos y agua para así formar un material endurecido con propiedades específicas resistentes (ACI, 2009). Esta mezcla compactada contiene el suficiente cemento para conformar una estructura resistente y durable, además debe tener la humedad necesaria para una correcta compactación y para la hidratación del cemento. Además, esta mezcla tendrá el contenido mínimo de cemento que garantice la resistencia requerida de las especificaciones técnicas y también deberá cumplir con los ensayos de durabilidad, como por ejemplo humedecimiento y secado, y congelamiento y deshielo (ICPA, 2011).

2.12.1. Propiedades físicas suelo – cemento

Densidad. -

Generalmente, la densidad de la mezcla suelo – cemento se mide en términos de densidad seca, pero la densidad humedad puede usarse para controlar la densidad del campo. Para la prueba de humedad – densidad que determina el contenido de humedad y la densidad adecuada puede utilizarse las normas ASTM D558 o ASTM D1557 para así determinar el grado de compactación de la mezcla suelo – cemento. En suelos granulares, la norma ASTM D1557 se usa con frecuencia para establecer la relación humedad – densidad.

Se debe también tener en cuenta que la acción del cemento tiende a producir un aumento en el contenido óptimo de humedad y una disminución en su densidad máxima. Sin embargo, la adición del cemento Portland en la mezcla de suelo generalmente causara un aumento en las densidades secas del mismo. En general, para un contenido de cemento

dado, mientras mayor sea su densidad, mayor será su resistencia a la compresión de las mezclas de cemento de suelo sin cohesión (Shen and Mitchell, 1966 como se citó en ACI, 2009).

Cuando se tienen retrasos muy largos entre la mezcla del suelo - cemento y la compactación, esto influye tanto en la densidad como en la resistencia. De acuerdo a los estudios de West (1959) demostraron que un retraso de 2 horas entre el mezclado y la compactación final da como resultado una disminución significativa tanto en la densidad como en la resistencia a compresión. Catton y Felt (1943) llegaron a las mismas conclusiones y con lo cual mostraron que para minimizarse el tiempo de demora se podría mezclar intermitentemente el suelo y cemento varias veces por hora, esto siempre y cuando el contenido de humedad durante la compactación sea el óptimo o ligeramente superior (ACI, 2009).

Resistencia a la compresión. -

La resistencia a compresión simple de las mezclas suelo – cemento es un indicador del grado de reacción del suelo – cemento – agua y la relación de endurecimiento respecto al tiempo. Esto depende de muchos factores entre los cuales son:

- Tipo y contenido de cemento.
- La energía de compactación aplicada a la mezcla.
- El tipo y cantidad del suelo, específicamente la cantidad de materia orgánica, sales y materiales deletéreos que se encuentran en el suelo.
- Cantidad y calidad de agua.
- El tiempo transcurrido después de realizado el mezclado y compactación.
- La duración y la forma de realizar el curado.
- Medidas consideradas para disminuir el agrietamiento.
- Tamaño y forma del espécimen de ensayo.

También es importante mencionar que la resistencia a compresión simple aumenta con el tiempo, los primeros 90 días tiene un aumento considerable, unas tres veces más que a los 7 días, todo esto dependiendo del tipo de suelo y también del tipo contenido del cemento.

Después de los 28 días se ha demostrado que la resistencia tiene un crecimiento mucho más lento (ISCYC, 2006).

Por lo general, la resistencia a la compresión confinada f_c' se mide de acuerdo con la norma ASTM D1633. Esta resistencia a la compresión se puede utilizar como criterio para determinar los requisitos mínimos de cemento para dosificar la mezcla suelo - cemento. Esta propiedad se ve afectada de igual forma que la densidad por el grado de compactación y el contenido de agua. Los rangos típicos de resistencia a la compresión no confinada de 7 y 28 días para diferentes tipos de cemento y suelo se dan en la siguiente tabla (ACI, 2009).

Tabla 4. Rangos de resistencias a la compresión no confinada del suelo – cemento.

Tipo de suelo	Resistencia a la compresión confinada (psi)	
	7 días	28 días
Suelos arenosos y gravosos: AASHTO grupos: A-1, A-2, A-3 Sistema unificado: GW, GC, GP, GM, SW, SC, SP, SM	300 a 600	400 a 1.000
Suelos limosos: AASHTO grupos: A-4 y A-5 Sistema unificado: ML y CL	250 a 500	300 a 900
Suelos arcillosos: AASHTO grupos: A-6 y A-7 Sistema unificado: MH y CH	200 a 400	250 a 600

Fuente: ACI 230.1R-09.

En la norma ASTM D1633, nos indican que se requiere remojar los especímenes antes de la prueba, ya que la mayoría de las estructuras de suelo - cemento pueden saturarse de forma permanente o intermitente durante su vida útil y por lo tanto tener menor resistencia en condiciones de saturación.

Resistencia a la flexión y a la tracción. -

A través de diferentes ensayos, ya sea directa o indirectamente, se ha podido conocer el comportamiento del suelo - cemento en lo que se refiere a su resistencia a la flexión. Algunos de estos ensayos por ejemplo son el ensayo de vigas según ASTM D1635 y ensayos de tensión indirecta. Por lo general se tienen dos grupos, uno de ellos a los que se refiere a los suelos finos y los otros obtenidos a través de mezclas con suelos granulares. Esta resistencia a flexión varía directamente con la resistencia a la compresión simple y con el peso volumétrico seco máximo de la mezcla (ISCYC, 2006).

La resistencia a la flexión es aproximadamente 1/5 a 1/3 de la resistencia a la compresión no confinada. La relación entre la resistencia a flexión y la resistencia a compresión son mayores en las mezclas de baja resistencia (1/3 de f'_c) que en las mezclas de alta resistencia (1/5 de f'_c). Una buena aproximación para este valor de resistencia a flexión es la siguiente:

$$R = 0,51 * (f'_c)^{0,88}$$

Donde:

- R = resistencia a flexión (psi).
- f'_c = resistencia a la compresión confinada.

Los valores de resistencia a la flexión y a la tracción que se obtienen de los resultados de ensayos a flexión, tensión directa y tensión dividida, pueden variar debido a los efectos de las concentraciones de tensión y las diferencias que existen entre los módulos de tensión y compresión (ACI, 2009).

Resistencia al desgaste. -

Cuando la mezcla suelo - cemento va ser utilizado en estructuras de pavimento no se evalúa esta propiedad de resistencia al desgaste, ya que según la experiencia e investigaciones demostradas el suelo - cemento es excelente para soportar esfuerzos perpendiculares a la superficie, pero muy deficiente para soportar fuerzas abrasivas del tránsito circulando directamente sobre él. Por lo mencionado anteriormente es que se recurre a proteger las capas de suelo - cemento colocando sobre ella una capa de rodadura de concreto hidráulico, concreto asfáltico, o tratamientos superficiales asfálticos.

De acuerdo a las investigaciones y pruebas realizadas, se ha podido observar que se tiene una mejora en la resistencia al desgaste cuando se incrementa el contenido de cemento y se utilizan suelos granulares no plásticos. Es importante tomar en cuenta que la mezcla suelo - cemento tiene una mayor resistencia al desgaste provocado por la acción erosiva de las lluvias, que por la acción erosiva que provoca el tráfico vehicular (ISCYC, 2006).

Permeabilidad. -

La permeabilidad en la mayoría de las mezclas suelo – cemento es reducida cuando se le adiciona cemento Portland. En general la permeabilidad dependerá principalmente del tipo de suelo, contenido de cemento y de una compactación adecuada. Cuando se tiene una mezcla suelo – cemento elaborada con suelos finos, se tiene una menor permeabilidad con el tiempo, los valores típicos del coeficiente de permeabilidad para mezclas suelo – cemento con suelos areno limosos, varían de 0,4 a $3 \cdot 10^{(-6)}$ cm/s, en estos casos el porcentaje de cementos corresponde a valores inferiores al 5% en peso (ISCYC, 2006).

De acuerdo a las pruebas de permeabilidad realizadas en laboratorio para diferentes tipos de suelo, la norma ACI 230.1R-09 nos presenta la siguiente tabla:

Tabla 5. Permeabilidad del cemento.

Clasificación del suelo ASTM	Densidad seca, lb/ft ³	Contenido de humedad, %	Contenido de cemento % en peso	K, ft por año, 10 ⁻⁶ cm/s	Análisis de gradación, % que pasa						
					Nº 4 (4,75 mm)	Nº 10 (2,0 mm)	Nº 40 (0,425 mm)	Nº 200 (0,075 mm)	0,005 mm	0,0005 mm	Cemento requerido, % en peso
Arena estándar de Ottawa	108,2	10,8	0	48.880	100% que pasa el Nº 200 (0,85 mm): 0% que pasa el Nº 30 (0,60 mm)						-
	112,8	9,4	5,3	6900							
	117,6	9,7	10,5	76							
Arena graduada de Ottawa	103,2	13,7	0	16.300	100	100	28	2	-	-	-
	104,7	13,6	5,4	470							
	107,4	12,3	10,5	21							
Arena fina (SP)	101	12,2	0	750	100	100	91	7	1	-	11,5
	100,9	13,2	3,2	560							
	105,3	12	9,5	21							
Arena limosa (SM)	100,8	14,9	0	5000	100	100	96	13	12	2	8
	99,9	14,7	3,2	1400							
	104	15,1	6,4	60							
Arena fina (SP)	100,1	16	0	360	99	99	96	6	6	1	-
Arena fina (SP)	101	13,8	0	140	100	100	94	2	-	-	11
	106,7	13,3	3,1	33							
	108,2	13,4	6,3	0,3							
	108,8	13,4	9,6	0,02							
Arena fina (SP)	112,5	11	0	36	-	97	-	-	11	4	-
	115,8	10,4	5,5	5							
Arena fina (SP)	111,7	12	0	23	100	99	-	-	9	3	-
	115,2	11,7	5,5	8							
Arena limosa (SM)	121,9	9,3	0	16	98	94	66	20	18	5	-
	125,5	8	8,6	0,1							
Arena limosa (SM)	117,9	10,8	0	10	99	97	69	16	12	4	-
	123	8,1	8,9	2							
Arena limosa (SM)	112,5	11,5	0	5	-	98	-	-	12	5	-
	115	12,3	5,5	3							
Arena limosa (SM)	118,7	11	0	5	100	99	88	36	25	7	-
	119,2	10,5	9,1	0,1							
Arena limosa (SM)	125	-	0	16	100	75	41	13	12	5	5
	-	10,1	3,3	0,4							
	-	-	7,3	0,07							

Fuente: Elaboración propia.

Módulo de elasticidad. -

En los pavimentos, cuando se realiza el diseño estructural del mismo, es muy importante que las capas que conforman la estructura, tengan la capacidad de distribuir las cargas impuestas por el tráfico vehicular, de esta manera se tiene una menor deformación en la capa estructural, para lograr lo mencionado anteriormente se deben tener altos módulos de elasticidad en la capa estructural.

El tratamiento que se realiza con la mezcla suelo – cemento eleva considerablemente los módulos de elasticidad, ya que genera una rigidez que puede ser bien aprovechada para la distribución de carga y buen desempeño durante toda la vida de diseño del pavimento.

En general, los valores de módulos son bajos comparados con los valores del concreto y muy altos si son comparados con el suelo natural compactado. Algunos valores típicos de módulo de elasticidad a los 28 días para mezclas suelo – cemento elaboradas con suelos granulares varían de 40.000 kg/cm² a 71.000 kg/cm².

La PCA (Portland Cement Association) y AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials) recomiendan valores entre 35000 kg/cm² y 148000 kg/cm² a 28 días para la mayoría de las mezclas suelo – cemento.

Contracción y fisuración. -

Este fenómeno de contracción se produce durante el secado de la mezcla suelo - cemento, producto de la pérdida de agua y de las reacciones ocurridas durante la hidratación del cemento. Los factores que influyen en esta propiedad son muchas y complejas, entre algunos de ellos están:

- Cantidad y tipo de cemento utilizado.
- Contenido de agua aplicado en campo.
- Propiedades de los agregados.
- Procedimiento del curado realizado.
- Condiciones del clima.
- Tiempo de colocación.
- Grado de compactación.

Las causas y soluciones al agrietamiento por contracción en las mezclas de suelo - cemento se han estudiado por más de 50 años, actualmente países como Francia, España y EEUU han desarrollado algunas técnicas constructivas innovadoras, como la prefisuración y creación de juntas en fresco y procedimientos de compactación posterior y microagrietamiento.

Sin embargo, en países como El Salvador, donde se ha estudiado bastante este tipo de pavimentos, han logrado minimizar el fisuramiento a través de mejoras a los requerimientos de diseño de mezclas, y en especial con el tipo de cemento a utilizar y la energía de compactación aplicada (ISCYC, 2006).

Por otro lado, George (2002) encontró que el agrietamiento está relacionado en gran medida con las siguientes consideraciones:

- Cambio de volumen resultado del secado, cambio de temperatura o ambos.
- Resistencia a la tracción del material.
- Rigidez y fluencia de materiales estabilizados.
- Restricción de la subrasante.

De acuerdo a la norma ACI 230.1R-09, algunas de las técnicas específicas para controlar el agrietamiento son:

- Compactación con un contenido de humedad levemente inferior al óptimo ya que una mayor humedad da como resultado una mayor contracción.
- Limitar el contenido de finos en el suelo o agregado.
- Uso de capas intermedias para frenar la propagación de las grietas desde la capa base.
- Curado prolongado (mediante aplicación de agua o la colocación de un compuesto bituminoso de curado) durante 14 a 28 días iniciales.
- Uso de una losa de base más gruesa con contenido reducido de cemento.
- Adición de cenizas volantes para reducir la contracción general.
- Uso de cemento expansivo.

Más allá de estas técnicas que son útiles, lo primero siempre está en la calidad durante el proceso de construcción, es decir, controlar la humedad, densidad, mezcla suelo - cemento, contenido del cemento y el curado respectivo (ACI, 2009).

Módulo de reacción K. -

En la mezcla suelo – cemento el soporte de la subrasante es de los elementos más importantes en el procedimiento de diseño, este valor de soporte es medido en términos del módulo de Westergaard de reacción de la subrasante K, que básicamente representa la presión de una placa circular rígida dividida por la deformación que dicha presión genera, la unidad del parámetro está en kg/cm³. Este valor se determina mediante el ensayo de placa definida en la norma AASHTO T 222-78, pero en caso de no tener disponible el equipo se pueden utilizar los valores de la siguiente tabla:

Tabla 6. Rangos de resistencias a la compresión no confinada del suelo – cemento.

Clasificación AASHTO	Descripción	Clasificación unificada	Densidad seca (lb/ft ³)	CBR (%)	Valor de K (psi/in)
Suelos de grano grueso					
A-1-a, Bien Graduada	Grava	GW	125 - 140	60 - 80	300 - 450
A-1-a, Pobremente 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
Suelo Material Granular Alto Contenido de Finas					
A-2-4, Gravosa	Gravas con Limos	GM	130 - 145	40 - 80	300 - 500
A-2-5, Gravosa	Arenas Gruesas con Limos				
A-2-4, Arenoso	Arena con Limos	SM	120 - 135	20 - 40	300 - 400
A-2-5, Arenoso	Arena Gruesa 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 Mezclas 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: Manual de diseño de conservación vial, ABC, 2011.

Módulo de Poisson. -

De acuerdo al IMCYC (Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto) los valores medios del módulo de Poisson en una mezcla suelo cemento son los que se muestran en las tablas siguientes:

Tabla 7. Módulos de Poisson medios del suelo - cemento.

Investigadores	Valores medios del módulo
Felt y Abrams	0,08 – 0,24
Inglés, O. G.	0,10 – 0,30
Portland Cement Association, E.U.A	0,12 – 0,14
Larsen T. J. Nussbaum M. y Colley B. E.	0,10 – 0,20
Granular con finos	0,12
Granular	0,14
Reinhold, F	0,13

Fuente: IMCYC; Suelo - cemento sus usos, propiedades y aplicaciones.

Tabla 8. Módulos de Poisson de suelo - cemento.

Investigadores	Estático	Dinámico	Tipos de suelo
Felt y Abrams		0,22 – 0,27	Arenoso
		0,41 – 0,42	Areno - arcilloso
Reinhold	0,095 – 0,125		Areno - arcilloso
Portland Cement Association E.U.A.	0,120 – 0,142		Arenoso

Fuente: IMCYC; Suelo - cemento sus usos, propiedades y aplicaciones, 2013.

2.13. Experiencias en Bolivia

En Latinoamérica, uno de los institutos que más impulso esta técnica de pavimentación es el Instituto Salvadoreño del Cemento y el Concreto (ISCYC), que comenzó su investigación en el año 2000, esto para tener una alternativa diferentes capas de rodadura que se realizan convencionalmente en la red de caminos rurales de bajo tráfico, es acá donde nace el pavimento unicapa de alto desempeño (PUAD).

Los técnicos de este instituto estuvieron en Bolivia en cuatro diferentes oportunidades, dictando cursos de Suelo – Cemento y pavimentos unicapa, además de conferencias en dos importantes eventos. A consecuencia de lo anterior, en Bolivia se ha desarrollado ya un tramo experimental de pavimento unicapa, así para evaluar y adecuar la técnica constructiva con los materiales y condiciones climáticas del país.

El Instituto Boliviano del Cemento y el Hormigón impulsa la realización de nuevos tramos de prueba con diferentes materiales del país, así para generar la experiencia local suficiente para implementar esta nueva tecnología. Es importante tomar en cuenta que los pavimentos unicapa se diseñan para ofrecer capacidad estructural y seguridad en caminos con velocidades máximas de 65 km/hr y TPDA menor a 500 vehículos.

En nuestro país existen diferentes experiencias sobre el uso suelo – cemento. Uno de ellos el tramo de la carretera Santa Cruz – Puerto Suarez, que esta especificada con una capa sub base de suelo – cemento mezclada en planta, el tramo se ha construido normalmente y alcanzo las resistencias de diseño en los tramos San José – Robore; Robore – El Carmen; El Tinto – San José y la parte de pavimento rígido de Paraíso – El Tinto (Alfaro, s.f.).

En cuanto al uso de pavimentos unicapa, SOBOCE junto al IBCH realizaron un tramo experimental en la localidad de “Alto Limanipata”, zona rural donde se tiene un importante tráfico de volquetas que trasportan áridos, en 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 de una zona rural típica.

Para este tramo se realizaron estudios de suelos, dando como resultado un suelo de clasificación A-1, con CBR de 21% para el 95% de compactación y expansión de 0%. A partir de esto se realizaron pruebas de laboratorio con diferentes contenidos de cemento, dando como resultado probetas a la compresión y flexión a los 28 días en las siguientes tablas:

Tabla 9. Resistencia a compresión promedio para diferentes cantidades de cemento.

% de cemento	Resistencia promedio kg/cm²
11	56,7
13	56,1
15	91,3
17	72,9

Fuente: Seminario Internacional Mantenimiento Sostenible de Caminos Rurales,
Mantenimiento de caminos rurales con pavimentos unicapa.

Tabla 10. Resistencia a flexión promedio para diferentes cantidades de cemento.

% de cemento	Resistencia promedio kg/cm²
11	12
13	15,3
15	22
17	23,7

Fuente: Seminario Internacional Mantenimiento Sostenible de Caminos Rurales,
Mantenimiento de caminos rurales con pavimentos unicapa.

En cuanto a la resistencia al desgaste realizada en la máquina de Los Ángeles, se realizó el ensayo con un método similar al de Cántabro, es decir, sin utilizar las bolas de desgaste y con las probetas que fueron ensayadas a flexión. Para ello, la ISCYC recomienda que no se supere el 50%. En las pruebas realizadas para el tramo mencionada anteriormente se obtuvieron los siguientes resultados:

Tabla 11. Resistencia al desgaste de Los Ángeles para diferentes cantidades de cemento.

% de cemento	% de desgaste
11	67,1
13	53,4
15	29
17	23,3

Fuente: Seminario Internacional Mantenimiento Sostenible de Caminos Rurales, Mantenimiento de caminos rurales con pavimentos unicapa.

De acuerdo a los resultados obtenidos, el contenido de cemento que cumpliría aparentemente sería el de 14% para un pavimento unicapa. Con todos los procedimientos de diseño realizados se obtuvo que el pavimento tenga un espesor de 25 cm con un 14% de cemento mezclado con el suelo subrasante.

Ya en obra, considerando que se tenía la posibilidad de mayores experiencias, se definió en construir la capa de 25 cm pero solo con contenidos de cemento del 12% y de 14%, por lo cual se dividió el tramo en dos subtramos iguales variando el contenido de cemento (Alfaro, s.f.).

2.14. Diseño del pavimento unicapa por método del UES – ISCYC en base a método Parmigiani - Di Pace

En cuanto al diseño del pavimento unicapa el ISCYC ha trabajado intensamente en el desarrollo de una teoría estructural, se ha evolucionado en una metodología fundamentada por el método Parmigiani – Di Pace para el diseño de pavimentos de hormigón compactado con rodillo, modificando algunos parámetros, ya que los pavimentos unicapa tiene un comportamiento diferente al de las mezclas de hormigón (Alfaro, s.f.).

Ya que este método de Parmigiani – Di Pace requiere el uso de ábacos, el Centro Técnico del Hormigón del Ecuador, desarrollo una ecuación que permite aplicar los principios y ventajas de este método (Artero Alvarado, Jovel Abrego, & Mejía Morán, 2003).

La ecuación propuesta es la siguiente:

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

$$Y = 0,33635 - 0,065 * \left(\frac{S}{a}\right) + \left(0,016 * \left(\frac{S}{a}\right) - 0,58\right) * \ln\left(\frac{a}{L}\right)$$

Donde:

- N_r = Número de ruedas en la punta del eje.
- P = Carga por rueda.
- h = Espesor del pavimento unicapa.
- s = Separación entre ruedas (m).
- a = Radio del área equivalente de contacto.
- L = Radio de rigidez relativa de Wetergaard.

Para su cálculo se debe seguir el siguiente procedimiento:

Primeramente, se deben tener los siguientes datos:

- Valor de soporte de la subrasante, K (MPa/m).
- Módulo de ruptura a la flexión, M_R (MPa).
- Módulo de elasticidad, E_c (MPa).
- Coeficiente 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 periodos de diseño, N .

Una vez obtenido los datos se debe calcular el número de repeticiones de cargas esperadas durante el periodo de diseño (N), de acuerdo a la siguiente fórmula:

$$N = PD * 365 * A$$

Donde:

- N = Número de repeticiones de cargas esperadas.
- PD = Periodo de diseño.

- A = Número de repeticiones de carga por día para cada eje.

Se calcula el factor de crecimiento (F_{cr}), de acuerdo a la siguiente fórmula:

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

Donde:

- F_{cr} = Factor de crecimiento.
- i = Tasa de crecimiento.
- PD = Periodo de diseño.

Posterior a ello se debe calcular el número de repeticiones de carga (NR), a partir del factor de crecimiento y el número de repeticiones esperadas, para ello se utiliza la siguiente expresión:

$$NR = N * \frac{1 + F_{cr}}{100}$$

Con este valor se puede obtener la relación de tensiones (SR), utilizando las siguientes fórmulas:

$$SR = 1,20 - 0,10 * \log NR, \text{ para } NR \geq 100$$

$$SR = 1,0, \text{ para } NR < 100$$

Con este valor podemos obtener la tensión admisible:

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

Calcular el radio del área equivalente de contacto (a), en metros de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$a = \sqrt{\frac{P}{p * \pi}}$$

Para un primer cálculo se asume un valor tentativo del espesor del pavimento unicapa (h).

Para medir la rigidez del pavimento unicapa respecto al suelo de soporte se calcula el radio de rigidez relativa de Westergaard (L), de acuerdo a la siguiente ecuación:

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

Donde:

- E_c = Módulo de elasticidad del pavimento unicapa, en (MPa).
- h = Espesor del pavimento unicapa (m).
- μ = Módulo de Poisson del pavimento unicapa.
- K = Módulo de reacción de la subrasante (MPa/m).

Calculamos la variable (Y), de acuerdo a la fórmula mostrada anteriormente.

$$Y = 0,33635 - 0,065 * \left(\frac{S}{a}\right) + \left(0,016 * \left(\frac{S}{a}\right) - 0,58\right) * \ln\left(\frac{a}{L}\right)$$

Obtenemos el valor de la resistencia calculada (σ), de acuerdo a la ecuación mostrada inicialmente.

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

Finalmente, para comprobar que el espesor del pavimento unicapa (h) asumido sea el correcto, se debe verificar que la resistencia calculada (σ) sea menor a la resistencia admisible (σ_{adm}), en caso de que no lo sea se debe aumentar el valor de “h”.

2.15. Materiales utilizados en el pavimento unicapa

Los materiales que se deben usar deben cumplir las siguientes características (SIECA, 2010):

a) Cemento

Tipo de cemento para mampostería que cumpla con ASTM C-91 TIPO M. No se permitirá el uso de cemento total o parcialmente fraguado; el material en tales condiciones será retirado de la obra. El cemento deberá presentar un estado de excelente pulverización sin

la menor tendencia a aglomerarse, podrá almacenarse a granel en silos adecuados que aseguren la conservación del material y su correcta manipulación durante la carga y descarga. Si el suministro es realizado en sacos o bolsas, este deberá ser almacenado bajo cubierta para protegerlo de la humedad e intemperie, y debe estar aislado del suelo.

Figura 15. Cemento Portland IP-30.



Fuente: Elaboración propia.

b) Suelo del lugar

Se utilizará el suelo del lugar existente en la rasante del camino para elaborar la mezcla y construir el PUAD. La utilización de material de aporte será opcional. Las características del suelo que se debe usar son las siguientes:

- Índice de plasticidad 25 máx.
- Porcentaje que pasa malla N° 200, 30% máx.
- Porcentaje retenido en malla N° 4, 2 % mín.

Figura 16. Suelo del lugar.



Fuente: Elaboración propia.

c) Agua

El agua debe presentar características adecuadas para el propósito de la construcción.

d) Material de curado

Aplicar membrana de curado inmediatamente después de las operaciones de compactación. Podrá utilizarse compuestos químicos de curado de base acuosa, según dosificación del fabricante, así como asfaltos emulsificados en una tasa de aplicación variando entre 0,7 a 1,4 l/m². En el caso de utilizar material de curado de tipo asfáltico, se deberá colocar material de secado (arena, gravilla). El curado también podrá realizarse con riegos continuos de agua.

Figura 17. Agua para pavimento unicapa.



Fuente: Elaboración propia

2.16. Proceso constructivo del pavimento unicapa

El proceso constructivo sugerido por el manual centroamericano de mantenimiento de carreteras es el siguiente:

Colocar dispositivos de seguridad transitorios y verificar que todo el personal disponga de la vestimenta obligatoria y en buen estado, y asegurar el control adecuado del tránsito.

Figura 18. Implementación de sistema de seguridad.



Fuente: Elaboración propia.

Las actividades o fases fundamentales que se deben realizar en el proceso constructivo se pueden resumir en las siguientes etapas:

a) Preparación del suelo existente.

Verificar los valores de humedad y densidad del suelo en estado natural, para conocer de esta forma sus condiciones previo a la construcción del pavimento y realizar los ajustes de humedad necesarios. Una vez realizada esta verificación de humedad, se deberá escarificar, pulverizar y mezclar el suelo hasta obtener una razonable uniformidad y conformidad con el alineamiento, niveles y secciones transversales especificadas.

Figura 19. Preparación del suelo existente para el pavimento unicapa.



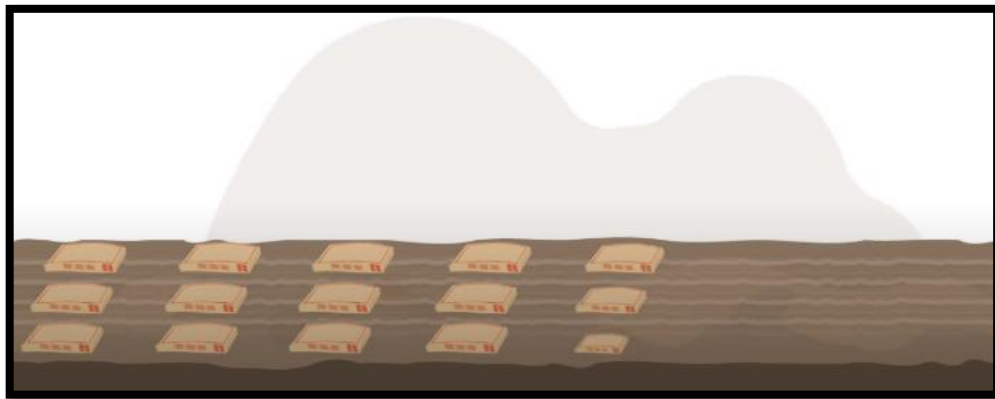
Fuente: Elaboración propia.

En este tipo de pavimentos, debido a su contenido de cemento, es recomendable que el suelo se encuentre con 5 o 10 puntos porcentuales mayor al valor de humedad óptima (dependiendo de las condiciones de humedad natural del suelo) antes de adicionar el cemento, ya que éste absorberá la mayor parte del agua. Esta actividad es importante para lograr la cantidad de agua necesaria (para hidratar el cemento y alcanzar la humedad óptima de compactación), la cual se completará posteriormente a la aplicación del cemento y a las operaciones de mezclado posteriores. Si está proyectado que la aplicación del agua sea por medio de inyección directa a la carcasa del equipo escarificador - mezclador o inyección directa de lechada (cemento y agua), no será necesario humedecer previamente el suelo de acuerdo al lineamiento descrito en el párrafo anterior.

b) Colocación del cemento.

La distribución del cemento se podrá realizar de forma manual o mecanizada, cumpliendo con la dosificación mínima estipulada en el diseño de mezcla.

Figura 20. Colocación del cemento para el pavimento unicapa.



Fuente: Elaboración propia.

c) Mezcla del suelo con el cemento.

Constituye la fase fundamental del proceso constructivo del pavimento. La homogeneización del material y la profundidad de mezclado son dos aspectos que se deben garantizar en este proceso.

Figura 21. Mezcla del suelo con el cemento del pavimento unicapa.



Fuente: Elaboración propia.

El mezclado podrá realizarse utilizando equipos tipo mezclador - escarificador o motoniveladora, realizando para esta actividad el número de pasadas necesario para lograr obtener una mezcla homogénea. Es importante mencionar, que desde que se aplica el cemento el plazo para trabajarlo es de dos horas y se deberá tener presente en los procesos que continúan.

d) Aplicación del agua.

Una vez se ha incorporado el cemento y mezclado con el suelo, se recomienda llevar la mezcla a la humedad de compactación óptima, verificando constantemente los valores de humedad durante las operaciones de mezclado.

Figura 22. Aplicación de agua en la mezcla suelo – cemento del pavimento unicapa.



Fuente: Elaboración propia.

Antes de realizar el proceso de compactación del pavimento, se deberá revisar el contenido de humedad, con el propósito de comparar y cumplir con $\pm 2\%$ de la humedad óptima de compactación del ensayo Proctor AASHTO T-180, realizado previamente en laboratorio; además, se recomienda realizar zanjas o calas de observación en la mezcla suelta para asegurarse que el mezclado del suelo, cemento y agua sea eficiente y que la humedad sea uniforme en todo el espesor tratado.

La aplicación del agua, en los procesos mencionados podrá realizarse utilizando camión cisterna convencional con distribuidor de agua.

e) **Compactación.**

Los principios que gobiernan la compactación del PUAD, son los mismos que rigen la compactación de suelo - cemento o bases tratadas con cemento. El mezclado y compactado se deberá concluir en un plazo no mayor de 2 horas.

Con el objetivo de lograr una compactación integral en todo el espesor y evitar también reajuste o nivelación de la capa, se recomienda efectuar el proceso de compactación en dos fases. La primera, inmediatamente después del mezclado, en la cual se deberá lograr una densidad cercana a la especificada utilizando un rodo de al menos 8 toneladas tipo pata de cabra.

Figura 23. Compactación con rodillo pata de cabra del pavimento unicapa.

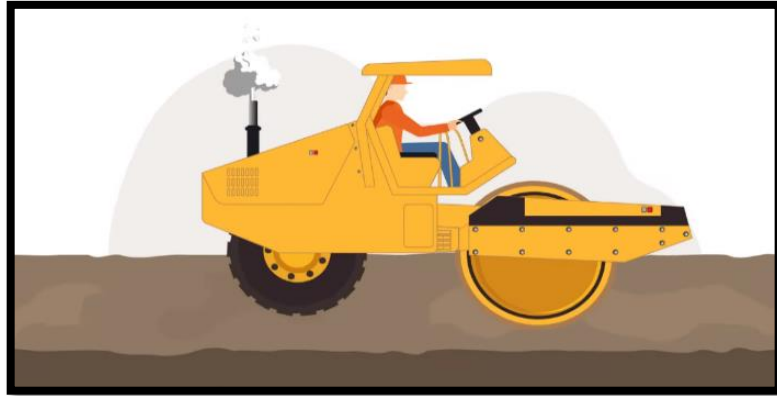


Fuente: Elaboración propia.

Posteriormente se deberán realizar pequeños ajustes en el perfil de la vía utilizando motoniveladora, y en una segunda fase, finalizar el proceso de compactación con un

porcentaje de al menos 95 % de AASTHO T-180, utilizando un rodillo liso vibratorio de 8 a 10 toneladas, para garantizar una superficie densa, libre de surcos, arrugas y material suelto.

Figura 24. Compactación con rodillo liso del pavimento unicapa.



Fuente: Elaboración propia.

f) Curado.

Una vez finalizado el proceso de compactación, el pavimento debe protegerse para evitar que la humedad de la mezcla compactada se evapore rápidamente, lo cual permite hidratar completamente el cemento.

Figura 25. Curado del pavimento unicapa.



Fuente: Elaboración propia.

g) Apertura al tráfico.

Por su naturaleza estructural, los PUAD están concebidos para realizar apertura inmediata al tráfico de construcción y público. No se permitirá el paso vehicular sin que dicha capa cuente con la membrana asfáltica y el material de secado.

Retirar dispositivos de seguridad en orden inverso a como fueron colocadas.

Figura 26. Apertura al tráfico.



Fuente: Elaboración propia.

CAPÍTULO III
DISEÑO METODOLÓGICO Y
RELEVAMIENTO DE LA
INFORMACIÓN

CAPÍTULO III

DISEÑO METODOLÓGICO Y RELEVAMIENTO DE LA INFORMACIÓN

3.1. Ubicación de la zona de muestreo

La zona de muestreo se encuentra en el departamento de Tarija, provincia Cercado, ubicado al sur de la ciudad de Tarija, al norte de Tolomosa y al Noreste de Lazareto y Noroeste de San Blas.

Las coordenadas y fotografía de la zona de muestreo son las siguientes:

Figura 27. Zona de muestreo Tablada – Turumayo.



Fuente: Google Earth, s.f.

Tabla 12. Coordenadas UTM inicio – fin del camino “La Tablada – Turumayo”.

Detalle	Coordenadas UTM		
	Este (m)	Sur (m)	Zona
Inicio	319.992,00	7.615.874,00	20
Final	315.565,00	7.615.645,00	20

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 13. Coordenadas UTM y clasificación de subrasante por punto de muestreo.

Punto de muestreo	Coordenadas UTM			Clasificación subrasante		Descripción
	Este (m)	Sur (m)	Zona	AASHTO	SUCS	
1	319.992,00	7.615.874,00	20	A-2-4 ₍₀₎	GM	Gravas con limos
2	319.832,00	7.615.414,00	20	A-2-4 ₍₀₎	GM	Gravas con limos
3	319.474,00	7.615.157,00	20	A-2-4 ₍₀₎	GM	Gravas con limos
4	319.018,00	7.614.962,00	20	A-2-4 ₍₀₎	SM	Arena con limos
5	318.593,00	7.614.917,00	20	A-1-b ₍₀₎	SW	Arena gruesa
6	318.142,00	7.614.675,00	20	A-2-4 ₍₀₎	SM	Arena con limos
7	317.778,00	7.614.597,00	20	A-2-4 ₍₀₎	GM	Gravas con limos
8	317.307,00	7.614.713,00	20	A-1-b ₍₀₎	SW	Arena gruesa
9	316.904,00	7.614.898,00	20	A-1-b ₍₀₎	SW	Arena gruesa
10	316.643,00	7.615.243,00	20	A-1-b ₍₀₎	SW	Arena gruesa
11	316.314,00	7.615.514,00	20	A-1-b ₍₀₎	SW	Arena gruesa
12	315.946,00	7.615.504,00	20	A-2-4 ₍₀₎	SM	Arena con limos
13	315.565,00	7.615.645,00	20	A-2-4 ₍₀₎	GM	Gravas con limos

Fuente: Elaboración propia.

3.2. Caracterización de los materiales empleados en el pavimento unicapa

Los materiales empleados para el diseño del pavimento unicapa fueron caracterizados en el Laboratorio de Hormigones y el Laboratorio de Suelos, instalaciones ubicadas en el campus de la Universidad Autónoma “Juan Misael Saracho”, se utilizó en el diseño 16% de cemento portland IP-30 y suelo de la subrasante extraída de la zona de muestreo con las características más desfavorables del camino.

Los materiales que se deben usar deben cumplir las siguientes características (SIECA, 2010):

3.2.1. Caracterización del cemento

En el presente proyecto se utilizó cemento portland IP-30 el cual cumple con las características de la norma ASTM C-91 y es comerciable en la zona de diseño.

Los resultados se encuentran en la siguiente tabla. Las planillas de ensayos de caracterización están en el **ANEXO II**.

Tabla 14. Caracterización del cemento portland IP-30.

Descripción	Requisitos Norma ASTM C-91 Tipo M	Valores del cemento utilizado	Observación
Finura, residuo en tamiz 45 μm (N° 325), máx, %	24	3,26	¡Cumple!
Fraguado inicial (min), no menor que:	90	150	¡Cumple!
Fraguado final (min), no mayor que:	1000	330	¡Cumple!
Resistencia a compresión a los 7 días (MPa):	12,4	22	¡Cumple!
Resistencia a compresión a los 28 días (MPa):	20	30	¡Cumple!
Densidad del cemento (g/cm^3):	-	2,69	¡Cumple!

Fuente: Elaboración propia.

3.2.2. Caracterización del suelo de la subrasante

La siguiente caracterización pertenece a la subrasante con características más desfavorables con la cual se realizará el diseño del pavimento unicapa.

Los resultados se encuentran en la siguiente tabla. Las planillas de ensayos de caracterización están en el **ANEXO I**.

Tabla 15. Caracterización de la subrasante.

Muestra Tablada - Turumayo			
Ensayo		Unidad	Promedio
Contenido de humedad		%	2,05
Ensayo		Unidad	Promedio
Límites de Atterberg	Límite líquido	%	0
	Límite plástico	%	0
	Índice de plasticidad	%	0
	Índice de grupo	Adim.	0
Ensayo		Unidad	Promedio
Granulometría	% retenido de N° 4	%	6,03
	% retenido de N° 10	%	5,3
	% retenido de N° 40	%	14,14
	% retenido de N° 200	%	19,76
Clasificación del suelo			
AASHTO	A-2-4 ₍₀₎	Arena limosa	
SUCS	SM		
Ensayo		Unidad	Promedio
Compactación	Densidad máxima	g/cm ³	2,15
	Humedad óptima	%	7,1
Ensayo		Unidad	Promedio
CBR	CBR 100% D. máx	%	39,07
	CBR 95% D. máx	%	37,12

Fuente: Elaboración propia.

Las características del suelo empleado para el diseño del pavimento unicapa cumplen satisfactoriamente con las exigidas en el manual centro americano de mantenimiento de carreteras:

Tabla 16. Comparación de características exigidas del suelo empleado.

Descripción	Valores requeridos	Valores del suelo utilizado	Observación
Índice de plasticidad, máx.:	25	0	¡Cumple!
Porcentaje que pasa malla N° 200, máx., (%):	30	15,09	¡Cumple!
Porcentaje retenido en malla N° 4, mín., (%):	2	6,03	¡Cumple!

Fuente: Elaboración propia.

3.3. Elaboración de especímenes de pavimento unicapa

El procedimiento para la elaboración de los especímenes de pavimento unicapa propuesto en el “Manual Centroamericano de Carreteras” es el siguiente:

3.3.1. Engrasar al molde de la probetas y vigas

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 28. Engrasado al molde de probetas.



Fuente: Elaboración propia.

3.3.2. Preparación de la muestra de la subrasante

La muestra extraída es metida al horno por un tiempo de 24 horas hasta que se vuelva desmenuzable. Se disgregó los terrones, evitando reducir el tamaño natural de las partículas 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 subrasante con el 16% de cemento.

En una fuente se mezcló uniformemente el suelo con cemento.

Figura 29. Preparación de muestra suelo – cemento.



Fuente: Elaboración propia.

3.3.3. Adición del agua a la mezcla de suelo - cemento

Una vez se ha incorporado el cemento y mezclado con el suelo, se recomienda llevar la mezcla a la humedad de compactación óptima, verificando constantemente los valores de humedad durante las operaciones de mezclado.

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

Tabla 17. Ensayo de compactación en suelo con 16% de cemento.

Ensayo		Unidad	Promedio
Compactación suelo con 16 % de cemento	Densidad máxima	g/cm ³	2,16
	Humedad óptima	%	7,8

Fuente: Elaboración propia.

Una vez calculada la cantidad de agua necesaria con la ayuda de una probeta graduada se aplicó la cantidad exacta de agua, se mezcló el agua, el cemento y el suelo, evitando la formación de grumos hasta conseguir una muestra homogénea.

3.3.4. Compactación en el moldeo de los especímenes

El proceso de compactación en el moldeo de especímenes propuesto por el Manual Centroamericano de Mantenimiento de Carreteras es idéntico a lo especificado en la norma AASTHO T-180, excepto por lo siguiente:

- Los especímenes se realizarán utilizando moldes cilíndricos de 6" x 12", idénticos a los utilizados en la elaboración de cilindros de concreto, según ASTM C-31.
- El material será compactado en diez capas, realizando un número igual a 75 golpes/capa.
- La elaboración de vigas se deberá realizar utilizando moldes de 6" x 6" x 24", idénticas a las utilizadas a la elaboración de vigas de concreto según ASTM C-78.
- El material será compactado en cinco capas, realizando un número igual a 356 golpes/capa.

Por lo tanto, la compactación se la realizo de la siguiente manera:

Con la mezcla lista se procedió al moldeo de los especímenes, compactando de modo continuo para que se tenga 10 capas de 75 golpes por capa para probetas y 5 capas de 356 golpes por capa para vigas, teniendo el cuidado de que la mezcla mantenga la humedad necesaria, durante el proceso de compactación, cubriéndola con un plástico.

Figura 30. Compactación de las probetas.



Fuente: Elaboración propia.

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, se deja el espécimen elaborado reposar por un periodo de 30 minutos antes de retirar el molde, culminado el tiempo, se procedió a desmoldar la muestra teniendo como resultado el espécimen.

3.3.5. Curado de las probetas y vigas de pavimento unicapa

El procedimiento propuesto por el “Manual Centroamericano de Mantenimiento de Carreteras” para el curado de probetas es el siguiente:

- El curado deberá realizarse aplicando compuesto químico de curado a los especímenes, para luego almacenarlos en ambiente húmedo de laboratorio, el curado también podrá realizarse con riegos continuos de agua.

En el presente proyecto debido a la imposibilidad de conseguir laboratorios con almacenamiento de ambientes húmedos, se realizó el proceso de curado por el método de riegos continuos para humedecer las muestras, puesto a que este es un método factible y más asequible.

Figura 31. Curado de probetas.



Fuente: Elaboración propia.

Los especímenes fueron curados diariamente durante 28 días, se humedecieron con la ayuda de un atomizador, asegurándose de esta manera una distribución uniforme del agua en todo el ejemplar, asimismo adicionando un envoltorio de material plástico se fortaleció la preservación de su humedad, logrando de esta manera que el curado sea adecuado, evitando la generación de fisuras que debiliten estructuralmente los especímenes.

3.4. Rotura de las probetas a compresión

Después de realizar el curado de los especímenes por el periodo de 28 días, en instalaciones del laboratorio de Hormigones ubicado en el campus de la Universidad Autónoma “Juan Misael Saracho”, se determinó los esfuerzos de compresión y flexión de los especímenes con una prensa hidráulica que aplica carga y velocidad constante.

Figura 32. Pesaje de especímenes de pavimento unicapa.



Fuente: Elaboración propia.

Se recolectaron todos los datos necesarios para determinar el esfuerzo de los especímenes:

- Para determinar el esfuerzo a flexión promedio de las vigas de pavimento unicapa se mide con la ayuda de un flexómetro las dimensiones del cuerpo, con una balanza se determinó el peso de las muestras y finalmente mediante la prensa hidráulica determinamos la carga máxima y esfuerzo máximo a flexión de cada espécimen.

Los valores obtenidos tras el ensayo a flexión podemos apreciarlos en la siguiente tabla:

Tabla 18. Valores de esfuerzo a flexión de vigas.

Nº	Edad (días)	Altura (mm)	Ancho (mm)	Largo (mm)	Carga (KN)	Esfuerzo (MPa)	Esfuerzo (kg/cm ²)
1	28	150	150	600	8,9	1,58	16,13
2	28	150	150	600	8,8	1,56	15,95
3	28	150	150	600	9,2	1,64	16,68
4	28	150	150	600	8,6	1,53	15,59
5	28	150	150	600	9,5	1,69	17,22
Esfuerzo promedio =						1,60	16,32

Fuente: Elaboración propia.

El esfuerzo a flexión promedio obtenido del pavimento unicapa es de 16,32 kg/cm², valor mayor al requerido por el “Manual Centroamericano de Carreteras” el cual exige un esfuerzo a flexión mínimo de 11 kg/cm².

- Para determinar el esfuerzo a compresión promedio de las probetas de pavimento unicapa se mide las dimensiones del cuerpo, con una balanza se determinó el peso de las muestras y finalmente mediante la prensa hidráulica determinamos la carga máxima y esfuerzo máximo a compresión de cada espécimen.

Figura 33. Rotura de probetas en prensa hidráulica.



Fuente: Elaboración propia.

Los valores obtenidos tras el ensayo a compresión podemos apreciarlos en la siguiente tabla:

Tabla 19. Valores de esfuerzo a compresión de probetas cilíndricas.

Nº	Edad (días)	Altura (mm)	Diámetro (mm)	Área (mm ²)	Carga (KN)	Esfuerzo (MPa)	Esfuerzo (Kg/cm ²)
1	28	300	150	17.671	216,1	12,2	124,7
2	28	300	150	17.671	203,8	11,5	117,6
3	28	300	150	17.671	239,7	13,6	138,3
4	28	300	150	17.671	254,9	14,4	147,1
5	28	300	150	17.671	203,9	11,5	117,7
6	28	300	150	17.671	192,6	10,9	111,1
7	28	300	150	17.671	167,5	9,5	96,7
8	28	300	150	17.671	284,3	16,1	164,1
9	28	300	150	17.671	209,2	11,8	120,7
10	28	300	150	17.671	230,4	13,0	133,0
11	28	300	150	17.671	217,5	12,3	125,5
12	28	300	150	17.671	234,6	13,3	135,4
13	28	300	150	17.671	208,2	11,8	120,1
14	28	300	150	17.671	183,9	10,4	106,1
15	28	300	150	17.671	177,2	10,0	102,3
Esfuerzo promedio =						12,15	123,90

Fuente: Elaboración propia.

El esfuerzo a compresión promedio obtenido del pavimento unicapa es de 123,90 kg/cm², valor mayor al requerido por el “Manual Centroamericano de Carreteras” el cual exige un esfuerzo a compresión mínimo de 70 kg/cm².

CAPÍTULO IV
ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

CAPÍTULO IV

ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

4.1. Diseño del pavimento unicapa

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

$$N = PD * 365 * A$$

Donde:

- N = Número de repeticiones de cargas esperadas durante el periodo de diseño.
- PD = Periodo de diseño; se diseñará con un periodo de diseño de **PD = 10 años**.
- A= el número de repeticiones de carga.

Para poder conocer el número de repeticiones de carga se realizó el estudio del volumen promedio diario de vehículos en el tramo de diseño por 24 horas diarias durante una semana el cual fue de **A = 55 Veh. / día**, el volumen promedio diario de vehículos se lo puede apreciar a detalle en el **ANEXO III**.

$$N = PD * 365 * A$$

$$N = 10 * 365 * 55 = 200.750$$

$$N = 2,01 \times 10^5$$

Se tendrá 200.750 repeticiones de cargas esperadas durante el periodo de diseño.

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

Basado en información recolectada del INE conocemos que el índice de crecimiento de tráfico anual es **$i = 4\%$** en un periodo de vida útil del proyecto de 10 años.

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

$$F_{cr} = \frac{(1 + 0,040)^{10} - 1}{0,040}$$

$$F_{cr} = 12,0061$$

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:

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

$$NR = 200.750 * \left(1 + \frac{12,0061}{100}\right)$$

$$\mathbf{NR = 224.853}$$

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

$$SR = 1,20 - 0,10 * \log(NR)$$

$$SR = 1,20 - 0,10 * \log (224.853)$$

$$\mathbf{SR = 0,66}$$

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

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

El valor del módulo de ruptura (M_R), se ha considerado como el esfuerzo a flexión promedio a 28 días con 16% de cemento el cual tiene un valor de $\mathbf{M_R = 1,60 MPa}$.

$$\sigma_{adm} = 0,66 * 1,6 = 1,064 MPa$$

$$\mathbf{\sigma_{adm} = 1,064 MPa}$$

Se calcula el radio del área equivalente de contacto:

$$a = \left(\frac{P}{p * \pi}\right)^{0,5}$$

Donde:

- a = Radio del área equivalente de contacto.
- P = Carga máxima por rueda simple.
- p = Presión de inflado del neumático.

El cálculo de radio de giro, se lo realizará con el vehículo tipo C3 ya que este es el que genera la situación más crítica que atraviesa por la zona según el estudio volumen medio diario de tráfico realizado.

La carga por eje para un vehículo tipo C3 se puede apreciar en el siguiente cuadro:

Tabla 20. Vehículo tipo C3.

Configuración vehicular	Descripción gráfica del vehículo			Longitud máxima (m)
C3				13,2
Ejes	E1	E2	E3	E4
Carga según censo (T)	7	8	8	-
Carga según censo (T)	7	16		-
Tipo de eje	Eje simple		Eje tándem	-
Tipo de rueda	Rueda simple		Rueda doble	-

Fuente: Manual de carreteras MTC.

La carga máxima por eje para un vehículo C3 es de **P = 8 T**.

$$P = \frac{8T}{4} = 2 \text{ Ton}$$

$$P = 0,020 \text{ MN}$$

La máxima carga por rueda simple (P) tiene un valor de 0,020 MN.

p = usualmente la presión de inflado de neumáticos para un C3, es igual a 95 lb/in².

p = 0,66 MPa

$$a = \left(\frac{0,020}{0,66 * \pi} \right)^{0,5}$$

$$a = 0,097 \text{ m}$$

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

Se asumirá un espesor tentativo inicial **h= 0,175 m**.

Para medir la rigidez del pavimento unicapa respecto al suelo de soporte se calcula el

“Radio de rigidez relativa de Westergaard” de acuerdo a la siguiente ecuación:

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

Coeficiente de Poisson tiene un valor de $\mu = 0,15$ (valor aproximado promedio para un PUAD).

El módulo de elasticidad (E_c) es un valor característico, según la norma ACI.

$$E_c = 15.100 * \sqrt{f_c}$$

Donde:

- f_c = Esfuerzo promedio de compresión de la muestra a los 28 días, el cual tiene un valor promedio de $f_c = 123,90 \text{ kg/cm}^2$.

$$E_c = 15.100 * \sqrt{123,90} = 168.075,64 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$$

$$E_c = 16.482,59 \text{ MPa}$$

Valor de soporte de la subrasante: $K = 395,35 \text{ pci} = 107,32 \text{ MPa/m}$.

$$L = \sqrt[4]{\frac{16.482,59 * 0,175^3}{12 * (1 - 0,15^2) * 107,32}}$$

$$L = 0,83 \text{ m}$$

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

$$Y = 0,33635 - 0,065 * \left(\frac{S}{a}\right) + \left(0,016 * \left(\frac{S}{a}\right) - 0,58\right) * \ln\left(\frac{a}{L}\right)$$

La separación entre los centros de las ruedas (s) depende de la configuración de ruedas del vehículo, para un C3 esta distancia se mide en una rueda doble.

$s = 0,50\text{m}$. (valor comúnmente encontrado en configuraciones de ruedas doble).

$$Y = 0,33635 - 0,065 * \left(\frac{0,5}{0,097}\right) + \left(0,016 * \left(\frac{0,5}{0,097}\right) - 0,58\right) * \ln\left(\frac{0,097}{0,83}\right)$$

$$Y = 0,83$$

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:

$$\sigma = \frac{2 * 0,020}{0,175^2} * 0,83 = 1,063 \text{ MPa}$$

$$\sigma = 1,063 \text{ MPa}$$

Se compara el valor de σ con σ_{adm} :

$$\sigma_{adm} = 1,064 \text{ MPa} ; \sigma = 1,063 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{adm} > \sigma ; 1,064 \text{ MPa} > 1,063 \text{ MPa}$$

Cumple!!!

Significa que el espesor del PUAD es adecuado.

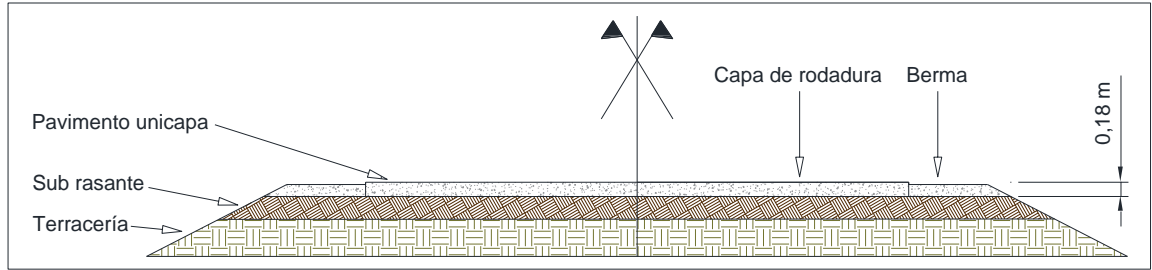
El espesor adecuado para un pavimento unicapa con un periodo de diseño de 10 años es de 0,175 metros o 17,51 centímetros, pero asumiremos un espesor constructivo de **18 centímetros**.

Tabla 21. Cálculo de espesor del pavimento unicapa con 16% de cemento.

Pavimento unicapa de alto desempeño: Diseño de espesores de pavimento			
Procedimiento propuesto por el ISCYC, fundamentado en el método Parmigiani - Di Pace			
Vehículo de diseño:		C3	
<u>Parámetros</u>			
Módulo de elasticidad (a 60 días):	E =	16.482,59	MPa
Espesores tentativo de pavimento:	h =	0,175	m
Coefficiente de Poisson:	μ =	0,15	
Módulo de reacción de la subrasante:	K =	107,32	MPa/m
Carga de cada rueda:	P =	0,02	MN
Presión de inflado de neumático:	p =	0,66	MPa
Número de ruedas (en cada punta de eje):	Nr =	2	
Radio de área equivalente:	a =	0,097	m
Radio de rigidez relativa:	L =	0,52	m
Separación entre centros de ruedas:	s =	0,5	m
	s/a =	5,14	
	a/l =	0,19	
<u>Formula Modificada por ISCYC</u>			
	y =	0,83	
	σ =	1,063	MPa
<u>Fatiga por flexión</u>			
Módulo de rotura a flexión (a 60 días):	Mr =	1,6	MPa
Número diario de repeticiones de la carga:	A =	55	
Periodo de diseño:	PD =	10	Años
Aumento de tráfico anual:	% =	4	
Factor de crecimiento:	Fcr =	12,0061	
Número de repeticiones en periodo de diseño:	NR =	224.853	
Relación tensión / Módulo de rotura:	SR =	0,66	
Tensión admisible:	σ_{adm} =	1,064	MPa
Es el espesor del PUAD es correcto?		Si	CUMPLE!

Fuente: Elaboración propia.

Figura 34. Vista sección transversal pavimento unicapa.



Fuente: Elaboración propia.

4.2. Diseño del pavimento flexible método AASHTO

Para poder realizar el diseño del pavimento flexible AASHTO propone la siguiente ecuación:

$$\log_{10}(W_{18}) = Z_r * S_o + 9,36 * \log_{10}(SN_{req} + 1) - 0,20 + \frac{\log_{10}\left(\frac{\Delta PSI}{4,2 - 1,5}\right)}{0,4 + \frac{1094}{(SN_{req} + 1)^{5,19}}} + 2,32 * \log_{10}(Mr) - 8,07$$

Donde:

- SN_{req} = Número estructural requerido.
- W_{18} = Ejes equivalentes.
- Z_r = Desviación estándar normal.
- S_o = Error estándar combinado.
- ΔPSI = Diferencia de serviciabilidad ($P_o - P_t$).
- P_o = Serviciabilidad inicial.
- P_t = Serviciabilidad final.
- Mr = Módulo de resiliencia de la subrasante.

Según los cálculos realizados en el **ANEXO III** los ejes equivalentes acumulados para el pavimento flexible tienen un valor de:

$$W_{18} = 1,95 \times 10^5$$

Determinamos la confiabilidad de uso (R) y la desviación estándar normal (Z_r), siguiendo las recomendaciones de la guía AASHTO:

Según resultados basados en una investigación de diseño de pavimentos AASHTO recomienda utilizar de guía la siguiente tabla:

Tabla 22. Niveles de confiabilidad sugeridos para varias clasificaciones funcionales.

Nivel de confiabilidad sugerido para varias clasificaciones funcionales		
Clasificación funcional	Nivel de confiabilidad recomendado	
	Urbano	Rural
Interestatal y otras vías libres	85 - 99,9	80 - 99,9
Arterias principales	80 - 99	75 - 95
Colectoras	80 - 95	75 - 95
Locales	50 - 80	50 - 80

Fuente: Guía para el diseño de estructuras de pavimento (AASHTO – 1993).

Basándose en la tabla N° y utilizando el número de ejes equivalentes asumimos un valor de confiabilidad y la desviación estándar normal utilizando la siguiente tabla:

Tabla 23. Nivel de confiabilidad y desviación estándar.

Tipo de caminos	Tráfico	Ejes equivalentes acumulados		Nivel de confiabilidad (R)	Desviación estándar normal (Z_R)
Caminos de bajo volumen de tránsito	TP0	75.000	150.000	65,00%	-0,385
	TP1	150.001	300.000	70,00%	-0,524
	TP2	300.001	500.000	75,00%	-0,674
	TP3	500.001	750.000	80,00%	-0,842
	TP4	750.001	1.000.000	80,00%	-0,842
Resto de caminos	TP5	1.000.001	1.500.000	85,00%	-1,036
	TP6	1.500.001	3.000.000	85,00%	-1,036
	TP7	3.000.001	5.000.000	85,00%	-1,036
	TP8	5.000.001	7.500.000	90,00%	-1,282
	TP9	7.500.001	10.000.000	90,00%	-1,282
	TP10	10.000.001	12.500.000	90,00%	-1,282
	TP11	12.500.001	15.000.000	90,00%	-1,282
	TP12	15.000.001	20.000.000	95,00%	-1,645
	TP13	20.000.001	25.000.000	95,00%	-1,645
	TP14	25.000.001	30.000.000	95,00%	-1,645
	TP15	> 30.000.000		95,00%	-1,645

Fuente: Manual de “suelos, geología, geotecnia y pavimentos”, en base a guía AASHTO – 1993.

Según los ejes equivalentes identificamos los valores de nivel de confiabilidad (R) y la desviación estándar normal (Zr) los cuales tienen un valor de:

$$\mathbf{R = 70\%} \quad \mathbf{Zr = - 0,524}.$$

Determinamos la variabilidad estándar (So), la guía AASHTO propuso los siguientes valores:

Para pavimentos rígidos una variabilidad estándar con un valor de entre 0,30 y 0,50.

Para pavimentos flexibles una variabilidad estándar con un valor de entre 0,40 a 0,50.

Al tratarse del diseño de una construcción nueva, por sugerencia de la guía AASHTO asumiremos un valor de variabilidad estándar de:

$$\mathbf{So = 0,45}.$$

Determinamos el índice de serviciabilidad inicial (Po) y el índice de serviciabilidad final (Pt):

Los valores aconsejados a utilizar para el índice de serviciabilidad inicial (Po), según la guía AASHTO para el diseño de pavimentos son los siguientes:

Po = 4,2 ;para pavimentos flexibles.

Po = 4,5 ;para pavimento rígido.

Al tratarse del diseño de un pavimento flexible utilizamos el valor de serviciabilidad inicial de:

$$\mathbf{Po = 4,2}.$$

Los valores aconsejados a utilizar para el índice de serviciabilidad final (Pt), según la guía AASHTO para el diseño de pavimentos son los siguientes:

Pt = 4,2 a 3,0 ;para carreteras principales.

Pt = 2,0 ;para carreteras con clasificación menor.

Al tratarse de una carretera con una clasificación menor utilizamos el valor de serviciabilidad final de:

$$\mathbf{Pt = 2,0}.$$

Calculamos el diferencial del índice de serviciabilidad (ΔPSI) con la siguiente ecuación:

$$\Delta PSI = P_o - P_t$$

$$\Delta PSI = 4,2 - 2,0$$

$$\Delta PSI = 2,2$$

Calculamos el módulo de resiliencia de la subrasante (Mr), utilizando el valor del CBR en la correlación correspondiente:

$$\text{CBR de subrasante} = 39,07 \%$$

- Correlación para determinar el módulo de resiliencia Lister y Powell (1987):

$$Mr = 2.555 * CBR^{0,55} \quad CBR < 12\%$$

- Correlación para determinar el módulo de resiliencia MOP (2004) (Chile):

$$Mr = 3.205,334 * CBR^{0,55} \quad 12\% < CBR < 80\%$$

Utilizaremos la correlación de MOP para determinar el módulo de resiliencia de la subrasante, debido a que el CBR de la subrasante tiene un valor de **CBR = 39,07%** y se encuentra dentro del rango sugerido el cual es $12\% < CBR < 80\%$:

$$Mr = 3.205,33 * 39,07^{0,55}$$

$$\text{Mr} = 24.065,072 \text{ psi}$$

Remplazamos los valores obtenidos en la ecuación e iteramos para determinar el número estructural requerido:

$$\begin{aligned} \log_{10}(1,95 \times 10^5) = & -0,524 * 0,45 + 9,36 * \log_{10}(SN_{req} + 1) - 0,20 + \frac{\log_{10}\left(\frac{2,2}{4,2 - 1,5}\right)}{0,4 + \frac{1094}{(SN_{req} + 1)^{5,19}}} + 2,32 \\ & * \log_{10}(24.065,072) - 8,07 \end{aligned}$$

$$SN_{req} = 1,45$$

Para poder determinar el número estructural calculado utilizaremos la siguiente ecuación:

$$SN_{calc} = a_1 * d_1 + a_2 * d_2 * m_2 + a_3 * d_3 * m_3$$

Donde:

- SN_{calc} = Número estructural calculado.

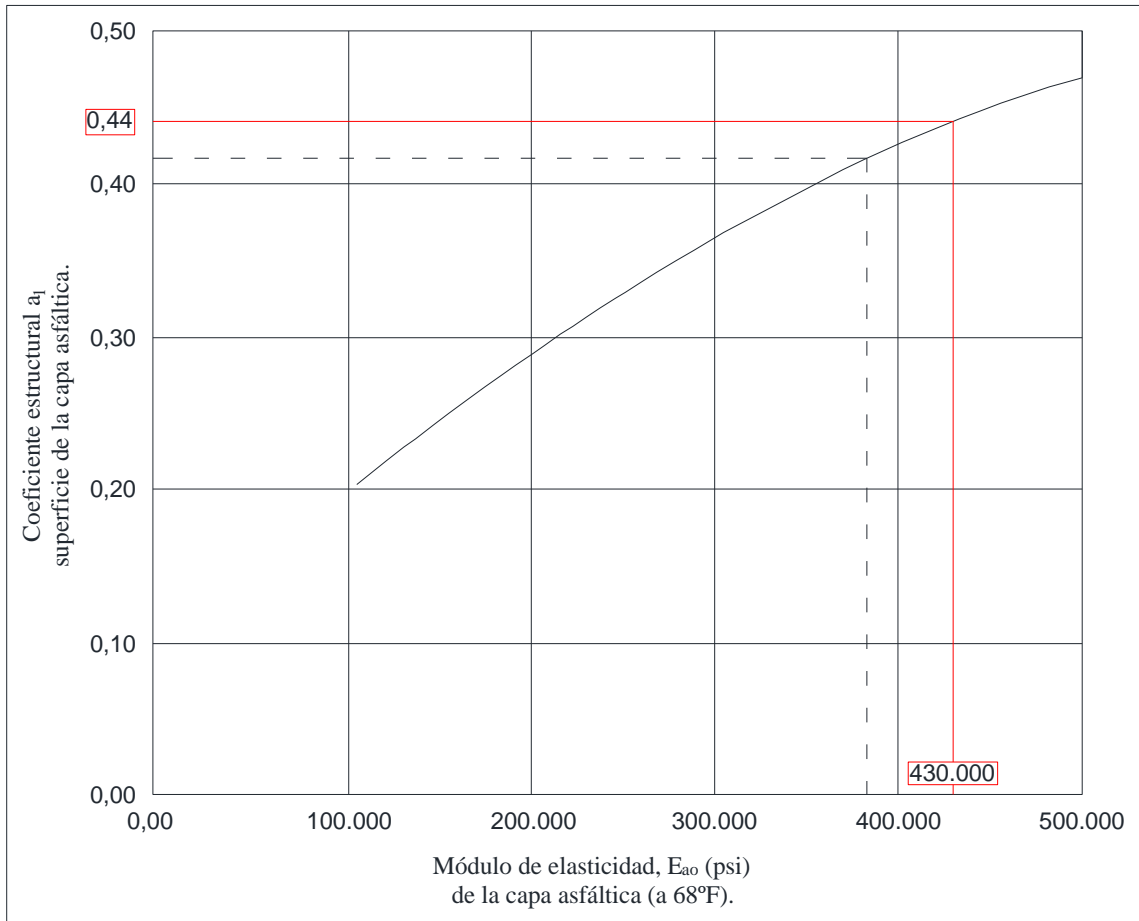
- a_1, a_2, a_3 = coeficientes estructurales de las capas: superficial, base y sub base.
- d_1, d_2, d_3 = Espesores (cm) de las capas: superficial, base y sub base.
- m_2, m_3 = Coeficiente de drenaje para las capas: base y sub base.

Coefficientes estructurales. -

Determinamos el coeficiente estructural de la capa superficial (a_1), capa base (a_2) y capa sub base (a_3) y el módulo resiliencia de la capa base y capa sub base:

Con el módulo de elasticidad de la capa de concreto asfáltico ($E_c = 430.000$ psi) estimaremos el coeficiente estructural de la capa superficial utilizando la siguiente figura:

Figura 35. Estimación del coeficiente estructural de la capa superficial.



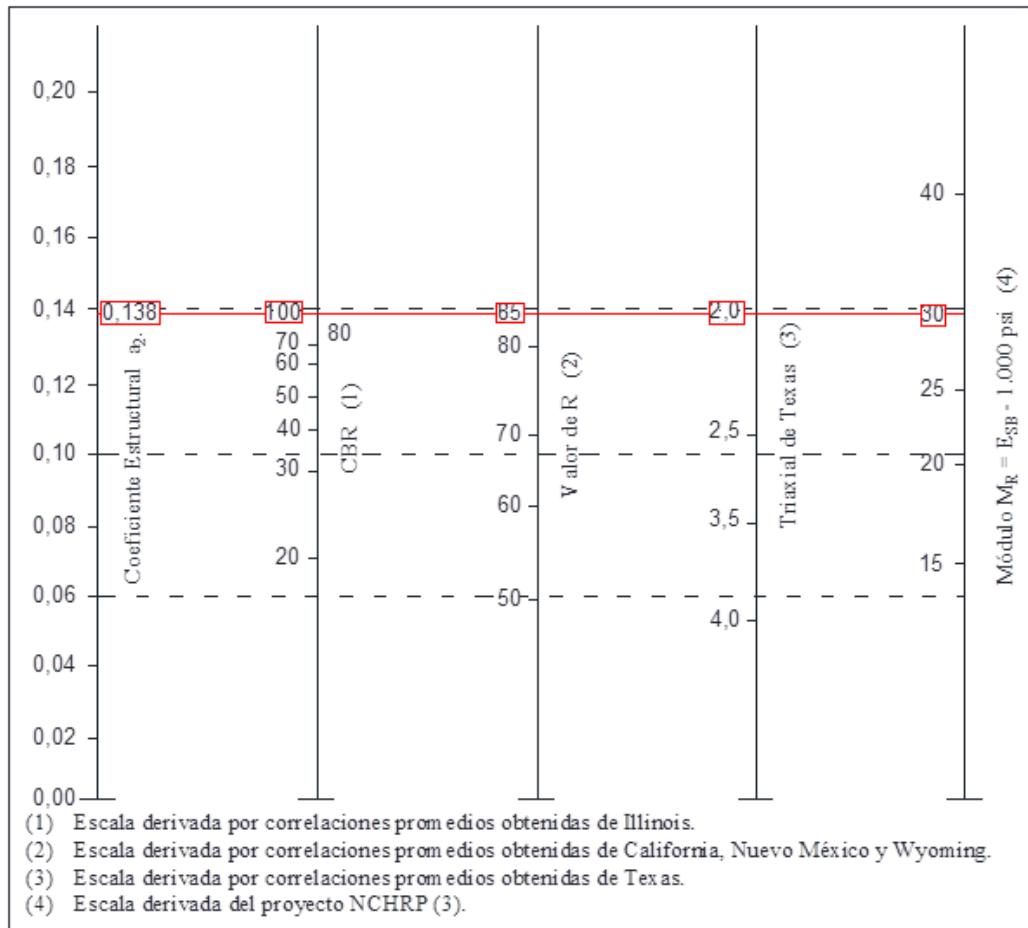
Fuente: Guía AASHTO para el diseño de estructuras de pavimento (1993).

El coeficiente estructural de la capa superficial será igual a:

$$a1 = 0,44 / \text{pulgadas} \quad ; \quad a1 = 0,17 / \text{centímetros}$$

Utilizando el valor de CBR de la capa base (a2) el cual asumiremos como un valor de 100%, estimaremos el coeficiente estructural de la capa base su módulo de resiliencia utilizando la siguiente gráfica:

Figura 36. Variación en el coeficiente estructural de la capa base (a2) con diferentes parámetros de resistencia.



Fuente: Guía AASHTO para el diseño de estructuras de pavimento (1993).

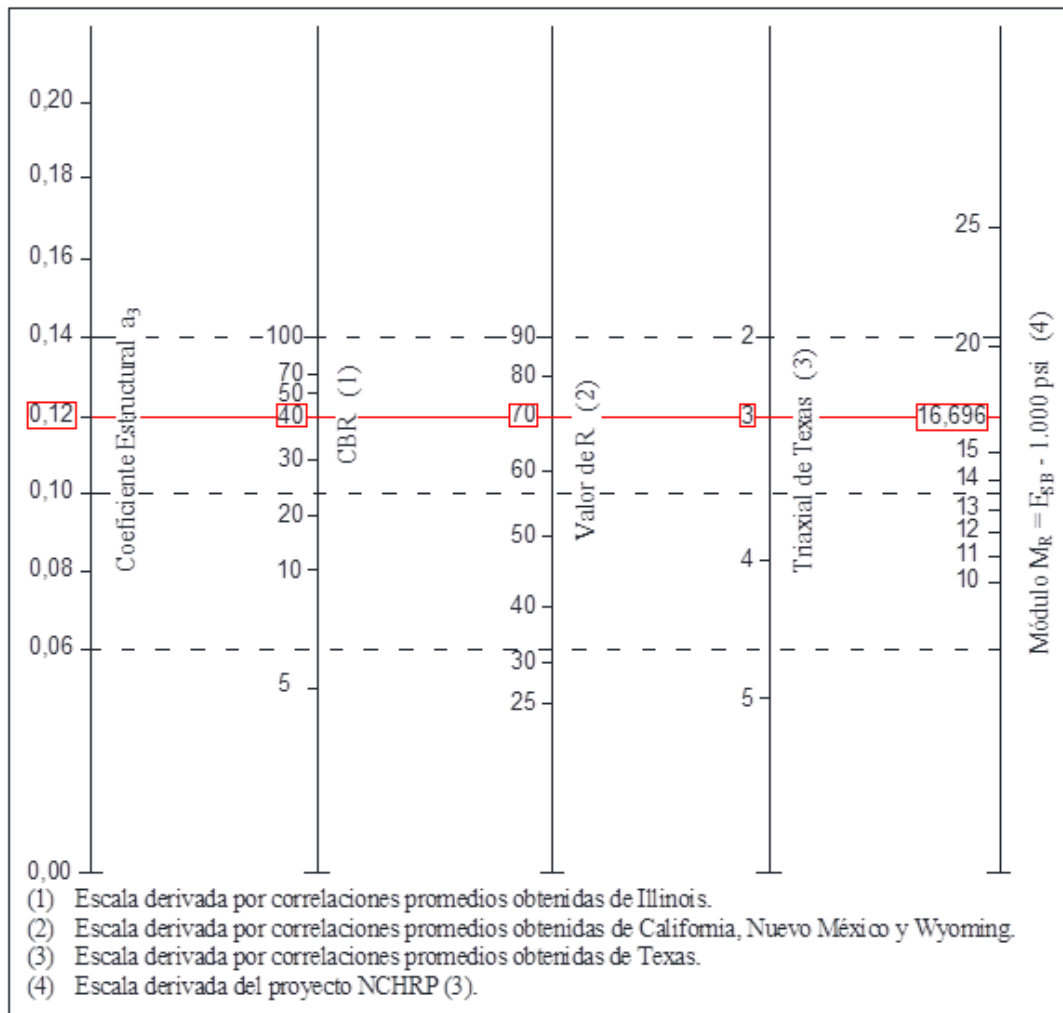
El coeficiente estructural de la capa base (a2) y el módulo de resiliencia tendrán un valor de:

$$a2 = 0,14 / \text{pulgadas} \quad ; \quad a2 = 0,054 / \text{centímetros}$$

$$Mr = 30.000 \text{ psi}$$

Utilizando el valor de CBR de la capa sub base (a3) el cual asumiremos como un valor de 40%, estimaremos el coeficiente estructural de la capa base su módulo de resiliencia utilizando la siguiente gráfica:

Figura 37. Variación en el coeficiente estructural de la capa sub base (a3) con diferentes parámetros de resistencia.



Fuente: Guía AASHTO para el diseño de estructuras de pavimento (1993).

El coeficiente estructural de la capa subbase (a3) y el módulo de resiliencia tendrán un valor de:

$$a_3 = 0,12 / \text{pulgadas} \quad ; \quad a_3 = 0,047 / \text{centímetros}$$

$$M_r = 16.696 \text{ psi}$$

Coeficiente de drenaje

Los coeficientes de drenaje de la capa base (m2) y de la capa subbase (m3) fueron calculados considerando los siguientes puntos:

- La calidad de drenaje de la capa base y subbase se considera como **buena**, asumiendo que el tiempo en que tarda el agua en ser evacuada de cada capa tiene una duración de 1 día.
- El porcentaje de tiempo en el que el pavimento está expuesto a niveles de humedad cercanos a la saturación es de **10,96%**, valor obtenido en base a datos obtenidos de los registros estadísticos del servicio nacional de meteorología e hidrología (SENAMHI).

Conociendo la calidad de drenaje y el porcentaje en el que el pavimento está expuesto a niveles de humedad cercanos a la saturación, dedujimos que los coeficientes de drenaje m2 y m3 tienen un valor de:

$$m2 = m3 = 1,11$$

EL cálculo de los coeficientes de drenaje se puede apreciar a detalle en el **ANEXO IV**.

Cálculo de espesor de la capa superficial. -

Para poder calcular el espesor de la capa de superficial (d1) utilizaremos la misma ecuación y los mismos valores obtenidos anteriormente con la diferencia de que utilizaremos el módulo de resiliencia de la capa base el cual tiene un valor de **Mr = 30.000 psi** e iteraremos para poder determinar el número estructural calculado de la capa de rodadura de la siguiente manera:

$$\log_{10}(W_{18}) = Z_r * S_o + 9,36 * \log_{10}(SN1req. + 1) - 0,20 + \frac{\log_{10}\left(\frac{\Delta PSI}{4,2 - 1,5}\right)}{0,4 + \frac{1094}{(SN1req. + 1)^{5,19}}} + 2,32 * \log_{10}(Mr) - 8,07$$

Donde:

- SN1req = Número estructural requerido de capa superficial.
- W_{18} = Ejes equivalentes. $W_{18} = 1,95 \times 10^5$
- Z_r = Desviación estándar normal. $Z_r = -0,524$
- S_o = Error estándar combinado. $S_o = 0,45$
- ΔPSI = Diferencial de serviciabilidad ($P_o - P_t$). $\Delta PSI = 2,2$

- P_o = Serviciabilidad inicial. $P_o = 4,2$
- P_t = Serviciabilidad final. $P_t = 2$
- M_r = Módulo de resiliencia de la capa base. $M_r = 30.000 \text{ psi}$

Remplazando los datos en la ecuación, iterando y resolviendo la igualdad obtenemos un número estructural requerido de la capa superficial:

$$\mathbf{SN1req. = 1,32}$$

Calculamos el espesor de la capa de rodadura (d_1) con la siguiente ecuación:

$$d_1 = \frac{SN1req.}{a_1}$$

$$d_1 = \frac{1,32}{0,17} = 7,60 \text{ cm}$$

Asumimos un espesor constructivo para la capa superficial:

$$\mathbf{d_1 = 8 \text{ centímetros}}$$

Calculamos el número estructural calculado de la capa de rodadura ($SN1calc$) utilizando como dato el espesor de la capa superficial constructivo:

$$SN1calc = a_1 * d_1$$

$$SN1calc = 0,17 * 8$$

$$\mathbf{SN1calc = 1,39}$$

Realizamos la verificación para saber si el espesor de la capa de rodadura cumple el requerimiento comparando y verificando que el número estructural calculado sea mayor al número estructural requerido:

$$\mathbf{SN1calc > SN1req}$$

$$\mathbf{1,39 > 1,32}$$

¡Cumple!

Según la verificación realizada el espesor de la capa superficial de “**8 centímetros**” cumple con lo requerido.

Cálculo de espesor de la capa base. -

Para poder calcular el espesor de la capa de base (d2) utilizaremos la misma ecuación y los mismos valores obtenidos anteriormente con la diferencia de que utilizaremos el módulo de resiliencia de la capa sub base el cual tiene un valor de $M_r = 16.696$ psi e iteraremos para poder determinar el número estructural calculado de la capa base de la siguiente manera:

$$\log_{10}(W_{18}) = Z_r * S_o + 9,36 * \log_{10}(SN_{2req.} + 1) - 0,20 + \frac{\log_{10}\left(\frac{\Delta PSI}{4,2 - 1,5}\right)}{0,4 + \frac{1094}{(SN_{2req.} + 1)^{5,19}}} + 2,32 * \log_{10}(M_r) - 8,07$$

Donde:

- SN_{2req} = Número estructural requerido de capa base.
- W_{18} = Ejes equivalentes. $W_{18} = 1,95 \times 10^5$
- Z_r = Desviación estándar normal. $Z_r = -0,524$
- S_o = Error estándar combinado. $S_o = 0,45$
- ΔPSI = Diferencial de serviciabilidad ($P_o - P_t$). $\Delta PSI = 2,2$
- P_o = Serviciabilidad inicial. $P_o = 4,2$
- P_t = Serviciabilidad final. $P_t = 2$
- M_r = Módulo de resiliencia de la capa sub base. $M_r = 16.696$ psi

Remplazando los datos en la ecuación, iterando y resolviendo la igualdad obtenemos un número estructural requerido de la capa base:

$$SN_{2req.} = 1,68$$

Calculamos el espesor de la capa base (d2) con la siguiente ecuación:

$$d2 = \frac{SN_{2req} - SN_{1calc}}{a2 * m2}$$
$$d2 = \frac{1,68 - 1,39}{0,054 * 1,11} = 4,95 \text{ cm}$$

Asumimos un espesor constructivo para la capa base:

El espesor mínimo constructivo de la capa base es de 10 centímetros, por lo tanto:

$$d2 = 10 \text{ centímetros}$$

Calculamos el número estructural calculado de la capa base (SN2calc) utilizando como dato el espesor de la capa base constructiva:

$$SN2calc = a2 * d2 * m2 + SN1calc$$

$$SN2calc = 0,054 * 10 * 1,11 + 1,39$$

$$SN2calc = 1,99$$

Realizamos la verificación para saber si el espesor de la capa base cumple el requerimiento comparando y verificando que el número estructural calculado sea mayor al número estructural requerido:

$$SN2calc > SN2req$$

$$1,99 > 1,68$$

¡Cumple!

Según la verificación realizada el espesor de la capa base de “**10 centímetros**” cumple con lo requerido.

Cálculo de espesor de la capa sub base. -

Para poder calcular el espesor de la capa de sub base (d3) utilizaremos la misma ecuación y los mismos valores obtenidos anteriormente con la diferencia de que utilizaremos el módulo de resiliencia de la subrasante el cual tiene un valor de **Mr = 24.065,072 psi** e iteraremos para poder determinar el número estructural calculado de la capa sub base de la siguiente manera:

$$\log_{10}(W_{18}) = Zr * So + 9,36 * \log_{10}(SN3req. + 1) - 0,20 + \frac{\log_{10}\left(\frac{\Delta PSI}{4,2 - 1,5}\right)}{0,4 + \frac{1094}{(SN3req. + 1)^{5,19}}} + 2,32 * \log_{10}(Mr) - 8,07$$

Donde:

- SN3req = Número estructural requerido de capa sub base.
- W₁₈ = Ejes equivalentes. W₁₈ = 1,95x10⁵
- Zr = Desviación estándar normal. Zr = -0,524
- So = Error estándar combinado. So = 0,45
- ΔPSI = Diferencial de serviciabilidad (Po – Pt). ΔPSI = 2,2

- P_o = Serviciabilidad inicial. $P_o = 4,2$
- P_t = Serviciabilidad final. $P_t = 2$
- M_r = Módulo de resiliencia de la subrasante. $M_r = 24.065,072$ psi

Remplazando los datos en la ecuación, iterando y resolviendo la igualdad obtenemos un número estructural requerido de la capa sub base:

$$\mathbf{SN3req. = 1,45}$$

Calculamos el espesor de la capa sub base (d_3) con la siguiente ecuación:

$$d_3 = \frac{SN3req - SN2calc - SN1calc}{a_3 * m_3}$$

$$d_3 = \frac{1,68 - 1,99 - 1,39}{0,047 * 1,11} = -36,85 \text{ cm}$$

Asumimos un espesor constructivo para la capa base:

Debido a que el cálculo del espesor de la capa sub base da un valor negativo asumiremos un espesor igual a:

$$\mathbf{d_3 = 0 \text{ centímetros}}$$

Calculamos el número estructural calculado de la capa sub base ($SN3calc$) utilizando como dato el espesor de la capa sub base constructiva:

$$SN3calc = a_3 * d_3 * m_3 + SN1calc + SN2calc$$

$$SN3calc = 0,047 * 0 * 1,11 + 1,39 + 1,99$$

$$\mathbf{SN3calc = 3,37}$$

Realizamos la verificación para saber si el espesor de la capa sub base cumple el requerimiento comparando y verificando que el número estructural calculado sea mayor al número estructural requerido:

$$\mathbf{SN3calc > SN3req}$$

$$\mathbf{3,37 > 1,4}$$

$$\mathbf{¡Cumple!}$$

Según la verificación realizada el espesor de la capa sub base de “**0 centímetros**” cumple con lo requerido.

Con todos los datos ya obtenidos procedemos a calcular el número estructural calculado:

$$a1 = 0,17 / \text{centímetros}$$

$$d1 = 8 \text{ centímetros}$$

$$a2 = 0,054 / \text{centímetros}$$

$$d2 = 10 \text{ centímetros}$$

$$m2 = 1,11$$

$$a3 = 0,047 / \text{centímetros}$$

$$d3 = 0 \text{ centímetros}$$

$$m3 = 1,11$$

$$SN_{\text{calc}} = a1 * d1 + a2 * d2 * m2 + a3 * d3 * m3$$

$$SN_{\text{calc}} = 0,17 * 8 + 0,054 * 10 * 1,11 + 0,047 * 0 * 1,11$$

$$SN_{\text{calc}} = 1,99$$

Realizamos la verificación para saber si el espesor de las capas cumple el requerimiento comparando y verificando que el número estructural calculado sea mayor al número estructural requerido:

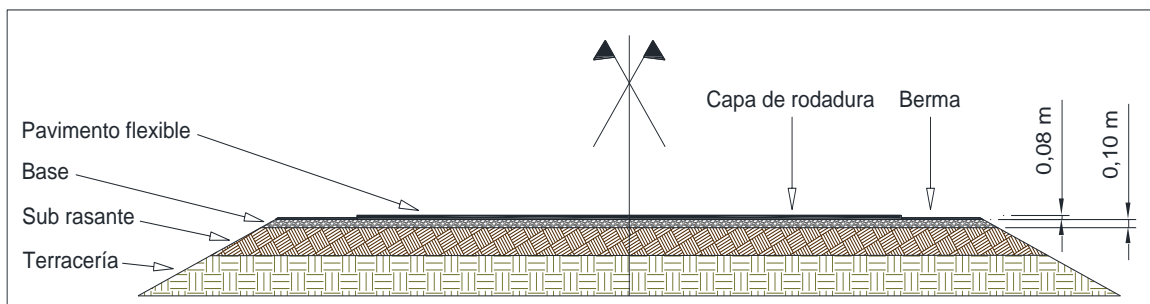
$$SN_{\text{calc}} > SN_{\text{req}}$$

$$1,99 > 1,45$$

¡Cumple!

Según la verificación realizada se dedujo que la capa superficial tendrá un espesor de “8 centímetros” la capa base un espesor de “10 centímetros” y de la capa sub base un espesor de “0 centímetros” con lo cual cumplen lo requerido.

Figura 38. Vista sección transversal pavimento flexible.



Fuente: Elaboración propia.

4.3. Diseño del pavimento rígido método PCA

Para realizar el diseño de espesor de un pavimento rígido se debe seguir el siguiente procedimiento:

Se debe conocer los ejes equivalentes individuales, los cuales según cálculos realizados en el ANEXO III tenemos la siguiente tabla:

Tabla 24. Ejes equivalentes individuales.

Peso en kips por eje	Peso en tonelada por eje	Tiempo 365 días	F _d	F _c	TPDA * FCE	F _{ca}	W ₁₈	W ₁₈
Ejes simples								
2,2	1	365	0,5	1	0,043	12,0061	94	94x10 ⁵
15,43	7	365	0,5	1	36,91	12,0061	566.152	5,66x10 ⁵
22,046	10	365	0,5	1	40,61	12,0061	889.818	8,90x10 ⁵
Ejes tándem								
33,069	15	365	0,5	1	12,41	12,0061	407.799	4,08x10 ⁵
35,27	16	365	0,5	1	8,53	12,0061	299.189	2,99x10 ⁵

Fuente: Elaboración propia.

Asumimos un espesor de losa el cual será de **h = 7,51 pulgadas**.

Con el CBR de nuestra subrasante determinamos que el módulo de reacción combinado tendrá un valor de **k = 395,35 pci**.

Determinamos el módulo de rotura del concreto:

$$M_r = \alpha(f'_c) ; \text{ donde: } 1,99 \leq \alpha \leq 3,18$$

Donde:

- M_r = Módulo de rotura del concreto (psi).
- f'_c = Resistencia a compresión del concreto. (f'_c = 242,84 kg/cm²).
- α = Coeficiente (1,99 ≤ α ≤ 3,18). α = 2,59.

$$M_r = 2,59 * \sqrt{242,84} = 40,36 \frac{kg}{cm^2}$$

$$M_r = 574 \text{ psi}$$

Se debe determinar un factor de seguridad de carga el cual tendrá el valor de:

1,3 en casos especiales con muy altos volúmenes de tráfico pesado y cero mantenimientos.

1,2 para autopistas o vialidades de varios carriles en donde se presentará un flujo ininterrumpido de tráfico y altos volúmenes de tráfico pesado.

1,1 autopistas y vialidades urbanas con volúmenes moderados de tráfico pesado.

1,0 caminos y calles secundarias con muy poco tráfico pesado.

En nuestro caso se trata de un camino o calle secundario con muy poco tráfico, el cual tiene un valor de factor de seguridad de carga **LSF = 1**, por lo tanto, no afectará a la carga por eje.

El diseño del pavimento rígido no cuenta con juntas con pasadores ni bermas de concreto y tendrá un periodo de diseño de **10 años**.

Se determinará el esfuerzo equivalente considerando que no tiene apoyos laterales, para eje sencillo y eje tándem utilizando la siguiente tabla:

Tabla 25. Esfuerzo equivalente – sin apoyo lateral
(eje sencillo / eje tándem / eje trídem).

Espesor de Losa, (pulgadas)	K de la subrasante, pci																				
	50			100			150			200			300			500			700		
	Sen	Tán	Trí	Sen	Tán	Trí	Sen	Tán	Trí	Sen	Tán	Trí	Sen	Tán	Trí	Sen	Tán	Trí	Sen	Tán	Trí
4	825	679	510	726	585	456	671	542	437	634	516	428	584	486	419	523	457	414	484	443	412
4,5	699	586	439	616	500	380	571	460	359	540	435	349	498	406	339	448	378	331	417	363	328
5	602	516	387	531	436	328	493	399	305	467	376	293	432	349	282	390	321	272	363	307	269
5,5	526	461	347	464	387	290	431	353	266	409	331	253	379	305	240	343	278	230	320	264	226
6	465	416	315	411	348	261	382	316	237	362	296	223	336	271	209	304	246	198	285	232	193
6,5	417	380	289	367	317	238	341	286	214	324	267	201	300	244	186	273	220	173	256	207	168
7	375	349	267	331	290	219	307	262	196	292	244	183	272	222	167	246	199	154	231	186	148
7,5	340	323	247	300	268	203	279	241	181	265	224	168	246	203	153	224	181	139	210	169	132
8	311	300	230	274	249	189	255	223	168	242	208	156	225	188	141	205	167	126	192	155	120
8,5	285	281	215	252	232	177	234	208	158	222	193	145	206	174	131	188	154	116	177	143	109
9	264	264	200	232	218	166	216	195	148	205	181	136	190	163	122	174	144	108	163	133	101
9,5	245	248	187	215	205	157	200	183	140	190	170	129	176	153	115	161	134	101	151	124	93
10	228	235	174	200	193	148	186	173	132	177	160	122	164	144	108	150	126	95	141	117	87
10,5	213	222	163	187	183	140	174	164	125	165	151	115	153	136	103	140	119	89	132	110	82
11	200	211	153	175	174	132	163	155	119	154	143	110	144	129	98	131	113	85	123	104	78
11,5	188	201	142	165	165	125	153	148	113	145	136	104	135	122	93	123	107	80	116	98	74
12	177	192	133	155	158	119	144	141	108	137	130	100	127	116	89	116	102	77	109	93	70
12,5	168	183	123	147	151	113	136	135	103	129	124	95	120	111	85	109	97	73	103	89	67
13	159	176	114	139	144	107	129	129	98	122	119	91	113	106	81	103	93	70	97	85	64
13,5	152	168	105	132	138	101	122	123	93	116	114	87	107	102	78	98	89	67	92	81	61
14	144	162	97	125	133	96	116	118	89	110	109	83	102	98	75	93	85	65	88	78	59

Fuente: Fuente: Manual de pavimento de concreto CEMEX.

Interpolando obtendremos para un eje sencillo un esfuerzo equivalente de 235,030 pci y para un eje tándem un esfuerzo equivalente de 192,16 pci.

Se calcula el factor de relación de esfuerzos dividiendo el módulo de rotura del concreto con el esfuerzo equivalente:

Para el eje sencillo tendremos un factor de relación de esfuerzos de $235,030 / 574,045 = 0,41$.

Para el eje tándem tendremos un factor de relación de esfuerzos de $192,16 / 574,045 = 0,33$.

Se determinará el factor de erosión considerando que no tiene apoyos laterales ni pasa juntas, para eje sencillo y eje tándem utilizando la siguiente tabla:

Tabla 26. Factor de erosión – sin pasa juntas – sin apoyo lateral
(eje sencillo / eje tándem / eje trídem).

Espesor de Losa, (pulgadas)	K de la subrasante, pci																	
	50			100			200			300			500			700		
	Sen	Tán.	Trí.	Sen	Tán.	Trí.	Sen	Tán.	Trí.	Sen	Tán.	Trí.	Sen	Tán.	Trí.	Sen	Tán.	Trí.
4	3,94	4,03	4,06	3,91	3,95	3,97	3,88	3,89	3,88	3,86	3,86	3,82	3,82	3,83	3,74	3,77	3,8	3,67
4,5	3,79	3,91	3,95	3,76	3,82	3,85	3,73	3,75	3,76	3,71	3,72	3,7	3,68	3,68	3,63	3,64	3,65	3,56
5	3,66	3,81	3,85	3,63	3,72	3,75	3,6	3,64	3,66	3,58	3,6	3,6	3,55	3,55	3,52	3,52	3,52	3,46
5,5	3,54	3,72	3,76	3,51	3,62	3,66	3,48	3,53	3,56	3,46	3,49	3,51	3,43	3,44	3,43	3,41	3,4	3,37
6	3,44	3,64	3,68	3,4	3,53	3,58	3,37	3,44	3,48	3,35	3,4	3,42	3,32	3,34	3,35	3,3	3,3	3,29
6,5	3,34	3,56	3,61	3,3	3,46	3,5	3,26	3,36	3,4	3,25	3,31	3,34	3,22	3,25	3,27	3,2	3,21	3,21
7	3,26	3,49	3,54	3,21	3,39	3,43	3,17	3,29	3,33	3,15	3,24	3,27	3,13	3,17	3,2	3,11	3,13	3,14
7,5	3,18	3,43	3,48	3,13	3,32	3,37	3,09	3,22	3,26	3,07	3,17	3,2	3,04	3,1	3,13	3,02	3,06	3,08
8	3,11	3,37	3,42	3,05	3,26	3,31	3,01	3,16	3,2	2,99	3,1	3,14	2,96	3,03	3,07	2,94	2,99	3,01
8,5	3,04	3,32	3,37	2,98	3,21	3,25	2,93	3,1	3,15	2,91	3,04	3,09	2,88	2,97	3,01	2,87	2,93	2,96
9	2,98	3,27	3,32	2,91	3,16	3,2	2,86	3,05	3,09	2,84	2,99	3,03	2,81	2,92	2,95	2,79	2,87	2,9
9,5	2,92	3,22	3,27	2,85	3,11	3,15	2,8	3,00	3,04	2,77	2,94	2,98	2,75	2,86	2,9	2,73	2,81	2,85
10	2,86	3,18	3,22	2,79	3,06	3,11	2,74	2,95	3,00	2,71	2,89	2,93	2,68	2,81	2,85	2,66	2,76	2,8
10,5	2,81	3,14	3,18	2,74	3,02	3,06	2,68	2,91	2,95	2,65	2,84	2,89	2,62	2,76	2,81	2,6	2,72	2,76
11	2,77	3,1	3,14	2,69	2,98	3,02	2,63	2,86	2,91	2,6	2,8	2,84	2,57	2,72	2,77	2,54	2,67	2,71
11,5	2,72	3,06	3,1	2,64	2,94	2,98	2,58	2,82	2,87	2,55	2,76	2,8	2,51	2,68	2,72	2,49	2,63	2,67
12	2,68	3,03	3,07	2,6	2,9	2,95	2,53	2,78	2,83	2,5	2,72	2,76	2,46	2,64	2,68	2,44	2,59	2,63
12,5	2,64	2,99	3,03	2,55	2,87	2,91	2,48	2,75	2,79	2,45	2,68	2,73	2,41	2,6	2,65	2,39	2,55	2,59
13	2,6	2,96	3	2,51	2,83	2,88	2,44	2,71	2,76	2,4	2,65	2,69	2,36	2,56	2,61	2,34	2,51	2,56
13,5	2,56	2,93	2,97	2,47	2,8	2,84	2,4	2,68	2,73	2,36	2,61	2,66	2,32	2,53	2,58	2,3	2,48	2,52
14	2,53	2,9	2,94	2,44	2,77	2,81	2,36	2,65	2,69	2,32	2,58	2,63	2,28	2,5	2,54	2,25	2,44	2,49

Fuente: Manual de pavimento de concreto CEMEX.

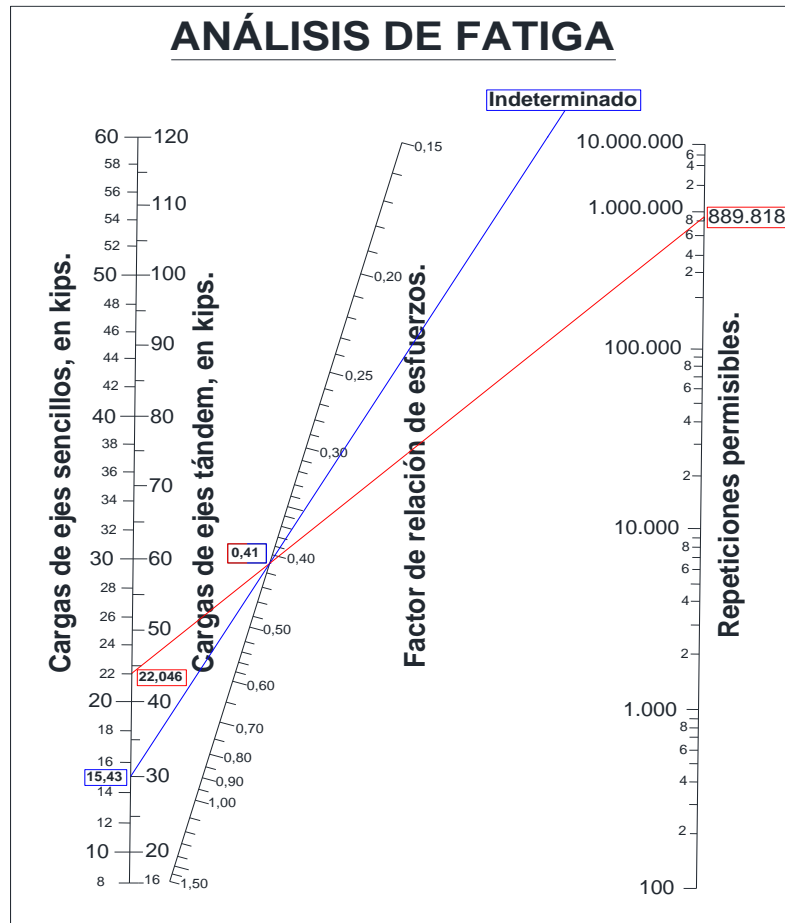
Interpolando obtendremos para un eje sencillo un esfuerzo equivalente de 3,054 pci y para un eje tándem un esfuerzo equivalente de 3,13 pci.

Para determinar si el espesor adoptado cumplirá la demanda se procede a realizar un análisis de fatiga y de erosión para los cuales se utilizan ábacos.

Análisis por fatiga. -

Análisis de fatiga para ejes sencillos utilizando el grafico para los ejes de 15,43 kips y 22,046 kips y su factor de relación de esfuerzos de 0,41:

Figura 39. Análisis de fatiga ejes simples (repeticiones permisibles basadas en el factor de relación de esfuerzo, con o sin apoyo lateral).

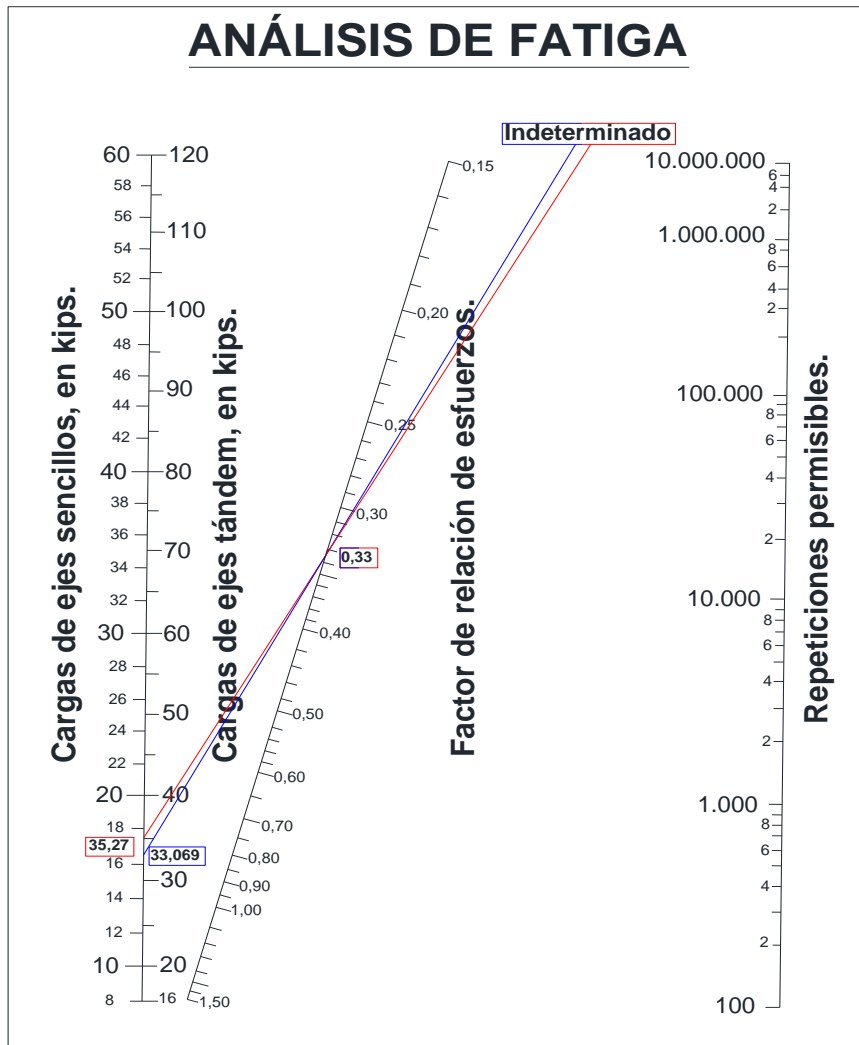


Fuente: Elaboración propia en base a manual de pavimento de concreto CEMEX.

Interpretando los valores del grafico podemos expresar que las repeticiones permitidas para el eje de 15,43 kips es indeterminado por lo tanto tiene 0% en porcentaje de fatiga y para el eje de 22,046 kips un numero de repeticiones permitidas de 889.818 por lo tanto tiene 100% en porcentaje de fatiga.

Análisis de fatiga para ejes tándem utilizando el grafico para los ejes de 33,069 kips y 35,27 kips y su factor de relación de esfuerzos de 0,33:

Figura 40. Análisis de fatiga ejes tándem (repeticiones permisibles basadas en el factor de relación de esfuerzo, con o sin apoyo lateral).



Fuente: Elaboración propia en base a manual de pavimento de concreto CEMEX.

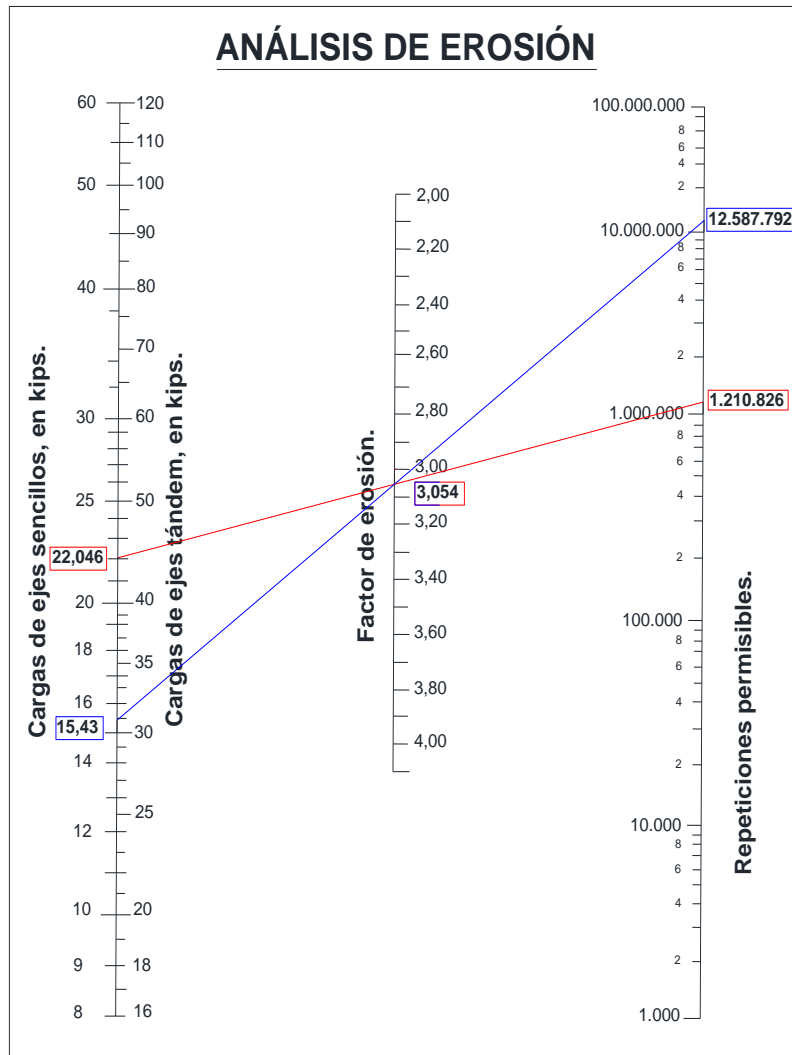
Interpretando los valores del gráfico podemos expresar que las repeticiones permitidas para el eje de 15,43 kips es indeterminado por lo tanto tiene 0% en porcentaje de fatiga y para el eje de 22,046 kips también es indeterminado por lo tanto tiene 0% en porcentaje de fatiga.

Sumando todos los porcentajes de fatiga obtenemos un porcentaje acumulado de 100%, por lo tanto, el espesor asumido del pavimento cumple la demanda a la que el pavimento será sometido.

Análisis por erosión. -

Análisis de erosión para ejes sencillos utilizando el grafico para los ejes de 15,43 kips y 22,046 kips y su factor de erosión de 3,054:

Figura 41. Análisis de erosión ejes simples. (Repeticiones permisibles basadas en el factor de erosión, sin apoyo lateral).

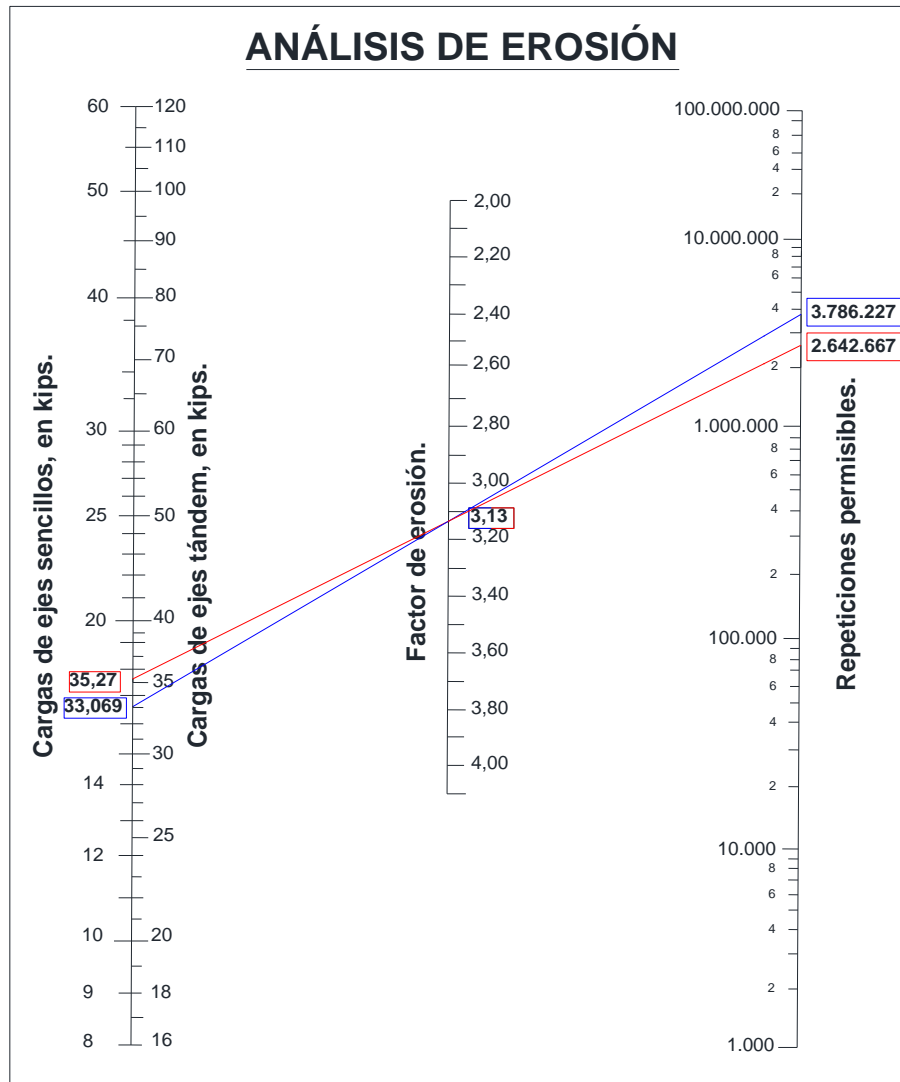


Fuente: Elaboración propia en base a manual de pavimento de concreto CEMEX.

Interpretando los valores del gráfico podemos expresar que las repeticiones permitidas para el eje de 15,43 kips es de 12.587.792 por lo tanto tiene 4,5% en porcentaje de erosión y para el eje de 22,046 kips es de 1.210.826 por lo tanto tiene 73,5% en porcentaje de erosión.

Análisis de erosión para ejes tándem utilizando el grafico para los ejes de 33,069 kips y 35,27 kips y su factor de relación de erosión de 3,13:

Figura 42. Análisis de erosión ejes tándem. (Repeticiones permisibles basadas en el factor de erosión, sin apoyo lateral).



Fuente: Elaboración propia en base a manual de pavimento de concreto CEMEX.

Interpretando los valores del grafico podemos expresar que las repeticiones permitidas para el eje de 33,069 kips es de 2.642.667 por lo tanto tiene 11% en porcentaje de fatiga y para el eje de 35,27 kips también es de 3.786.227 por lo tanto tiene 11% en porcentaje de fatiga.

Sumando todos los porcentajes de erosión obtenemos un valor total de 100%, por lo tanto, el espesor de 7,51 pulgadas cumple la demanda a la que el pavimento será sometido.

Tabla 27. Resultados del pavimento rígido calculado por el método PCA.

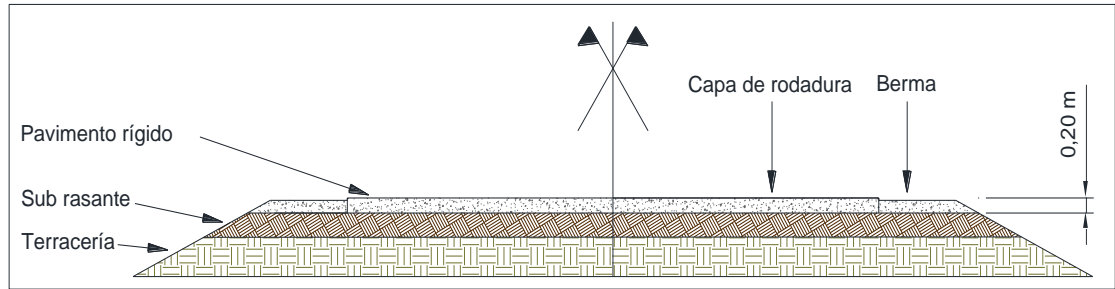
Cálculo de espesor del pavimento rígido método PCA						
Espesor de la losa (h):		7,51 pulgadas		Juntas con pasadores:		NO
Módulo de reacción combinado (Kc):		395,35 pci		Bermas de concreto:		NO
Resistencia característica del C° (f'c):		3454 psi		Periodo de diseño (PD):		10 años
Módulo de ruptura del C° (Mr):		574 psi		Factor de seguridad de carga (LSF):		1,00
Carga por eje (KIPS)	Multiplicado por LSF	Repeticiones esperadas	Análisis de fatiga		Análisis de erosión	
			Repeticiones permitidas	Porcentaje de fatiga	Repeticiones permitidas	Porcentaje de erosión
Eje sencillo						
Esfuerzo equivalente:			235,030	Factor de erosión:		3,054
Factor de relación de esfuerzo:			0,41			
2,20	2,2046	94	indeterminado	0%	indeterminado	0%
15,43	15,4322	566.152	indeterminado	0%	12.587.792	4,5%
22,046	22,046	889.818	889.818	100%	1.210.826	73,5%
Eje tándem						
Esfuerzo equivalente:			192,16	Factor de erosión:		3,13
Factor de relación de esfuerzo:			0,33			
33,069	33,069	407.799	indeterminado	0%	3.786.227	11%
35,27	35,2736	299.189	indeterminado	0%	2.642.667	11%
			Daño total por fatiga:	100%	Daño total por erosión:	100%

Fuente: Elaboración propia.

Resultados. –

Dado que los daños totales por fatiga y erosión no son mayores al 100%, el diseño con espesor de losa de 19,080 centímetros (7,51 pulgadas), resistencia característica de 242,84 kg/cm² (3.454 psi) y módulo de rotura igual a 40,36 kg/cm² (574 psi) es adecuado, sin embargo, se adoptará un espesor constructivo de **20 centímetros** y una resistencia característica igual a 250 kg/cm².

Figura 43. Vista sección transversal pavimento rígido.



Fuente: Elaboración propia.

4.4. Diseño del tratamiento superficial simple método Linckenheyl

Para realizar el diseño de un tratamiento superficial simple se debe seguir el siguiente procedimiento:

El diseño de un tratamiento superficial simple y la determinación de su espesor de capa de rodadura, depende fundamentalmente de la granulometría del agregado a emplearse. A continuación, se muestran algunas granulometrías o requisitos de gradación para el diseño del tratamiento superficial simple para el cual asumimos la gradación C.

Tabla 28. Gradación de agregados para tratamientos superficiales.

Designación de tamices	Gradación de los agregados (% que pasa)				
	A	B	C	D	E
2"	100	-	-	-	-
1 1/2"	97 - 100	100	-	-	-
1"	-	97 - 100	100	-	-
3/4"	66 - 80	-	97 - 100	100	-
1/2"	-	-	76 - 88	97 - 100	100
3/8"	48 - 60	53 - 70	-	-	90 - 100
Nº 4	33 - 45	40 - 52	49 - 59	57 - 69	55 - 85
Nº 8	25 - 33	25 - 39	36 - 45	41 - 49	32 - 67
Nº 16	-	-	-	-	23 - 52
Nº 30	-	-	-	-	15 - 37
Nº 40	9 - 17	10 - 19	14 - 22	14 - 22	-
Nº 50	-	-	-	-	7 - 23
Nº 100	-	-	-	-	5 - 16
Nº 200	3 - 8	3 - 8	3 - 7	3 - 8	2 - 10

Fuente: Manual básico de emulsiones asfálticas.

Para el cálculo de agregado pétreo se realiza el siguiente procedimiento:

$$A = \frac{D + d}{2}$$

Donde:

- A = Tamaño medio del árido (mm).
- D = Tamaño máximo del árido (mm). **D = 19 mm.**
- d = Tamaño mínimo del árido (mm). **d = 5 mm.**

Se considera como tamaño máximo al árido retenido en el tamiz de mayor tamaño de abertura, y como tamaño mínimo al material que pase el 50%.

$$A = \frac{19 + 5}{2}$$

$$A = 12 \text{ mm}$$

Calculamos la cantidad de áridos ($Q = \text{kg/m}^2$), utilizando la siguiente ecuación:

$$Q = 0,9 * A$$

$$Q = 0,9 * 12$$

$$Q = 10,80 \text{ kg/m}^2$$

La cantidad de ligante ($L = \text{l/m}^2$), utilizando la siguiente ecuación:

$$L = 0,10 * Q$$

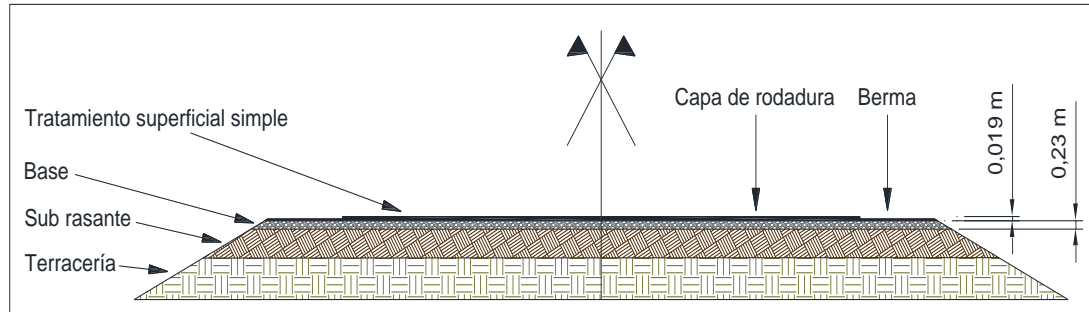
$$L = 0,10 * 10,80$$

$$L = 1,08 \text{ l/m}^2$$

El tratamiento superficial simple se lo realizará con $10,80 \text{ kg/m}^2$ de árido con granulometría tipo C y $1,08 \text{ l/m}^2$ de emulsión MC-30.

El espesor de la capa de rodadura para el tratamiento superficial simple será asumido como la partícula de mayor dimensión, la cual en este caso es la retenida en el tamiz 3/4" por lo tanto su espesor de la capa de rodadura del tratamiento superficial simple es de **1,90 cm** o 0,019 m.

Figura 44. Vista transversal tratamiento superficial simple.



Fuente: Elaboración propia.

4.5. Diseño de afirmado método NAASRA

Para el dimensionamiento del espesor de la capa de afirmado se manejará el método de NAASRA (National Association of Australian State Road Authorities) el cual utiliza la siguiente ecuación:

$$h = (219 - 211 * \log(CBR) + 58 * (\log(CBR))^2) * \log\left(\frac{W_{18}}{120}\right)$$

Donde:

- h = Espesor de la capa de afirmado en mm.
- CBR = Valor del CBR de la subrasante.
- W_{18} = Ejes equivalentes.

El CBR de la subrasante en el tramo estudiado fue determinado mediante ensayos realizados en laboratorio de suelos el cual tuvo un valor de:

$$\text{CBR} = 39,07 \%$$

Realizamos el conteo de vehículos en el tramo estudiado, calculamos el número de ejes equivalentes (W_{18}) con un periodo de diseño de **PD = 5 años**, dando como resultado un valor total de:

$$W_{18} = 7,88 \times 10^4$$

El cálculo de numero de ejes equivalentes podemos verlo a detalle en el **ANEXO III**.

Una vez determinados los valores de CBR y el número de repeticiones de EE para el carril de diseño (Nrep), reemplazamos los datos en la ecuación propuesta por NAASRA para poder determinar el espesor de la capa de afirmado.

$$h = (219 - 211 * \log(CBR) + 58 * (\log(CBR))^2) * \log\left(\frac{W_{18}}{120}\right)$$

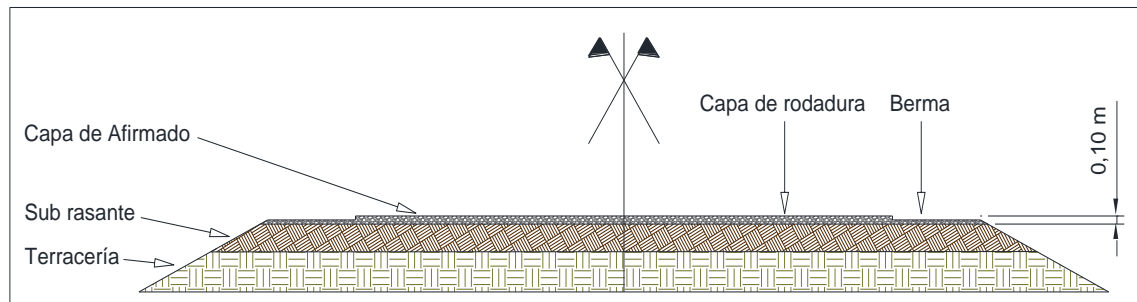
$$h = (219 - 211 * \log(39,07) + 58 * (\log(39,07))^2) * \log\left(\frac{7,88 \times 10^4}{120}\right)$$

$$h = 84,77 \text{ mm}$$

$$h = 8,48 \text{ cm}$$

El espesor calculado para la capa de afirmado es de 8,48 centímetros, pero se asumirá un espesor constructivo de **10 centímetros** ya que de acuerdo al manual de especificaciones técnicas de la ABC el espesor mínimo para una capa de afirmado debe ser de 10 centímetros.

Figura 45. Vista sección transversal del afirmado.



Fuente: Elaboración propia.

4.6. Análisis del precio unitario del pavimento unicapa

El análisis del precio unitario del pavimento unicapa lo podemos apreciar en la siguiente tabla:

Tabla 29. Análisis de precios unitarios del pavimento unicapa.

Análisis de precio unitario del pavimento unicapa					
Datos generales					
Proyecto:	Proyecto de grado				
Actividad:	Pavimento unicapa (PD = 10 años) (h = 18,00 cm)				
Cantidad:	1,00				
Unidad:	m ²				
Moneda:	Bolivianos (Bs.)				
1.- Materiales					
Nº	Descripción	Unidad	Cantidad	Precio productivo	Costo total
1	Cemento Portland	kg	57,42	1,00	57,42
1	Agua	m ³	0,03	5,00	0,15
Total de materiales:					57,57
2.- Mano de obra					
Nº	Descripción	Unidad	Cantidad	Precio productivo	Costo total
1	Albañil	hr	0,070	18,75	1,31
2	Ayudante	hr	0,070	15,00	1,05
3	Operador de equipo pesado	hr	0,060	22,50	1,35
4	Chofer	hr	0,035	18,75	0,66
Subtotal de mano de obra:					4,37
Cargas sociales = (55,00% del subtotal de mano de obra):					2,40
Impuestos IVA = (14,94% de subtotal mano de obra + cargas sociales):					1,01
Total de mano de obra:					7,78
3.- Equipo, maquinaria y herramientas					
Nº	Descripción	Unidad	Cantidad	Precio productivo	Costo total
1	Motoniveladora	hr	0,030	418,20	12,55
2	Camión cisterna	hr	0,015	180,00	2,70
3	Compactador de rodillo pata de cabra	hr	0,015	278,80	4,18
4	Compactador de rodillo liso	hr	0,015	278,80	4,18
5	Camión	hr	0,020	120,00	2,40
Herramientas = (5,00% del total de mano de obra):					0,39
Total equipo, maquinaria y herramientas:					26,40
4.- Gastos generales y administrativos					
Costo total					
Gastos generales (5% de 1+2+3+4):					4,59
Total gastos generales y administrativos:					4,59
5.- Utilidad					
Costo total					
Utilidad (5% de 1+2+3+4):					4,82
Total utilidad:					4,82
6.- Impuestos					
Costo total					
Utilidad IT (3,09% de 1+2+3+4+5):					3,13
Total impuestos:					3,13
Total precio unitario (1+2+3+4+5+6):					104,28
Total precio unitario adoptado:					104,28

Fuente: Elaboración propia.

El precio unitario para la construcción del pavimento unicapa de alto desempeño con una altura de 18 centímetros es **de 104,28 Bs/m²**. Los precios de los materiales, mano de obra y equipo que involucra realizar el pavimento unicapa se consultaron en el mercado local e información brindada por ingenieros dedicados a la construcción.

4.7. Análisis de precios unitarios del pavimento flexible

El análisis de precios unitarios del pavimento flexible lo podemos apreciar en la siguiente tabla:

Tabla 30. Análisis de precios unitarios del pavimento flexible.

Análisis de precio unitario del pavimento flexible					
Datos generales					
Proyecto:	Proyecto de grado				
Actividad:	Pavimento flexible (PD = 10 años) (h = 18,00 cm)				
Cantidad:	1,00				
Unidad:	m ²				
Moneda:	Bolivianos (Bs.)				
1.- Materiales					
Nº	Descripción	Unidad	Cantidad	Precio productivo	Costo total
1	Cemento asfáltico 85-100	kg	5,82	10,00	58,20
2	Grava	m ³	0,020	130,00	2,60
3	Gravilla	m ³	0,024	150,00	3,60
4	Arena	m ³	0,030	125,00	3,80
5	Material granular para capa base	m ³	0,10	80,00	8,00
6	Emulsión asfáltica	kg	1,30	5,45	7,09
7	Agua	m ³	0,070	5,00	0,35
Total de materiales:					83,64
2.- Mano de obra					
Nº	Descripción	Unidad	Cantidad	Precio productivo	Costo total
1	Albañil	hr	0,08	18,75	1,50
2	Ayudante	hr	0,08	15,00	1,20
3	Operador de planta	hr	0,10	18,75	1,88
4	Operador de equipo pesado	hr	0,065	22,50	1,46
5	Chofer	hr	0,060	18,75	1,13
Subtotal de mano de obra:					7,16
Cargas sociales = (55,00% del subtotal de mano de obra):					3,94
Impuestos IVA = (14,94% de subtotal mano de obra + cargas sociales):					1,66
Total de mano de obra:					12,76
3.- Equipo, maquinaria y herramientas					
Nº	Descripción	Unidad	Cantidad	Precio productivo	Costo total
1	Camión Volquete	hr	0,015	180,00	2,70
2	Camión cisterna	hr	0,015	180,00	2,70
3	Compactador de rodillo pata de cabra	hr	0,020	278,80	5,58
4	Barredora mecánica	hr	0,015	209,10	3,14
5	Camión imprimador	hr	0,015	278,80	4,18
6	Micropavimentadora	hr	0,10	278,80	27,88
7	Compactador de rodillo liso	hr	0,015	278,80	4,18
8	Compactador de rodillo neumático	hr	0,015	278,80	4,18
9	Motoniveladora	hr	0,015	418,20	6,27
Herramientas = (5,00% del total de mano de obra):					0,64
Total equipo, maquinaria y herramientas:					61,45
4.- Gastos generales y administrativos					
Costo total					
Gastos generales (5% de 1+2+3):					7,89
Total gastos generales y administrativos:					7,89
5.- Utilidad					
Costo total					
Utilidad (5% de 1+2+3+4):					8,29
Total utilidad:					8,29
6.- Impuestos					
Costo total					
Utilidad IT (3,09% de 1+2+3+4+5):					5,38
Total impuestos:					5,38
Total precio unitario (1+2+3+4+5+6):					179,40
Total precio unitario adoptado:					179,40

Fuente: Elaboración propia.

El precio unitario para la construcción del pavimento flexible con una altura de 18 centímetros es de **179,40 Bs/m²**. Los precios de los materiales, mano de obra y equipo que involucra realizar el pavimento flexible se consultaron en el mercado local e información brindada por ingenieros dedicados a la construcción.

4.8. Análisis de precios unitarios del pavimento rígido

El análisis de precios unitarios del pavimento rígido lo podemos apreciar en la siguiente tabla:

Tabla 31. Análisis de precios unitarios del pavimento rígido.

Análisis de precio unitario del pavimento rígido					
Datos generales					
Proyecto:	Proyecto de grado				
Actividad:	Pavimento rígido (PD = 10 años ; f'c = 250 kg/cm ² ; h = 20,00 cm)				
Cantidad:	1,00				
Unidad:	m ²				
Moneda:	Bolivianos (Bs.)				
1.- Materiales					
Nº	Descripción	Unidad	Cantidad	Precio productivo	Costo total
1	Cemento portland	kg	76,00	1,00	76,00
2	Arena	m ³	0,050	125,00	6,20
3	Grava	m ³	0,086	130,00	11,20
4	Agua	m ³	0,040	5,00	0,20
5	Sellador de juntas	kg	0,35	12,60	4,41
6	Antisol	lt	0,20	18,20	3,64
7	Acero corrugado	kg	4,30	7,50	32,25
Total de materiales:					133,90
2.- Mano de obra					
Nº	Descripción	Unidad	Cantidad	Precio productivo	Costo total
1	Albañil	hr	0,15	18,75	2,81
2	Ayudante	hr	0,15	15,00	2,25
3	Operador de equipo pesado	hr	0,10	22,50	2,25
4	Operador de equipo liviano	hr	0,060	18,75	1,13
5	Chofer	hr	0,030	18,75	0,56
Subtotal de mano de obra:					9,00
Cargas sociales = (55,00% del subtotal de mano de obra):					4,95
Impuestos IVA = (14,94% de subtotal mano de obra + cargas sociales):					2,08
Total de mano de obra:					16,03
3.- Equipo, maquinaria y herramientas					
Nº	Descripción	Unidad	Cantidad	Precio productivo	Costo total
1	Camión mixer	hr	0,10	243,95	24,40
3	Vibrador de inmersión	hr	0,030	25,00	0,75
4	Cortador de hormigón	hr	0,045	70,00	3,15
5	Camión cisterna	hr	0,030	180,00	5,40
Herramientas = (5,00% del total de mano de obra):					0,80
Total equipo, maquinaria y herramientas:					34,50
4.- Gastos generales y administrativos					
Costo total					
Gastos generales (5% de 1+2+3):					9,22
Total gastos generales y administrativos:					9,22
5.- Utilidad					
Costo total					
Utilidad (5% de 1+2+3+4):					9,68
Total utilidad:					9,68
6.- Impuestos					
Costo total					
Utilidad IT (3,09% de 1+2+3+4+5):					6,28
Total impuestos:					6,28
Total precio unitario (1+2+3+4+5+6):					209,62
Total precio unitario adoptado:					209,62

Fuente: Elaboración propia.

El precio unitario para la construcción del pavimento rígido con una altura de 20 centímetros es de **209,62 Bs/m²**. Los precios de los materiales, mano de obra y equipo que involucra realizar el pavimento rígido se consultaron en el mercado local e información brindada por ingenieros dedicados a la construcción.

4.9. Análisis de precios unitarios del tratamiento superficial simple

El análisis de precios unitarios del tratamiento superficial simple lo podemos apreciar en la siguiente tabla:

Tabla 32. Análisis de precios unitarios del tratamiento superficial simple.

Análisis de precio unitario del tratamiento superficial simple					
Datos generales					
Proyecto:	Proyecto de grado				
Actividad:	Tratamiento superficial (PD = 5 años) (h = 1,90 cm)				
Cantidad:	1,00				
Unidad:	m ²				
Monea:	Bolivianos (Bs.)				
1.- Materiales					
Nº	Descripción	Unidad	Cantidad	Precio productivo	Costo total
1	Emulsión asfáltica MC-30	l	1,35	7,50	10,13
2	Gravilla	m ³	0,008	150,00	1,20
Total de materiales:					11,33
2.- Mano de obra					
Nº	Descripción	Unidad	Cantidad	Precio productivo	Costo total
1	Albañil	hr	0,030	18,75	0,56
2	Ayudante	hr	0,030	15,00	0,45
3	Operador de planta	hr	0,015	18,75	0,28
4	Operador de equipo pesado	hr	0,060	22,50	1,35
5	Chofer	hr	0,060	18,75	1,13
Subtotal de mano de obra:					3,77
Cargas sociales = (55,00% del subtotal de mano de obra):					2,07
Impuestos IVA = (14,94% de subtotal mano de obra + cargas sociales):					0,87
Total de mano de obra:					6,71
3.- Equipo, maquinaria y herramientas					
Nº	Descripción	Unidad	Cantidad	Precio productivo	Costo total
1	Barredora mecánica	hr	0,015	209,10	3,14
2	Camión imprimador	hr	0,015	278,80	4,18
3	Camión Volquete	hr	0,030	180,00	5,40
4	Compactador de rodillo neumático	hr	0,030	278,80	8,36
5	Motoniveladora	hr	0,030	418,20	12,55
Herramientas = (5,00% del total de mano de obra):					0,34
Total equipo, maquinaria y herramientas:					33,96
4.- Gastos generales y administrativos					
Costo total					
Gastos generales (5% de 1+2+3):					2,60
Total gastos generales y administrativos:					2,60
5.- Utilidad					
Costo total					
Utilidad (5% de 1+2+3+4):					2,73
Total utilidad:					2,73
6.- Impuestos					
Costo total					
Utilidad IT (3,09% de 1+2+3+4+5):					1,77
Total impuestos:					1,77
Total precio unitario (1+2+3+4+5+6):					59,11
Total precio unitario adoptado:					59,11

Fuente: Elaboración propia.

El precio unitario para la construcción del tratamiento superficial simple con una altura de 1,90 centímetros es de **59,11 Bs/m²**. Los precios de los materiales, mano de obra y equipo que involucra realizar el tratamiento superficial simple se consultaron en el mercado local e información brindada por ingenieros dedicados a la construcción.

4.10. Análisis de precios unitarios del afirmado

El análisis de precios unitarios del afirmado lo podemos apreciar en la siguiente tabla:

Tabla 33. Análisis de precios unitarios del afirmado.

Análisis de precio unitario del afirmado					
Datos generales					
Proyecto:	Proyecto de grado				
Actividad:	Afirmado		(PD = 5 años)	(h = 10,00 cm)	
Cantidad:	1,00				
Unidad:	m ²				
Moneda:	Bolivianos (Bs.)				
1.- Materiales					
N°	Descripción	Unidad	Cantidad	Precio productivo	Costo total
1	Material granular para afirmado	m ³	0,10	70,00	7,00
2	Agua	m ³	0,031	5,00	0,16
Total de materiales:					7,16
2.- Mano de obra					
N°	Descripción	Unidad	Cantidad	Precio productivo	Costo total
1	Operador de equipo pesado	hr	0,060	22,50	1,35
2	Abañil	hr	0,015	18,75	0,28
3	Ayudante	hr	0,015	15,00	0,23
4	Chofer	hr	0,030	18,75	0,56
Subtotal de mano de obra:					2,42
Cargas sociales = (55,00% del subtotal de mano de obra):					1,33
Impuestos IVA = (14,94% de subtotal mano de obra + cargas sociales):					0,56
Total de mano de obra:					4,31
3.- Equipo, maquinaria y herramientas					
N°	Descripción	Unidad	Cantidad	Precio productivo	Costo total
1	Camión Volquete	hr	0,015	180,00	2,70
2	Motoniveladora	hr	0,030	418,20	12,55
3	Camión cisterna	hr	0,015	180,00	2,70
4	Compactador de rodillo liso	hr	0,030	278,80	8,36
Herramientas = (5,00% del total de mano de obra):					0,22
Total equipo, maquinaria y herramientas:					26,53
4.- Gastos generales y administrativos					
Costo total					
Gastos generales (5% de 1+2+3):					1,90
Total gastos generales y administrativos:					1,90
5.- Utilidad					
Costo total					
Utilidad (5% de 1+2+3+4):					1,99
Total utilidad:					1,99
6.- Impuestos					
Costo total					
Utilidad IT (3,09% de 1+2+3+4+5):					1,29
Total impuestos:					1,29
Total precio unitario (1+2+3+4+5+6):					43,18
Total precio unitario adoptado:					43,18

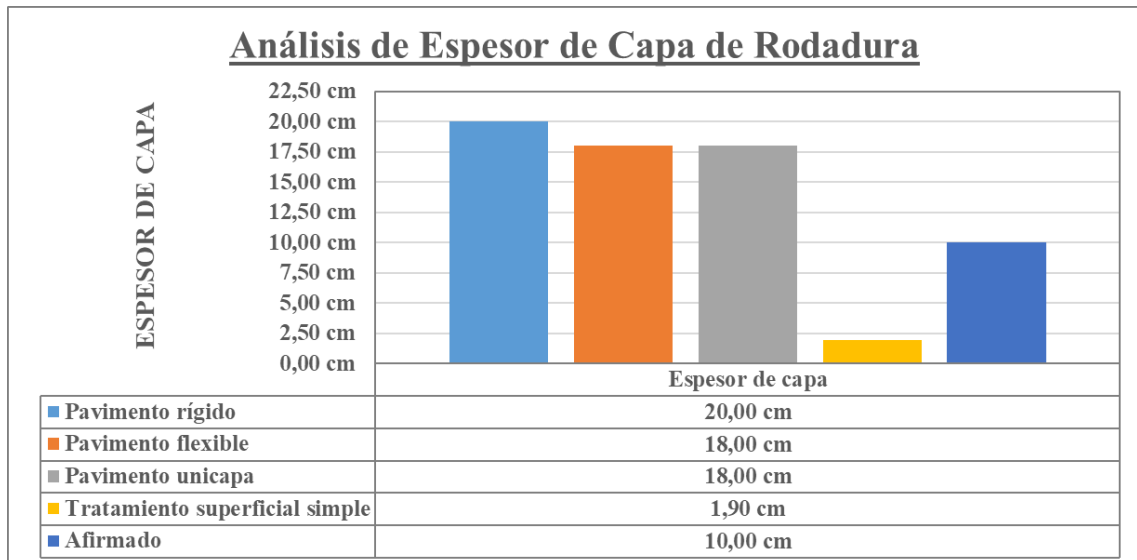
Fuente: Elaboración propia.

El precio unitario para la construcción del afirmado con una altura de capa de 10 centímetros es de **43,18 Bs/m²**. Los precios de los materiales, mano de obra y equipo que involucra realizar el tratamiento superficial simple se consultaron en el mercado local e información brindada por ingenieros dedicados a la construcción.

4.11. Análisis de espesores de capa de rodadura

En la siguiente gráfica podemos observar los resultados del espesor de diseño de las distintas capas de rodaduras según su método y tiempo.

Figura 46. Comparación de espesores de capa de rodadura.



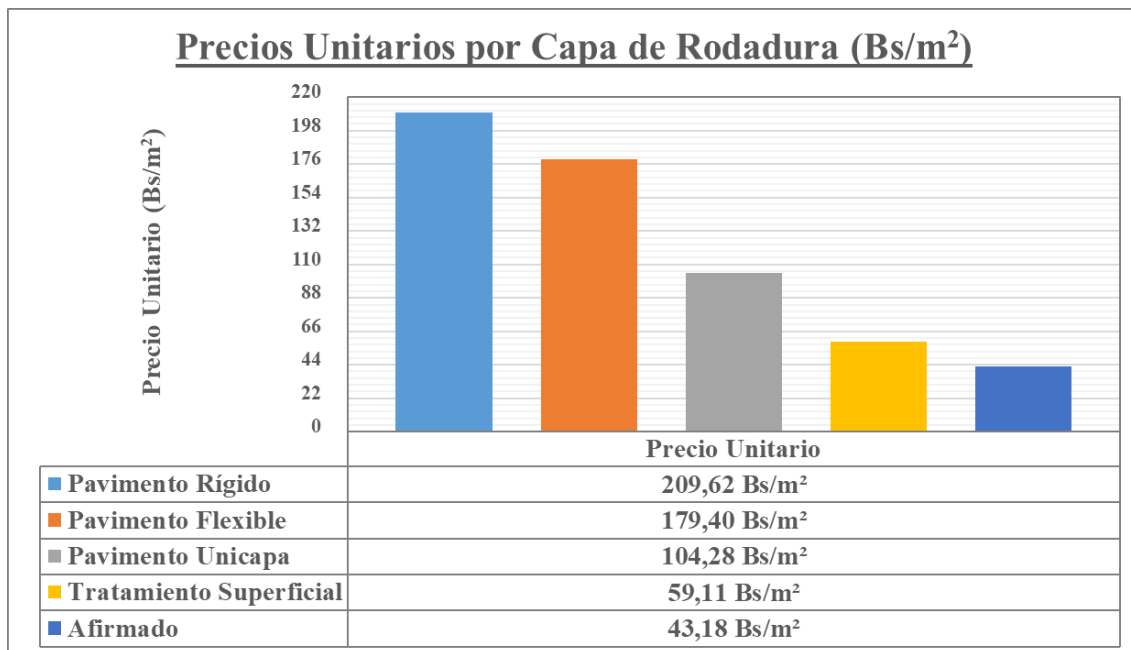
Fuente: Elaboración propia.

- El espesor del pavimento rígido es 11,11% mayor que el pavimento unicapa por una diferencia de 2 centímetros, ambos diseñados con un mismo periodo de diseño.
- El espesor del pavimento flexible es el mismo que el pavimento unicapa, ambos diseñados con un mismo periodo de diseño.
- El pavimento unicapa tiene un 89,44% más de espesor que el tratamiento superficial simple, sin embargo, el tratamiento superficial simple tiene la mitad de vida útil que el pavimento unicapa.
- El pavimento unicapa tiene un 44,44% más de espesor que el afirmado, ambos diseñados con un mismo periodo de diseño.

4.12. Análisis comparativo de precios unitarios

En la siguiente gráfica podemos observar los precios unitarios de las diferentes capas de rodadura según su espesor de diseño.

Figura 47. Comparación de precios unitarios.



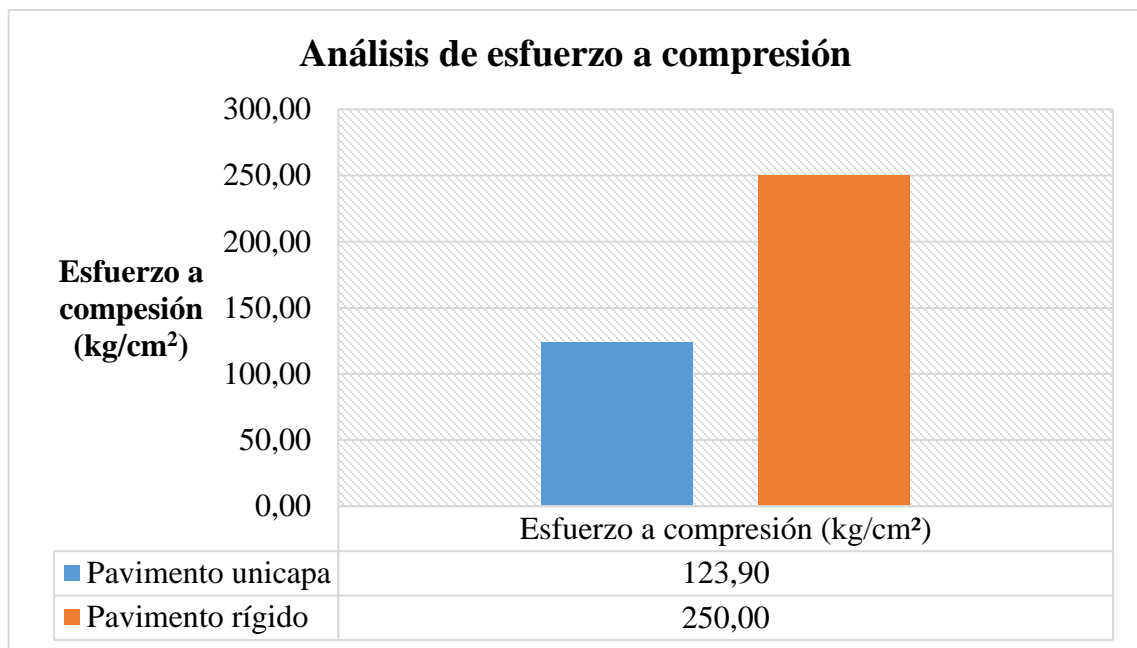
Fuente: Elaboración propia.

- El pavimento rígido pese a tener el mismo periodo de diseño que el pavimento unicapa es un 101,01% más costoso con una diferencia de 105,34 Bs/m².
- En un mismo periodo de diseño y mismo espesor de capa de rodadura, el pavimento flexible es un 72,03% más costoso que el pavimento unicapa con una diferencia de 75,12 Bs/m².
- Con la mitad de periodo de diseño el tratamiento superficial simple es un 43,32% más económico que el pavimento unicapa por una diferencia de 45,18 Bs/m².
- Con la mitad de periodo de diseño el afirmado es un 58,60% más económico que el pavimento unicapa por una diferencia de 61,10 Bs/m².

4.13. Análisis de resistencia a compresión

Para realizar el análisis de resistencia a compresión se tomó en cuenta la resistencia del pavimento unicapa a los 28 días que llegó a un valor promedio de 123,90 kg/cm² y para un pavimento rígido cuya resistencia de diseño es 250 kg/cm².

Figura 48. Análisis de esfuerzos a compresión.



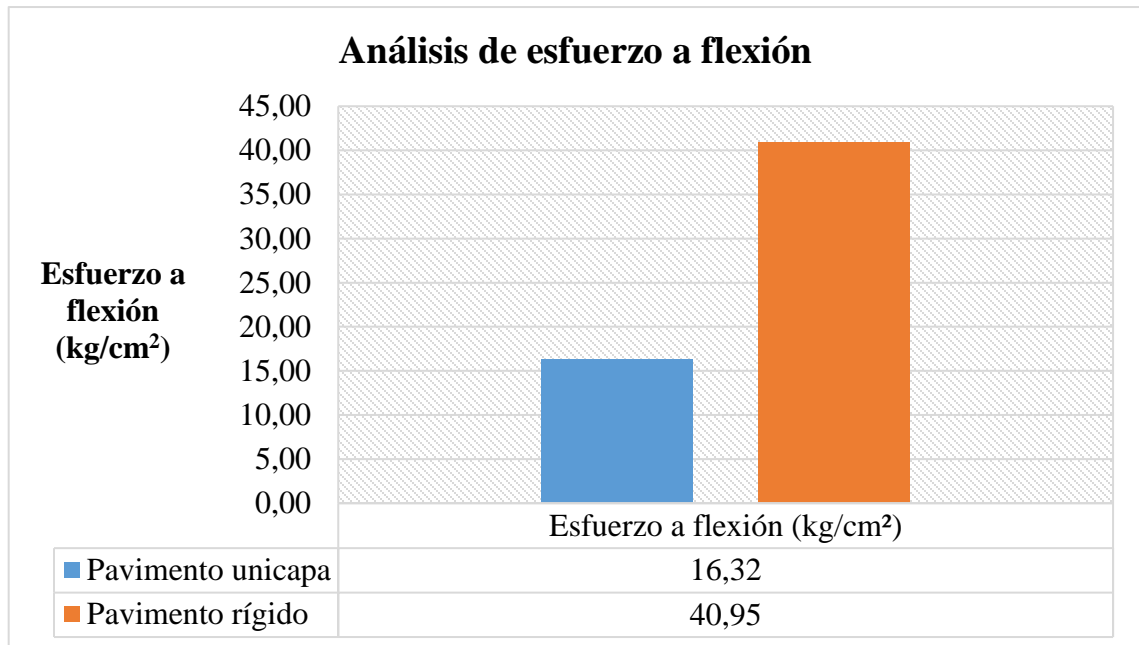
Fuente: Elaboración propia.

- El pavimento rígido pese a ser diseñado con el mismo periodo de diseño es un 101,78% más resistente a compresión que el pavimento unicapa por una diferencia de 126,10 kg/cm².

4.14. Análisis de resistencia a flexión

Para realizar el análisis de resistencia a compresión se tomó en cuenta la resistencia del pavimento unicapa a los 28 días que llegó a un valor promedio de 16,32 kg/cm² y para un pavimento rígido cuya resistencia de diseño fue de 40,95 kg/cm².

Figura 49. Análisis de esfuerzos a flexión.



Fuente: Elaboración propia.

- El pavimento rígido pese a ser diseñado con el mismo periodo de diseño es un 150,92% más resistente a flexión que el pavimento unicapa por una diferencia de 24,63 kg/cm².

4.15. Análisis valores de entrada

Cada capa de rodadura tiene diferentes variables que se muestran a continuación:

Tabla 34. Análisis de valores de entrada del pavimento unicapa.

Valores de entrada del pavimento unicapa		
Valores de entrada	Método de obtención de valores	Valor obtenido
Valor de soporte de la subrasante, (K).	Obtenidos a través de tablas utilizando el valor del CBR de la subrasante.	395,35 pci
Módulo de ruptura a la flexión, (M_R).	Determinado con la rotura de probetas.	1,60 MPa
Módulo de elasticidad, (E_c).	Determinado con una ecuación a partir del esfuerzo promedio de compresión resultado de la rotura de probetas.	16.482,59 MPa
Coefficiente de Poisson.	Valor promedio para un pavimento unicapa.	0,15
Carga por rueda, (P).	Según censo de carga de vehículos.	0,020 MN
Separación entre ruedas, (s).	Características de vehículo tipo C3.	0,50 m
Presión de inflado de neumáticos, (p).	Presión de inflado característico de vehículo tipo C3.	0,66 MPa
Número de repeticiones de carga en periodos de diseño, (N).	Obtenido mediante un conteo de volumen diario de tráfico.	224.853

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 35. Análisis de valores de entrada del pavimento flexible.

Valores de entrada del pavimento flexible		
Valores de entrada	Método de obtención de valores	Valor obtenido
Número de ejes equivalentes de 80 KN, (W_{18}).	Calculado con el conteo de volumen diario de tráfico.	194.983
Desviación estándar normal, (Z_r).	Valor deducido según el nivel de confiabilidad obtenido de guía AASHTO.	-0,524
Error estándar combinado, (S_o).	Propuesto para pavimento flexible por guía AASHTO.	0,45
Serviciabilidad inicial, (P_o).	Propuesto para pavimento flexible por guía AASHTO.	4,2
Coefficiente estructural de capa (a_1 , a_2 y a_3)	Obtenidos de guía AASHTO.	$a_1 = 0,44$ / pulg $a_2 = 0,14$ / pulg $a_3 = 0,12$ / pulg
Serviciabilidad final, (P_t).	Propuesto para pavimento flexible por guía AASHTO.	2
Módulo de resiliencia, (M_r).	Obtenido de ecuación utilizando CBR de subrasante.	30.000 psi
Coefficiente de drenaje, (m).	Valor obtenido a partir de tablas obtenido de datos estadísticos de SENAMHI.	1,11
Ensayo de Relación de Soporte de California, (CBR).	Valor deducido en laboratorio de suelo utilizando muestras extraídas en el tramo estudiado.	39,07%

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 36. Análisis de valores de entrada del pavimento rígido.

Valores de entrada del pavimento rígido		
Valores de entrada	Método de obtención de valores	Valor obtenido
Resistencia a compresión del concreto, (f 'c).	Valor deducido mediante iteraciones para llegar al 100% de fatiga.	233,52 kg/cm ²
Módulo de rotura del concreto, (Mr).	Calculado mediante una ecuación a partir de las resistencia a compresión de concreto.	574,045 psi
Módulo de reacción de la subrasante, (K).	Obtenidos a través de tablas utilizando el valor del CBR de la subrasante.	395,35 pci
Factor de seguridad, (LFS).	Valor característico para un camino o calle secundaria.	1

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 37. Análisis de valores de entrada del tratamiento superficial simple.

Valores de entrada del tratamiento superficial simple		
Valores de entrada	Método de obtención de valores	Valor obtenido
Tamaño máximo del árido.	Valor Obtenido de la gradación adoptada utilizando tabla de gradación de agregados para tratamientos superficiales.	19 mm
Tamaño mínimo del árido.	Valor Obtenido de la gradación adoptada utilizando tabla de gradación de agregados para tratamientos superficiales.	5 mm

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 38. Análisis de valores de entrada del afirmado.

Valores de entrada del afirmado		
Valores de entrada	Método de obtención de valores	Valor obtenido
Ensayo de Relación de Soporte de California, (CBR).	Valor deducido en laboratorio de suelo utilizando muestras extraídas en el tramo estudiado.	39,07%
Número de ejes equivalentes de 80 KN, (W_{18}).	Calculado con el conteo de volumen diario de tráfico.	194.983

Fuente: Elaboración propia.

4.16. Análisis de ventajas y desventajas de las capas de rodadura

A continuación, se muestra una tabla de ventajas y desventajas de las capas de rodadura, para encontrar las diferencias y poder analizar los métodos.

Tabla 39. Ventajas y desventajas del pavimento unicapa.

Ventajas y Desventajas del Pavimento Unicapa	
Ventajas	Desventajas
Menor impacto ambiental.	Vida útil máxima de 10 años.
Después del periodo de diseño la estructura puede servir como base para la rehabilitación de otro pavimento.	Es eficiente solo en caminos de bajo tráfico.
Fácil de diseñar.	
Fácil de construir.	
Bajo costo.	
Utilización de materiales y suelos del lugar.	
Mantenimiento mínimo.	
Maquinaria convencional.	

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 40. Ventajas y desventajas del pavimento flexible.

Ventajas y desventajas del pavimento flexible	
Ventajas	Desventajas
El ciclo de vida útil puede llegar a 20 años.	Son frecuentes los baches, hundimientos y roderas.
Tiene diversos métodos de dimensionamiento.	Requiere mayores excavaciones, movimientos de tierra, y son más las capas a colocar.
Distribuye de manera óptima las cargas de tensión entre sus capas.	Las altas temperaturas y lluvias promueven pérdida de material.
Rápida construcción.	Sobrecargas y tráfico imprevisto provocan daño estructural al pavimento.
Fácil reparación.	No rentable para caminos secundarios de bajo tráfico.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 41. Ventajas y desventajas del pavimento rígido.

Ventajas y desventajas del pavimento rígido	
Ventajas	Desventajas
EL ciclo de vida puede llegar hasta 30 años.	Costo de construcción elevado.
La calidad de la superficie se mantiene por muchos años.	Puede sufrir fracturas ante sobrecargas o movimientos en el terreno.
Resiste ataques químicos.	No rentable para caminos secundarios de bajo tráfico.
Mayor resistencia mecánica y de abrasión.	
Mayor resistencia al deslizamiento.	
Buenas características de drenaje superficial.	
Fácil de construir.	

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 42. Ventajas y desventajas del tratamiento superficial simple.

Ventajas y Desventajas del Tratamiento Superficial Simple	
Ventajas	Desventajas
Permite aumentar el coeficiente de fricción de la carretera.	No tiene mucha durabilidad.
Sirven para impermeabilizar la estructura de pavimento existente, con lo cual se protegen las capas subyacentes.	Requiere mantenimiento constante.
Cuando se colocan sobre superficies granulares sirven para reducir la emulsión de polvo.	Soporta bajos niveles de tráfico.
Permiten disponer de una superficie uniforme.	Las altas temperaturas y lluvias promueven pérdida de material.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 43. Ventajas y desventajas del afirmado.

Ventajas y Desventajas del Afirmado	
Ventajas	Desventajas
Bajo costo al inicio de diseño.	Mantenimiento constante.
Fácil de diseñar.	Daño ambiental en recolección de materiales de bancos.
Fácil de construir.	Material escaso.
Se utiliza maquinaria convencional.	Existe pérdida de material.
	Alto costo en distancias largas de transporte del material.
	Produce polvo.

Fuente: Elaboración propia.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y

RECOMENDACIONES

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

- Al finalizar el presente proyecto de grado se pudo lograr el objetivo principal que fue comparar el pavimento unicapa con otras capas de rodaduras las cuales fueron el pavimento flexible, pavimento rígido, tratamiento superficial simple y afirmado, a través de indicadores de diseño, definiendo así sus cualidades respecto a los costos y características de diseño, llegando a la conclusión que debido a las características del tramo estudiado “La tablada – Turumayo” en cuanto a características de tráfico, función y ubicación, la construcción del pavimento unicapa puede ser el método más adecuado temporalmente en el mejoramiento del camino, pudiendo dar soluciones a los problemas que día a día se presentan en el camino, brindando de esta manera mayor confort y mejor transitabilidad en el tramo, fortaleciendo así de gran manera en el desarrollo socio-económico de la zona.
- Recurriendo al laboratorio de hormigones y al laboratorio de suelos se logró realizar la caracterización de la subrasante del tramo de diseño, se hayo la humedad óptima para el proceso de compactación del pavimento unicapa y se determinó la resistencia a compresión y flexión del pavimento unicapa los cuales cumplieron con los requisitos mínimos para la elaboración del pavimento unicapa.
- Se realizó un análisis comparativo con las características del pavimento unicapa respecto a las características de las alternativas llegando a la siguiente conclusión, verificamos que el pavimento unicapa, es un método de fácil diseño y fácil construcción, utiliza el mismo suelo y los materiales del lugar para realizar su construcción y al finalizar su periodo de diseño puede ser utilizado como capa base.
- En el aspecto ambiental se ha estudiado que el pavimento unicapa llega a ser un método que, tomando las medidas necesarias, puede llegar a tener un mínimo impacto ambiental en sus procesos de construcción.
- Un análisis económico nos muestra que el pavimento unicapa es un método muy factible en cuestión a su durabilidad y función, de acuerdo a las características del tramo estudiado en el proyecto de grado.

- Se determinó tras una comparación de los precios unitarios para la construcción del pavimento unicapa respecto al de las alternativas que:
 - El pavimento rígido es 105,34 Bs/m² más costoso que el pavimento unicapa.
 - El pavimento flexible es 75,12 Bs/m² más costoso que el pavimento unicapa.
 - El pavimento unicapa es 45,18 Bs/m² más costoso que el tratamiento superficial simple.
 - El pavimento unicapa es 61,10 Bs/m² más costoso que el afirmado.
- Se concluye que el pavimento unicapa es un método que se puede realizar y sacar beneficios solucionando los problemas que día a día se presentan en caminos de baja circulación, pero que son importantes para el desarrollo socio-económico, de tal manera es un método que merece ser estudiado en gran amplitud y aplicado en nuestro medio.

5.2. Recomendaciones

- Tener cuidado al momento de realizar la compactación T-180 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.
- Es muy importante realizar el curado correspondiente, 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.