

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1. Introducción

El presente trabajo engloba nociones actuales e importantes con el uso de materiales de suma importancia en la elaboración de estructuras de pavimento, entre los cuales se encuentra la utilización del RAP (Pavimento Asfáltico Reciclado), material que es proveniente de tramos deteriorados que han perdido en gran medida sus propiedades, características iniciales o cumplieron su vida útil y son removidos para posteriormente depositarlos en vertederos, son estos los materiales que se emplea para la elaboración del RAP.

El RAP se empleara para la generación de nuevas estructuras de pavimento proporcionando grandes ventajas como la reducción de costo, optimizando de esta manera recursos, abriendo así la posibilidad de que más zonas puedan acceder al pavimentado de sus carreteras, logrando de esta manera aportar al desarrollo social y mejora a la calidad de vida de los habitantes, pero el punto más importante que se toma en cuenta es el impacto medioambiental mínimo que este genera, al emplear el método del reciclado, haciendo resaltar que es este uno de los puntos importantes que hoy en día se toma en consideración, al realizar nuevas infraestructuras y tecnologías aplicadas en la ingeniería moderna.

Esta nueva alternativa que se propone va acompañada del uso de las geoceldas, las cuales son un sistema de confinamiento celular que permite el diseño de las estructuras de pavimento con menores espesores, al mismo tiempo incrementa la capacidad de soporte de carga de las capas y proporciona una buena compactación.

Bajo el concepto de incrementar el periodo de diseño de la carreteras pavimentadas es que se realiza periódicamente rehabilitaciones superficiales con la utilización de agregados nuevos y asfaltos, lo que ocasiona erogación de gastos económicos y generando un impacto medioambiental negativo, es así que de esta manera se emprende la búsqueda de nuevas tecnologías para la implementación en el diseño de pavimentos, logrando actualmente la utilización de RAP (Pavimento Asfáltico Reciclado) con la combinación de las geoceldas.

Es de esta manera y bajo los conceptos anteriores que se propone la alianza de dos grandes nociones para su respectivo estudio de ventajas y desventajas de los mismos, llegando a conclusiones benéficas a favor de la ingeniería moderna en la aplicación de estas, el uso del RAP (Pavimento Asfáltico Reciclado) enlazado con las geoceldas para generación de estructuras de pavimento, las mismas que serán aplicadas a características de nuestro medio.

Enmarcados los fundamentos de la investigación se compone el presente documento como objeto de texto base en el uso de RAP (Pavimento Asfáltico Reciclado) con Geoceldas en obras de ingeniería vial, esperando que la misma sirva como aporte de referencia para posteriores estudios y su aplicación a nuestro medio.

1.2. Diseño teórico

1.3. Planteamiento del problema.

1.4. Situación problemática.

Se denomina RAP al Pavimento Asfáltico Reciclado o Recuperado de pavimentos asfálticos envejecidos procedentes de las capas que conforman el paquete estructural que han cumplido su vida útil pero que tiene el potencial de ser reutilizados para integrar nuevas capas, el RAP seguirá el proceso de chancado de esta manera se producirá una mezcla con los requerimientos de granulometría, plasticidad, grado de compactación y capacidad de soporte adecuado para el tipo de capa que sea empleado, aportando de esta manera al impacto medio ambiental mínimo que se genera, esto gracias al método de reciclado. Las propiedades del nuevo agregado dependerá de factores como: el tipo de mezcla asfáltica del que proviene el RAP, la metodología empleada en su extracción o también del proyecto del cual proviene.

Este material lo combinaremos con el uso de las geoceldas, las cuales son estructuras tridimensionales que permiten confinar materiales granulares y suelos. Entre las propiedades más destacables de las mismas encontramos que proporcionan una superficie estable para zonas peatonales y con tráfico, permite el drenaje del agua con libertad, gracias al granulado de relleno y la porosidad en las paredes del geotextil, proporciona buena compactación y mejora la capacidad de soporte del suelo que es empleado.

En los últimos años las rutas camineras del mundo han buscado implementar nuevas tecnologías para alargar el ciclo de vida útil de los pavimentos, buscando también la mejora de sus características y es por este motivo que ha surgido actualmente el tratamiento de residuos aprovechando al máximo de sus recursos mediante su reutilización o reciclado antes de su vertedero y eliminación, todo esto con el objeto de cuidar el medio ambiente.

Las primeras aplicaciones del RAP fueron en el Reino Unido, con un proceso llamado “Retread Process” para reparar las vías secundarias dañadas por la segunda guerra mundial y años más tarde en países como Alemania, Países Bajos, Suiza, Dinamarca, Bogotá, Perú y la Argentina, la proporción de mezclas recicladas con RAP sobre el total de mezclas con suelo puro es superior al 15 %.

En Bolivia desde hace pocos años, el Instituto Boliviano del Cemento y el Hormigón (IBCH) cumplen con una labor de investigación.

Algunos proyectos ejecutados en Bolivia con similar metodología son:

Tramo Cocota- Paraiso

Tramo Rio Seco-Desaguadero

En el departamento de Cochabamba se realizó un artículo sobre la rehabilitación de pavimentos asfálticos mediante el reciclado, en el cual menciona al reciclado de pavimento como una de las mejores alternativas en cuanto a plazos, trabajabilidad y costo.

El empleo de los geosintéticos surgen como alternativa de mejorar las propiedades del suelo, adquiriendo de esta manera una nueva tecnología en el diseño de pavimentos, registros caben resaltar que desde hace más de 25 años se viene empleando esta nueva tecnología en el mundo y así de la misma manera en el continente americano más especialmente hablando en países como Brasil, Perú. Actualmente en Bolivia aún no se ha implementado este método de grandes ventajas en el diseño de obras viales, pero si en el realizado de terraplenes, en muros de retención y otros.

Es en este sentido que con el presente trabajo se pretende implementar una dupla innovadora al unir dos conceptos de gran importancia en la realización de obras civiles

viales como son: la de utilización de Pavimento Asfáltico Reciclado, método que aporta de gran manera a la reducción de la contaminación medio ambiental y siendo capaz de reducir en hasta un 70 % el uso de materia virgen con esto coadyuvando al costo, por otro lado tenemos el uso de las geoceldas, método que brinda grandes ventajas al ser unida al RAP.

Ahora bien en el entorno en el cual nos encontramos no existe registros del uso de esta dupla, afectando de esta manera al desarrollo de distintas zonas del departamento donde es necesario la pavimentación de sus carreteras para así de esta manera mejorar la calidad de vida de todos y cada uno de sus habitantes, porque con la pavimentación se realiza un gran salto a la conexión con el resto del departamento, la no pavimentación tiene como consecuencia el escaso acceso a medios de transporte, genera también problemas respiratorios agudos que afectan principalmente a niños menores de 5 años y personas de la tercera edad debido al polvo, otra situación en la que se ven afectados los habitantes es en la época de lluvia en la cual se generan los mayores inconvenientes debido a la acumulación de agua en las carreteras, afectando principalmente a las zonas más alejadas del departamento, que no pueden acceder al pavimentado de sus carreteras debido a la falta de recursos económicos, falta de proyectos innovadores con nuevas tecnologías y respetando la naturaleza en su contexto total, pero con el presente trabajo se aporta en todos los campos anteriormente mencionados.

1.5. Problema

¿Cuáles son las ventajas del uso de RAP con geoceldas, como método moderno en la construcción vial de pavimentos, y su aplicación en capa base, sub-base y si con el empleo de las mismas se genera menores espesores y disminución de costos en su proceso de ejecución?

1.6. Objetivos.

1.6.1. Objetivo general.

Analizar el comportamiento de la combinación de RAP como agregado de capa base y sub-base con la inclusión además de geoceldas para cálculo de espesores de capa base y sub-base de estructuras de pavimento flexible, de esta manera mostrar la reducción de espesor de capas y de costo, al mismo tiempo exponer que existen nuevas tecnologías que generan un impacto medio ambiental mínimo en el diseño de estructuras de pavimento flexible aplicado a nuestro medio.

1.6.2. Objetivos específicos.

- ❖ Realizar una metodología de reciclaje a ser empleada en la elaboración del Pavimento Asfáltico Reciclado.
- ❖ Obtener la caracterización de capa base y sub-base siguiendo las especificaciones descritas en la norma ABC (Administradora Boliviana de Carreteras).
- ❖ Desarrollar la dosificación a diferentes porcentajes de RAP en capa base y sub-base, mediante mezclas.
- ❖ Comparar los resultados de los diferentes ensayos realizados en laboratorio de las mezclas suelo/RAP y suelo puro.
- ❖ Aplicar las geoceldas a las mezclas de porcentaje óptimo de suelo/RAP tanto en capa base como en capa sub-base.
- ❖ Determinar la influencia del uso de geoceldas en las capas base/RAP y sub-base/RAP, mediante la determinación de su comportamiento en ensayos de compactación y CBR.
- ❖ Comparación de costos, mostrando de esta manera los beneficios que trae la utilización de RAP (Pavimento Asfáltico Reciclado) y geoceldas.

1.7. Hipótesis.

Al emplear el uso de la fusión de las geoceldas con el pavimento asfáltico reciclado (RAP) se conseguirá una mejor condición en el comportamiento mecánico en las capa base y sub-base del pavimento debido a que acrecienta la capacidad de soporte de carga de las capas.

Las geoceldas serán empleadas en la capa base y sub-base, debido a que estas son un sistema de confinamiento en los cuales será vertido el material de cada capa.

De la misma manera el empleo de esta dupla ayudará a la reducción de espesores de la capa base y capa sub-base del pavimento flexible respectivamente, logrando de esta manera la reducción de costo y de su ejecución.

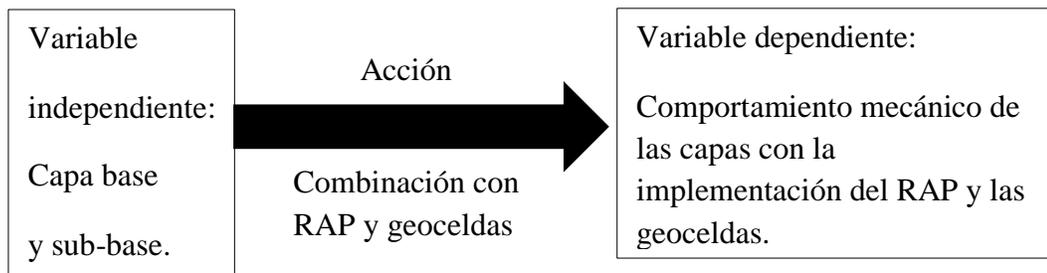
Al reducir el costo y ejecución abrirá la oportunidad de que más zonas puedan optar de manera más fácil la pavimentación de sus calles y avenidas logrando de esta manera mejorar la calidad de vida de cada uno de sus habitantes.

También se considera como un método innovador, al emplear el reciclado, ya que el mismo es un concepto usado muy frecuentemente en las últimas décadas para minimizar el impacto medio ambiental hacia la madre tierra.

1.8. Definición de variables independientes y dependientes.

En el presente trabajo se consideran las siguientes variables:

Figura 1.1. Identificación de variables.



Fuente: Elaboración propia

Se toma como variable independiente a las capas base y sub-base, las cuales son parte del paquete estructural del pavimento flexible, posteriormente se implementará el pavimento asfáltico reciclado (RAP) chancado y las geoceldas a partir de ese momento se obtendrá la variable dependiente que será el comportamiento mecánico de estas capas, luego del proceso de combinación, las muestras serán sometidas a distintos ensayos de laboratorio.

Los ensayos a realizar en laboratorio con el Pavimento Asfáltico Reciclado y las geoceldas son los siguientes, mismos que están destinados a experimentar el uso del RAP y las geoceldas como elemento parte de la capa base y capa sub-base.

Análisis granulométrico por tamizado (ASTM D422; AASHTO 88), siguiendo que los materiales para capa base y capa sub-base granular cumplan con las exigencias indicadas en “Requerimientos generales” y en “Materiales para base y sub-base”. Las granulometrías deberán ajustarse a una de las siguientes bandas: TM-50b, TM-50c o TM-25 para capa base y TM-50a para capa sub-base, de la Tabla 3.2

Clasificación del suelo por el método AASTHO

Determinación de límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad (ASTM D4318; AASHTO T89 y T90).

Grado de compactación medible a través del ensayo del mismo nombre que sirve para determinar los valores de la densidad máxima y el contenido de humedad óptimo, según lo establece la norma. (ASTM D422; AASHTO T180).

Determinación de capacidad de soporte de carga de la capa base y sub-base medible a través del ensayo de California Baring Ratio o más conocido como C.B.R. bajo normas. (ASTDM D1883; AASHTO T193).

1.9. Alcance de la investigación

La presente investigación comprende fundamentalmente describir el comportamiento del suelo puro frente a la combinación de suelo/RAP y suelo/RAP/geoceldas partiendo de la definición y caracterización de cada una de ellas, sus comportamientos y sus propiedades más importantes, esto lo lograremos partiendo de la exploración bibliográfica sobre cada

una de las variables, para así de esta manera tener una base sustentable y confiable, para luego continuar con la exploración en laboratorio a través de los diferentes ensayos a los cuales serán sometidos las variables.

Posteriormente abarcaremos la apología del uso de RAP con geoceldas como alternativa que engloba nociones actuales y de nueva tecnología en el cálculo de capas base y capa sub-base de estructuras de pavimento flexible, explicando a detalle las ventajas y desventajas del uso y fusión de esta dupla.

Subsiguientemente ilustraremos los resultados de los espesores de la capa base y capa sub-base a partir de los ensayos en laboratorio, llegando a determinar que esta dupla permite conseguir una disminución de las necesidades de árido virgen.

También con este estudio se pretende corroborar que el uso de RAP con geoceldas minimiza las necesidades de áridos nuevos al reutilizar los existentes en el firme.

El empleo de las geoceldas surge como un nuevo capítulo en el uso de materiales innovadores dentro de la comunidad de la ingeniería civil y vial, ofreciendo con el empleo de esta: Rendimientos en su instalación ya que estos poseen un modo de instalación rápido y sencillo, son fabricados bajo estricto control de calidad garantizando de esta manera sus especificaciones.

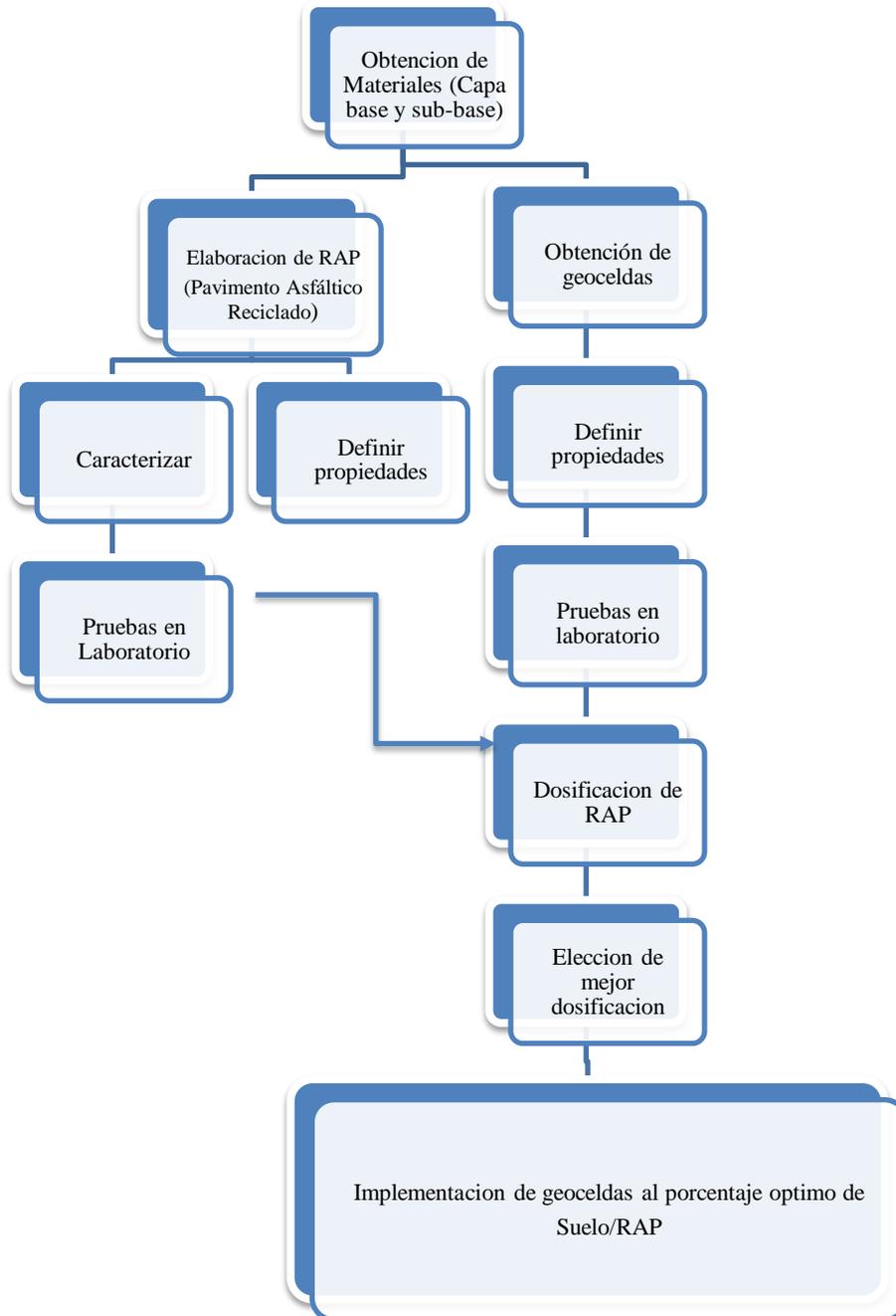
Desde el punto de vista operativo, el reciclado limita las interferencias con el tráfico y permite una apertura prácticamente inmediata a la circulación, con lo que se minimiza la molestia en los usuarios.

Desde el punto de vista económico, realizaremos una comparación de costos para probar que este método permite obtener un ahorro significativo frente a otras técnicas convencionales.

Cabe resaltar al mismo tiempo el beneficio al medio ambiente que se obtendrá a partir de la elaboración de este proyecto, tema puntual y de amplia discusión en las últimas décadas.

Al finalizar el estudio deduciremos las conclusiones y proporcionaremos las recomendaciones vistas en la ejecución del trabajo para su posterior mejora y aplicación de manera más eficiente y favorable.

Figura 1.2. Diseño metodológico de actividades



Fuente: Elaboración propia.

CAPÍTULO II

USO DE RAP Y GEOCELDAS EN

PAVIMENTOS FLEXIBLES

CAPÍTULO II

USO DE RAP Y GEOCELAS EN PAVIMENTOS FLEXIBLES

2.1. Conceptos básicos de pavimento.

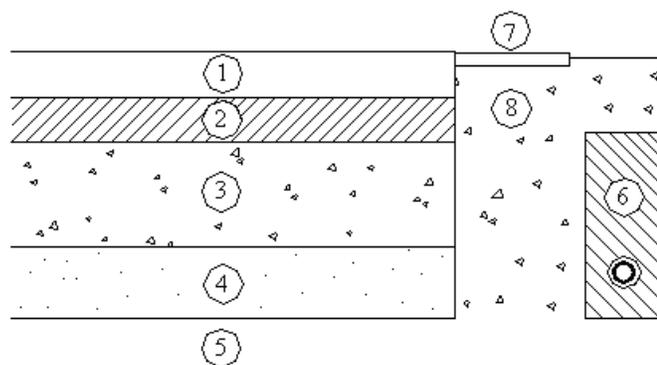
2.1.1. Definición de pavimento.

Se llama pavimento al conjunto de capas superpuestas, relativamente horizontales, de material seleccionado que reciben en forma directa las cargas del tránsito y las transmiten a los estratos inferiores en forma disipada, proporcionando una superficie de rodamiento, la cual debe funcionar eficientemente.

2.1.2. Componentes de un pavimento flexible.

En la Figura 2.1 se muestra esquemáticamente, los componentes principales de un pavimento asfáltico. Se puede considerar que la estructura de un pavimento está formada por una superestructura encima de una fundación, esta última debe ser el resultado de un estudio geotécnico adecuado. En los pavimentos camineros, la superestructura está constituida por la capa de revestimiento y la capa base; la fundación está formada por las capas de sub-base y suelo compactado.

Figura 2.1. Sección típica de un pavimento



Fuente: Instituto tecnológico de aeronáutica, ingeniería de pavimentos, Brasil, 2000

- | | |
|---------------------|-------------------------------|
| 1. Capa de rodadura | 5. Sub-rasante |
| 2. Capa base | 6. Sub-drenaje longitudinal |
| 3. Capa sub-base | 7. Revestimiento de hombreras |
| 4. Suelo compactado | 8. Sub-base de hombreras |

2.1.2.1. Capa de rodadura.

La capa de rodadura o revestimiento asfáltico tiene las siguientes funciones:

Impermeabilizar el pavimento, para que las capas subyacentes puedan mantener su capacidad de soporte.

Proveer una superficie resistente al deslizamiento, incluso en una pista húmeda.

Reducir las tensiones verticales que la carga por eje ejerce sobre la capa base, para poder controlar la acumulación de deformaciones plásticas en dicha capa.

2.1.2.2. Capa base.

Esta capa tiene por finalidad absorber los esfuerzos transmitidos por las cargas de los vehículos y además repartir uniformemente los esfuerzos a la sub-base y terreno de fundación.

La capa base tiene las siguientes funciones:

Reducir las tensiones verticales que las cargas por eje ejercen sobre las capas sub-base y suelo natural.

Reducir las deformaciones de tracción que las cargas por eje ejercen a la capa de revestimiento asfáltico.

Permitir el drenaje del agua que se infiltra en el pavimento, a través de drenajes laterales longitudinales.

Ser resistente a los cambios de temperatura y humedad.

La gradación del material de la base es necesario que se halle dentro de los límites indicados.

La fracción de material que pasa el tamiz N° 40 ha de tener un límite líquido menor al 35 % y un índice de plasticidad menor a 6.

La fracción que pase el tamiz N° 200 no podrá exceder de la 1/2. En ningún caso de los 2/3 de la fracción que pase el tamiz N° 40.

El CBR no debe ser inferior a 80 %.

Tabla 2.1. Características requeridas del material de la capa base.

Características	
Límite líquido	Máx. 35 %
Índice de plasticidad	Máx. 6 %
CBR %	≥ 80 %
Desgaste de los ángeles	≤ 35 %

Fuente: Manual de ensayos de suelos y materiales (suelos) de la Administradora Boliviana de Carreteras

2.1.2.3. Capa sub-base.

Es la capa de material seleccionado que se coloca encima de la sub-rasante

La capa sub-base está constituida por un material de capacidad de soporte superior a la del suelo compactado y se utiliza para permitir la reducción del espesor de la capa base.

Tiene por objeto:

Servir de capa de drenaje al pavimento.

Controlar o eliminar en lo posible cambios de volumen, elasticidad y plasticidad perjudiciales que pudiera tener el material de la sub-rasante.

Controlar la ascensión capilar del agua proveniente de las capas freáticas cercanas protegiendo así al pavimento contra los hinchamientos que se producen en épocas de helada.

El material de la sub-base debe ser seleccionada y tener mayor capacidad que el terreno de fundación compactado, este material puede ser grava, arena, grava o granzón, escoria de los altos hornos y residuos de material de cantera.

El material ha de tener las características de un suelo A1 o A2 aproximadamente.

Su límite líquido debe ser inferior al 35 % y su índice plástico no mayor a 8.

El CBR no podrá bajar del 40 %.

Si la función principal de la sub-base es de servir de capa de drenaje, el material a emplearse debe ser granular y la cantidad de material fino que pasa el tamiz N° 200 no deberá exceder el 8 %.

De la capacidad de soporte del terreno de fundación depende en gran parte el espesor que debe tener un pavimento, sea flexible o rígido. Si el terreno de fundación es pésimo debe desecharse este material y sustituirse por otros de mejor calidad. Si el terreno de fundación es malo y se halla formado por un suelo fino, limos o arcilloso susceptible de saturación habrá de ponerse una sub-base de material granular seleccionada antes de ponerse la base y capa de rodadura.

En la actualidad como elemento drenante en la sub-base se está utilizando con mucha frecuencia geo textiles. El geo textil se define como cualquier textil permeable usado en fundaciones, roca o suelo. Sus propiedades hidráulicas son considerables, convenientes para las funciones de filtración y drenaje.

Los materiales para sub-base deberán cumplir con los requerimientos estipulados en “Requerimientos generales” y en “Materiales para sub-base y con la graduación TM-50a de la Tabla 3.2.

En cuanto a las propiedades mecánicas, el material deberá:

Tabla 2.2. Características requeridas del material de la capa sub-base.

Características	
Límite líquido	Máx. 35 %
Índice de plasticidad	Máx. 8 %
CBR %	≥ 40 %
Desgaste de los ángeles	≤ 40 %

Fuente: Manual de ensayos de suelos y materiales (suelos) de la administradora boliviana de carreteras

2.1.3. Características que debe reunir un pavimento.

Un pavimento para cumplir adecuadamente sus funciones debe reunir los siguientes requisitos:

Ser resistente a la acción de las cargas impuestas por el tránsito.

Ser resistente ante los agentes de intemperismo.

Ser resistente al desgaste producido por el efecto abrasivo de las llantas de los vehículos.

Debe ser durable.

Presentar condiciones adecuadas respecto al drenaje.

Debe ser económico.

2.1.4. Pavimentos flexibles.

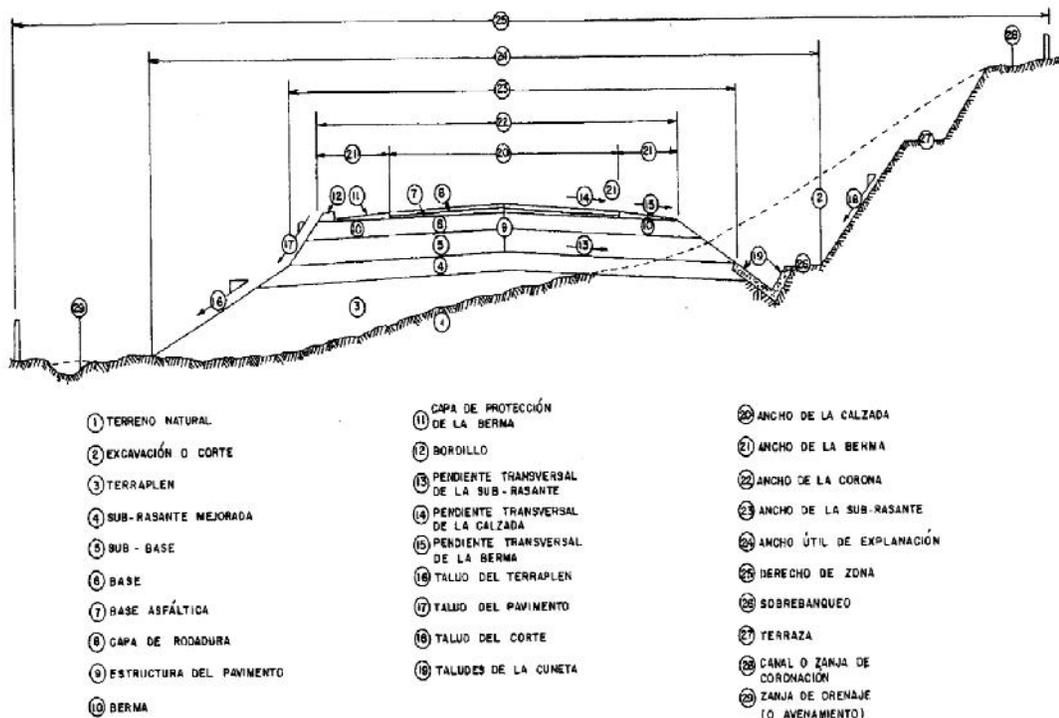
Son aquellos que tienen un revestimiento asfáltico sobre una capa base granular. La distribución de tensiones y deformaciones generadas en la estructura por las cargas de rueda del tráfico, se da de tal forma que las capas de revestimiento y base absorben las tensiones verticales de compresión del suelo de fundación por medio de la absorción de tensiones cizallantes. En este proceso ocurren tensiones de deformación y tracción en la fibra inferior del revestimiento asfáltico, que provocará su fisuración por fatiga por la repetición de las cargas de tráfico. Al mismo tiempo la repetición de las tensiones y deformaciones verticales de compresión que actúan en todas las capas del pavimento

producirán la formación de hundimientos en la trilla de rueda, cuando el tráfico tiende a ser canalizado, y la ondulación longitudinal de la superficie cuando la heterogeneidad del pavimento fuera significativa.

La estructura de pavimento flexible está compuesta por varias capas de material, cada capa recibe las cargas por encima de la capa, se extiende en ella, entonces pasa a estas cargas a la siguiente capa inferior. Por lo tanto, la capa ubicada en la parte inferior de la estructura del pavimento, recibe menos carga.

Para pavimentos flexibles, la estrategia de diseño seleccionado deberá presentar un mínimo inicial de duración de ocho años antes de que sea obligatoria la superposición de otra capa. En general la duración óptima debería estar diseñada para un periodo de 20 años.

Figura 2.2. Sección típica de un pavimento flexible



Fuente: Rico, Alfonso. Ingeniería de pavimentos para carreteras

2.2. Estudio de los suelos y propiedades físico-mecánicas.

2.2.1. Ensayo de granulometría.

Dentro del análisis de los suelos, se encuentra el de la granulometría, que no es más que obtener la distribución porcentual de los tamaños de partículas que conforman un suelo.

Tabla 2.3. Escala granulométrica.

Escala granulométrica	
Partícula	Tamaño
Arcillas	< 0,002 mm
Limos	0,002 – 0,06 mm
Arenas	0,06 – 2 mm
Gravas	2 – 60 mm
Cantos rodados	60 – 250 mm
Bloques	> 250 mm

Fuente: Braja M. Das

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

2.2.1.1. Análisis granulométrico por tamizado (ASTM D-422; AASHTO T-88)

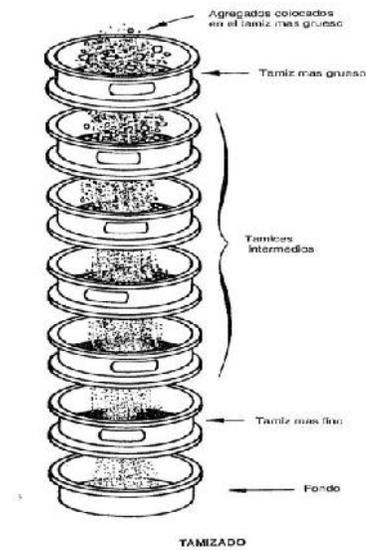
Este ensayo consiste en agitar la muestra de suelo mediante un conjunto de mallas o tamices de aberturas estándar (Figura 2.3). Primero se deja secar la muestra en un horno, 24 h antes del ensayo, luego se tamiza este suelo y se determina la masa retenida en cada malla o tamiz. Los resultados de este análisis se expresan generalmente como porcentaje del peso total del suelo que ha pasado por las diferentes mallas.

Tabla 2.4. Tamaños nominales de tamices.

Tamaños nominales de abertura	
(mm)	ASTM
75	3"
63	2 1/2"
50	2"
37,50	1 1/2 "
25	1"
19	3/4 "
9,50	3/8 "
4,75	N° 4
2	N° 10
0,0425	N° 40
0,075	N° 200

Fuente: Braja M. Das

Figura 2.3. Juego de tamices



Fuente: Braja M. Das

2.2.1.2. Determinación del límite líquido, plástico e índice de plasticidad.

(ASTM D4318; AASHTO T-89 T-90)

Este método establece el procedimiento para determinar los límites líquido y plástico de los suelos, para el límite líquido mediante la maquina Casagrande.

Los límites de consistencia de un suelo, están representados por contenidos de humedad. Los principales se conocen con los nombres de:

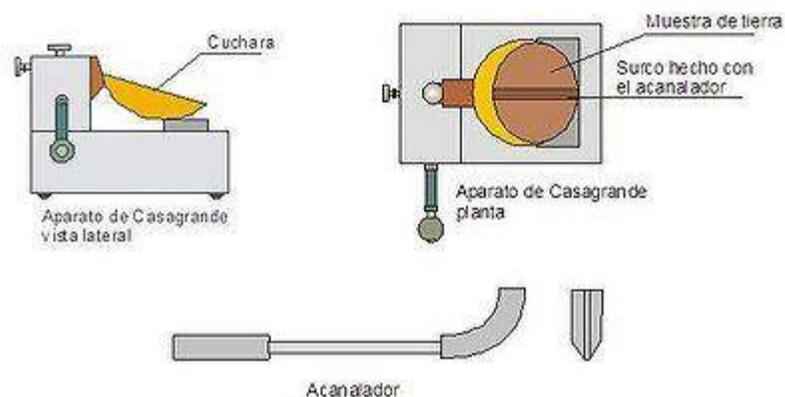
Límite líquido. Es el límite entre los estados líquido y plástico de un suelo.

Límite plástico. Es el límite entre los estados plástico y semisólido.

Límite de contracción. Es el límite entre los estados semisólido y sólido.

El límite líquido, es la humedad, expresada como porcentaje de la masa de suelo seco en horno, de un suelo remoldeado en el límite entre los estados líquido y plástico. Corresponde a la humedad necesaria para que una muestra de suelo remoldeada, depositada en la taza de bronce de la maquina Casagrande y dividida en dos porciones simétricas separadas 2mm entre sí, fluya y entren en contacto en una longitud de 10mm, aplicando 25 golpes.

Figura 2.4. Equipo Casagrande

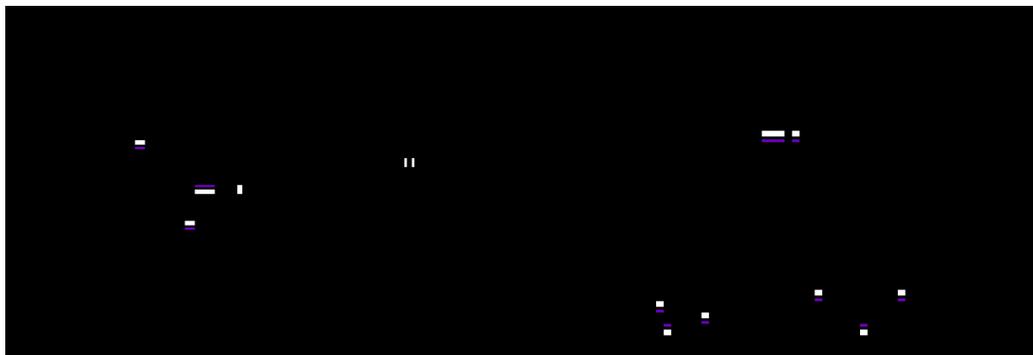


Fuente: Meta portal de arquitectura, ingeniería y construcción.

El límite plástico es la humedad expresada como porcentaje de la masa de suelo seco en horno, de un suelo remoldeado en el límite entre los estados plástico y semisólido. Corresponde a la humedad necesaria para que bastones cilíndricos de suelo de 3 mm de

diámetro se disgreguen en trozos de 0.5 a 1 cm de largo y no puedan ser reamasados ni reconstituidos.

Figura 2.5. Ensayos de plasticidad



Fuente: Meta portal de arquitectura, ingeniería y construcción.

El índice de plasticidad es calculado a través de la diferencia del límite líquido y plástico, e indican el margen de humedad dentro del cual se encuentran en estado plástico tal como definen los ensayos.

La fórmula del índice de plasticidad está dada por

$$I.P = L.L - L.P$$

2.2.1.3. Clasificación de suelos.

2.2.1.3.1. Sistema de clasificación AASHTO (ASTM D3282; AASHTO M-145).

Teniendo en cuenta que en la naturaleza existe una gran variedad de suelos, la ingeniería de suelos ha desarrollado algunos métodos de clasificación de los mismos. Cada uno de estos métodos tiene su campo de aplicación según la necesidad y uso.

Los sistemas utilizados para la clasificación de suelos, en estudios para diseño de pavimentos de carreteras y aeropistas son el de la American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO)

El sistema de clasificación AASHTO actualmente en uso, se muestra en la Tabla 2.5 De acuerdo con este, el suelo se clasifica en siete grupos mayores: A-1 al A-7. Los suelos clasificados en los grupos A-1, A-2 y A-3 son materiales granulares, donde 35% o menos de las partículas pasan por la criba No. 200. Los suelos de los que más del 35% pasan por

la criba No. 200 son clasificados en los grupos A-4, A-5, A-6 y A-7. La mayoría están formados por materiales tipo limo y arcilla. El sistema de clasificación se basa en los siguientes criterios:

Tamaño del grano

Plasticidad

Si cantos rodados y boleos

El “Índice de Grupo”, es un factor de evaluación que determina la calidad del suelo a través de características similares en grupos de suelos, el índice de grupo es muy importante en el diseño de espesores, inclusive un método lleva el mismo nombre.

El cual es calculado mediante la fórmula empírica.

$$IG = 0,2a + 0,005ac + 0,01bd$$

Donde:

a= % pasa N° 200 – 35 % (si %N°200>75, se anota 75, si es <35, se anota 0)

b= % pasa N° 200 – 15 % (si %N°200>55, se anota 55, si es <15, se anota 0)

c= L. líquido – 40 % (si LL>60, se anota 60, si es <40, se anota 0)

d=I. plasticidad – 10 % (Si IP>30, se anota 30, si es <10, se anota 0)

Tabla 2.5. Clasificación de materiales. AASHTO.

Clasificación General	Materiales granulares (35% como mínimo de lo que pasa el tamiz N° 200)							Materiales de arcilla-limo (más de 35% del total de la muestra que pasa el tamiz N° 200)			
Clasificación de grupo	A-1		A-3	A-2				A-4	A-5	A-6	A-7
	A-1-a	A-1-b		A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7				A-7-5 A-7-6
Porcentaje de material que pasa el tamiz											
N° 10	50 máx.										
N° 40	30 máx.	50 máx.	51 min.								
N° 200	15 máx.	25 máx.	10 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.	36 min	36 min	36 min	36 min
Características de la fracción que pasa el tamiz N° 40											
LL:	6 máx.		NP	40 máx.	41 min	40 máx.	40 min	40 máx.	41 min	40 máx.	41 min
IP:				10 máx.	10 máx.	11 min	11 min	10 máx.	10 máx.	11 min	11 min
Índice de grupo:	0		0	0		4 máx.		8 máx.	12 máx.	16 máx.	20 máx.

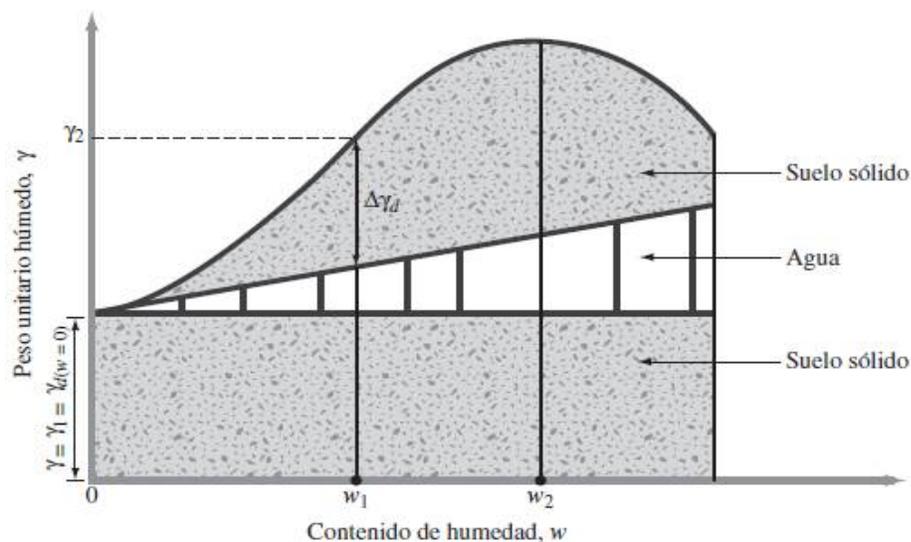
Fuente: AASHTO

2.2.1.4. Ensayo de compactación de suelos

La compactación de los suelos, es importante como medio para aumentar la resistencia y disminuir la compresibilidad de los mismos, no fue reconocida ampliamente sino hasta la aparición del rodillo pata de cabra en 1906. Sin embargo, fue hasta 1933, año en el que R. R. Proctor publico sus investigaciones sobre este tema, cuando se conocieron los factores que intervienen en la compactación. Proctor encontró que aplicando a un suelo cierta energía para compactarlo, el peso volumétrico obtenido varia con el contenido de humedad según una curva, en la cual se puede observar la existencia de un grado de humedad con el cual se obtiene el peso volumétrico máximo para ese suelo y esa energía de compactación.

La compactación es la densificación del suelo por remoción de aire, lo que requiere energía mecánica. El grado de compactación de un suelo se mide en términos de su peso específico seco. Cuando se agrega agua al suelo durante la compactación, esta actúa como un agente ablandador de las partículas del suelo, que hace que se deslicen entre si y se muevan a una posición de empaque más denso. El peso específico seco después de la compactación se incrementa primero conforme aumenta el contenido de agua.

Figura 2.6. Principios de la compactación



Fuente: Braja M. Das

2.2.1.4.1. Relaciones de peso unitario – Humedad en los suelos método modificado (Designación ASTM D422; AASHTO T-180)

Este método establece el procedimiento para determinar la relación entre la humedad y la densidad de un suelo, compactado en un molde normalizado, mediante un pisón de 4,5 Kg. en caída libre, desde una altura de 460 mm, con una energía específica de compactación de $2,67 \text{ J/cm}^3 (= 27,2 \text{ kgf cm/cm}^3)$.

Se describen cuatro procedimientos alternativos:

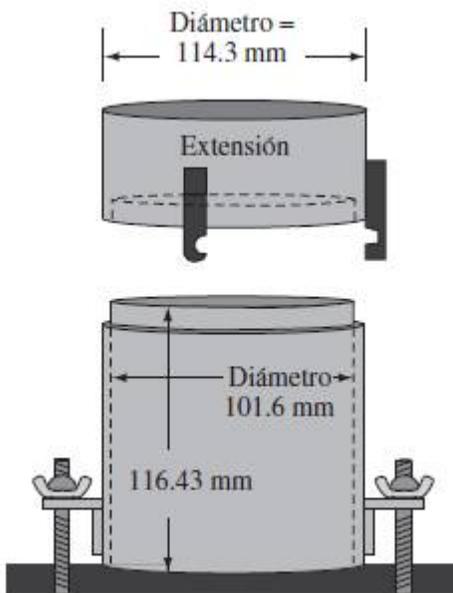
Método A- molde de 100 mm de diámetro: suelo que pasa por el tamiz de 4,75 mm

Método B- molde de 150 mm de diámetro: suelo que pasa por el tamiz de 4,75 mm

Método C- molde de 100 mm de diámetro: suelo que pasa por el tamiz de 19 mm

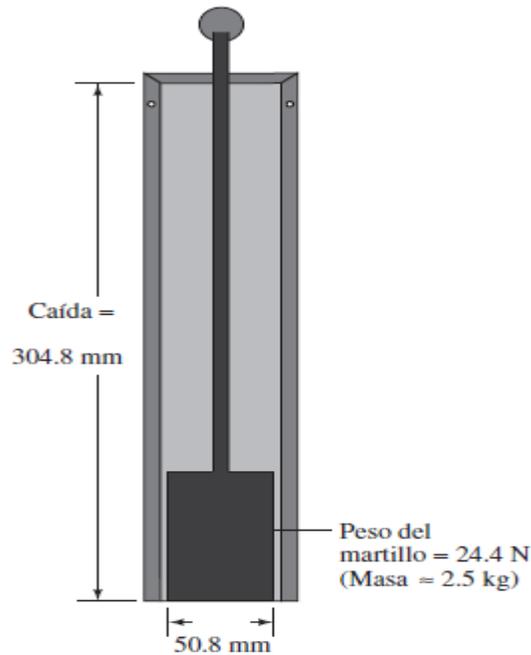
Método D- molde de 150 mm de diámetro: suelo que pasa por el tamiz de 19 mm

Figura 2.7. Molde cilíndrico



Fuente: Braja M. Das

Figura 2.8. Martillo apisonador



Fuente: Braja M. Das

Para cada prueba, el peso específico húmedo de compactación γ se calcula como:

$$\gamma = \frac{W}{V_{(m)}}$$

Donde:

W = Peso del suelo compactado en el suelo

$V_{(m)}$ = Volumen del molde

El peso específico γ_d se calcula con la ecuación:

$$\gamma_d = \frac{\gamma}{1 + \frac{w(\%)}{100}}$$

Dónde:

$w(\%)$ = Porcentaje de contenido de agua

Los valores de γ_d determinados con la anterior ecuación se grafican contra los correspondientes contenidos de agua para obtener el peso específico seco máximo y el contenido de agua óptimo para el suelo.

2.2.1.5. Determinación de la relación de soporte de los suelos en el laboratorio (CBR) relación soporte de california (ASTM D1883; AASHTO T-193)

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

La denominación CBR se deriva de “California Bearing Ratio”.

Este método se utiliza para evaluar la capacidad de soporte de suelo de sub-rasante, como también de materiales empleados en la construcción de terraplenes, sub-base, bases y capas de rodadura granulares.

No obstante que originalmente el método fue diseñado para evaluar el soporte de suelos de tamaño máximo 3/4” (19 mm), el ensayo es aplicable a todos aquellos suelos que contengan una cantidad limitada de material que pasa el tamiz de 50 mm (2”) y es retenido en el tamiz de 19 mm (3/4”).

Cuando el tamaño máximo absoluto del material en estudio sea superior a 19 mm (3/4”), el peso retenido en este tamiz se reemplazara por uno equivalente de material de la misma muestra que pasa por 19 mm (3/4”) y es retenido en 4,75 mm (N° 4).

El objetivo principal de este ensayo es determinar la capacidad de soporte (CBR) en laboratorio, mediante la compactación del suelo con humedades y niveles de energía variables, para su aplicación en el diseño de pavimentos.

La expresión que define al CBR, es la siguiente:

$$\% CBR = \frac{\text{Carga unitaria de ensayo}}{\text{Carga unitaria de patron}} * 100$$

El cálculo para el % de expansión es la siguiente:

$$\% \text{ exp} = \frac{|L_f - L_i|}{h} * 100$$

Donde:

% exp = Porcentaje de expansión

Lf = Lectura final del extensómetro (cm)

Li = Lectura inicial del extensómetro (cm)

h = Altura total del espécimen

Antes de determinar la resistencia a la penetración, generalmente los moldes se saturan durante 96 horas para simular las condiciones de trabajo más desfavorables y para determinar su posible expansión.

En general se confeccionan 3 moldes como mínimo, las que poseen distintas energías de compactación (lo usual es con 56, 25 y 12 golpes).

2.3. Método AASHTO para diseño de pavimentos flexibles. (Versión 1997)

A continuación se describe en detalle los procedimientos seguidos por el método de la AASHTO para el diseño estructural de pavimentos flexibles de carreteras. Este método establece que la superficie de rodamiento se resuelve solamente con concreto asfáltico y tratamientos superficiales, pues asume que tales estructuras soportarán niveles significativos de tránsito (mayores de 50,000 ejes equivalentes acumulados de 8,2 ton durante el período de diseño).

En la versión de la guía AASHTO-97 se puede resaltar que se puede trabajar con unidades inglesas y métricas. Para lo cual el número estructural deja de ser adimensional para tener dimensiones de longitud; en el sistema inglés viene expresado en pulgadas y en el sistema métrico en milímetros; los coeficientes estructurales son adimensionales.

El diseño está basado primordialmente en identificar o encontrar un “número estructural SN” y en función del mismo, se determinan los distintos espesores de capas que forman el paquete estructural. Para determinar el número estructural SN requerido, el método proporciona la ecuación general de diseño de pavimentos flexibles y/o el ábaco mostrado a continuación, que involucra los siguientes parámetros:

El tránsito en ejes equivalentes acumulados para el período de diseño seleccionado, “W18”.

El parámetro de confiabilidad, “R”.

La desviación estándar global, “So”.

El módulo de resiliencia efectivo, “Mr” del material usado para la subrasante.

La pérdida o diferencia entre los índices de servicios inicial y final deseados, “ΔPSI”.

La ecuación puede ser resuelta en forma manual, lo cual es muy tedioso. Si bien el uso de ábacos es mucho más rápido también es menos preciso por los errores al trazar las líneas con lápiz. Por esta razón es conveniente tener un programa de computación con lo cual se logra exactitud y rapidez en la obtención de los resultados.

2.3.1. Factores de diseño.

Los factores más importantes para el diseño de las capas de un pavimento son los siguientes:

Tráfico

Propiedades de la Sub-rasante

Materiales de Construcción

Condiciones Climáticas, Ambientales y Drenaje

2.3.2. Ecuación de diseño para pavimentos flexibles

Con la siguiente fórmula de diseño se obtiene el número estructural SN y en función del mismo se determinan los distintos espesores de capas que forman el paquete estructural.

$$\log W_{18} = Z_R S_o + 9,36 \log(SN + 1) - 0,20 + \frac{\log \left[\frac{\Delta PSI}{4,2 - 1,5} \right]}{0,4 + \frac{1094}{(SN + 1)^{5,19}}} + 2,32 \log M_R - 8,07$$

Donde:

W_{18} = Número de aplicaciones de carga de 80 kN.

Z_R = Desviación estándar normalizada.

S_o = Desvío estándar de las variables.

ΔPSI = Pérdida de serviciabilidad prevista en el diseño.

M_R = Módulo resiliente de la sub-rasante (psi).

SN = Número estructural.

2.3.2.1. Ábaco de diseño AASHTO para pavimentos flexibles.

Debido a que la resolución de la ecuación del párrafo superior puede resultar algo tediosa, es que se elaboraron ábacos para la determinación de espesores. En la figura 2.9 se indica el ábaco de diseño para pavimentos flexibles, el mismo que permite la determinación de SN de forma gráfica.

Las variables de entrada en éste ábaco de diseño están expresadas en unidades inglesas y son:

Tránsito estimado por trocha, W_{18} , a lo largo de la vida útil del pavimento.

Confiabilidad, R (%).

Desvío estándar de todas las variables S_o .

Módulo resiliente efectivo de la sub-rasante M_R (psi).

Pérdida de serviciabilidad ΔPSI .

La expresión que liga el número estructural con los espesores de capa es

$$SN = a_1 D_1 + a_2 m_2 D_2 + a_3 m_3 D_3$$

Donde:

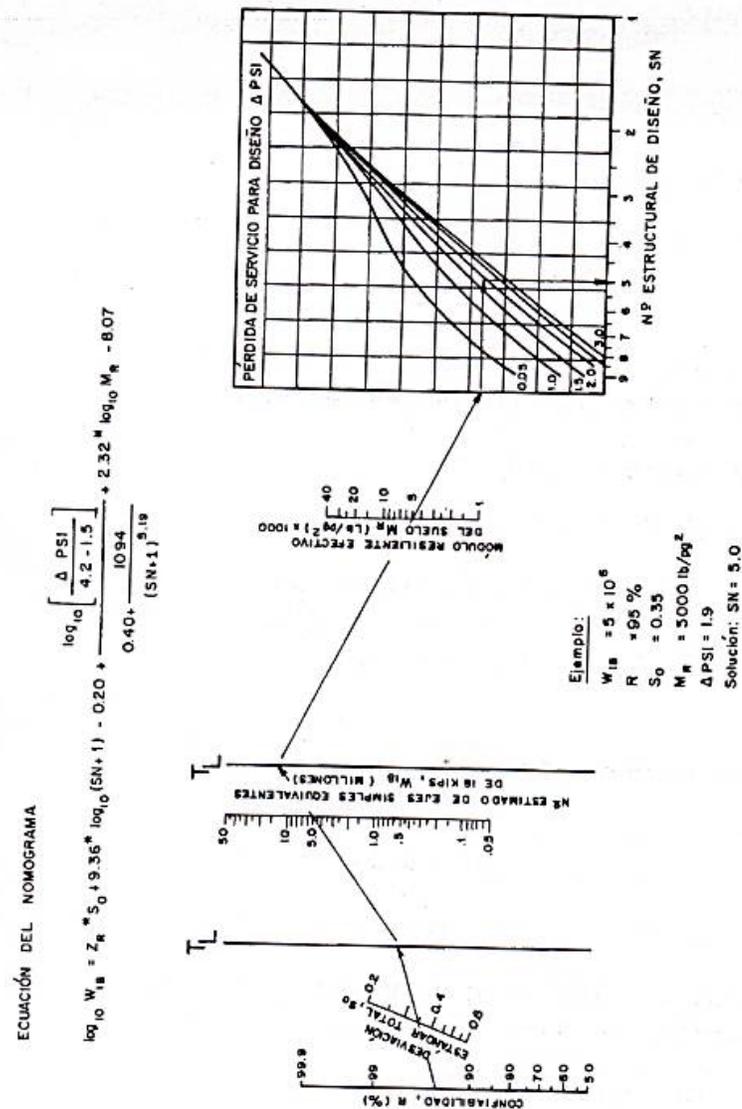
a_1, a_2, a_3 = Coeficientes de capa, adimensionales.

m_2, m_3 = Coeficientes de drenaje.

D_1, D_2, D_3 = Espesores de las capas.

Esta ecuación no tiene una única solución, hay muchas combinaciones de espesores que la pueden satisfacer, no obstante existen normativas tendientes a dar espesores de capas que puedan ser construidas y protegidas de deformaciones permanentes por las capas superiores más resistentes.

Figura 2.9. Ábaco de Diseño AASHTO para pavimentos flexibles



Fuente: AASTHO (1997) Guía para diseño de estructuras de pavimento.

A continuación se describirá cada una de las variables que forman parte de esta ecuación de diseño.

2.3.2.2. Variables que intervienen en el diseño

a) Confiabilidad “R”.-

Con el parámetro de confiabilidad “R”, se trata de llegar a cierto grado de certeza en el método de diseño, para asegurar que las diversas alternativas de la sección estructural que se obtengan, durarán como mínimo el período de diseño. Se consideran posibles

variaciones en las predicciones del tránsito en ejes acumulados y en el comportamiento de la sección diseñada.

El actual método AASHTO para el diseño de la sección estructural de pavimentos flexibles, recomienda valores desde 50 y hasta 99,9 para el parámetro “R” de confiabilidad, con diferentes clasificaciones funcionales, notándose que los niveles más altos corresponden a obras que estarán sujetas a un uso intensivo, mientras que los niveles más bajos corresponden a obras o caminos locales y secundarios.

Tabla 2.6. Valores de “R” de confiabilidad, con diferentes clasificaciones funcionales.

Niveles de confiabilidad	
Clasificación funcional	Nivel recomendado por AASHTO para carreteras zona rural
Carretera interestatal o autopista	80 - 99,9
Red principal o federal	75 - 95
Red secundaria o estatal	75 - 95
Red rural o local	50 - 80

Fuente: AASTHO (1997) Guía para diseño de estructuras de pavimento.

b) Desviación estándar normalizada.-

La desviación estándar normalizada Z_R representa la abscisa correspondiente a un área igual a la confiabilidad R en la curva de distribución normalizada.

La distribución normal es útil para estudiar los efectos de la variabilidad en el rendimiento y el diseño de pavimentos.

La Tabla 2.7 obtenida de la Guía AASHTO muestra valores de la desviación estándar normal Z_R correspondientes a valores seleccionados de confiabilidad.

Tabla 2.7. Valores de desviación estándar normalizada.

Confiabilidad R (%)	Desviación estándar normal Z_R	Confiabilidad R (%)	Desviación estándar normal Z_R
50	0,000	93	- 1,476
60	- 0,253	94	- 1,555
70	- 0,524	95	- 1,645
75	- 0,674	96	- 1,751
80	- 0,841	97	- 1,881
85	- 1,037	98	- 2,054
90	- 1,282	99	- 2,327
91	- 1,340	99,9	- 3,090
92	- 1,405	99,99	- 3,750

Fuente: AASTHO (1997) Guía para diseño de estructuras de pavimento.

c) Desviación estándar de las variables “ S_o ”.-

La desviación estándar S_o , toma en cuenta la variabilidad asociada con el diseño, construcción y comportamiento del pavimento.

La guía AASHTO’ 97 aconseja valores para la desviación estándar S_o , desarrollados a partir de un análisis de varianza que existía en el AASHO Road Test y en base a predicciones futuras de tránsito.

En la Tabla 2.8 se dan los valores recomendados por AASHTO’ 97 para pavimentos flexibles.

Tabla 2.8. Valores de desviación estándar.

Condición de diseño	Desvío estándar
Variación en la predicción del comportamiento del pavimento sin errores en el tránsito	0,44
Variación en la predicción del comportamiento del pavimento con errores en el tránsito	0,49

Fuente: AASTHO (1997) Guía para diseño de estructuras de pavimento.

d) Estimación de ejes equivalentes (ESALs).-

El procedimiento de diseño para carreteras con volúmenes de tráfico tanto altos como bajos está basado en los ESALS acumulados esperados durante el período de diseño, donde el ESAL (Equivalent Simple Axial Load) es la conversión de las cargas, a un número de repeticiones de cargas equivalente de un eje simple de ruedas duales de carga estándar de 18.000 lb. Para la obtención de este valor es necesario el análisis a partir de la composición del tráfico.

Configuración de Ejes de los Vehículos

Según el Decreto Supremo N° 25629, en el que se aprueba el reglamento de la ley de cargas N° 1769 referente a pesos y dimensiones para vehículos de transporte de carga o pasajeros que circulan en el territorio nacional, se tienen los siguientes límites de cargas:

Tabla 2.9. Límites de cargas según ley de cargas N° 1769.

Carga máxima por tipo de eje	Peso (ton.)
Carga máxima para Eje sencillo de 2 llantas	7
Carga máxima para Eje sencillo de 4 llantas	11
Carga máxima para Eje doble de 8 llantas	18
Carga máxima para Eje doble de 4 llantas	10
Carga máxima para Eje doble de 6 llantas	14
Carga máxima para Eje triple de 12 llantas	25
Carga máxima para Eje triple de 6 llantas	17
Carga máxima para Eje triple de 10 llantas	21

Fuente: Decreto supremo 24327 elevado a rango de Ley 1769

Pese a que los vehículos livianos tienen poca influencia en la determinación del número total de ejes equivalentes para el diseño de pavimentos, estos han sido considerados, asumiendo tonelajes normalmente utilizados en proyectos de carreteras en nuestro medio. En cuanto a los vehículos pesados, es usual utilizar las cargas máximas permitidas en cada tipo de vehículo ante ausencia de un censo de cargas, sin embargo dicha consideración deriva de alguna manera a un sobredimensionamiento del paquete estructural. Es por eso, que se ha visto por conveniente afectar dichas cargas con el porcentaje más próximo superior yendo al lado de la seguridad y representativo del factor de ocupación ya sea de pasajeros o de carga según sea el caso, obtenidos con los datos proporcionados en las

encuestas O/D y que de alguna manera representa el comportamiento del flujo vehicular de la zona.

Factores de equivalencia de carga y factor camión.

Como primera instancia para calcular los ESAL's que se aplicarán a una estructura de pavimento es necesario asumir un número estructural (SN) que se considere adecuado a las cargas, también se tendrá que asumir el índice de serviciabilidad aceptable, de acuerdo con los programas de mantenimiento que se considere necesario según el tipo de carreteras.

Previo a determinar el factor camión adoptado de cada vehículo, se tiene que definir el SN absoluto a considerar para obtener esos valores. Inicialmente se calcula ejes equivalentes para el periodo de diseño (15 años) con distintos números estructurales asumidos y un nivel de serviciabilidad final de 2,5. A la vez se obtienen los respectivos SN en función a los ejes equivalentes calculados y otros parámetros indicados más adelante.

En la determinación de los ESAL's se hace notar que se considera un factor de distribución direccional igual a 0,5 (50%) que representa el mismo número de vehículos pesados circulando en ambas direcciones y un factor de distribución por carril igual a 1 (100%) por el número de carriles en una dirección.

e) Pérdida de serviciabilidad de diseño “ Δ PSI”.-

La serviciabilidad es la capacidad de un pavimento para servir al tipo de tránsito para el cual ha sido diseñado. En el diseño de pavimentos se deben elegir la serviciabilidad inicial y final. La serviciabilidad inicial P_0 está en función del diseño del pavimento y de la calidad de construcción. La serviciabilidad final o terminal P_t está en función de la categoría del camino y es adoptada en base a esta y al criterio del proyectista. Los valores recomendados por la AASHTO 97 están indicados a continuación:

Serviciabilidad Inicial

$P_0 = 4,5$ para pavimentos rígidos

$P_0 = 4,2$ para pavimentos flexibles

Serviciabilidad terminal:

$P_t = 2,5$ o más para caminos muy importantes

$P_t = 2,0$ para caminos de menor tránsito

f) Módulo resiliente de la sub-rasante.-

La base para la caracterización de los materiales de sub-rasante en este método, es el módulo resiliente o elástico. Este módulo se determina con un equipo especial que no es de fácil adquisición y por tal motivo se han establecido correlaciones para determinarlo a partir de otros ensayos como por ejemplo el CBR.

Existen varias correlaciones entre ellas:

$$M_R \text{ (psi)} = 1500 * \text{CBR} \quad (\text{Suelos finos con CBR} < 10)$$

$$M_R \text{ (psi)} = 4326 * \ln(\text{CBR}) + 241 \quad (\text{Para los suelos granulares})$$

Otras conocidas son las utilizadas en Chile:

$$M_R \text{ (MPa)} = 17,6 * \text{CBR}^{0,64} \quad (\text{CBR} < 12)$$

$$M_R \text{ (MPa)} = 22,1 * \text{CBR}^{0,55} \quad (12 < \text{CBR} < 80)$$

O las desarrolladas en Sudáfrica:

$$M_R \text{ (psi)} = 3000 * \text{CBR}^{0,65} \quad (7,2 < \text{CBR} < 20)$$

A partir de los valores de CBR de diseño definidos por el especialista de geotecnia en el respectivo estudio de suelos y materiales y utilizando las dos primeras fórmulas indicadas anteriormente que correlaciona el módulo resiliente y CBR, se han obtenido los módulos resilientes de la capa sub-rasante a lo largo del tramo.

2.3.3. Determinación de espesores por capas.

Una vez que se ha obtenido el número estructural SN para cada sección estructural del pavimento, utilizando el gráfico o la ecuación general básica de diseño, donde se involucran los parámetros anteriormente descritos (tránsito, R, So, MR, ΔPSI), se requiere determinar una sección multicapa que en conjunto provea de suficiente capacidad de soporte equivalente al número estructural de diseño original. La siguiente ecuación puede utilizarse para obtener los espesores de cada capa, para la superficie de rodamiento o carpeta, base y sub-base, haciéndose notar que el actual método de AASHTO, ya involucra coeficientes de drenaje particulares para la base y sub-base.

$$SN = a_1 D_1 + a_2 D_2 m_2 + a_3 D_3 m_3$$

Donde:

SN= Número estructural requerido

a_1 , a_2 y a_3 = Coeficientes de capa representativos de carpeta, base y sub-base respectivamente.

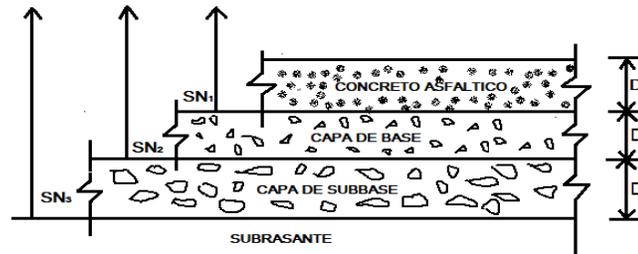
D_1 , D_2 y D_3 = Espesor de la carpeta, base y sub-base respectivamente, en pulgadas.

m_2 y m_3 = Coeficientes de drenaje para base y sub-base, respectivamente.

Para la obtención de los coeficientes de capa a_1 , a_2 y a_3 deberán utilizarse el Grafico 2.1, la figura 2.11 y 2.12.

Siendo el pavimento un sistema multicapa, la distribución de los espesores debe hacerse de acuerdo con los principios que muestra la siguiente figura.

Figura 2.10. Determinación de los espesores de las capas mediante aproximaciones



$$D_1^* \geq \frac{SN_1}{a_1}$$

$$SN_1^* = a_1 D_1^* \geq SN_1$$

$$D_2^* \geq \frac{SN_2 - SN_1^*}{a_2 m_2}$$

$$SN_1^* + SN_2^* \geq SN_2$$

$$D_3^* \geq \frac{SN_3 - (SN_1^* + SN_2^*)}{a_3 m_3}$$

- 1) $a_1 D_1$ m y SN como se definen en el texto son los valores mínimos requeridos.
- 2) Un asterisco en D o SN indica que representa el valor realmente usado, el cual debe ser mayor o igual al requerido.

Calculamos el SN requerido sobre la sub-rasante. Del mismo modo, se hallan los SN necesarios sobre las capas de sub-base y base, usando los valores aplicables de resistencia en cada caso. Trabajando con las diferencias entre los SN calculamos como necesarios sobre cada capa, el espesor máximo permisible de cada uno.

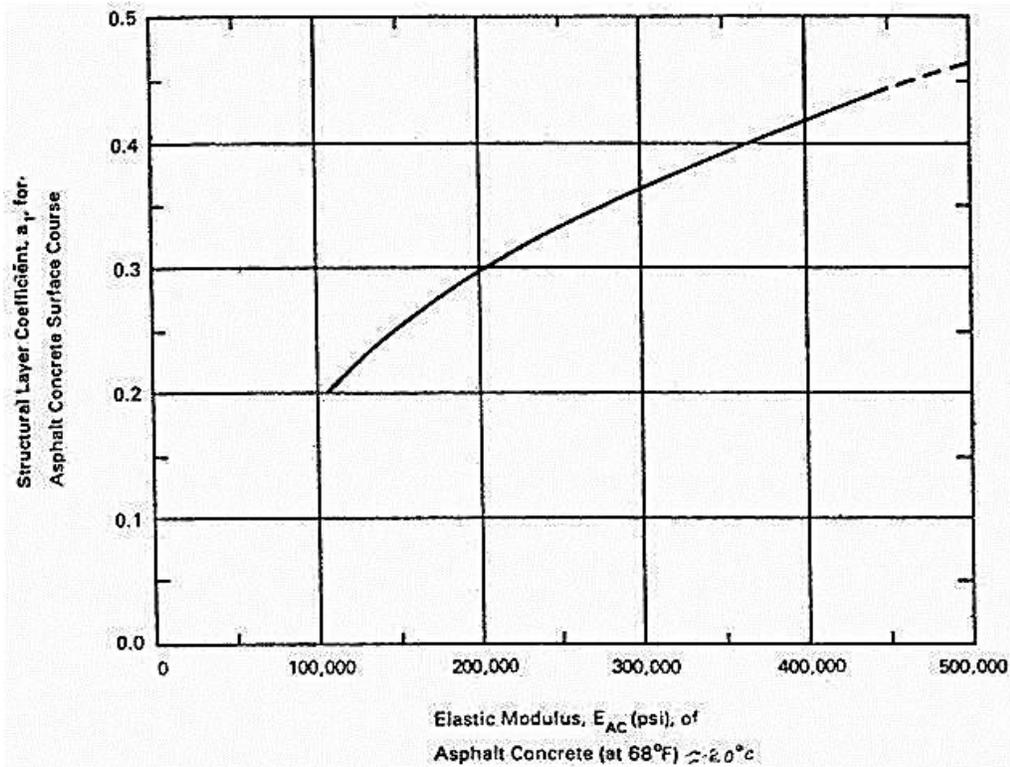
2.3.3.1. Coeficientes estructurales o de capa.

Estos coeficientes son una medida de la capacidad relativa de cada capa como componente estructural de un pavimento, aunque directamente no sean un índice de la resistencia del material. No obstante a ello, estos coeficientes están correlacionados con distintos parámetros resistentes.

a) Coeficiente estructural para la capa de rodadura “a₁”

Para estimar el coeficiente estructural se emplea el Gráfico 2.1. para capas asfálticas, donde este coeficiente “a₁” están en función del módulo resiliente adoptado.

Gráfico 2.1. Para determinar el coeficiente estructural de capas asfálticas en función del módulo resiliente adoptado

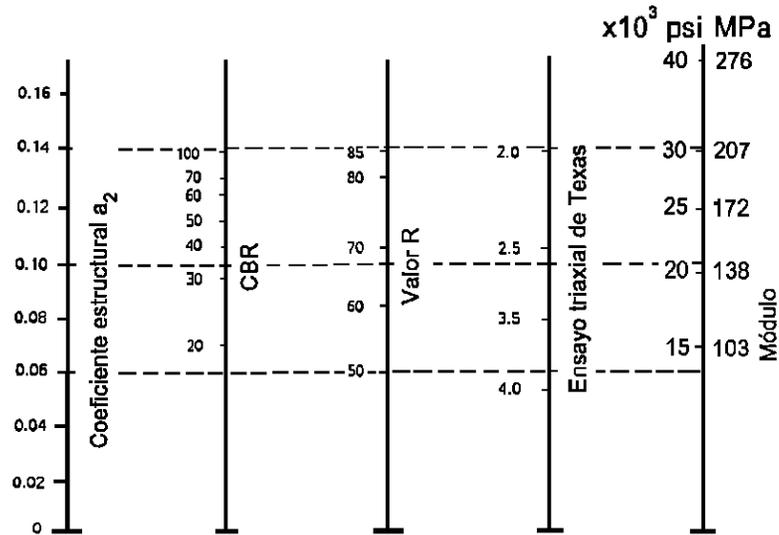


Fuente: AASTHO (1997) Guía para diseño de estructuras de pavimento.

b) Coeficiente estructural para la capa base “a₂”

En la figura 2.11 se muestra el ábaco para determinar el coeficiente estructural “a₂” para bases granulares. Este coeficiente está en función de distintos parámetros resistentes.

Figura 2.11. Relación entre el coeficiente estructural para base granular y distintos parámetros resistentes

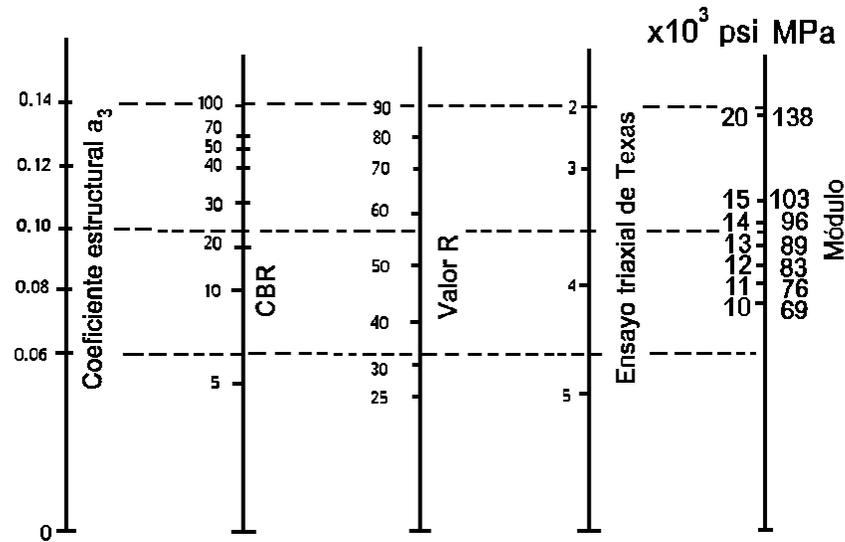


Fuente: AASTHO (1997) Guía para diseño de estructuras de pavimento.

c) Coeficiente estructural para la capa sub-base “ a_3 ”

Para la estimación del coeficiente de capa “ a_3 ” para sub-base granular se utiliza el ábaco de la figura 2.12, que relaciona este coeficiente con distintos parámetros resistentes.

Figura 2.12. Relación entre el coeficiente estructural para sub-base granular y distintos parámetros resistentes



Fuente: AASTHO (1997) Guía para diseño de estructuras de pavimento.

d) Coeficientes de drenaje “ m_i ”.-

Los coeficientes de drenaje que afectan a las capas no ligadas, tienen por objeto tomar en cuenta los efectos de distintos niveles de eficiencia de drenaje en el comportamiento de la estructura.

Es sabido que un buen drenaje aumenta la capacidad portante de la sub-rasante (el módulo resiliente aumenta cuando baja el contenido de humedad), mejorando la calidad del camino y permitiendo el uso de capas más delgadas.

En la Tabla 2.10 se indican los tiempos de drenaje recomendados por AASHTO. Estas recomendaciones están basadas en el tiempo requerido para drenar la capa base hasta un grado de saturación del 50 %. Sin embargo, el criterio del 85 % de saturación reduce en forma significativa el tiempo real usado para seleccionar la calidad del drenaje.

Tabla 2.10. Tiempo de drenaje.

Calidad de drenaje	50 % saturación en:	85% saturación en:
Excelente	2 horas	2 horas
Bueno	1 día	2 a 5 horas
Regular	1 semana	5 a 10 horas
Pobre	1 mes	Más de 10 horas
Muy Pobre	El agua no drena	Mucho más de 10 horas

Fuente: AASTHO (1997) Guía para diseño de estructuras de pavimento.

Esta calidad se expresa en la fórmula de dimensionado (Numero estructural) a través de unos coeficientes de drenaje m_i que afectan a las capas no ligadas (Tabla 2.11).

Tabla 2.11. Coeficientes de drenaje para pavimentos flexibles.

Calidad de drenaje	% de Tiempo que el pavimento está expuesto a niveles de humedad próximos a la saturación			
	< 1%	1 – 5 %	5 – 25 %	> 25 %
Excelente	1,40 – 1,35	1,35 – 1,30	1,30 – 1,20	1,20
Bueno	1,35 – 1,25	1,25 – 1,15	1,15 – 1,00	1,00
Regular	1,25 – 1,15	1,15 – 1,05	1,00 – 0,80	0,80
Pobre	1,15 – 1,05	1,05 – 0,80	0,80 – 0,60	0,60
Muy Pobre	1,05 – 0,95	0,95 – 0,75	0,75 – 0,40	0,40

Fuente: AASTHO (1997) Guía para diseño de estructuras de pavimento.

2.4. Introducción al reciclado de pavimentos.

Se entiende por reciclaje a la reutilización, generalmente luego de cierto tratamiento, de un material de pavimento que ha cumplido su finalidad inicial, el cual puede emplearse para construir un refuerzo en la misma carretera o alguna capa de una calzada nueva.

Entre los factores fundamentales que han contribuido al desarrollo de estas técnicas merecen destacarse las siguientes:

- a) La crisis energética causante de los significativos aumentos en los precios de los productos derivados del petróleo.
- b) El progresivo agotamiento de las fuentes de obtención de los agregados pétreos de adecuada calidad y el incremento de sus precios en canteras.
- c) Los aspectos ecológicos y la necesidad de conservar el medio ambiente, son factores que les otorgan actualmente la debida atención de los países más desarrollados.

2.4.1. Campos de aplicación del reciclaje.

El reciclado de pavimentos puede emplearse en aquellos casos en que las fallas pueden atribuirse a:

- a) Elevada rigidez del ligante asfáltico, como consecuencia de su envejecimiento por acción del tiempo.
- b) Desprendimiento de los agregados ocasionado por una falta de adherencia con el asfalto o bien por el envejecimiento del mismo.
- c) Deformaciones plásticas que producen ahullamiento, ondulaciones, corrimientos, etc. Esto es atribuible, principalmente, a mezclas con baja estabilidad.
- d) Afloramiento de asfalto, como consecuencia de una falla en el diseño de la mezcla, que conduce también a superficies propensas al patinaje de los vehículos.
- e) Fisuras y grietas ocasionadas por fatiga de la capa asfáltica (conocido como la piel de cocodrilo) o bien por contracción producida por efectos térmicos (fisuramiento transversal).

2.4.2. Tipos de reciclaje.

Existen tres tipos de reciclaje, cuyas denominaciones y características, son las siguientes:

- a) Reciclaje superficial. Consiste en el retramamiento de la superficie del pavimento en bajos espesores, generalmente de superior a los 2,5 cm, en casos en que los deterioros del pavimento no sean atribuibles a deficiencias estructurales. Se incluye todo procedimiento en que la superficie es fresada, cepillada o escarificada, triturada y adicionada o no de un agente de reciclaje, con o sin la incorporación de pequeños porcentajes de materiales vírgenes, reacondicionada y re-compactada. El proceso puede adelantarse en caliente o en frío y en este último caso el agente de reciclaje.
- b) Reciclaje en el lugar (in-situ). Conocido también como reciclaje en frío, consiste en rehabilitar el pavimento asfáltico hasta una profundidad mayor de 2,5 cm, involucrando o no el material de la capa de base. Para ello, el espesor es escarificado y el material trozado resultante es triturado hasta un tamaño adecuado y luego, mezclado con un agente de reciclaje y eventualmente con cierto porcentaje de agregado nuevo, todo como para cumplir con las exigencias de la nueva mezcla.
- c) Reciclaje en planta. Denominado también reciclaje en caliente, consiste en escarificar el espesor deseado del pavimento existente y transportar el material

trozado a una planta en la que es triturado y clasificado por su granulometría. El material también puede obtenerse del pavimento por medio de fresado en frío. Posteriormente, en base al análisis de composición del material viejo, se reconstruye en caliente la nueva mezcla a reciclar, la cual debe responder al diseño adoptado.

2.4.3. Ventajas de las técnicas de reciclado.

En la tabla 2.12 se muestra las principales ventajas de las distintas técnicas de reciclado más frecuentemente utilizadas.

Tabla 2.12. Principales ventajas de las técnicas de reciclado.

Principales ventajas de las técnicas de reciclado	
Técnica de reciclado	Ventajas
Reciclado superficial	<ul style="list-style-type: none"> Mejora la resistencia al deslizamiento Corrige las deficiencias de origen superficial Mejora el perfil geométrico de la calzada Permite eliminar la capa de restitución de galibo en refuerzos del pavimento
Reciclado “in situ”	<ul style="list-style-type: none"> Mejora la resistencia al deslizamiento Corrige las deficiencias de origen superficial y estructural Permite incrementar en forma limitada la resistencia estructural del pavimento Elimina temporalmente las fisuras reflejas Permite corregir las características de las mezclas asfálticas superficiales (6 a 7cm) con deformaciones plásticas Mejora el perfil geométrico de la calzada
Reciclado en planta	<ul style="list-style-type: none"> Refuerza estructuralmente al pavimento de acuerdo con las necesidades del proyecto Corrige las deficiencias de origen superficial y estructural Produce mezclas asfálticas de mejor calidad Permite eliminar o corregir las capas intermedias de deficiente comportamiento Elimina las fisuras reflejas Mejora la resistencia al deslizamiento Corrige el perfil geométrico de las calzada

Fuente: Universidad de Costa Rica, Ficha técnica de pavimento asfáltico reciclado

2.4.4. Formas de obtención del RAP

2.4.4.1. Reciclaje superficial.

Este sistema es aplicable a espesores muy delgados de pavimento, puede realizarse en caliente o en frío y constituye una solución en aquellos casos en que los que existen problemas de deslizamiento, ya que mediante la eliminación de un espesor superficial débil, se pueden regenerar las características antideslizantes del pavimento. Así mismo, puede resultar aplicable cuando se presenten otros tipos de fallas superficiales, tales como degradación de la carpeta por pérdidas de ligante o agregados pétreos o abultamiento producidos por el empleo de mezclas asfálticas de baja estabilidad.

2.4.4.2. Reciclaje en el lugar.

Consiste en la pulverización de la carpeta asfáltica existente y su mezcla con el material de base existente, añadiendo un aditivo que desarrolle en la capa reciclada una resistencia suficiente para soportar adecuadamente las cargas de tránsito futuro. La selección del aditivo apropiado depende de los factores tales como el uso proyectado, la resistencia requerida y el costo del producto. Los aditivos más empleados para este tipo de reciclaje son el cemento asfáltico, los asfaltos líquidos y emulsionados.

2.4.4.3. Reciclaje en planta (en caliente).

Es un proceso por el cual se combinan materiales recuperados de un pavimento asfáltico y eventualmente de la base granular, con asfalto y agregados nuevos y/o agentes de reciclaje, en una planta central, para producir mezclas para pavimentación en caliente. El producto terminado deberá cumplir todas las especificaciones y requisitos constructivos que el tipo de mezcla producida.

2.5. Conceptos básicos sobre geoceldas.

2.5.1. Definición y antecedentes.

Los geo-sintéticos son un producto en el que al menos uno de sus componentes está fabricado a base de polímeros sintéticos o naturales. Los geo-sintéticos se fabrican en forma de fieltro, manto, lámina o estructura tridimensional, los cuales son puestos en contacto con el suelo u otros materiales en aplicación de la ingeniería civil.

El polímero usado para la fabricación de la geocelda es polietileno de alta densidad, no degradable térmicamente.

Geoceldas son una nueva generación de geo-sintéticos fabricado como un sistema de confinamiento con celdas, a partir de un material denominado neoloy. Sus principales campos de aplicación son la estabilización de sub-rasantes, refuerzo de estructuras de pavimentos, aplicaciones en estructuras de contención y control de erosión.

Los sistemas de confinamiento celular (geoceldas) fueron utilizados por primera vez por Ingenieros del ejército de los Estados Unidos, durante la guerra del Golfo, con la finalidad de lograr una rápida movilidad de sus tropas. Las geoceldas fueron empleadas para confinar la arena del lugar, lo cual aumentaba la capacidad de soporte, facilitando la creación de accesos para vehículos pesados, a altas velocidad de ejecución.

Años después, se permitió su uso para aplicaciones civiles y se inició la producción comercial. Sin embargo, a pesar de su aplicación original, el desarrollo de las geoceldas en el mercado de la ingeniería civil se centró principalmente en el control de la erosión de suelos para la protección de canales y taludes.

En estructuras de pavimento, las geoceldas se usaban en las capas estructurales más inferiores, normalmente en la sub-base, con el fin de mejorar el soporte de carga de suelos débiles.

2.5.2. Características de las geoceldas.

Los sistemas de geoceldas son estructuras tridimensionales dispuestas en forma de panel (Figura 2.13), permeables, a base de polímeros (sintéticos o naturales), interconectadas, que encierran completamente un tipo de relleno, proporcionando confinamiento a toda la estructura, previendo la extensión lateral del material de relleno. Cuando se le aplican cargas verticales a este sistema, las tensiones circunferenciales en las paredes de las celdas y las resistencias de las celdas adyacentes se movilizan. Estas tensiones y resistencias reducen la deformación lateral del material de relleno. Como resultado la rigidez incrementa generando que la capa de material de relleno y geocelda actué como una matriz

rígida y distribuya las cargas verticales del tráfico sobre un área más grande que la del suelo de la sub-rasante.

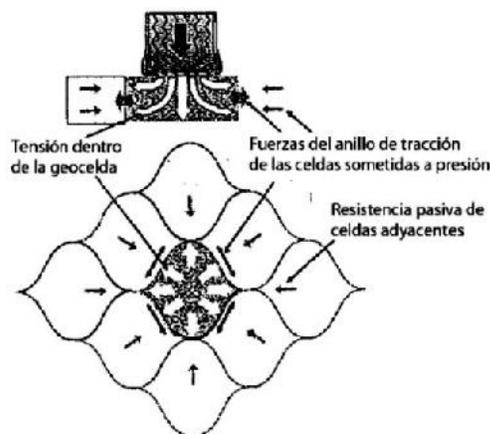
Figura 2.13. Estructura típica de geoceldas.



Fuente: Artículo de GEOSYSTEMS.

Según Meyer & Emersleben, (2005), el principal efecto que tiene un sistema de geoceldas, consiste en que éstas retienen horizontalmente el suelo encerrado en su interior, por lo tanto, limitan la deformación lateral bajo presión, para que el comportamiento del suelo mejore ante las fuerzas de deformación. Cuando el suelo estabilizado con un sistema de geoceldas es sometido a fuerzas o presiones, la dilatación lateral del material de relleno es restringida por las fuerzas del anillo de tracción de la geocelda y por la resistencia pasiva de las celdas adyacentes. Todo este sistema de funcionamiento de un sistema de geoceldas se muestra en la figura 2.14.

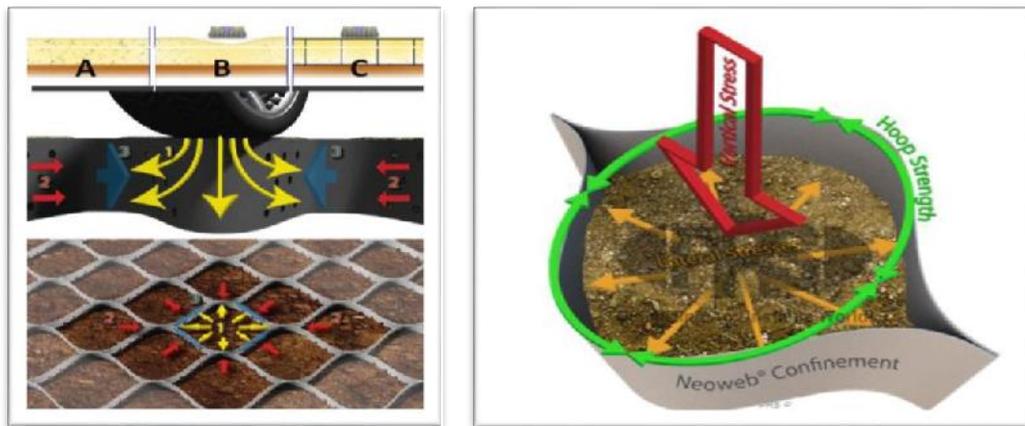
Figura 2.14. Esquema de funcionamiento de geoceldas.



Fuente: Meyer y Emersleben, 2005

El sistema mejora el rendimiento de los materiales de relleno al tiempo que incrementa la capacidad de soporte de carga de las capas de pavimento, simulando una losa semirrígida o viga, en la cual se distribuyen las cargas en un área más grande, reduce la cantidad de las tierras necesarias en la estabilización de firmes de baja capacidad portante. De esta manera, disminuyen los esfuerzos sobre la sub-base y/o la sub-rasante, lo que permite la reducción de los asentamientos totales y diferenciales, incrementando la vida útil de la estructura de pavimento.

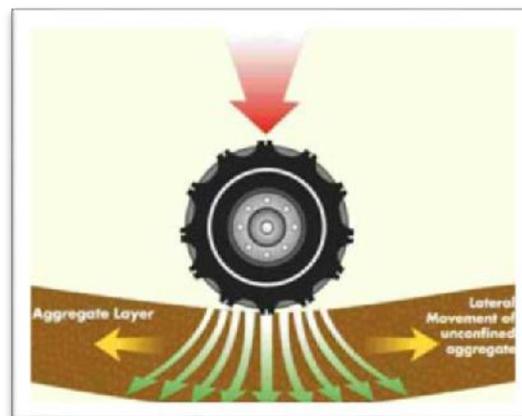
Figura 2.15. Distribución de esfuerzos en el sistema de geoceldas.



Fuente: Meyer y Emersleben.

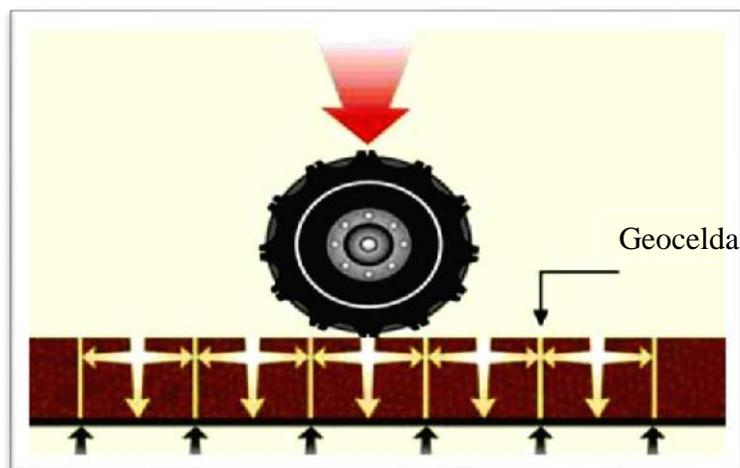
El polímero usado para la fabricación de la geocelda es polietileno de alta densidad, no degradable térmicamente.

Figura 2.16. Formación de roderas por cargas superiores a la capacidad portante del terreno transmitidas al firme.



Fuente: Artículo de CENET. (2014)

Figura 2.17. Comportamiento de las geoceldas.



Fuente: Artículo de CENET. (2014)

Debido al confinamiento celular se evitan desplazamientos laterales de agregados. Esfuerzos laterales iguales a la resistencia de las celdas rellenas de agregado.

Cargas transmitidas al firme iguales a la capacidad portante del terreno. No se forman roderas.

2.5.2.1 Datos técnicos de las geoceldas.

A continuación se presenta datos técnicos de las geoceldas, según la empresa especializada en la fabricación y distribución de materiales de calidad para la aplicación de técnicas de bioingeniería en la restauración del paisaje, Aquanea es una empresa Europea.

Tabla 2.13. Datos técnicos de las geoceldas.

Propiedades	Método de ensayo	Valor típico
Mínima densidad del polímero	ASTM D-1505	0,940 g/cm ³
Espesor nominal de la placa	ASTM D-5199	1,25 mm +/- 5 %
Contenido en carbono negro	ASTM D-1603	1,5 % mínimo
Resistencia al agrietamiento ante agresiones medioambientales	ASTM D-1693	3400 hs

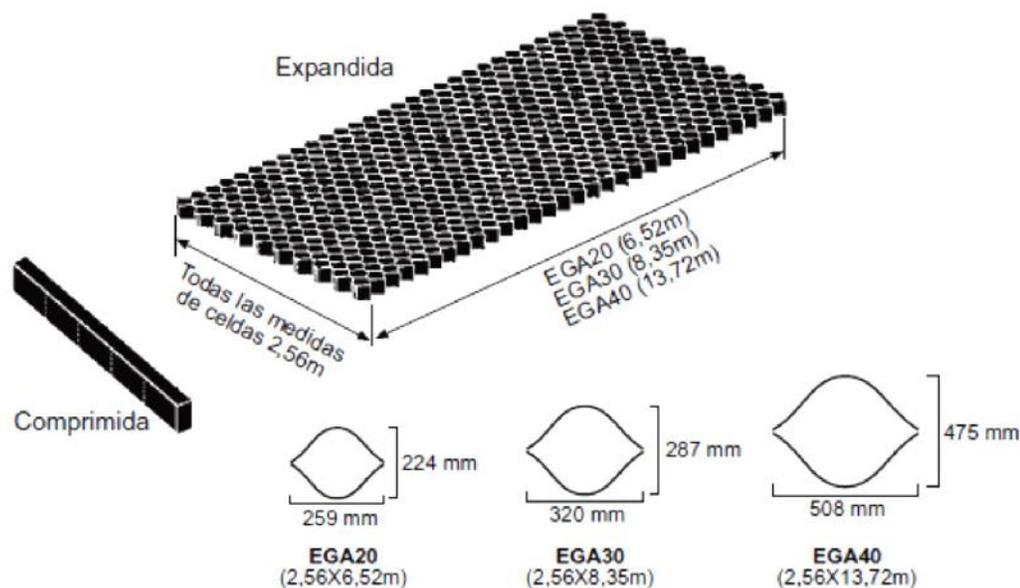
Fuente: Artículo de AQUANEA. European soil and water engineering group (2006)

Tabla 2.14. Medidas de las geoceldas.

Medidas	EGA 20 (Normal)	EGA 30 (Intermedia)	EGA 40 (Grande)
Ancho x largo (celda expandida, mm)	259 x 224	320 x 287	508 x 475
Superficie (celda expandida, cm ²)	289	460	1206
Ancho x largo (panel expandido, m)	2,56 x 6,52	2,56 x 8,35	2,56 x 13,72
Superficie (panel expandido, m ²)	16,7	21,4	35,14
Ancho x largo	75, 100 150, 200, 250, 300		

Fuente: Artículo de AQUANEA. European soil and water engineering group (2006)

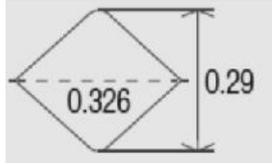
Figura 2.18. Medidas de las geoceldas.



Fuente: Artículo de AQUANEA. European soil and water engineering group eeig (2006)

Por otro lado también podemos presentar datos de técnicas de las geoceldas, de la empresa Prodac con sede en el Callao, Perú y con sucursal en Bolivia a través de un representante.

Tabla 2.15. Datos técnicos de las geoceldas.

Geocelda de HDPE	Unidad	Valor
Polymer	-	HDPE
Altura	mm	75
Espesor	mm	1,5
Distancia entre 2 puntos de soldaduras	mm	450
Resistencia de soldadura	N	1060
Dimensión de la celda expandida (aprox.)	m	
Ancho de la sección expandida	m	2,6
Longitud de la sección expandida	m	5,25
N° de celdas por sección (ancho x largo)	-	8x18
Superficie de la sección expandida	m	13,65
Color	-	Negro/verde

Fuente: Empresa Prodac con sede en Callao, Perú

2.5.3. Usos de las geoceldas en obras civiles.

2.5.3.1. Estabilización de taludes.

La instalación de geoceldas en un talud cumple la función de retener los materiales de relleno que se aportan en superficie. Al ser un material drenante, el agua de la escorrentía se ve frenada en su tránsito entre las celdas. Esto reduce la formación de procesos erosivos y dota de disponibilidad de agua a las plantas.

La imbricación del material vivo con el material de relleno junto con las geoceldas y las fijaciones de estas, crea una estructura que funciona como una armadura flexible y permanente.

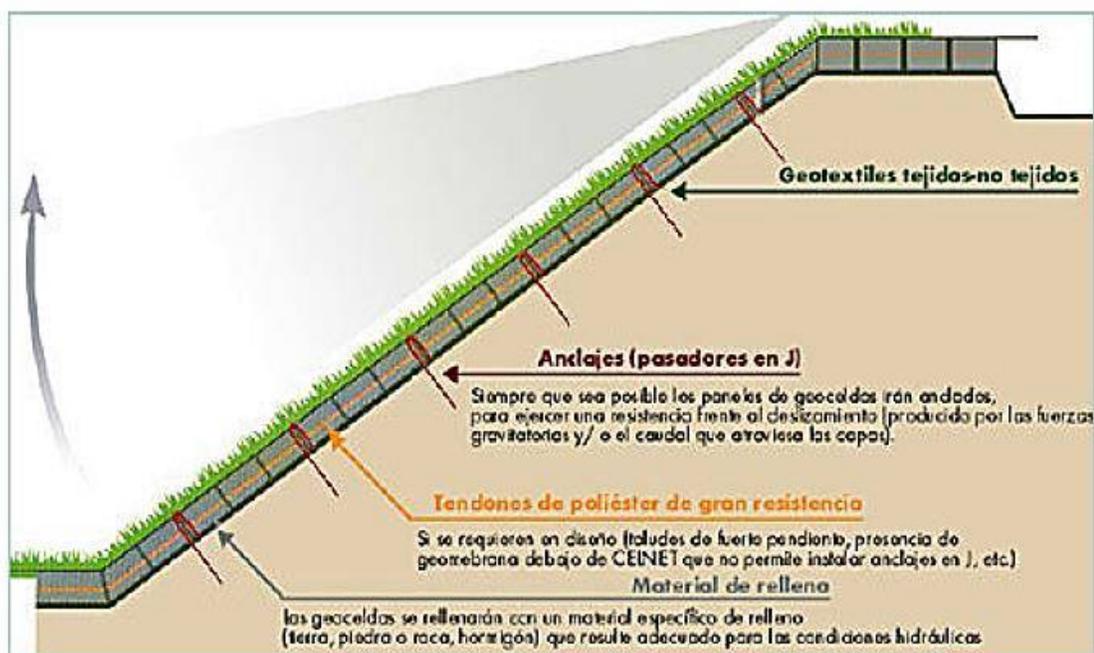
La instalación de geoceldas en un talud permite la hidro-siembra y la plantación de arbustos.

Tabla 2.16. Aplicación de las geoceldas según la pendiente del talud.

Aplicación de las geoceldas según la pendiente del talud					
Modelo	$\geq 1H: 1V$	2H: 1V	3H: 1V	4H: 1V	5H: 1V
EGA 20	X	X	X	X	X
EGA 30		X	X	X	X
EGA 40				X	X

Fuente: Empresa Prodac con sede en Callao, Peru

Figura 2.19. Estabilización de taludes.



Fuente: Empresa Prodac con sede en Callao, Peru

2.5.3.2. Muros de contención de tierras y muros verdes.

Las geoceldas tienen aplicación en la construcción de muros de contención de tierras y de muros verdes. En estos casos las geoceldas se instalan horizontalmente procediendo a su relleno por capas.

En el caso de los muros verdes las celdas exteriores se pueden rellenas de tierra vegetal para favorecer la implantación y crecimiento de la vegetación.

En la mayoría de los casos el material de relleno será del propio del lugar.

El sistema de confinamiento celular se puede utilizar tanto para construir muros de terraplén como para muros de contención de terreno excavado.

Figura 2.20. Muros de contención de tierras.



Fuente: Empresa Prodac con sede en Callao, Peru

2.5.4. Geoceldas como refuerzo de la capa base y sub-base del pavimento flexible.

El relleno se confina en la estructura 3D de sistema para evitar movimiento debajo de la carga.

El sistema proporciona protección de profundidad integral al crear una superficie estable y firme que aumenta los tiempos de ciclo de vida útil de pavimento.

El efecto del sistema es inmediato y funciona en un principio de resistencia tangencial.

La instalación del sistema es hasta tres veces más rápida en comparación con los sistemas de múltiples mallas ya que solo hay que extenderlo porque se presenta en forma comprimida de acordeón, para una mejor manipulación y almacenamiento.

Figura 2.21. Geoceldas en carreteras y plataformas sin asfaltar.



Fuente: Empresa Prodac con sede en Callao, Peru

Figura 2.22. Aplicación sistema de geoceldas.



Fuente: Empresa PRS. Bogota, Colombia

2.5.4.1. Ventajas del uso de las geoceldas en colocación de capa base y sub-base.

1. Utiliza relleno local

El sistema de geoceldas puede utilizar relleno disponible localmente o en el mismo sitio, mediante el confinamiento del material. Las geomallas requieren un agregado limpio, un costo de material cada vez mayor y costos adicionales de transportación.

2. Ofrece soluciones eficaces a problemas de drenaje, inestabilidad del suelo y control de erosión.

El relleno que se confina en la estructura celular de la geocelda no se daña con el flujo laminar y de esta manera previene la erosión.

3. Confina el relleno, estabiliza el suelo

El relleno se confina en la estructura 3D del sistema de geoceldas para evitar movimiento debajo de la carga.

4. Disminuye la formación de surcos y reduce el mantenimiento

El sistema de geoceldas es una solución de profundidad integral. Las geomallas no protegen la conversión de la superficie. Como consecuencia, las geomallas necesitan más mantenimiento para proteger superficies de apoyo.

5. Disminuye la resistencia de rodadura y favorece tiempos de ciclo más rápidos

Las geomallas solo controlan el movimiento lateral en las capas delgadas. El sistema de geoceldas proporciona protección de profundidad integral al crear una superficie estable y firme que aumenta los tiempos de ciclo y reduce el desgaste del neumático.

6. Aumenta la velocidad de construcción

La instalación del sistema de geoceldas es hasta tres veces más rápida en comparación con los sistemas de múltiples mallas.

Para su colocación solo se debe extenderlo ya que presenta una forma comprimida de acordeón, para una mejor manipulación y almacenamiento.

2.5.5. Normas de ensayos en geotextiles.

2.5.5.1. Resistencia a la tensión y alargamiento a la rotura de geotextiles ASTM D – 1682, ASTM D – 4532, INV E – 901

Esta norma describe el procedimiento que debe seguirse para la determinación de la resistencia a la tensión y el alargamiento a la rotura de los geotextiles tejidos y no tejidos.

El procedimiento consiste en aplicar longitudinalmente a una porción del ancho del espécimen de ensayo, una carga que aumenta continuamente, hasta que se produzca la rotura en un tiempo determinado.

2.5.5.2. Resistencia al punzonamiento de geotextiles ASTM D – 4833, INV E – 902.

Este método se utiliza para determinar la resistencia a la perforación de los geotextiles.

La resistencia a la perforación de los geotextiles se usa como una propiedad índice que refleja la habilidad del geotextil para resistir la penetración de los agregados.

2.5.5.3. Medida del espesor de materiales textiles ASTM – D 1777, INV E – 906.

Esta norma describe el procedimiento para medir el espesor de todo tipo de material textil, sea este tejido o no tejido, incluyendo geotextiles.

El espesor, es una de las propiedades físicas básicas de los materiales textiles. Algunas propiedades importantes y algunas características de comportamiento de los materiales textiles, se pueden determinar con base en la medida del espesor, antes o después de abrasión o de encogimiento. La permeabilidad de los geotextiles, entre otras variables, depende de su espesor.

El valor del espesor de la mayoría de los materiales textiles, variara considerablemente dependiendo de la presión aplicada al espécimen en el momento en que la medida es tomada; en todo caso, el espesor aparente varia inversamente a la presión aplicada y, por esta razón, se debe especificar la presión a la cual se tomó la medida del espesor.

2.5.5.4. Resistencia de los geotextiles a la ruptura ensayo de ruptura con diafragma hidráulico INV E – 908.

Este método de ensayo se emplea para determinar la resistencia de los geotextiles a la explosión, usando el diafragma hidráulico para el ensayo a la explosión.

En este ensayo, se toma una muestra de geotextil, la cual es asegurada a un diafragma expandible. El diafragma se expande por medio de un fluido a presión hasta el momento en que se rompa el geotextil. La diferencia entre la presión total requerida para la ruptura

de la muestra y la presión requerida para inflar el diafragma es considerada como la resistencia a la explosión.

El uso de este método permite establecer un valor índice que puede ser usado como criterio normalizado de diseño.

2.5.5.5. Tamaño de abertura aparente de geotextiles ASTM D – 4751, INV E – 910.

Este método de ensayo se emplea para determinar el tamaño de abertura aparente de un geotextil (TAA), tamizando microesferas de vidrio a través de él.

Esta norma no se refiere a los problemas de seguridad que puedan estar asociados con su utilización. Es responsabilidad de quien la emplea, establecer prácticas apropiadas de seguridad y sanidad y determinar la aplicabilidad de las limitaciones reglamentarias, antes de ejecutar el ensayo.

Se coloca una muestra del geotextil en el marco de un tamiz y se colocan microesferas de vidrio sobre la superficie de aquél. El geotextil y el marco se sacuden lateralmente de manera que el movimiento induzca a las esferas a atravesar la muestra de ensayo. El procedimiento se repite empleando la misma muestra con esferas de diferentes tamaños hasta que se determine su tamaño de abertura aparente.

2.5.5.6. Método estándar para determinar la retención de asfalto de geo-textiles usados en repavimentaciones asfálticas ASTM D-6140, INV E – 911.

Esta norma consiste en medir la capacidad de retención asfáltica de los geo-textiles de repavimentación la cual se define como el volumen de cemento asfáltico retenido por geo-textiles de repavimentación por unidad de área del espécimen después de ser sumergido en cemento asfáltico. El uso de este método esta dado para establecer un valor índice para proveer criterios estándar y una base para reportes uniformes.

CAPÍTULO III
RELEVAMIENTO DE LA
INFORMACIÓN

CAPÍTULO III

RELEVAMIENTO DE LA INFORMACIÓN

3.1. Exploración para toma de muestras de suelo de capa base y capa sub-base.

Previamente a la extracción de muestras de suelos, se procede a realizar una inspección sistemática de los diferentes proyectos camineros que se encuentren en ejecución en la ciudad de Tarija, esto para seleccionar el más cercano y solicitar las muestras necesarias.

Una vez seleccionado el lugar se procede a realizar los trámites correspondientes para la extracción de muestras, se decide extraer capa base y sub-base del mismo tramo carretero, el cual se encuentra en un 60 % de ejecución.

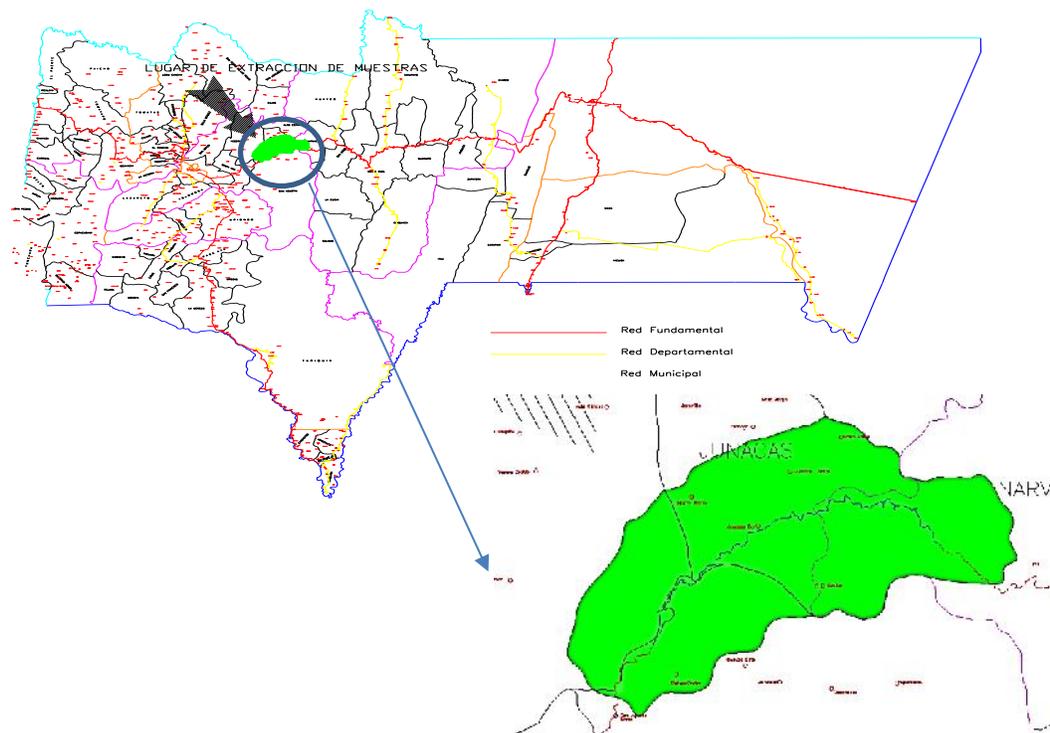
3.1.1. Ubicación del lugar de extracción de las muestras de capa base y capa sub-base.

La carretera Puente Jarcas - Piedra Larga, circunscrita en la provincia Cercado del departamento de Tarija, forma parte del tramo carretero al chaco.

El tramo “Puente Jarcas – Piedra Larga” desde 00+000 (9+504,60) hasta 15+336,70 (24+840,60), pertenece a la ruta fundamental F11 y beneficia directamente a las comunidades de Jarcas, Junacas, Piedra Larga, San Agustín, Narvaez, Yesera, Santa Ana entre otras.

Se procede a la extracción de muestras con el objetivo de estudiar el comportamiento de los suelos y si estos cumplen con características de clasificación, propiedades físico-mecánicas para capa base y sub-base, para posteriormente realizar mezclas a diferentes porcentajes de pavimento asfáltico reciclado y nuevamente estudiar el comportamiento de los mismos.

Figura 3.1. Ubicación del tramo en estudio.



Fuente: TESA, construcción camino Puerta de Chaco-Canaletas

3.1.1.1. Características del tramo.

3.1.1.1.1. Fisiografía.

La ruta está ubicada dentro de la unidad morfoestructural denominada Cordillera Oriental o Bloque Paleozoico, que corresponden al sector sur, caracterizada por un paisaje representada de llanuras, colinas y pie de montes, con pendientes suaves a moderadas, entre los altos topográficos más representativos tenemos al cerro Morro Alto y la más sobresaliente El Abra El Cóndor.

3.1.1.1.2. Hidrografía.

La red hidrográfica del proyecto pertenece a la cuenca del río Bermejo, subsistema del río Tarija, representada por el río Santa Ana, que sirve como nivel base transitorio a los ríos Jarcas, Junacas y varias quebradas; el río Salinas que sirve de nivel base transitorio al río Canaletas y quebradas de longitud pequeñas, el diseño de avenamiento dominante en el área de influencia del proyecto es del tipo dendrítico.

3.1.1.1.3. Clima.

Según la clasificación climática de Caldas Lang, el clima de la región corresponde a la clase templado semiárida. La temperatura media anual mínima extrema alcanza los -8°C los meses de mayo-julio y una temperatura extrema máxima alcanza los 39°C , en los meses de octubre - diciembre, con una precipitación media anual de 1000-1100mm.

3.1.2. Especificaciones técnicas de suelo capa base y capa sub-base.

Estas especificaciones definen la calidad de mezclas para ser utilizadas como capa base y capa sub-base.

Tabla 3.1. Resumen de especificaciones técnicas para capa base y capa sub-base.

Descripción	Capa base	Capa sub-base
Límite líquido	Máx. 35	Máx. 35
Índice de plasticidad	Máx. 6	Máx. 8
Valor de soporte CBR (%) al 100% D. Max	$\geq 80\%$	$\geq 40\%$
Desgaste de los Ángeles (%)	$< 40\%$	$< 35\%$

Fuente: Manual de ensayos de suelos y materiales (suelos) de la ABC

Tabla 3.2. Bandas granulométricas para sub-base, base y capas de rodadura.

Tamiz		TM-50a	TM-50b	M-50c	TM-40a	TM-40b	TM-40c	TM-25
(mm)	Alternativo							
50	2"	100	100	100				
37,5	1 1/2"	-	70-100	-	100	100	100	
25	1"	55-100	55-85	70-100	70-100	80-100	80-100	100
19	3/4 "	-	45-75	60-90	50-80	-	-	70-100
9,5	3/8 "	30-75	35-65	40-75	25-50	50-80	50-80	50-80
4,75	N° 4	20-65	25-55	30-60	10-30	35-65	35-65	35-65
2,36	N° 8	-	-	-	5-15	-	-	-
2	N° 10	10-50	15-45	15-45	-	25-50	25-50	25-50
0,425	N° 40	5-30	5-25	10-30	0-5	10-30	10-30	10-30
0,075	N° 200	0-20	0-10	0-15	0-3	5-15	5-15	5-15

Fuente: Manual de ensayos de suelos y materiales (suelos) de la Administradora Boliviana de Carreteras.

Los materiales para base deberán cumplir con la graduación TM-50a de la tabla 3.2. y en el caso de capa sub-base la granulometría deberá ajustarse a una de las siguientes bandas: TM-50b, TM-50c o TM-25.

3.1.3. Pruebas para la caracterización del suelo para capa base y capa sub-base.

3.1.3.1. Procedimientos para la preparación de muestras de suelos por cuarteo (AASHTO T-248).

Previa obtención de muestras tanto de suelo para capa base y sub-base se realizó el método de cuarteo descrito en el manual de ensayos de suelos y materiales de la ABC.

Se colocó la muestra trasladada de campo, sobre una superficie dura, limpia y nivelada, posteriormente se mezcló el material completamente, se divide la muestra aplanada en cuatro (4) partes iguales, empleando una regla y se retiran dos partes diagonalmente opuestas, incluyendo el material más fino, usando una escoba o cepillo, si es necesario. El material que quede se vuelve a mezclar tomando paladas alternativamente de cada una de las dos cuartas partes que quedaron. Se repitió el proceso de cuarteo hasta que la muestra quede reducida a 5 Kg.

Figura 3.2. Cuarteo de muestras.

División de la muestra en cuatro partes iguales.



Retiro de dos partes diagonalmente opuestas.



Tamizado de material



Resultado del cuarteo

Fuente: Elaboración propia

3.1.3.2. Distribución granulométrica de materiales para capa base y sub-base, mediante tamizado (ASTM D22; AASTHO T88).

Para el análisis realizado en el presente trabajo se siguieron las orientaciones del manual de ensayos de suelos y materiales de la ABC y todo aquello ya mencionado en el Capítulo II del presente trabajo.

Para la realización del ensayo se toma 5000 g. de cada muestra de suelo y se coloca en el horno dentro de bandejas por un periodo no inferior a las 24h, luego de pasado este tiempo se retiran las muestras del horno y se tomó el peso del material seco, seguidamente se procedió a vaciar la muestra en el juego de mallas para su respectivo tamizado manual por cada una por el lapso de 15 minutos, luego se pesa cuidadosamente el suelo que queda retenido en cada tamiz con el empleo de diferentes bandejas previamente identificadas, donde se deposita cada material que pasa.

Figura 3.3. Juego de tamices.



Fuente: Elaboración propia

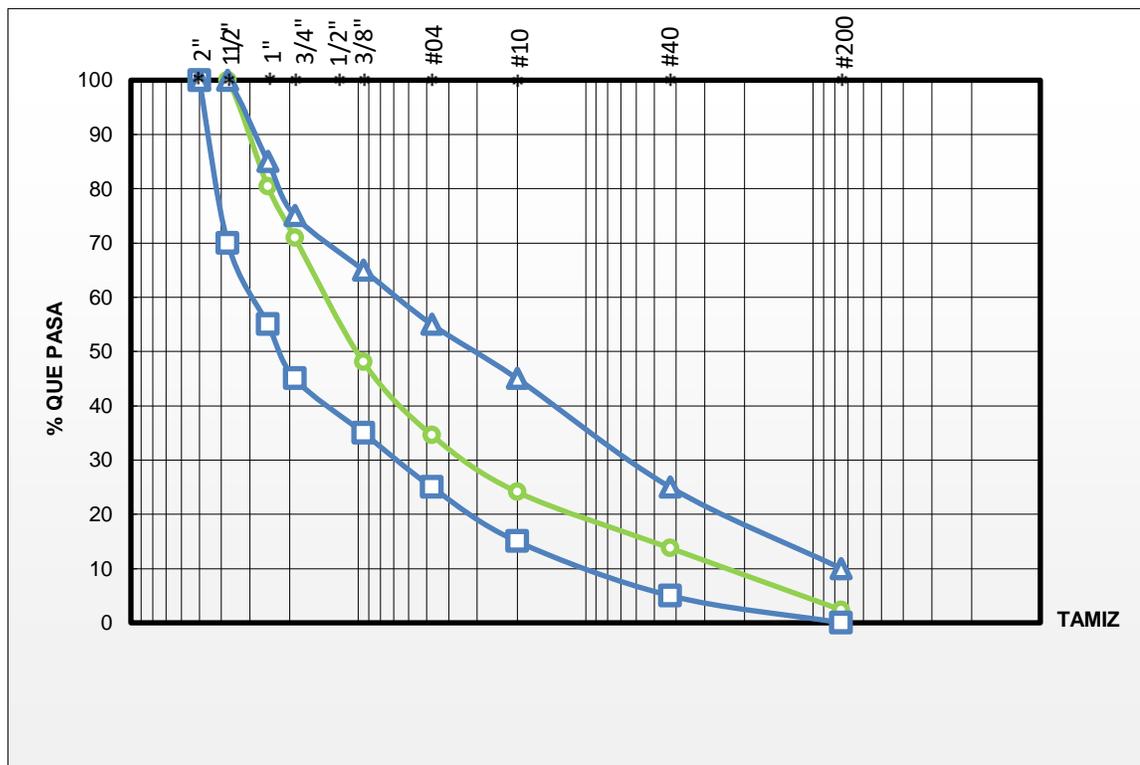
3.1.3.2.1. Suelo para capa base.

Tabla 3.3. Granulometría de suelo capa base.

Peso Total (g)			5000,00			
Tamices	Tamaño (mm)	Peso Ret. (g)	Ret. Acum (g)	% Ret	% Que Pasa del Total	Especificaciones
2"	50	0,00	0,00	0,00	100,00	100%
1 1/2"	37,5	0,00	0,00	0,00	100,00	70%-100%
1"	25,00	979,20	979,20	19,58	80,42	55%-85%
3/4"	19,00	472,40	1451,60	29,03	70,97	45%-75%
3/8"	9,50	1146,30	2597,90	51,96	48,04	35%-65%
Nº 4	4,75	672,70	3270,60	65,41	34,59	25%-55%
Nº 10	2,00	523,90	3794,50	75,89	24,11	15%-45%
Nº 40	0,425	516,90	4311,40	86,23	13,77	5%-25%
Nº 200	0,075	570,30	4881,70	97,63	2,37	0%-10%

Fuente: Elaboración propia

Gráfico 3.1. Curva de ensayo de distribución granulométrica de capa base.



Fuente: Elaboración propia

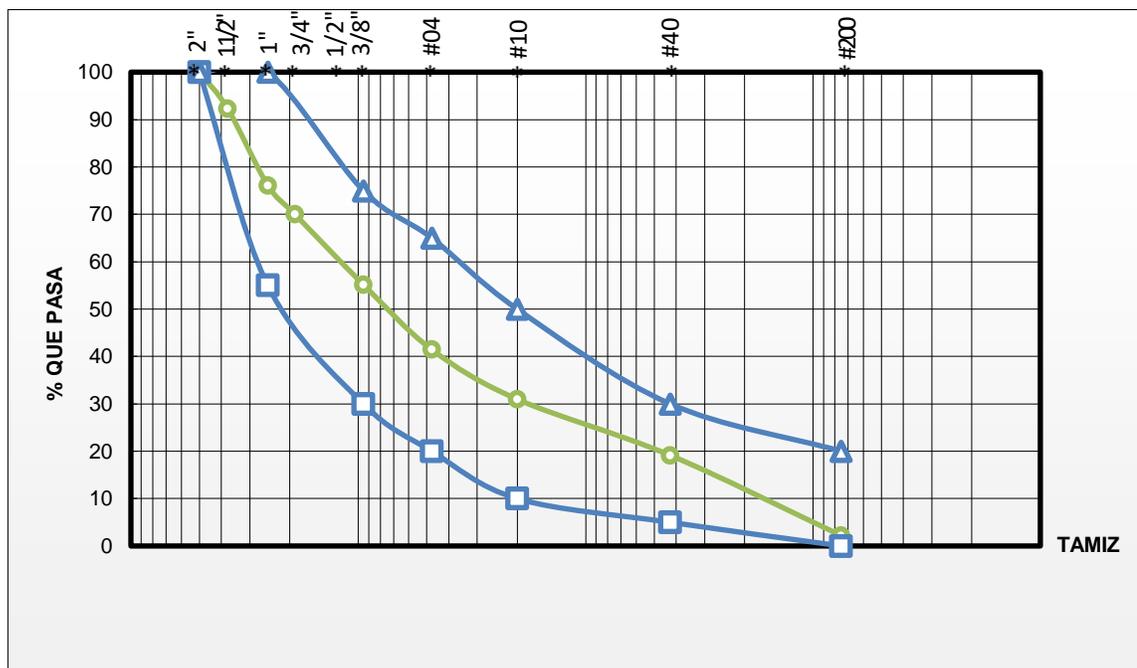
3.1.3.2.2. Suelo para capa sub-base.

Tabla 3.4. Granulometría de suelo capa sub-base.

Peso Total (g)			5000,00			
Tamices	Tamaño (mm)	Peso Ret. (g)	Ret. Acum (g)	% Ret	% Que Pasa del Total	Especificaciones
2"	50	0,00	0,00	0,00	100,00	100%
1 1/2"	37,5	386,50	386,50	7,73	92,27	-
1"	25,00	808,70	1195,20	23,90	76,10	55%-100%
3/4"	19,00	304,20	1499,40	29,99	70,01	-
3/8"	9,50	741,80	2241,20	44,82	55,18	30%-75%
Nº 4	4,75	686,40	2927,60	58,55	41,45	20%-65%
Nº 10	2,00	523,90	3451,50	69,03	30,97	10%-50%
Nº 40	0,425	591,20	4042,70	80,85	19,15	5%-30%
Nº 200	0,075	848,30	4891,00	97,82	2,18	0%-20%

Fuente: Elaboración propia

Gráfico 3.2. Curva de ensayo de distribución granulométrica de capa sub-base.



Fuente: Elaboración propia

Siguiendo el manual de ensayos de suelos y materiales de la normativa ABC se realiza la respectiva revisión de las bandas granulométricas requeridas para suelo capa base y capa sub-base, dando como resultado, que las muestras se ajustan dentro de los límites establecidos por esta.

Las bandas granulométricas establecidas para capa base son TM-50b, TM-50c o TM-25

Las bandas granulométricas establecidas para capa sub-base es TM50a.

Tabla 3.5. Bandas granulométricas para sub-base, base y capas de rodadura.

Tamiz		TM-50a	TM-50b	M-50c	TM-40a	TM-40b	TM-40c	TM-25
(mm)	Alternativo							
50	2"	100	100	100				
37,5	1 ½"	-	70-100	-	100	100	100	
25	1"	55-100	55-85	70-100	70-100	80-100	80-100	100
19	¾"	-	45-75	60-90	50-80	-	-	70-100
9,5	3/8"	30-75	35-65	40-75	25-50	50-80	50-80	50-80
4,75	Nº 4	20-65	25-55	30-60	10-30	35-65	35-65	35-65
2,36	Nº 8	-	-	-	5-15	-	-	-
2	Nº 10	10-50	15-45	15-45	-	25-50	25-50	25-50
0,425	Nº 40	5-30	5-25	10-30	0-5	10-30	10-30	10-30
0,075	Nº 200	0-20	0-10	0-15	0-3	5-15	5-15	5-15

Fuente: Manual de ensayos de suelos y materiales (suelos) de la Administradora Boliviana de Carreteras.

La banda granulométrica para capa base del presente trabajo es TM-50b.

La banda granulométrica para capa sub-base es TM50a.

3.1.3.3. Límites de consistencia o límites de Atterberg.

Se realiza el procedimiento del ensayo de determinación del límite líquido (ASTM D4318; AASHTO T89) y del límite plástico e índice de plasticidad (ASTM D4318; AASHTO T90) siguiendo la norma ABC respectivamente a cada capa.

Los límites de Atterberg o límites de consistencia se utilizan para caracterizar el comportamiento de los suelos finos.

Limite líquido.

- Se trabaja con una muestra que pasa la malla N°40, se la deposita en un recipiente y se le agrega agua, para que con una espátula se realice una homogeneización de la humedad del suelo hasta obtener una pasta suave y homogénea.
- Verificar la calibración de la altura de caída de la copa de Casagrande, esta debe tener 1 cm. de caída caso contrario de debe regularse para que esto suceda.
- Se coloca una porción de la muestra en la copa de Casagrande tratando siempre que sea de manera horizontal de 1 cm. sujetar con una mano la copa de Casagrande y con la otra realizar la ranura de manera firme en una sola pasada, tratando de que en el fondo de la ranura se encuentre visible la superficie de la copa.
- Posteriormente se acciona la copa a razón de dos golpes por segundo, contando hasta que la ranura se cierre por lo menos 1.27 cm. (Anotar el número de golpes.)
- Con la espátula y de manera perpendicular a la ranura, realizar dos cortes a la muestra, estos deben pasar por los extremos de la parte que se unió. Luego extraer la porción de suelo entre los cortes y proceder a depositarla en un capsula previamente identificada y pesada.
- Pesar el suelo húmedo más capsula antes de ser introducida al horno durante 24 horas, luego extraer del horno y pesar nuevamente la capsula más muestra seca en este caso.
- Todo este proceso se debe repetir unas cinco veces a distintos contenidos de humedad y sus respectivos números de golpes. Para llenar la planilla de límite líquido.

Limite plástico.

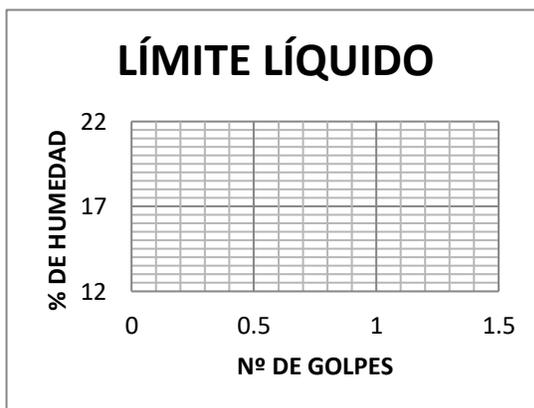
- Mezclar de manera homogénea parte de la muestra preparada con anterioridad hasta anotar que la misma adquiera una consistencia más plástica.
- Tomar una porción de la muestra y comenzar a amasar, hasta que el mismo pueda ser manipulado para obtener un pequeño rollito, el mismo que se debe rodar sobre un vidrio, hasta que tenga un diámetro aproximado de 3 mm. De espesor, observar si el rollito presenta pequeñas rajaduras en ese diámetro.

- Una vez que se visualicen los agrietamientos o rajaduras en los rollitos se procede a cortar el mismo en el sector donde se presenten, para introducirlos dentro de una capsula previamente identificada y pesada.
- Extraer del horno y pesar nuevamente la cápsula más muestra seca en este caso. Todo este proceso se debe repetir unas cinco veces a distintos contenido de humedad. Para llenar la planilla de límite plástico.

Determinación de límite líquido para capa base:

Capsula N°	1	2	3	4	5
N° de golpes					
Suelo Húmedo + Cápsula					
Suelo Seco + Cápsula					
Peso del agua					
Peso de la Cápsula					
Peso Suelo seco					
Porcentaje de Humedad					

NO TIENE



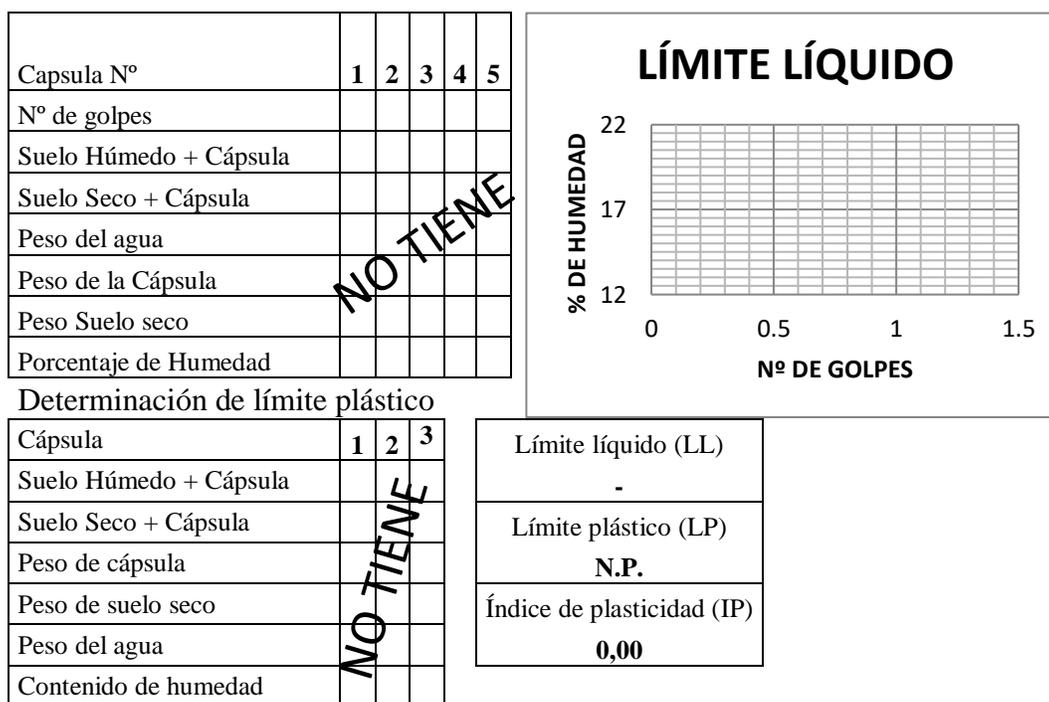
Determinación de límite plástico

Cápsula	1	2	3
Suelo Húmedo + Cápsula			
Suelo Seco + Cápsula			
Peso de cápsula			
Peso de suelo seco			
Peso del agua			
Contenido de humedad			

NO TIENE

Límite líquido (LL)	-
Límite plástico (LP)	N.P.
Índice de plasticidad (IP)	0,00

Determinación de límite líquido para capa sub-base:



De los resultados se puede concluir que ambas muestras no presentan plasticidad debido a que el tipo de suelo fino que pasa la malla N° 40 se trata de suelos arenosos, estando con estos resultados dentro de los parámetros de las normativas de ABC.

La normativa ABC establece que:

Tabla 3.6. Límites de consistencia o de Atterberg.

Tipo de capa	Límite líquido	Índice de plasticidad
Sub-base	Máx. 35	Máx. 8
Base estabilizada	Máx. 35	Máx. 6
Carpeta de rodadura	Máx. 35	5 - 10

Fuente: Manual de ensayos de suelos y materiales (suelos) de la Administradora Boliviana de Carreteras

3.1.3.4. Clasificación.

3.1.3.4.1. Sistema de clasificación AASHTO (ASTM D3282; AASHTO M-145).

Para la clasificación del suelo en Bolivia se utiliza fundamentalmente el método AASHTO. Para el análisis realizado se siguieron las orientaciones del manual de ensayos de suelos y materiales de la ABC correspondiente al sistema de clasificación AASHTO (Designación ASTM D3282; AASHTO M-145) y se toma en cuenta los resultados obtenidos en la granulometría y los límites de consistencia.

Tabla 3.7. Clasificación de suelo para capa base.

Clasificación del suelo		Descripción
SUCS:	GW	Suelo de grano grueso donde predomina la grava con un porcentaje mayor al 70%, un 20% de arena y un porcentaje menor a 5% de limo y arcilla.
AASHTO:	A-1-a (0)	

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.8. Clasificación de suelo para capa sub-base.

Clasificación del suelo		Descripción
SUCS:	GW	Suelo de grano grueso donde predomina la grava con un porcentaje mayor al 60%, un 20% de arena y un porcentaje menor a 5% de limo y arcilla.
AASHTO:	A-1-a (0)	

Fuente: Elaboración propia

Analizando los resultados obtenidos de la granulometría y los límites de Atterberg se puede clasificar a ambas muestras tanto de capa base como de sub-base pertenecen al grupo A-1-a (0). Debido a que menos del 35 % del total pasa el tamiz N° 200, menos del 50 % pasa el tamiz N° 10 y menos del 30 % pasa el N° 40.

Presentan una plasticidad nula por lo tanto un índice de grupo de 0, AASHTO menciona que:

Grupo A-1-a: Es bien graduado, predomina la piedra grava, casi no tiene ligante.

3.1.3.5. Ensayo de compactación de suelos.

3.1.3.5.1. Relaciones de peso unitario – Humedad en los suelos método modificado (ASTM D422; AASHTO T- 180).

Para la determinación de la humedad óptima y la densidad máxima en laboratorio se realiza mediante la compactación modificada, las características de este ensayo fueron descritas en el Capítulo II.

Para realizar el ensayo se seca la muestra al aire o en horno a una temperatura de 60 °C, hasta que el mismo se vuelva desmenuzable, evitando reducir el tamaño natural de las partículas.

Se pasa por el tamiz de 19 mm para los métodos B y C, respectivamente.

Se ensambla el molde para luego introducir el material según el método escogido, los golpes deben estar uniformemente distribuidos, con el martillo. Durante la compactación, el molde deberá mantenerse firmemente sobre una base rígida y estable.

Inmediatamente se procede a retirar el collarín, para luego proceder a enrasar el material, en el caso de la presencia de huecos, se debe tamizar con el N° 10, para rellenar los huecos faltantes para el enrase.

Luego se pesa el molde con su base más suelo húmedo y con el extractor de muestras se saca la muestra compactada del centro de la misma para posteriormente depositarla en una cápsula previamente identificada y pesada.

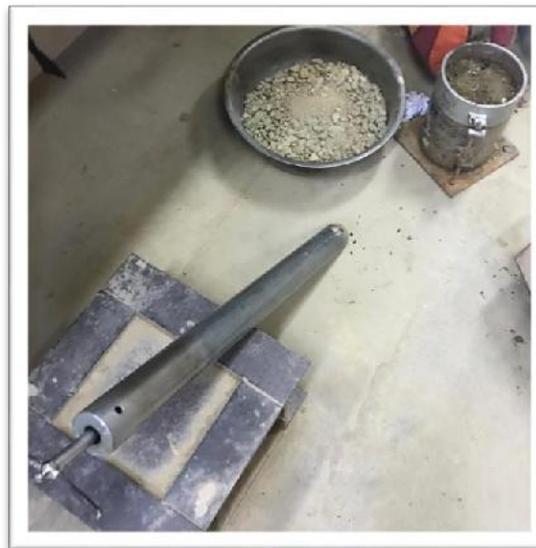
Se repite estos pasos, con diferentes contenidos de humedad, para obtener los puntos necesarios y poder graficar la curva de compactación.

Figura 3.4. Equipos empleados para ensayo de compactación.



Fuente: Elaboración propia

Figura 3.5. Ensayo de compactación.



Fuente: Elaboración propia

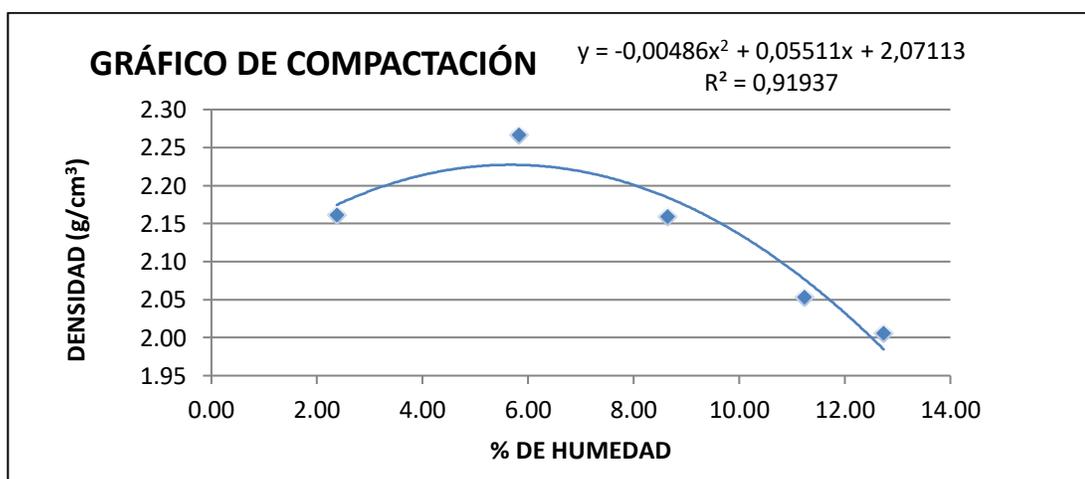
Tabla 3.9. Ensayo de compactación capa base.

N° de capas	5	5	5	5	5
N° de golpes por capa	56	56	56	56	56
Peso suelo húmedo + molde	11129,90	11523,40	11411,30	11281,20	11233,00
Peso del molde	6455,50	6455,50	6455,50	6455,50	6455,50
Peso suelo húmedo	4674,40	5067,90	4955,80	4825,70	4777,50
Volumen de la muestra	2112,50	2112,50	2112,50	2112,50	2112,50
Densidad suelo húmedo (gr/cm ³)	2,21	2,40	2,35	2,28	2,26
Cápsula N°	1	2	3	4	5
Peso suelo húmedo + capsula	127,80	99,50	79,90	222,30	115,70
Peso suelo seco + cápsula	125,30	95,20	75,20	201,70	104,90
Peso del agua	2,50	4,30	4,70	20,60	10,80
Peso de la cápsula	20,10	21,40	20,80	18,40	20,10
Peso suelo seco	105,20	73,80	54,40	183,30	84,80
Contenido de humedad (%)	2,38	5,83	8,64	11,24	12,74
Densidad suelo seco (gr/cm ³)	2,16	2,27	2,16	2,05	2,01

Densidad Máxima	2,23 gr/cm ³
Humedad Optima	5,67 %

Fuente: Elaboración propia

Gráfico 3.3. Curva de compactación capa base.



Fuente: Elaboración propia

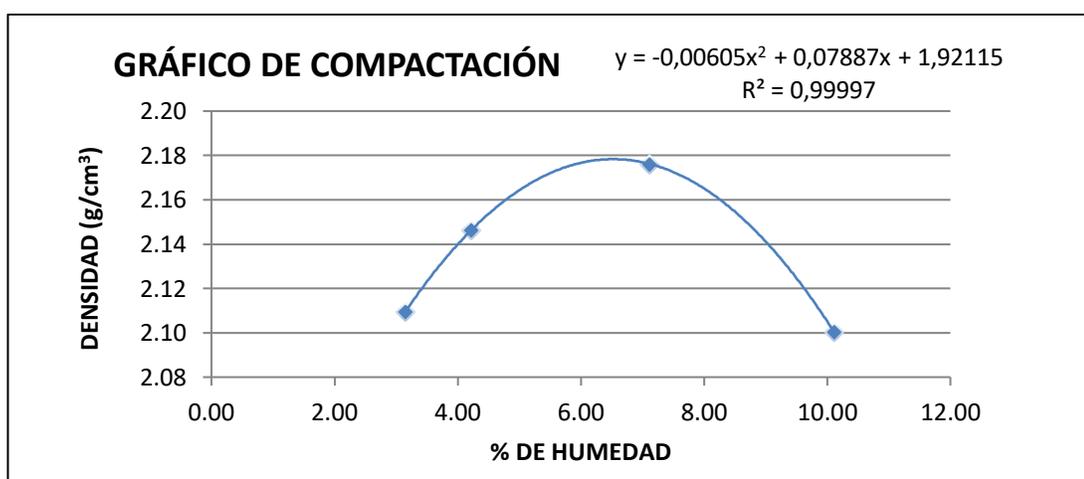
Tabla 3.10. Ensayo de compactación capa sub-base.

N° de capas	5	5	5	5
N° de golpes por capa	56	56	56	56
Peso suelo húmedo + molde	11085,20	11214,20	11395,00	11356,70
Peso del molde	6488,60	6488,60	6471,00	6471,00
Peso suelo húmedo	4596,60	4725,60	4924,00	4885,70
Volumen de la muestra	2112,50	2112,50	2112,50	2112,50
Densidad suelo húmedo (gr/cm ³)	2,18	2,24	2,33	2,31
Cápsula N°	1	2	3	4
Peso suelo húmedo + capsula	194,80	117,20	158,30	214,10
Peso suelo seco + cápsula	189,40	113,00	149,00	196,30
Peso del agua	5,40	4,20	9,30	17,80
Peso de la cápsula	18,00	13,40	18,30	20,30
Peso suelo seco	171,40	99,60	130,70	176,00
Contenido de humedad (%)	3,15	4,22	7,12	10,11
Densidad suelo seco (gr/cm ³)	2,11	2,15	2,18	2,10

Densidad Máxima	2,18 gr/cm ³
Humedad Optima	6,52 %

Fuente: Elaboración propia

Gráfico 3.4. Curva de compactación capa sub-base.



Fuente: Elaboración propia

Estos valores iniciales de los ensayos de compactación de capa base y sub-base servirán para realizar las comparaciones y evaluaciones respectivas, cuando se emplee las diferentes dosificaciones de suelo/RAP y suelo/RAP/geoceldas.

3.1.3.6. Ensayo desgaste de los Ángeles.

Determinación de desgaste de los Ángeles para suelo de capa base:

Método A		
Tamiz (pasado)	Tamiz (retenido)	Peso retenido
1 1/2"	1"	1250
1"	3/4"	1250
3/4"	1/2"	1250
1/2"	3/8"	1250

$$\% \text{ desgaste} = \frac{P_{\text{inicial}} - P_{\text{final}}}{P_{\text{inicial}}} * 100$$

Material	Peso inicial	Peso final	% de desgaste	Especificación ASTM
A	5000	3548,30	29,03	35 % máx.

Determinación de desgaste de los Ángeles para suelo de capa sub-base:

Método A		
Tamiz (pasado)	Tamiz (retenido)	Peso retenido
1 1/2"	1"	1250
1"	3/4"	1250
3/4"	1/2"	1250
1/2"	3/8"	1250

$$\% \text{ desgaste} = \frac{P_{\text{inicial}} - P_{\text{final}}}{P_{\text{inicial}}} * 100$$

Material	Peso inicial	Peso final	% de desgaste	Especificación ASTM
A	5000	3672,00	26,56	40 % máx.

El ensayo de desgaste de los Ángeles, realizado a ambas capas nos proporciona resultados dentro de los parámetros en ambas capas ya que se encuentran en los límites que presenta la norma ABC.

La norma menciona y el resultado obtenido se encuentra en estos.

Materiales para base granular:

La fracción gruesa deberá tener una resistencia al desgaste, medida por el ensayo de los Ángeles, de no más de 35 %.

Materiales para sub-base granular:

La fracción gruesa deberá tener una resistencia al desgaste, medida por el ensayo de los Ángeles, de no más de 40 %.

Figura 3.6. Preparación de muestras para ensayo desgaste de los Ángeles.



Fuente: Elaboración propia

Figura 3.7. Material saliente del equipo.



Fuente: Elaboración propia

Figura 3.8. Material saliente del equipo de capa base y capa sub-base.



Fuente: Elaboración propia

3.1.3.7. Ensayo de California Baring Ratio (CBR).

Para realizar la práctica de CBR (ASTM D1883; AASHTO T-193) seguimos todo el procedimiento establecido en la norma ABC.

A continuación se muestran las tablas de cálculos y gráficas del CBR de capa base y sub-base.

Tabla 3.11. Ensayo CBR. Capa base.

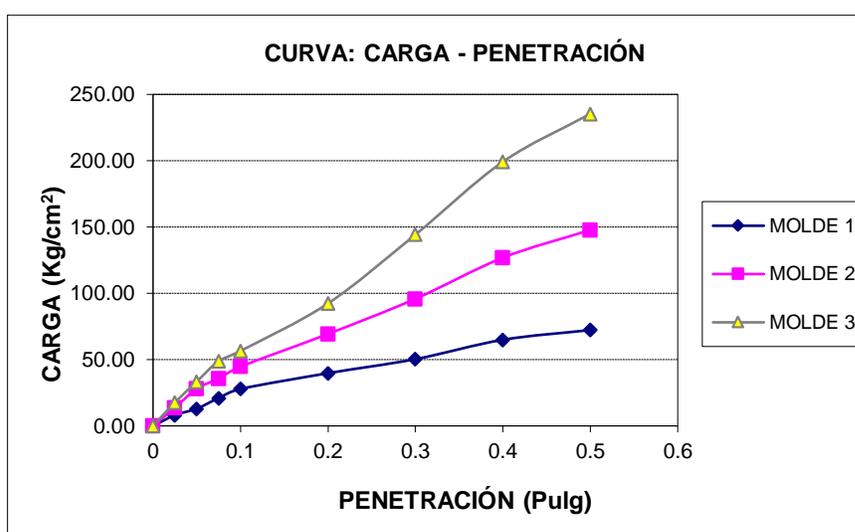
Contenido de humedad y peso unitario									
Nº capas	5			5			5		
Nº golpes por capa	12			25			56		
Condición de muestra	Antes de mojarse		D. de M	Antes de mojarse		D. de M	Antes de mojarse		D. de M
Peso muestra húm.+molde	12690,00		12780,00	12010,00		12090,00	13005,00		13050,00
Peso molde	7954,00		7954,00	7106,00		7106,00	8035,60		8035,60
Peso muestra húmeda	4736,00		4826,00	4904,00		4984,00	4969,40		5014,40
Volumen de la muestra	2121,00		2121,00	2121,00		2121,00	2121,00		2121,00
Peso unit. muestra húm.	2,23		2,28	2,31		2,35	2,34		2,36
Muestra de humedad	Fondo	Superf.	2" sup.	Fondo	Superf.	2" sup.	Fondo	Superf.	2" sup.
Tara Nº	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Peso muestra húm + tara	154,90	156,70	150,60	155,30	103,90	118,90	119,70	125,70	206,00
Peso muestra seca + tara	144,80	147,40	141,60	146,50	99,20	112,40	114,20	119,00	196,20
Peso del agua	10,10	9,30	9,00	8,80	4,70	6,50	5,50	6,70	9,80
Peso de tara	19,90	16,40	16,40	22,30	16,10	17,90	22,90	20,30	19,20
Peso de la muestra seca	124,90	131,00	125,20	124,20	83,10	94,50	91,30	98,70	177,00
Contenido humedad %	8,09	7,10	7,19	7,09	5,66	6,88	6,02	6,79	5,54
Promedio cont. humedad	7,59		7,19	6,37		6,88	6,41		5,54
Peso unit.muestra seca	2,08		2,12	2,17		2,20	2,20		2,24

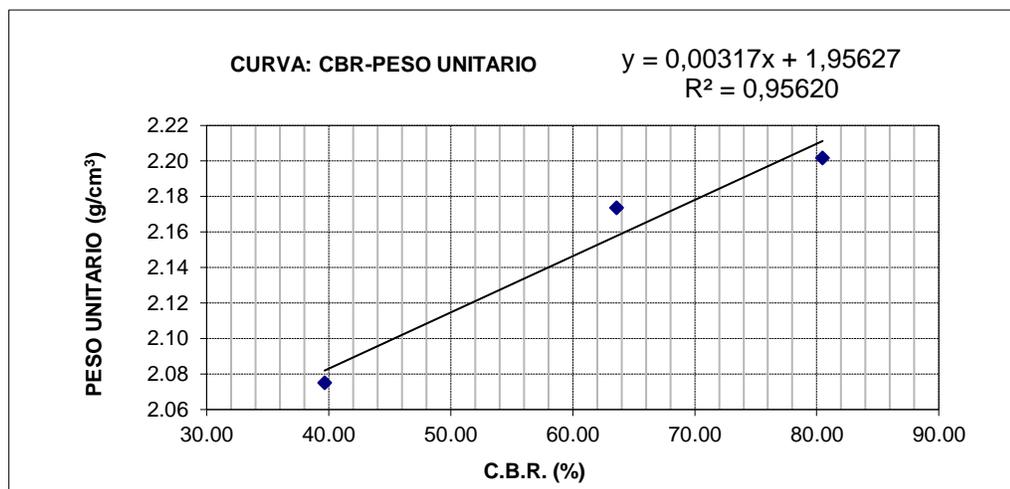
Expansión											
Fecha	Hora	Tiempo en días	Molde N° 1			Molde N° 2			Molde N° 3		
			Lect.		Expansión	Lect.		Expansión	Lect.		Expansión
			extens.	cm	%	extens.	cm	%	extens.	cm	%
18-sep	10:50	1	3,10	0,31	0	8,90	0,89	0	14,10	1,41	0
19-sep	10:30	2	3,10	0,31	0	8,90	0,89	0	14,10	1,41	0
20-sep	11:00	3	3,10	0,31	0	8,90	0,89	0	14,10	1,41	0
21-sep	8:00	4	3,10	0,31	0	8,90	0,89	0	14,10	1,41	0

C.B.R.														
Penetración		Carga normal	Molde N° 1				Molde N° 2				Molde N° 3			
Pulg.	mm		Carga ensayo		C.B.R. correg.		Carga ensayo		C.B.R. correg.		Carga ensayo		C.B.R. correg.	
		Kg	Kg	Kg/cm ²	Kg	%	Kg	Kg/cm ²	Kg	%	Kg	Kg/cm ²	Kg	%
0	0		0,00	0,00			0,00	0,00			0,00	0,00		
0,025	0,63		157,00	8,11			267,00	13,80			342,00	17,67		
0,05	1,27		252,00	13,02			542,00	28,00			647,00	33,43		
0,075	1,90		407,00	21,03			692,00	35,75			947,00	48,93		
0,1	2,54	1360	539,50	27,87		39,67	864,50	44,67		63,57	1094,50	56,55		80,48
0,2	5,08	2040	769,50	39,76		37,72	1342,00	69,34		65,78	1787,00	92,33		87,60
0,3	7,62		974,50	50,35			1854,50	95,82			2792,00	144,25		
0,4	10,16		1257,00	64,95			2454,50	126,82			3854,50	199,15		
0,5	12,7		1399,50	72,31			2859,50	147,74			4554,50	235,32		

Fuente: Elaboración propia

Gráfico 3.5. Curvas características para determinación de CBR de capa base.





Fuente: Elaboración propia

A partir de estos parámetros se determina el CBR:

CBR 100% D.máx	CBR 95% D. máx
85,52 %	50,39 %

Determinación de la capacidad soporte CBR para capa sub-base:

Tabla 3.12. Ensayo CBR. Capa sub-base.

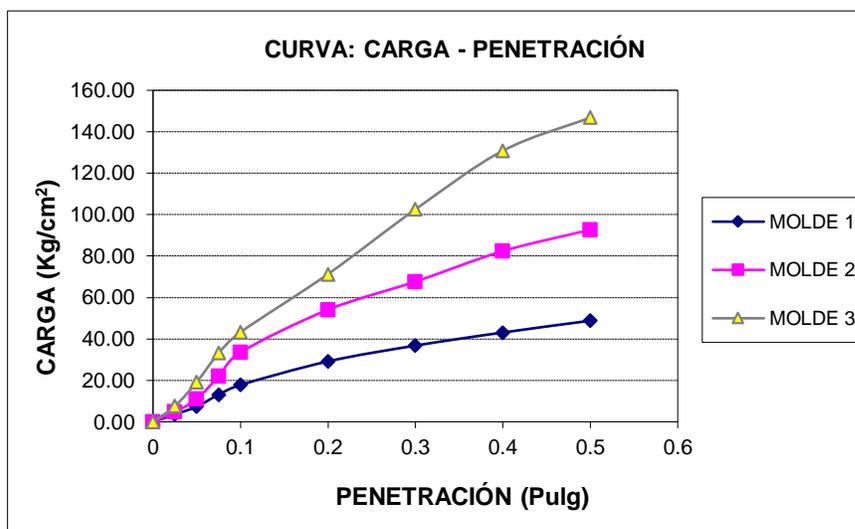
Contenido de humedad y peso unitario									
Nº capas	5			5			5		
Nº golpes por capa	12			25			56		
Condición de muestra	Antes de mojarse		D. de M	Antes de mojarse		D. de M	Antes de mojarse		D. de M
Peso muestra húm.+molde	11755,00	11780,00		12935,00	13050,00		12830,00	12905,00	
Peso molde	7107,20	7107,20		8035,50	8035,50		7954,80	7954,80	
Peso muestra húmeda	4647,80	4672,80		4899,50	5014,50		4875,20	4950,20	
Volumen de la muestra	2121,00	2121,00		2121,00	2121,00		2121,00	2121,00	
Peso unit. muestra húm.	2,19	2,20		2,31	2,36		2,30	2,33	
Muestra de humedad	Fondo	Superf.	2" sup.	Fondo	Superf.	2" sup.	Fondo	Superf.	2" sup.
Tara Nº	1,00	2,00	3,00	1,00	2,00	3,00	1,00	2,00	3,00
Peso muestra húm + tara	211,80	164,30	163,90	144,70	146,50	101,00	152,60	152,70	166,40
Peso muestra seca + tara	196,10	152,20	152,70	130,00	137,20	91,10	143,50	144,60	155,80
Peso del agua	15,70	12,10	11,20	14,70	9,30	9,90	9,10	8,10	10,60
Peso de tara	19,70	19,60	18,20	12,60	18,60	12,80	19,50	18,10	18,40
Peso de la muestra seca	176,40	132,60	134,50	117,40	118,60	78,30	124,00	126,50	137,40
Contenido humedad %	8,90	9,13	8,33	12,52	7,84	12,64	7,34	6,40	7,71
Promedio cont. humedad	9,01		8,33	10,18		12,64	6,87		7,71
Peso unit.muestra seca	2,01		2,03	2,10		2,10	2,15		2,17

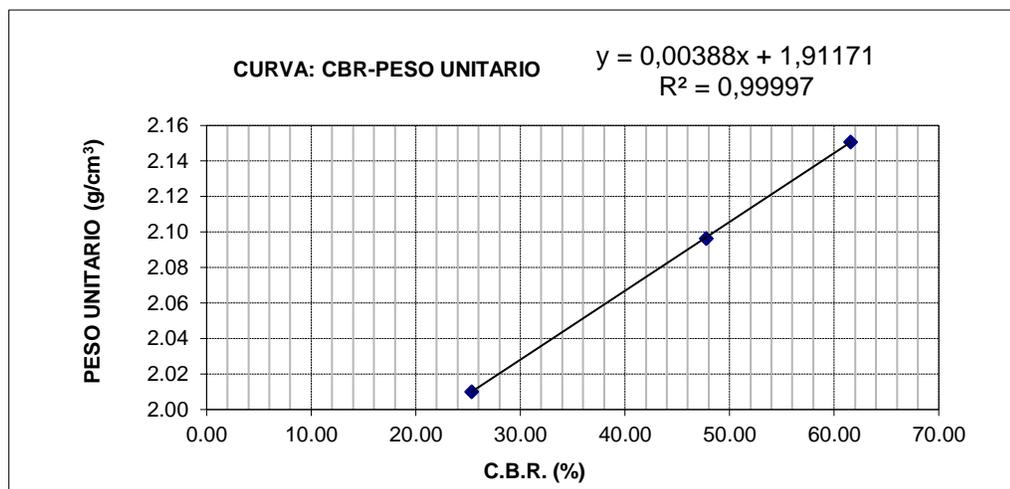
Expansión											
Fecha	Hora	Tiempo en días	Molde N° 1			Molde N° 2			Molde N° 3		
			Lect.		Expansión	Lect.		Expansión	Lect.		Expansión
			extens.	cm	%	extens.	cm	%	extens.	cm	%
25-sep	16:30	1	7,80	0,78	0	15,30	1,53	0	5,00	0,50	0
26-sep	15:30	2	7,80	0,78	0	15,30	1,53	0	5,00	0,50	0
27-sep	16:30	3	7,80	0,78	0	15,30	1,53	0	5,00	0,50	0
28-sep	16:30	4	7,80	0,78	0	15,30	1,53	0	5,00	0,50	0

C.B.R.														
Penetración		Carga normal	Molde N° 1				Molde N° 2				Molde N° 3			
Pulg.	mm		Carga ensayo		C.B.R. correg.		Carga ensayo		C.B.R. correg.		Carga ensayo		C.B.R. correg.	
		Kg	Kg	Kg/cm ²	Kg	%	Kg	Kg/cm ²	Kg	%	Kg	Kg/cm ²	Kg	%
0	0		0,00	0,00			0,00	0,00			0,00	0,00		
0,025	0,63		69,50	3,59			92,00	4,75			147,00	7,60		
0,05	1,27		142,00	7,34			214,50	11,08			372,00	19,22		
0,075	1,90		254,50	13,15			424,50	21,93			642,00	33,17		
0,1	2,54	1360	344,50	17,80		25,33	649,50	33,56		47,76	837,00	43,25		61,54
0,2	5,08	2040	564,50	29,17		27,67	1047,00	54,10		51,32	1379,50	71,27		67,62
0,3	7,62		712,00	36,79			1309,50	67,66			1984,50	102,53		
0,4	10,16		834,50	43,12			1594,50	82,38			2532,00	130,82		
0,5	12,70		944,50	48,80			1794,50	92,72			2842,00	146,84		

Fuente: Elaboración propia

Gráfico 3.6. Curvas características para determinación de CBR de capa sub-base.





Fuente: Elaboración propia

A partir de estos parámetros se determina el CBR:

CBR 100 % D. máx	CBR 95 % D. máx
68,68 %	40,61 %

Los resultados obtenidos muestran que ambas capas presentan características de un suelo granular, cumpliendo con las condiciones de la normativa establecida por la ABC y que por los valores del CBR son suelos de buena calidad ya que los mismos superan el 50%.

3.1.4. Resumen de resultados.

Tabla 3.13. Resumen de ensayos de suelo capa base.

Descripción	Capa base	Capa sub-base
Clasificación de suelo	A-1-a (0)	A-1-a (0)
Índice de plasticidad	N.P	N.P
Máxima densidad seca (g/cm ³)	2,23	2,18
Contenido de humedad óptimo (%)	5,67	6,52
Valor de soporte CBR (%) al 100% D. Max	85,52	68,68
Expansión	0	0
Desgaste de los Ángeles (%)	29,03	26,56

Fuente: Elaboración propia

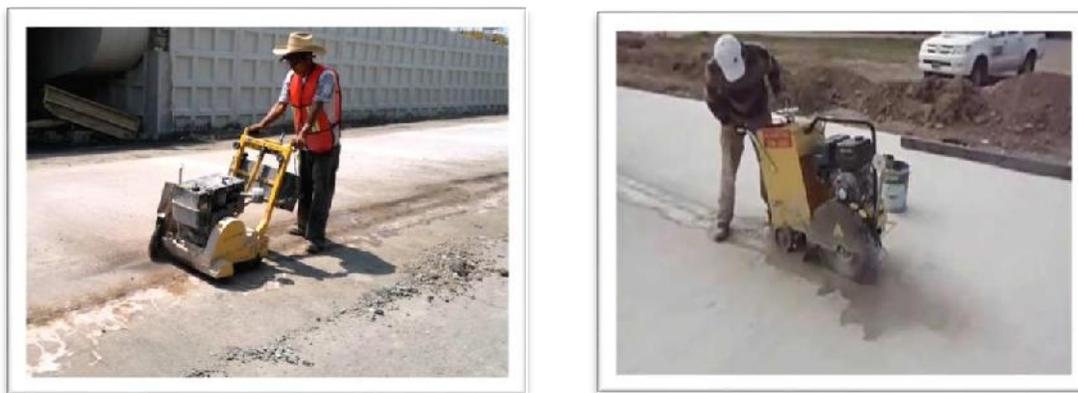
3.2. Exploración para toma de muestras de RAP.

Para el reciclado de pavimentos se realiza una inspección visual de varias calles y avenidas de la ciudad de Tarija, en las cuales se notó el mal estado y desgaste de las mismas.

Para la obtención de las muestras se realiza a través del uso de la cortadura de capa asfáltica y en los algunos casos se emplea el equipo de la pala cargadora, llegando a obtener muestras representativas para los fines que tiene la investigación. Con la precaución de obtener muestras inalteradas que no contengan algún químico o basura considerable sobre ellas, se asegura que al momento del retiro de la capa asfáltica se proceda a su muestreo y debido transporte al lugar de laboratorio para proseguir con el chancado del material.

Se realiza el muestreo de varios puntos de la ciudad y de diferentes situaciones de remoción del pavimento.

Figura 3.9. Cortadora de capa asfáltica.



Fuente: Elaboración propia

Figura 3.10. Pala cargadora en la remoción de capa asfáltica



Fuente: Elaboración propia

Figura 3.11. Avenida Panamericana. Carpeta asfáltica retirada para trabajos de COSAALT.



Fuente: Elaboración propia

Figura 3.12. Avenida principal de campus universitario El Tejar. Carpeta asfáltica deteriorada.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 3.13. Carpeta asfáltica deteriorada. Campus El Tejar.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 3.14. Carpeta asfáltica removida por el GAMT para bacheo de calle.



Fuente: Elaboración propia

Cabe resaltar que al realizar el bacheo de calles y avenidas los personeros del municipio proceden al traslado del material retirado a predios del gobierno municipal de Tarija ubicados sobre la Av. Integración, dejándolos ahí, sin darle ninguna reutilización, es en este sentido que se vio presentar esta nueva alternativa.

Figura 3.15. Capa de pavimento depositado como desecho.



Fuente: Elaboración propia

Figura 3.16. Pavimento asfáltico depositado como desecho.



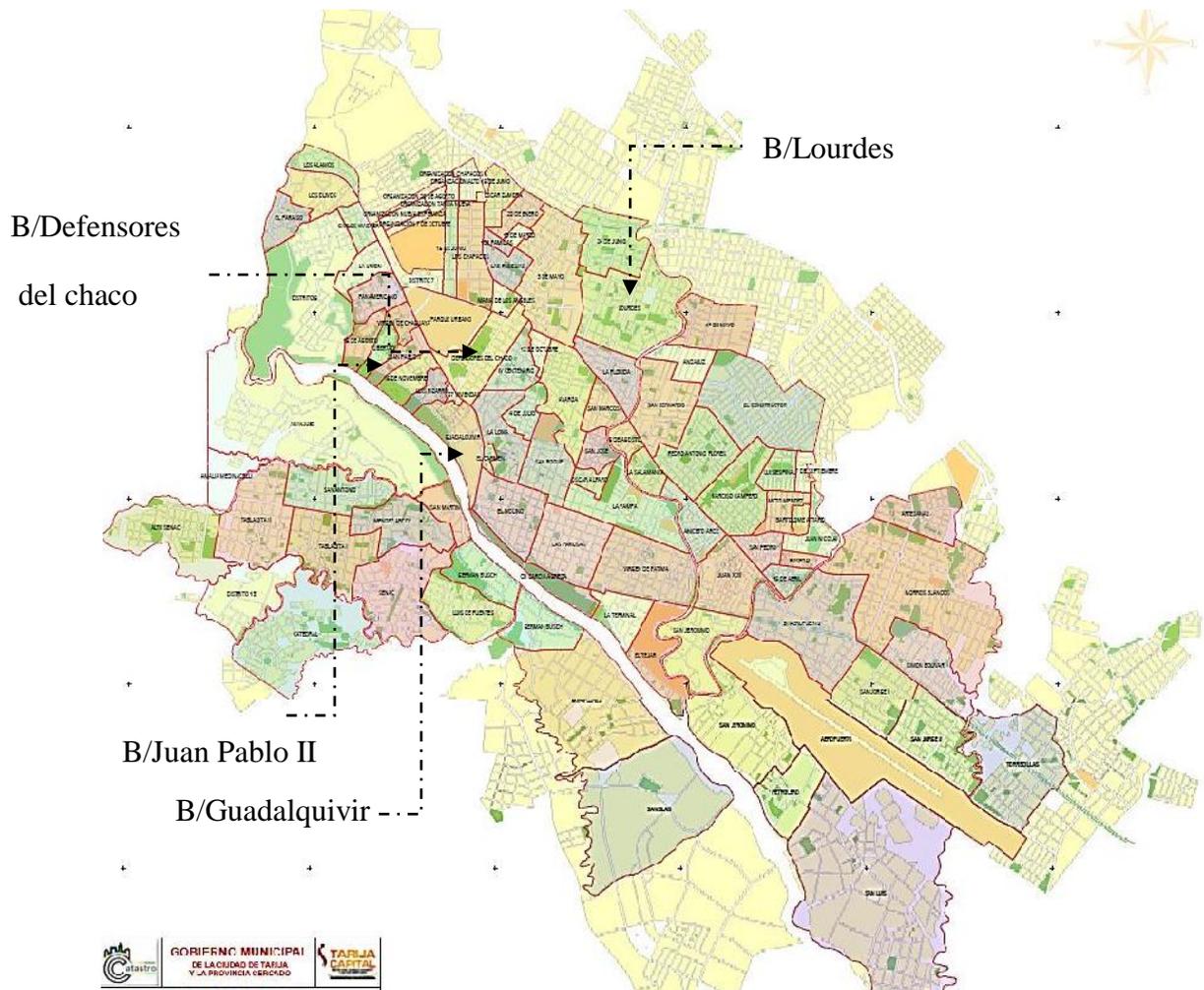
Fuente: Elaboración propia

Figura 3.17. Grandes extensiones de pavimento asfáltico en desuso.



Fuente: Elaboración propia

3.2.1 Ubicación para toma de muestras de pavimento asfáltico y posterior reciclado (RAP)



Fuente: Unidad de Catastro de Gobierno Autónomo Municipal de Tarifa

3.2.2. Volúmenes de RAP obtenidos de diferentes barrios de la ciudad de Tarija.

En la tabla 3.14 se muestra los volúmenes de RAP que son obtenidos a partir de una contabilización de los volúmenes de bacheo de diferentes barrios que realiza el Gobierno Autónomo Municipal de la ciudad de Tarija mediante la Secretaria de Obras Públicas.

Tabla 3.14. Volúmenes de bacheo de diferentes barrios de la ciudad de Tarija.

Gestión 2019

N°	Mes	Cantidad (m ³)
1	Enero	306,75
2	Febrero	225,53
3	Marzo	344,94
4	Abril	182,95
5	Mayo	209,23
6	Junio	233,77
7	Julio	187,49
8	Agosto	239,89
9	Septiembre	349,88
10	Octubre	286,27
11	Noviembre	225,99
12	Diciembre	182,95
Total		2975,61

Fuente: Secretaria de Obras Públicas y Municipales del Gobierno Municipal de Tarija.

Gráfico 3.7. Pavimento asfáltico extraído de diferentes barrios (m³).

Fuente: Elaboración propia

Las secretarías que realizan el bacheo en carreteras son: Administradora Boliviana de Carreteras (ABC) y el Servicio Departamental de Caminos (SEDECA) pero los mismos no cuentan con depósitos de RAP establecidos y solo llevan un estimado del total de bacheo anual, mismo que solo un determinado porcentaje puede ser empleado para su respectivo reciclado.

Tabla 3.15. Volumen de bacheo de SEDECA y ABC.

Institución	Total bacheo gestión 2019 (m ³)
SEDECA	743,90
ABC	595,12

Fuente: Secretaría de SEDECA y ABC

La tabla 3.15. indica los volúmenes de bacheo que pueden ser reutilizados de estas dos secretarías.

Anualmente el municipio de Tarija, SEDECA y ABC desechan 4314,63 m³ de pavimento asfáltico, los mismos que en el presente proyecto se plantea reutilizarlos, pero antes de emplear este volumen se debe tomar en cuenta ciertos aspectos.

Al momento de realizar el bacheo de las calles, no siempre los funcionarios municipales realizan el recojo de todo el pavimento asfáltico para llevarlo al lugar de acopio, dejándolo en el lugar en el cual realizaron el trabajo.

La calidad del pavimento asfáltico para su reutilización no es al 100 % óptima debido a factores de limpieza.

Las carpetas asfálticas retiradas con antigüedad se encuentran mezcladas con suelo e impurezas del lugar de acopio.

Al momento de realizar las granulometrías para incluir el pavimento asfáltico reciclado como agregado de capa base y sub-base, un porcentaje de ± 5 % es desechado.

Es por los motivos que no se puede reutilizar todo lo acumulado de pavimento asfáltico, por lo tanto se debe afectar por un coeficiente de reutilización que fluctúa entre 70 % y 85 %.

$$70 \% \geq C_{reu} \leq 85 \%$$

3.2.3. Descripción del depósito final del RAP.

Posterior a realizar el respectivo trabajo de bacheo en las calles, los funcionarios municipales proceden a trasladar la carpeta asfáltica retirada al terreno de acopio.

La carpeta asfáltica retirada, producto de los bacheos que se realizan en las diferentes calles de la ciudad de Tarija se encuentran en desuso debido a que el gobierno municipal no cuenta con ningún proyecto tipo para la reutilización de este material, posterior al retiro, son depositadas en inmediaciones de terrenos del municipio, sin darle otro uso.

Requisitos del material:

Para la reutilización del material procedente de pavimentos asfálticos, este debe cumplir con los siguientes requisitos exigidos para materiales vírgenes, lo cual implica.

Para conseguir las propiedades exigidas a la mezcla, es fundamental tener en cuenta la homogeneidad y limpieza del material recuperado. La homogeneidad y limpieza es una de las propiedades que determina el contenido de material antiguo en la nueva mezcla.

Se requiere una especial precisión para conseguir una granulometría adecuada del material reciclado.

Se debe definir las características de los materiales en cuanto a su granulometría, calidad del árido grueso, limpieza, compactibilidad.

Figura 3.18. Características de depósito actual de RAP.



Fuente: Elaboración propia

El RAP se encuentra en un área distinta de otros desechos, son muy pocos los volúmenes contaminados de escombros, lo que se puede observar es el crecimiento de maleza en algunas áreas del depósito.

Se puede verificar que existen grandes volúmenes de RAP ubicados en diferentes áreas del terreno, mediante una inspección se puede visualizar cúmulos de 100 m^3 hasta 150 m^3 .

La calidad del RAP en los depósitos va decreciendo de acuerdo al tiempo que este se encuentra ahí, es decir los pavimentos más viejos son los más deteriorados y de baja calidad para su empleo.

3.2.3.1. Ubicación geográfica del depósito final del RAP.

Geográficamente el terreno de depósito de RAP se encuentra situado frente a la Av. Integración en el barrio Juan Pablo II del distrito N° 6 de la ciudad de Tarija, provincia cercado. Las coordenadas geográficas del terreno donde se deposita el RAP están dadas por $21^\circ 31' 11,49''$ latitud sur y $64^\circ 45' 4,91''$ longitud oeste.

Figura 3.19. Ubicación geográfica del depósito final del RAP.



Fuente: Google Earth 2020

Figura 3.20. (a) Depósitos de pavimento asfáltico en desuso.



Fuente: Elaboración propia

Figura 3.20. (b) Depósitos de pavimento asfáltico en desuso.



Fuente: Elaboración propia

Figura 3.20. (c) Depósitos de pavimento asfáltico en desuso.



Fuente: Elaboración propia

Figura 3.21. Pavimento asfáltico en dimensiones extensas en desuso.



Fuente: Elaboración propia

3.2.4. Determinación del costo industrial del RAP.

3.2.4.1. Triturado, selección de los materiales del RAP e identificación de actividades.

El triturado del pavimento asfáltico reciclado se lo realizará en una planta trituradora, tomando en cuenta los tamaños de los granos.

Después del triturado en la planta mediante una banda se transporta el material a un acopio para seleccionar el mismo.

Posterior al triturado se procede a la clasificación del material resultante, esto se realiza con ayuda de un juego de tamices, que tienen un tamaño graduado establecido por las normas ASTM y AASHTO, en donde se obtienen los pesos retenidos.

Si bien se realiza una distribución de tamaños, esto no incide en la forma que puedan tener los granos de RAP, ya que al retener material en una malla se observa diferentes tamaños y el porcentaje que se calcula está basado estrictamente en los pesos que se retiene en la malla, referido al peso total que se utiliza en el respectivo ensayo.

El triturado del RAP se realiza siguiendo las especificaciones de gradación de materiales para capa base y capa sub-base respectivamente.

Tabla 3.16. Actividades de ejecución de RAP para capa base.

Ítem N°	Descripción	Unidad
1	Triturado RAP de 1"	m ³
2	Triturado RAP de 3/4 "	m ³
3	Triturado RAP de 3/8 "	m ³
4	Triturado RAP de N°4	m ³
5	Triturado RAP de N° 10	m ³
6	Triturado RAP de N° 40	m ³
7	Triturado RAP de N° 200	m ³

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.17. Actividades de ejecución de RAP para capa sub-base.

Ítem N°	Descripción	Unidad
1	Triturado RAP de 1 1/2"	m ³
2	Triturado RAP de 1"	m ³
3	Triturado RAP de 3/4 "	m ³
4	Triturado RAP de 3/8 "	m ³
5	Triturado RAP de N°4	m ³
6	Triturado RAP de N° 10	m ³
7	Triturado RAP de N° 40	m ³
8	Triturado RAP de N° 200	m ³

Fuente: Elaboración propia

3.2.4.2. Cómputos métricos de ejecución de RAP para capa base.

A partir de la obtención y clasificación de los diferentes tamaños se realiza el cálculo de la cantidad de material de cada gradación necesaria para un metro cubico de RAP, tomando en cuenta la banda granulométrica adoptada para cada capa, para este cálculo se debe afectar y tomar en cuenta la densidad de las gravas y las arenas.

Tabla 3.18. Densidades de los materiales.

Grupo de materiales	Densidad (Kg/m ³)
Arenas lavadas	de 1550 a 1600
Arena G 0/3	de 1500 a 1550
Mezclas	de 1600 a 1700
Sabló cribado	de 1450 a 1500
Zahorra Z 25	de 1600 a 1700
Gravillas	de 1500 a 1550
Grava 30/60	de 1450

Fuente: Materiales para la construcción. Lyall Addleso 2001

3.2.4.3. Análisis de precios unitarios de RAP para capa base y sub-base.

El análisis de precios unitarios con respecto a los materiales está calculado a partir de la identificación de las actividades y posterior análisis de los rendimientos de cada tamaño de material, el costo de los precios unitarios son obtenidos con costos actuales de cada material interviniente.

En este análisis también influye la mano de obra, la cual es referenciada con costos actuales de los mismos.

En el caso del equipo, maquinaria y herramientas, estos son determinados con costos actuales de mercado regional.

La planilla de precios unitarios para capa base y sub-base se encuentra en anexo de precios unitarios.

3.2.5. Especificaciones técnicas de pavimento asfáltico reciclado.

Requerimientos generales:

Los áridos gruesos, retenidos sobre tamiz 4,75 mm (N° 4), deben ser partículas resistentes, durables.

Los áridos finos, que pasan por el tamiz 0,075 mm (N° 4), deben estar constituidos por arenas trituradas y por partículas que pasan por el tamiz 0,075 mm (N° 200).

Todo material deberá estar libre de materias orgánicas y terrones de arcilla.

La graduación de los materiales deberá estar conforme con los requerimientos establecidos en la Tabla 3.2. Bandas granulométricas para sub-base, base y capas de rodadura.

El pavimento asfáltico reciclado deberá cumplir con las especificaciones señaladas en la Tabla 3.1. Resumen de especificaciones técnicas para capa base y capa sub-base.

3.2.6. Elaboración de RAP.

Una vez obtenidas las muestras de diferentes zonas de la ciudad y retiradas por diferentes motivos ya mostrados en las figuras 3.11 a 3.14 se prosigue al chancado del material.

Posteriormente a esto se clasifica por tamaños el RAP chancado

Figura 3.22. Clasificación por tamaños del RAP.



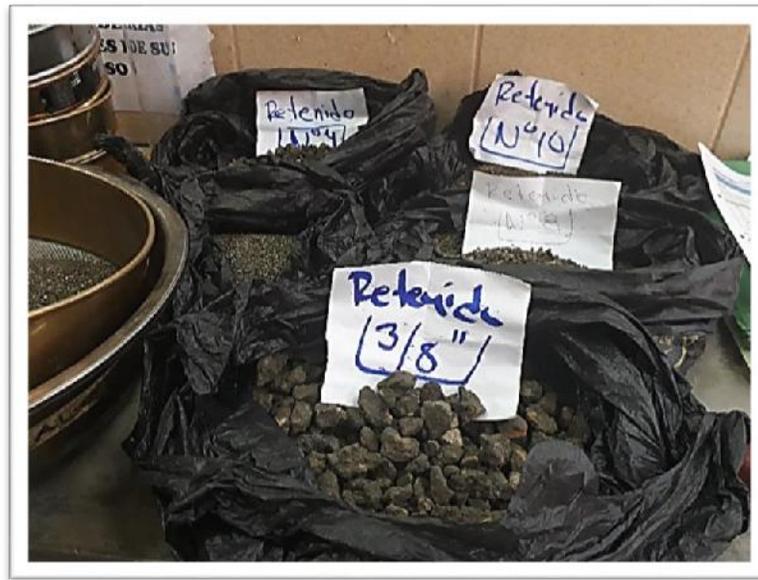
Fuente: Elaboración propia

Figura 3.23. Clasificación por tamaños del RAP.



Fuente: Elaboración propia

Figura 3.24. Clasificación por tamaños del RAP.



Fuente: Elaboración propia

Figura 3.25. Empleo de tamices para la selección del RAP.



Fuente: Elaboración propia

3.2.6. Pruebas para la caracterización de RAP.

Posterior al muestreo y traslado de las muestras de RAP a laboratorio de suelos y hormigones, donde se realizan los ensayos correspondientes para su respectiva caracterización y determinación de propiedades necesarias para el presente trabajo, como es su granulometría, plasticidad, densidad máxima y contenido de humedad óptima, CBR, ensayos que se realizan siguiendo el manual de ensayos y materiales de la ABC.

3.2.6.1. Granulometría.

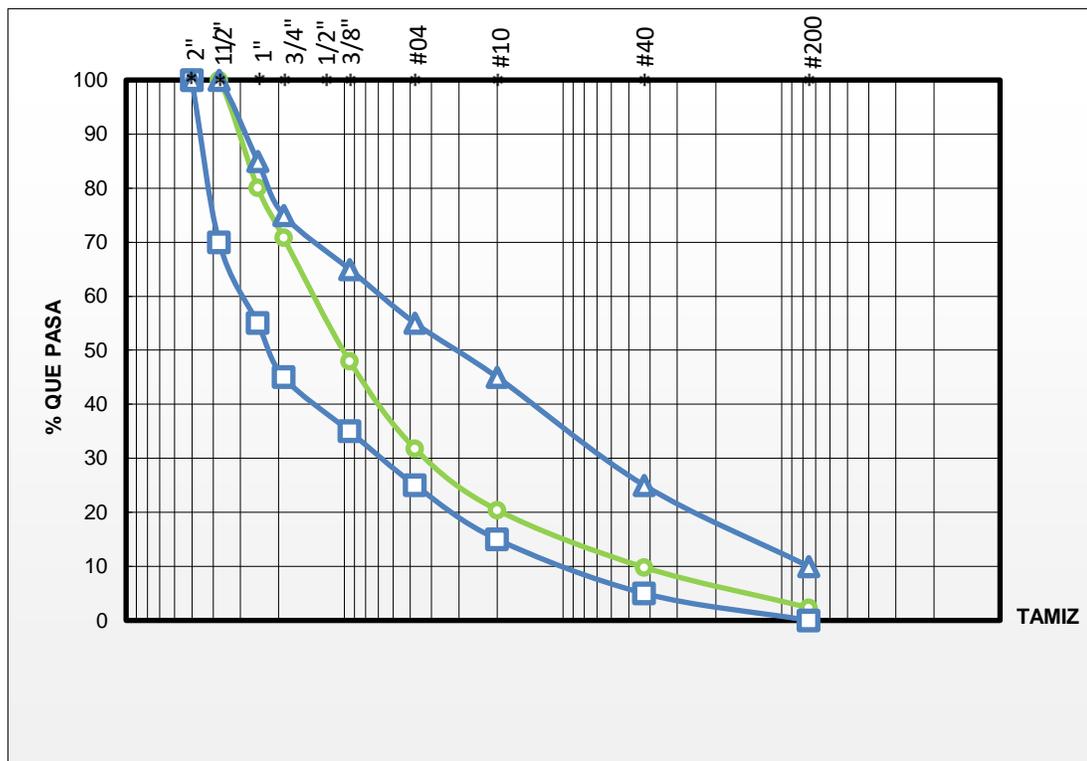
Posterior al chancado del material se procedió a realizar las mezclas correspondientes de los tamaños de partículas del RAP, hasta conseguir granulometrías iguales o similares a las muestras obtenidas de capa base y sub-base.

Tabla 3.19. Granulometría de RAP para capa base.

Peso Total (g)			5000,00			
Tamices	Tamaño (mm)	Peso Ret. (g)	Ret. Acum (g)	% Ret	% Que Pasa del Total	Especificaciones
2"	50	0,00	0,00	0,00	100,00	100%
1 1/2"	37,5	0,00	0,00	0,00	100,00	70%-100%
1"	25,00	995,60	995,60	19,91	80,09	55%-85%
3/4"	19,00	463,30	1458,90	29,18	70,82	45%-75%
3/8"	9,50	1139,80	2598,70	51,97	48,03	35%-65%
Nº 4	4,75	813,50	3412,20	68,24	31,76	25%-55%
Nº 10	2,00	566,50	3978,70	79,57	20,43	15%-45%
Nº 40	0,425	530,00	4508,70	90,17	9,83	5%-25%
Nº 200	0,075	373,00	4881,70	97,63	2,37	0%-10%

Fuente: Elaboración propia

Gráfico 3.8. Granulometría de RAP para capa base.



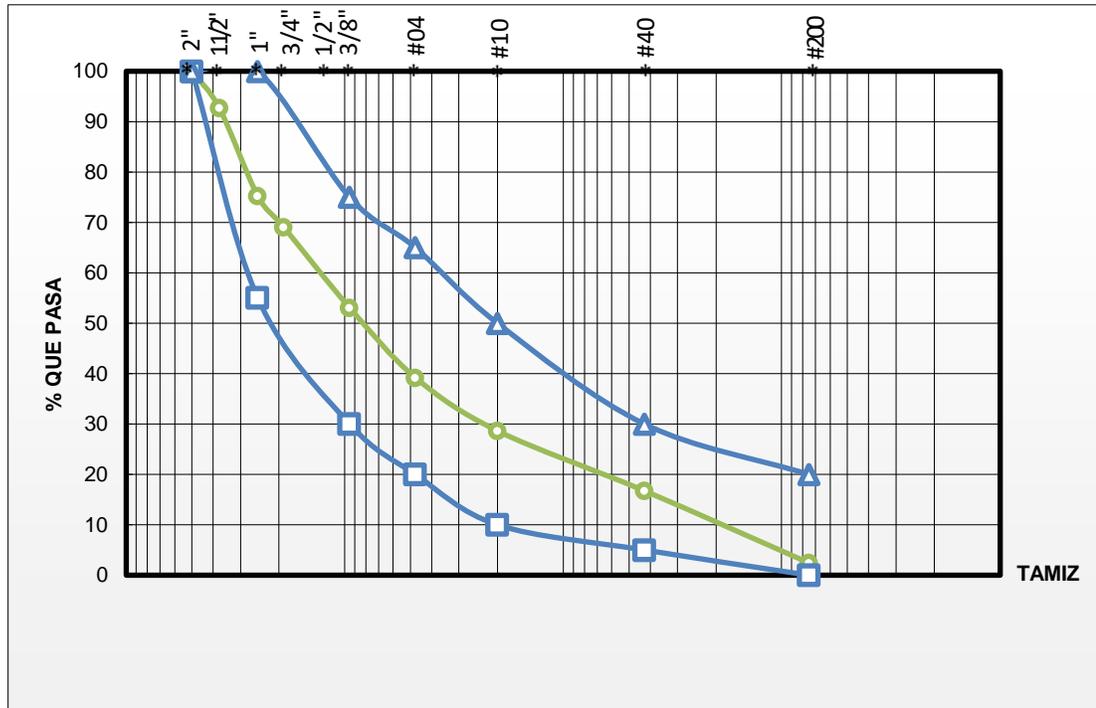
Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.20. Granulometría de RAP para capa sub-base.

Peso Total (gr.)			5000,00			
Tamices	Tamaño (mm)	Peso Ret. (gr)	Ret. Acum (gr)	% Ret	% Que Pasa del Total	Especificaciones
2"	50	0,00	0,00	0,00	100,00	100%
1 1/2"	37,5	364,80	364,80	7,30	92,70	-
1"	25,00	873,30	1238,10	24,76	75,24	55%-100%
3/4"	19,00	309,40	1547,50	30,95	69,05	-
3/8"	9,50	798,50	2346,00	46,92	53,08	30%-75%
Nº 4	4,75	693,30	3039,30	60,79	39,21	20%-65%
Nº 10	2,00	528,50	3567,80	71,36	28,64	10%-50%
Nº 40	0,425	594,80	4162,60	83,25	16,75	5%-30%
Nº 200	0,075	715,70	4878,30	97,57	2,43	0%-20%

Fuente: Elaboración propia

Grafico 3.9. Granulometría de RAP para capa sub-base.



Fuente: Elaboración propia

CAPÍTULO IV

INFLUENCIA DE RAP +

GEOCELDAS EN PAVIMENTOS

FLEXIBLES

CAPÍTULO IV

INFLUENCIA DE RAP + GEOCELDAS EN PAVIMENTOS FLEXIBLES

4.1. Proceso de mezclado de material de capa base con incorporación de pavimento asfáltico reciclado (RAP).

4.1.1. Dosificación de suelo capa base y RAP.

Para la dosificación de Suelo/Rap se procedió a realizar dos pruebas frontera es decir una de mayor implementación de RAP y la otra de menor, posteriormente se realizó el análisis de estos resultados, entre ellos el principal, comparación de CBR, para con estos nuevos datos según la dosificación correspondiente, añadir el uso de las geoceldas.

Tabla 4.1.1. Dosificación capa base/RAP.

Capa base	
Suelo natural (%)	RAP (%)
100	0
85	15
80	20
75	25
70	30

Fuente: Elaboración propia

4.1.2. Ensayos de laboratorio, suelo capa base/RAP.

4.1.2.1. Granulometría.

Se realiza el ensayo de granulometría establecido en la norma ABC a diferentes dosificaciones de suelo/RAP.

Para la realización del ensayo se tomó un determinado porcentaje de suelo capa base y otro de pavimento asfáltico reciclado, como la dosificación que corresponde al mismo variando según se muestra en la tabla 4.1.1.

Figura 4.1. Suelo capa base y RAP.



Fuente: Elaboración Propia

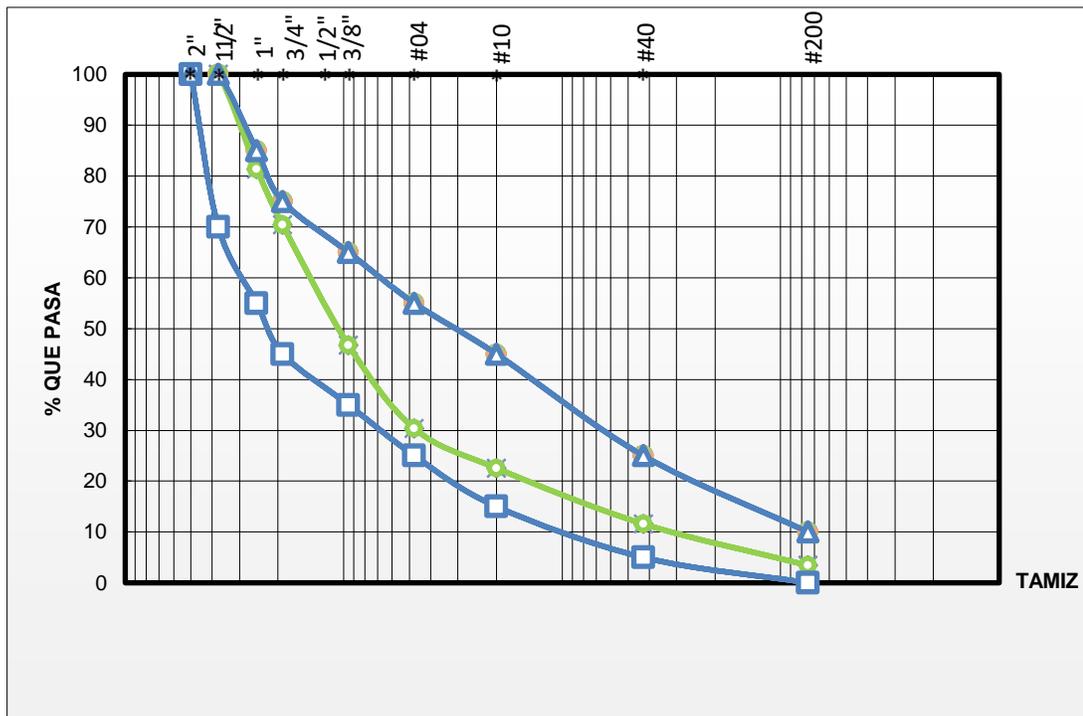
4.1.2.1.1. Mezcla suelo/RAP al 15%

Tabla 4.1.2. Granulometría de suelo/RAP al 15 %

Peso Total (g)			5000,00			
Tamices	Tamaño (mm)	Peso Ret. (g)	Ret. Acum (g)	% Ret	% Que Pasa del Total	Especificaciones
2"	50	0,00	0,00	0,00	100,00	100%
1 1/2"	37,5	0,00	0,00	0,00	100,00	70%-100%
1"	25,00	928,80	928,80	18,58	81,42	55%-85%
3/4"	19,00	552,00	1480,80	29,62	70,38	45%-75%
3/8"	9,50	1183,70	2664,50	53,29	46,71	35%-65%
N° 4	4,75	817,20	3481,70	69,63	30,37	25%-55%
N°10	2,00	390,80	3872,50	77,45	22,55	15%-45%
N°40	0,425	548,40	4420,90	88,42	11,58	5%-25%
N°200	0,075	407,60	4828,50	96,57	3,43	0%-10%

Fuente: Elaboración propia

Gráfico 4.1.1. Curva de ensayo de distribución granulométrica de suelo/RAP al 15 %



Fuente: Elaboración propia

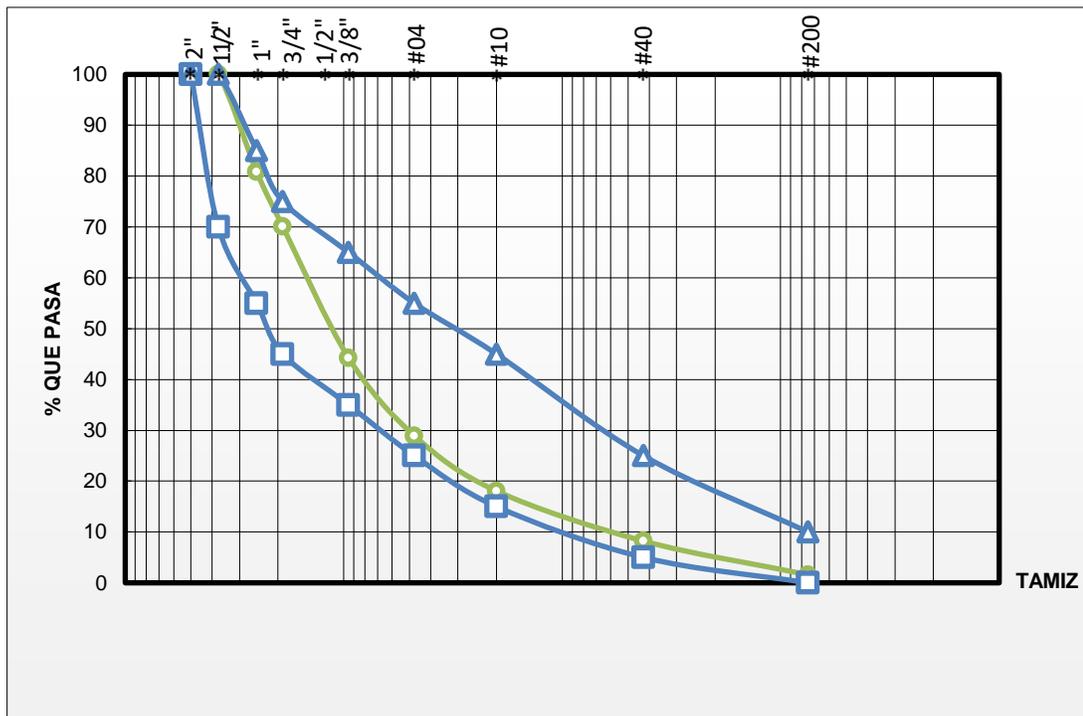
4.1.2.1.2. Mezcla suelo/RAP al 20 %

Tabla 4.1.3. Granulometría de suelo/RAP al 20 %

Peso Total (g)			5000,00			
Tamices	Tamaño (mm)	Peso Ret. (g)	Ret. Acum (g)	% Ret	% Que Pasa del Total	Especificaciones
2"	50	0,00	0,00	0,00	100,00	100%
1 1/2"	37,5	0,00	0,00	0,00	100,00	70%-100%
1"	25,00	958,90	958,90	19,18	80,82	55%-85%
3/4"	19,00	538,10	1497,00	29,94	70,06	45%-75%
3/8"	9,50	1290,80	2787,80	55,76	44,24	35%-65%
N° 4	4,75	765,30	3553,10	71,06	28,94	25%-55%
N°10	2,00	543,60	4096,70	81,93	18,07	15%-45%
N°40	0,425	492,20	4588,90	91,78	8,22	5%-25%
N°200	0,075	331,40	4920,30	98,41	1,59	0%-10%

Fuente: Elaboración propia

Gráfico 4.1.2. Curva de ensayo de distribución granulométrica de suelo/RAP al 20 %



Fuente: Elaboración propia

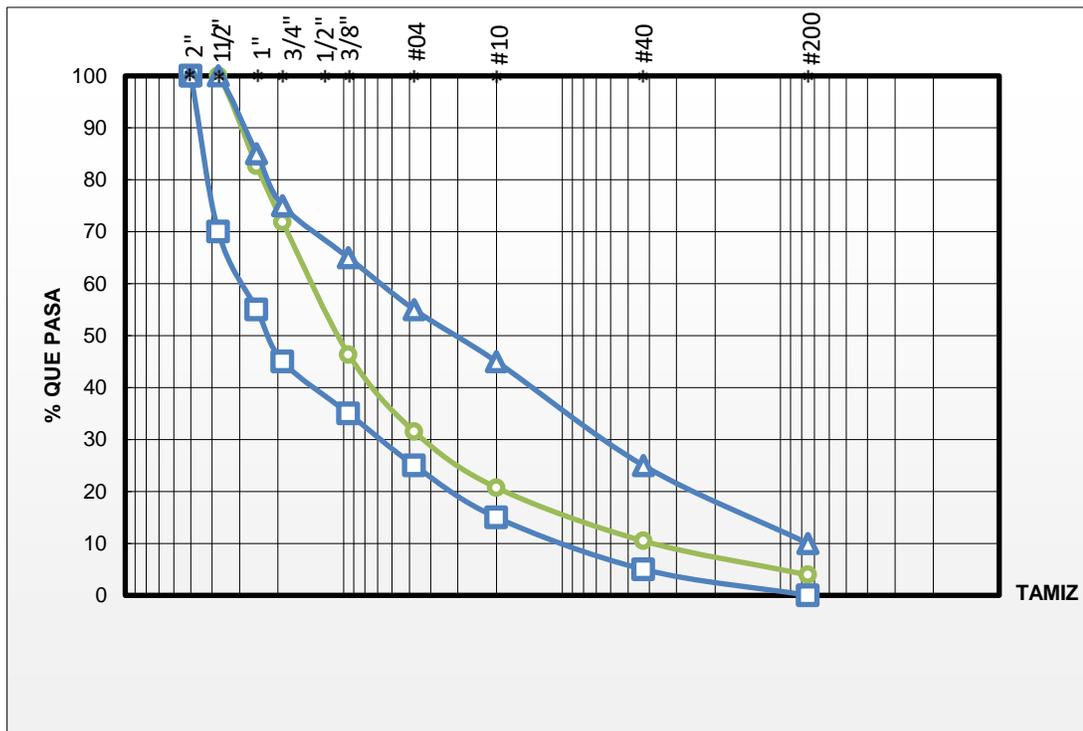
4.1.2.1.3. Mezcla suelo/RAP al 25 %

Tabla 4.1.4. Granulometría de suelo/RAP al 25 %

Peso Total (g)			5000,00			
Tamices	Tamaño (mm)	Peso Ret. (g)	Ret. Acum (g)	% Ret	% Que Pasa del Total	Especificaciones
2"	50	0,00	0,00	0,00	100,00	100%
1 1/2"	37,5	0,00	0,00	0,00	100,00	70%-100%
1"	25,00	864,70	864,70	17,29	82,71	55%-85%
3/4"	19,00	545,20	1409,90	28,20	71,80	45%-75%
3/8"	9,50	1271,50	2681,40	53,63	46,37	35%-65%
N° 4	4,75	743,00	3424,40	68,49	31,51	25%-55%
N° 10	2,00	538,80	3963,20	79,26	20,74	15%-45%
N° 40	0,425	513,60	4476,80	89,54	10,46	5%-25%
N° 200	0,075	326,70	4803,50	96,07	3,93	0%-10%

Fuente: Elaboración propia

Gráfico 4.1.3. Curva de ensayo de distribución granulométrica de suelo/RAP al 25 %



Fuente: Elaboración propia

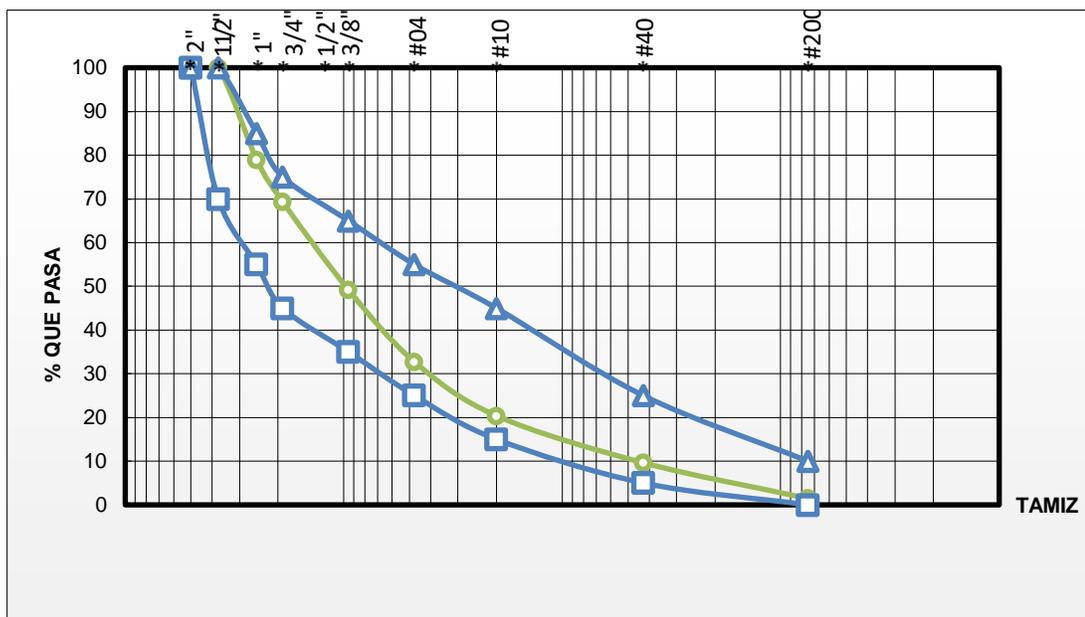
4.1.2.1.4. Mezcla suelo/RAP al 30 %

Tabla 4.1.5. Granulometría de suelo/RAP al 30 %

Peso Total (g)			5000,00			
Tamices	Tamaño (mm)	Peso Ret. (g)	Ret. Acum (g)	% Ret	% Que Pasa del Total	Especificaciones
2"	50	0,00	0,00	0,00	100,00	100%
1 1/2"	37,5	0,00	0,00	0,00	100,00	70%-100%
1"	25,00	1051,80	1051,80	21,04	78,96	55%-85%
3/4"	19,00	484,30	1536,10	30,72	69,28	45%-75%
3/8"	9,50	1006,10	2542,20	50,84	49,16	35%-65%
Nº 4	4,75	820,30	3362,50	67,25	32,75	25%-55%
Nº10	2,00	618,50	3981,00	79,62	20,38	15%-45%
Nº40	0,425	537,60	4518,60	90,37	9,63	5%-25%
Nº200	0,075	408,50	4927,10	98,54	1,46	0%-10%

Fuente: Elaboración propia

Gráfico 4.1.4. Curva de ensayo de distribución granulométrica de suelo/RAP al 30%



Fuente: Elaboración propia

4.1.2.2. Ensayo de compactación.

4.1.2.2.1. Mezcla suelo/RAP al 15%

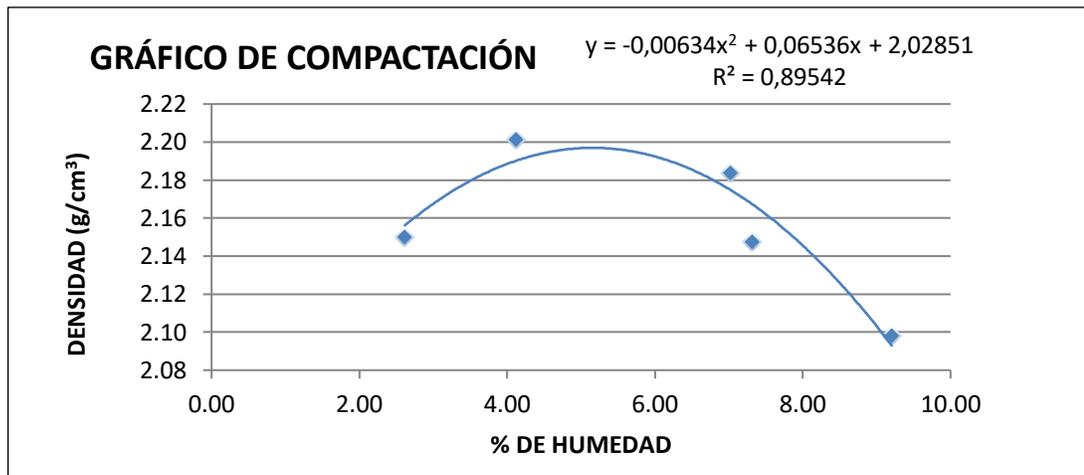
Tabla 4.1.6. Ensayo de compactación suelo/RAP al 15%

Nº de capas	5	5	5	5	5
Nº de golpes por capa	56	56	56	56	56
Peso suelo húmedo + molde	11121,80	11303,40	11398,60	11305,40	11277,00
Peso del molde	6461,20	6461,20	6461,20	6436,40	6436,40
Peso suelo húmedo	4660,60	4842,20	4937,40	4869,00	4840,60
Volumen de la muestra	2112,50	2112,50	2112,50	2112,50	2112,50
Densidad suelo húmedo (gr/cm³)	2,21	2,29	2,34	2,30	2,29
Cápsula Nº	1	2	3	4	5
Peso suelo húmedo + capsula	182,80	169,00	179,80	199,60	229,60
Peso suelo seco + cápsula	178,60	163,00	169,20	187,20	211,80
Peso del agua	4,20	6,00	10,60	12,40	17,80
Peso de la cápsula	18,00	17,40	18,20	17,80	18,40
Peso suelo seco	160,60	145,60	151,00	169,40	193,40
Contenido de humedad (%)	2,62	4,12	7,02	7,32	9,20
Densidad suelo seco (gr/cm³)	2,15	2,20	2,18	2,15	2,10

Densidad Máxima	2,20 gr/cm³
Humedad Optima	5,15 %

Fuente: Elaboración propia

Gráfico 4.1.5. Curva de compactación suelo/RAP al 15%



Fuente: Elaboración propia

4.1.2.2.2. Mezcla suelo/RAP al 20%

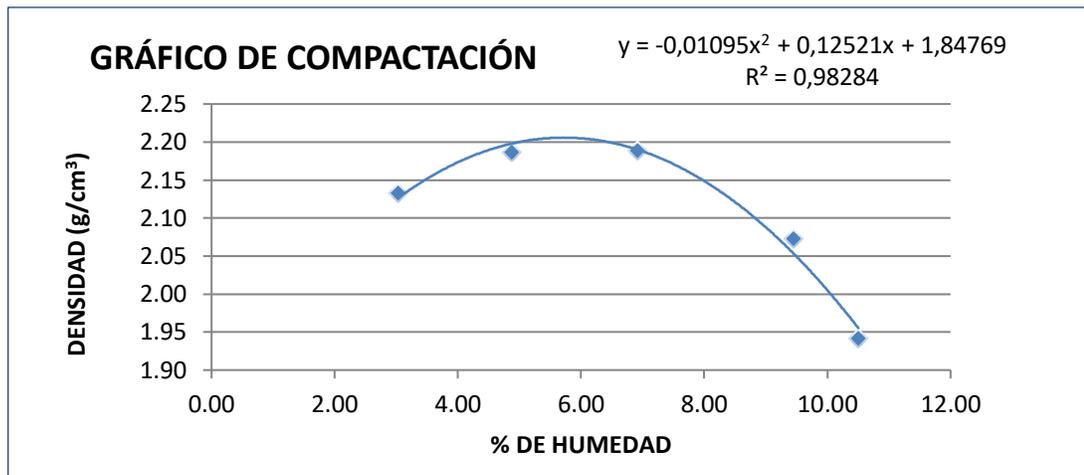
Tabla 4.1.7. Ensayo de compactación suelo/RAP al 20%

Nº de capas	5	5	5	5	5
Nº de golpes por capa	56	56	56	56	56
Peso suelo húmedo + molde	11079,60	11282,40	11379,80	11278,70	11019,20
Peso del molde	6437,60	6437,60	6436,20	6486,30	6486,30
Peso suelo húmedo	4642,00	4844,80	4943,60	4792,40	4532,90
Volumen de la muestra	2112,50	2112,50	2112,50	2112,50	2112,50
Densidad suelo húmedo (gr/cm ³)	2,20	2,29	2,34	2,27	2,15
Cápsula Nº	1	2	3	4	5
Peso suelo húmedo + capsula	138,30	102,90	128,80	150,90	217,30
Peso suelo seco + cápsula	134,60	98,70	121,40	139,50	198,50
Peso del agua	3,70	4,20	7,40	11,40	18,80
Peso de la cápsula	12,50	12,50	14,50	18,90	19,50
Peso suelo seco	122,10	86,20	106,90	120,60	179,00
Contenido de humedad (%)	3,03	4,87	6,92	9,45	10,50
Densidad suelo seco (gr/cm ³)	2,13	2,19	2,19	2,07	1,94

Densidad Máxima	2,21 gr/cm ³
Humedad Optima	5,72 %

Fuente: Elaboración propia

Gráfico 4.1.6. Curva de compactación suelo/RAP al 20 %



Fuente: Elaboración propia

4.1.2.2.3. Mezcla suelo/RAP al 25 %

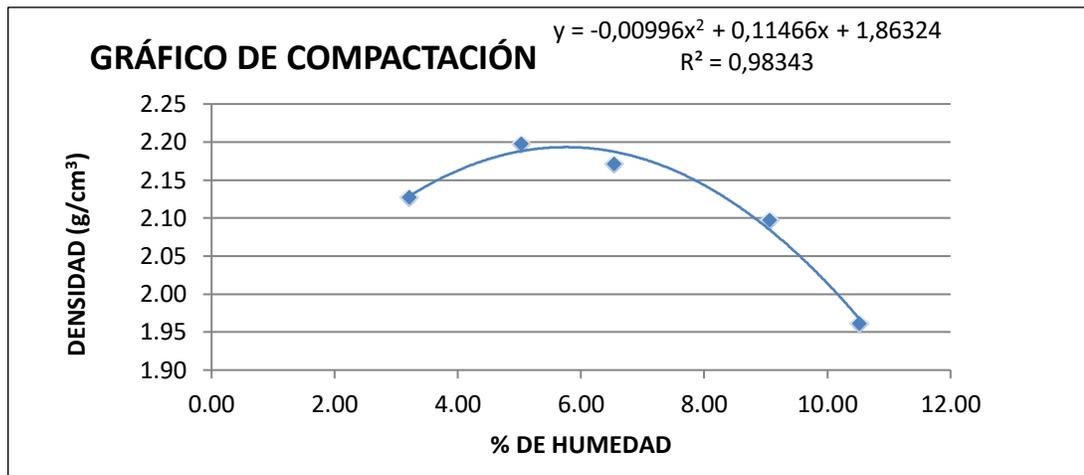
Tabla 4.1.8. Ensayo de compactación suelo/RAP al 25 %

Nº de capas	5	5	5	5	5
Nº de golpes por capa	56	56	56	56	56
Peso suelo húmedo + molde	11096,50	11335,20	11345,10	11290,90	11038,20
Peso del molde	6458,30	6458,30	6458,30	6458,30	6458,30
Peso suelo húmedo	4638,20	4876,90	4886,80	4832,60	4579,90
Volumen de la muestra	2112,50	2112,50	2112,50	2112,50	2112,50
Densidad suelo húmedo (gr/cm ³)	2,20	2,31	2,31	2,29	2,17
Cápsula Nº	1	2	3	4	5
Peso suelo húmedo + capsula	148,50	135,20	167,40	194,80	224,30
Peso suelo seco + cápsula	144,60	129,80	158,60	180,70	205,50
Peso del agua	3,90	5,40	8,80	14,10	18,80
Peso de la cápsula	23,10	22,50	24,10	25,20	26,80
Peso suelo seco	121,50	107,30	134,50	155,50	178,70
Contenido de humedad (%)	3,21	5,03	6,54	9,07	10,52
Densidad suelo seco (gr/cm ³)	2,13	2,20	2,17	2,10	1,96

Densidad Máxima	2,19 gr/cm ³
Humedad Optima	5,76 %

Fuente: Elaboración propia

Gráfico 4.1.7. Curva de compactación suelo/RAP al 25 %



Fuente: Elaboración propia

4.1.2.2.4. Mezcla suelo/RAP al 30 %

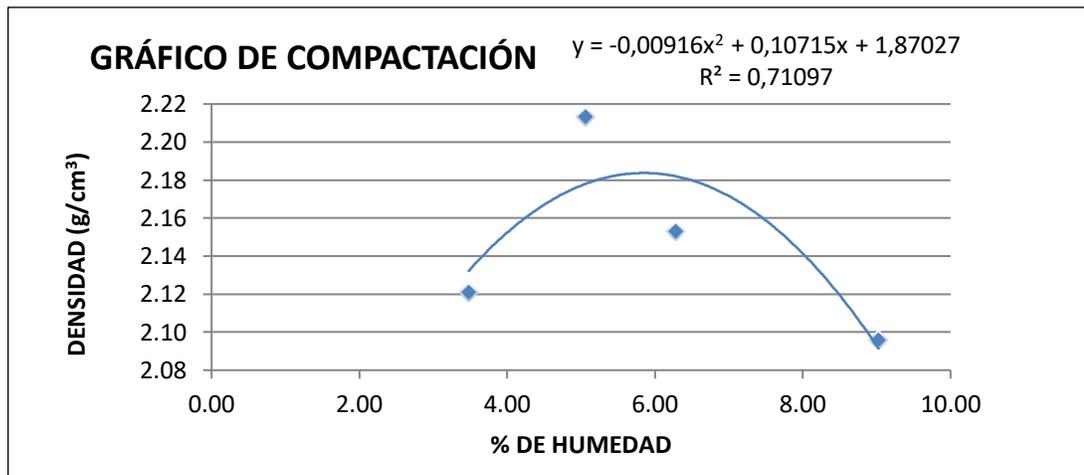
Tabla 4.1.9. Ensayo de compactación suelo/RAP al 30 %

Nº de capas	5	5	5	5
Nº de golpes por capa	56	56	56	56
Peso suelo húmedo + molde	11074,70	11350,00	11272,20	11265,20
Peso del molde	6437,80	6437,80	6437,80	6437,80
Peso suelo húmedo	4636,90	4912,20	4834,40	4827,40
Volumen de la muestra	2112,50	2112,50	2112,50	2112,50
Densidad suelo húmedo (gr/cm ³)	2,19	2,33	2,29	2,29
Cápsula Nº	1	2	3	4
Peso suelo húmedo + capsula	144,60	153,50	192,00	224,80
Peso suelo seco + cápsula	140,40	147,00	181,80	207,70
Peso del agua	4,20	6,50	10,20	17,10
Peso de la cápsula	19,70	18,50	19,50	18,20
Peso suelo seco	120,70	128,50	162,30	189,50
Contenido de humedad (%)	3,48	5,06	6,28	9,02
Densidad suelo seco (gr/cm ³)	2,12	2,21	2,15	2,10

Densidad Máxima	2,18 gr/cm ³
Humedad Óptima	5,85 %

Fuente: Elaboración propia

Gráfico 4.1.8. Curva de compactación suelo/RAP al 30 %



Fuente: Elaboración propia

4.1.2.3. Ensayo de capacidad de soporte (C.B.R.)

4.1.2.3.1. Mezcla suelo/RAP al 15 %

Tabla 4.1.10. Ensayo CBR. Mezcla suelo/RAP al 15 %

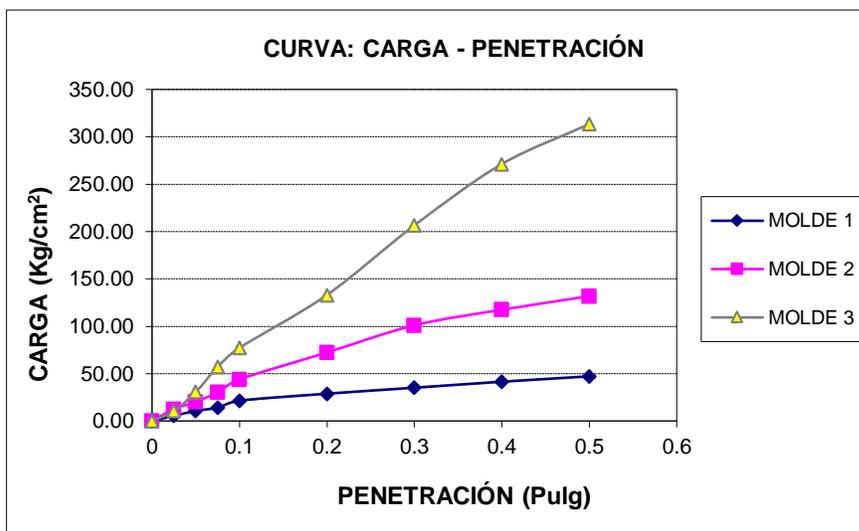
Contenido de humedad y peso unitario									
Nº capas	5			5			5		
Nº golpes por capa	12			25			56		
Condición de muestra	Antes de mojarse		D. de M	Antes de mojarse		D. de M	Antes de mojarse		D. de M
Peso muestra húm.+molde	12660,00		12810,00	12830,00		12990,00	12050,00		12090,00
Peso molde	7953,80		7953,80	8034,80		8034,80	7106,80		7106,80
Peso muestra húmeda	4706,20		4856,20	4795,20		4955,20	4943,20		4983,20
Volumen de la muestra	2121,00		2121,00	2121,00		2121,00	2121,00		2121,00
Peso unit. muestra húm.	2,22		2,29	2,26		2,34	2,33		2,35
Muestra de humedad	Fondo	Superf.	2" sup.	Fondo	Superf.	2" sup.	Fondo	Superf.	2" sup.
Tara Nº	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Peso muestra húm + tara	172,80	136,20	162,80	158,60	111,60	156,80	183,20	121,40	124,60
Peso muestra seca + tara	159,80	127,10	149,50	150,80	105,60	147,80	174,20	115,00	118,20
Peso del agua	13,00	9,10	13,30	7,80	6,00	9,00	9,00	6,40	6,40
Peso de tara	17,80	20,80	19,40	20,00	19,00	20,80	25,00	19,20	12,60
Peso de la muestra seca	142,00	106,30	130,10	130,80	86,60	127,00	149,20	95,80	105,60
Contenido humedad %	9,15	8,56	10,22	5,96	6,93	7,09	6,03	6,68	6,06
Promedio cont. humedad	8,86		10,22	6,45		7,09	6,36		6,06
Peso unit.muestra seca	2,04		2,08	2,12		2,18	2,19		2,22

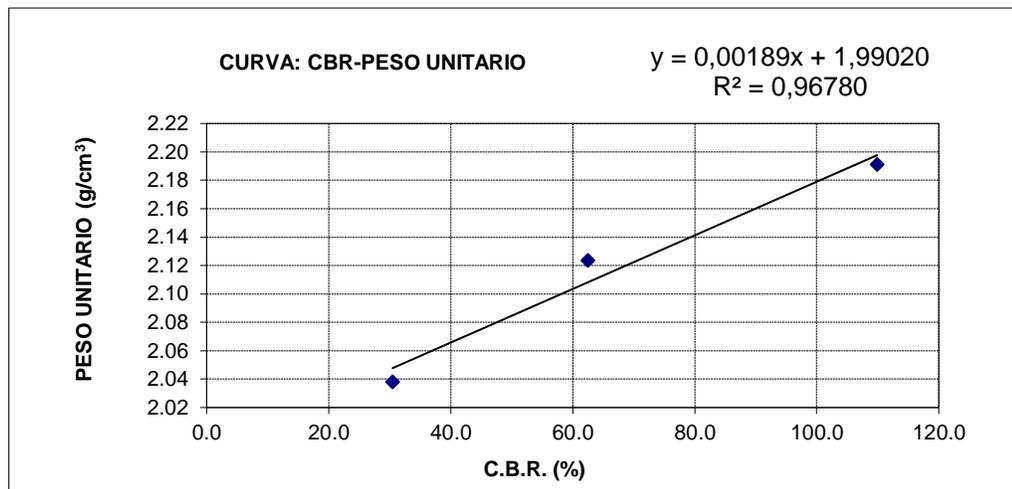
Expansión											
Fecha	Hora	Tiempo en días	Molde N° 1			Molde N° 2			Molde N° 3		
			Lect.		Expansión	Lect.		Expansión	Lect.		Expansión
			extens.	cm	%	extens.	cm	%	extens.	cm	%
2-oct	10:50	1	10	1	0	13,60	1,36	0	2	0,20	0
3-oct	10:30	2	10	1	0	13,60	1,36	0	2	0,20	0
4-oct	11:00	3	10	1	0	13,60	1,36	0	2	0,20	0
5-oct	8:00	4	10	1	0	13,60	1,36	0	2	0,20	0

C.B.R.														
Penetración		Carga normal	Molde N° 1				Molde N° 2				Molde N° 3			
Pulg.	mm		Carga ensayo		C.B.R. correg.		Carga ensayo		C.B.R. correg.		Carga ensayo		C.B.R. correg.	
		Kg	Kg	Kg/cm ²	Kg	%	Kg	Kg/cm ²	Kg	%	Kg	Kg/cm ²	Kg	%
0	0		0,00	0,00			0,00	0,00			0,00	0,00		
0,025	0,63		104,50	5,40			242,00	12,50			204,50	10,57		
0,05	1,27		207,00	10,70			392,00	20,25			592,00	30,59		
0,075	1,90		272,00	14,05			584,50	30,20			1104,50	57,07		
0,1	2,54	1360	414,50	21,42		30,48	849,50	43,89		62,46	1494,50	77,22		109,89
0,2	5,08	2040	557,00	28,78		27,30	1399,50	72,31		68,60	2574,50	133,02		126,20
0,3	7,62		679,50	35,11			1954,50	100,98			3997,00	206,51		
0,4	10,16		802,00	41,44			2272,00	117,39			5249,50	271,22		
0,5	12,70		912,00	47,12			2549,50	131,72			6067,00	313,46		

Fuente: Elaboración propia

Gráfico 4.1.9. Curvas características para determinación de CBR de mezcla suelo/RAP al 15 %





Fuente: Elaboración propia

A partir de estos parámetros se determina el CBR:

CBR 100 % D.máx	CBR 95 % D.máx
109,40 %	51,28 %

4.1.2.3.2. Mezcla suelo/RAP al 20 %

Tabla 4.1.11. Ensayo CBR. Mezcla suelo/RAP al 20 %

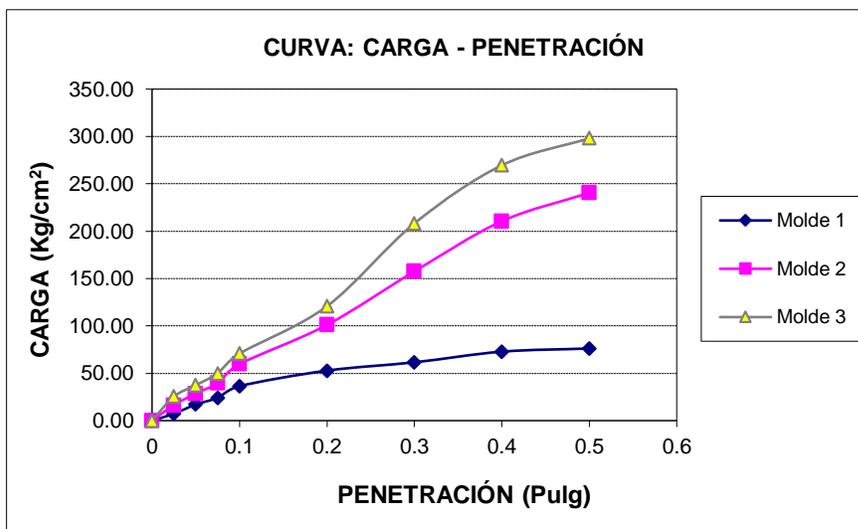
Contenido de humedad y peso unitario									
Nº capas	5			5			5		
Nº golpes por capa	12			25			56		
Condición de muestra	Antes de mojarse		D. de M	Antes de mojarse		D. de M	Antes de mojarse		D. de M
Peso muestra húm.+molde	11974,00		12020,00	12855,00		12880,00	11682,20		11750,00
Peso molde	7305,00		7305,00	7970,00		7970,00	6808,60		6808,60
Peso muestra húmeda	4669,00		4715,00	4885,00		4910,00	4873,60		4941,40
Volumen de la muestra	2121,00		2121,00	2121,00		2121,00	2121,00		2121,00
Peso unit. muestra húm.	2,20		2,22	2,30		2,31	2,30		2,33
Muestra de humedad	Fondo	Superf.	2" sup.	Fondo	Superf.	2" sup.	Fondo	Superf.	2" sup.
Tara Nº	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Peso muestra húm + tara	104,40	100,70	97,50	104,40	91,30	123,70	100,10	88,90	91,80
Peso muestra seca + tara	98,60	94,60	91,60	98,00	85,80	116,70	95,60	84,10	87,30
Peso del agua	5,80	6,10	5,90	6,40	5,50	7,00	4,50	4,80	4,50
Peso de tara	18,20	18,10	17,70	18,20	18,60	18,40	17,70	18,10	17,70
Peso de la muestra seca	80,40	76,50	73,90	79,80	67,20	98,30	77,90	66,00	69,60
Contenido humedad %	7,21	7,97	7,98	8,02	8,18	7,12	5,78	7,27	6,47
Promedio cont. humedad	7,59		7,98	8,10		7,12	6,52		6,47
Peso unit.muestra seca	2,05		2,06	2,13		2,16	2,16		2,19

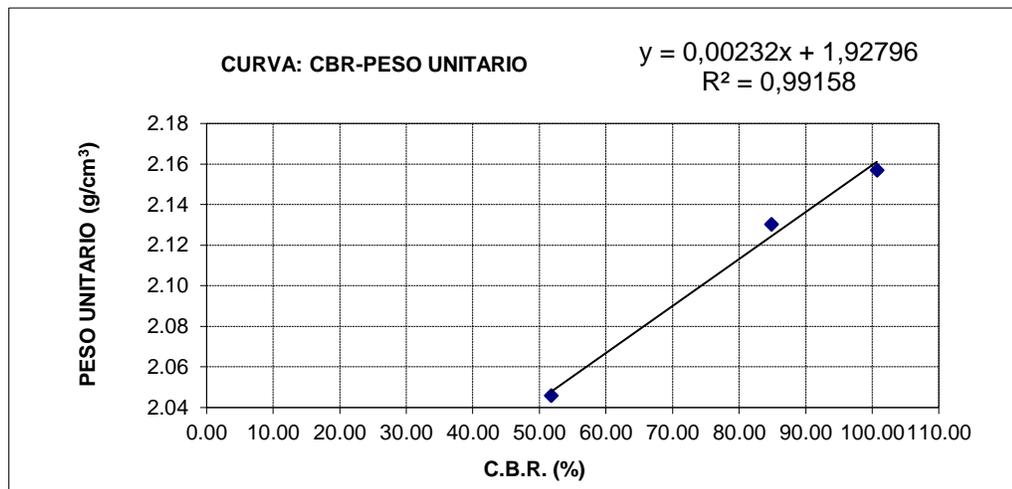
Expansión											
Fecha	Hora	Tiempo en días	Molde N° 1			Molde N° 2			Molde N° 3		
			Lect.		Expansión	Lect.		Expansión	Lect.		Expansión
			extens.	cm		extens.	cm		extens.	cm	
8-oct	10:50	1	5,60	0,56	0	7,80	0,78	0	20,50	2,05	0
9-oct	10:30	2	5,60	0,56	0	7,80	0,78	0	20,50	2,05	0
10-oct	11:00	3	5,60	0,56	0	7,80	0,78	0	20,50	2,05	0
11-oct	8:00	4	5,60	0,56	0	7,80	0,78	0	20,50	2,05	0

C.B.R.														
Penetración		Carga normal	Molde N° 1				Molde N° 2				Molde N° 3			
Pulg.	mm		Carga ensayo		C.B.R. correg.		Carga ensayo		C.B.R. correg.		Carga ensayo		C.B.R. correg.	
		Kg	Kg	Kg/cm ²	Kg	%	Kg	Kg/cm ²	Kg	%	Kg	Kg/cm ²	Kg	%
0	0		0,00	0,00			0,00	0,00			0,00	0,00		
0,025	0,63		142,00	7,34			317,00	16,38			492,00	25,42		
0,05	1,27		329,50	17,02			554,50	28,65			724,50	37,43		
0,075	1,9		467,00	24,13			767,00	39,63			967,00	49,96		
0,1	2,54	1360	704,50	36,40		51,80	1154,50	59,65		84,89	1369,50	70,76		100,70
0,2	5,08	2040	1022,00	52,80		50,10	1954,50	100,98		95,81	2337,00	120,75		114,56
0,3	7,62		1192,00	61,59			3049,50	157,56			4029,50	208,19		
0,4	10,16		1409,50	72,82			4074,50	210,52			5217,00	269,55		
0,5	12,7		1474,50	76,18			4654,50	240,48			5769,50	298,09		

Fuente: Elaboración propia

Gráfico 4.1.10. Curvas características para determinación de CBR de mezcla suelo/RAP al 20 %





Fuente: Elaboración propia

A partir de estos parámetros se determina el CBR:

CBR 100% D.máx	CBR 95% D.máx
119,68 %	72,15 %

4.1.2.3.3. Mezcla suelo/RAP al 25 %

Tabla 4.1.12. Ensayo CBR. Mezcla suelo/RAP al 25 %

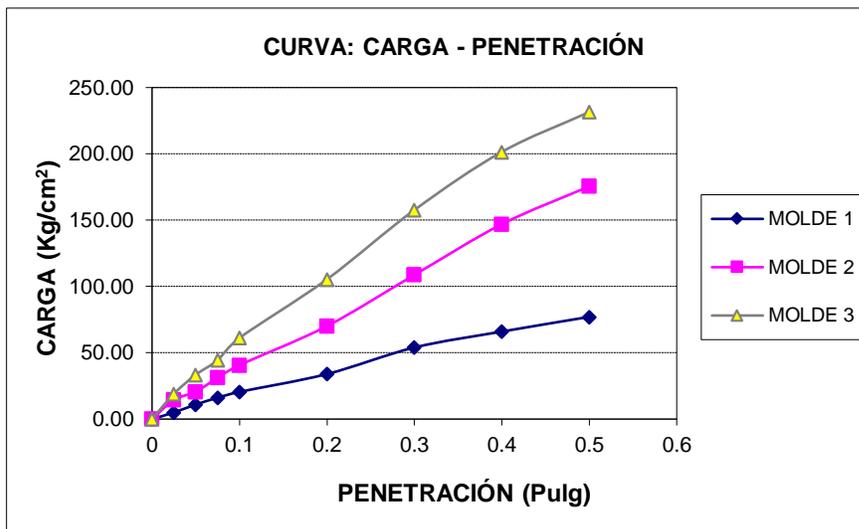
Contenido de humedad y peso unitario									
Nº capas	5			5			5		
Nº golpes por capa	12			25			56		
Condición de muestra	Antes de mojarse		D. de M	Antes de mojarse		D. de M	Antes de mojarse		D. de M
Peso muestra húm.+molde	12550,00	12706,00	12706,00	12005,00	12065,00	12065,00	12910,00	12940,00	12940,00
Peso molde	7954,00	7954,00	7954,00	7106,00	7106,00	7106,00	8035,60	8035,60	8035,60
Peso muestra húmeda	4596,00	4752,00	4752,00	4899,00	4959,00	4959,00	4874,40	4904,40	4904,40
Volumen de la muestra	2121,00	2121,00	2121,00	2121,00	2121,00	2121,00	2121,00	2121,00	2121,00
Peso unit. muestra húm.	2,17		2,24	2,31		2,34	2,30		2,31
Muestra de humedad	Fondo	Superf	2" sup.	Fondo	Superf.	2" sup.	Fond	Superf.	2" sup.
Tara Nº	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Peso muestra húm + tara	123,50	120,30	112,50	117,20	123,60	131,30	98,40	113,80	108,70
Peso muestra seca + tara	116,00	113,70	105,10	109,10	116,10	123,20	93,90	107,40	103,90
Peso del agua	7,50	6,60	7,40	8,10	7,50	8,10	4,50	6,40	4,80
Peso de tara	16,00	16,60	14,90	15,40	15,50	16,10	12,40	15,90	14,80
Peso de la muestra seca	100,00	97,10	90,20	93,70	100,60	107,10	81,50	91,50	89,10
Contenido humedad %	7,50	6,80	8,20	8,64	7,46	7,56	5,52	6,99	5,39
Promedio cont. humedad	7,15		8,20	8,05		7,56	6,26		5,39
Peso unit.muestra seca	2,02		2,07	2,14		2,17	2,16		2,19
Expansión									

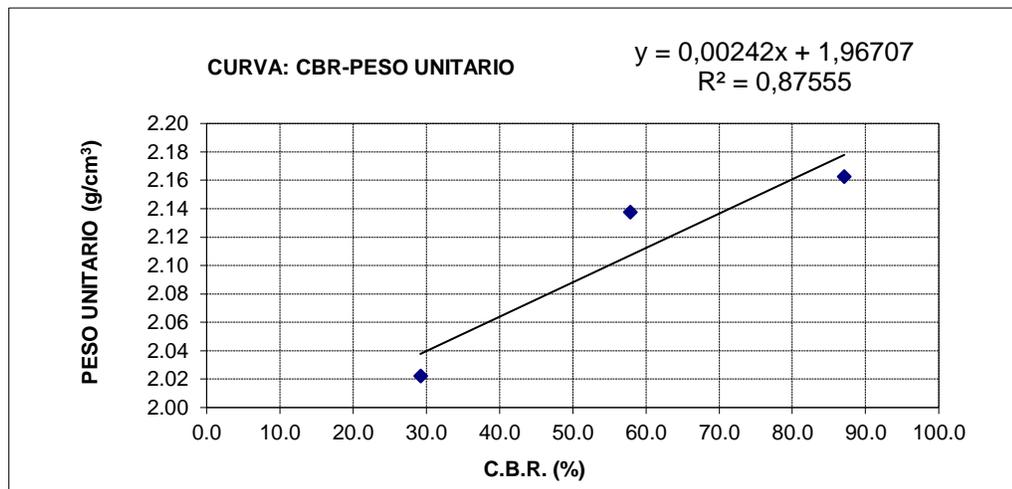
Fecha	Hora	Tiempo en días	Molde N° 1			Molde N° 2			Molde N° 3		
			Lect.		Expansión	Lect.		Expansión	Lect.		Expansión
			extens.	cm	%	extens.	cm	%	extens.	cm	%
16-oct	10:50	1	6,20	0,62	0	18,90	1,89	0	12,5	1,25	0
17-oct	10:30	2	6,20	0,62	0	18,90	1,89	0	12,5	1,25	0
18-oct	11:00	3	6,20	0,62	0	18,90	1,89	0	12,5	1,25	0
19-oct	8:00	4	6,20	0,62	0	18,90	1,89	0	12,5	1,25	0

C.B.R.														
Penetración		Carga normal	Molde N° 1				Molde N° 2				Molde N° 3			
Pulg.	mm		Carga ensayo		C.B.R. correg.		Carga ensayo		C.B.R. correg.		Carga ensayo		C.B.R. correg.	
		Kg	Kg	Kg/cm ²	Kg	%	Kg	Kg/cm ²	Kg	%	Kg	Kg/cm ²	Kg	%
0	0		0,00	0,00			0,00	0,00			0,00	0,00		
0,025	0,63		97,00	5,01			279,50	14,44			369,50	19,09		
0,05	1,27		212,00	10,95			399,50	20,64			647,00	33,43		
0,075	1,90		312,00	16,12			604,50	31,23			859,50	44,41		
0,1	2,54	1360	397,00	20,51		29,19	787,00	40,66		57,87	1184,50	61,20		87,10
0,2	5,08	2040	657,00	33,95		32,21	1357,00	70,11		66,52	2039,50	105,37		99,98
0,3	7,62		1044,50	53,97			2104,50	108,73			3052,00	157,69		
0,4	10,16		1277,00	65,98			2844,50	146,97			3899,50	201,47		
0,5	12,70		1492,00	77,09			3397,00	175,51			4482,00	231,57		

Fuente: Elaboración propia

Gráfico 4.1.11. Curvas características para determinación de CBR de mezcla suelo/RAP al 25%





Fuente: Elaboración propia

A partir de estos parámetros se determina el CBR:

CBR 100 % D.máx	CBR 95 % D.máx
93,46 %	48,14 %

4.1.2.3.4. Mezcla suelo/RAP al 30 %

Tabla 4.1.13. Ensayo CBR. Mezcla suelo/RAP al 30 %

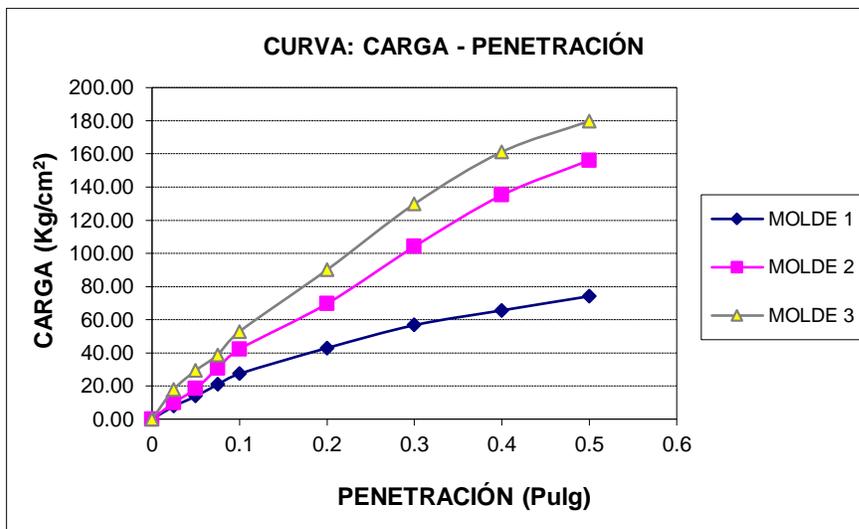
Contenido de humedad y peso unitario									
Nº capas	5			5			5		
Nº golpes por capa	12			25			56		
Condición de muestra	Antes de mojarse		D. de M	Antes de mojarse		D. de M	Antes de mojarse		D. de M
Peso muestra húm.+molde	12540,00	12680,00	12750,00	12840,00	12040,00	12075,00			
Peso molde	7970,50	7970,50	7954,80	7954,80	7170,10	7170,10			
Peso muestra húmeda	4569,50	4709,50	4795,20	4885,20	4869,90	4904,90			
Volumen de la muestra	2121,00	2121,00	2121,00	2121,00	2121,00	2121,00			
Peso unit. muestra húm.	2,15	2,22	2,26	2,30	2,30	2,31			
Muestra de humedad	Fondo	Superf.	2" sup.	Fondo	Superf.	2" sup.	Fondo	Superf.	2" sup.
Tara Nº	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Peso muestra húm + tara	148,50	145,90	133,50	136,00	161,90	144,90	102,60	144,50	131,50
Peso muestra seca + tara	139,90	138,80	125,10	128,80	153,30	137,90	98,10	136,60	125,70
Peso del agua	8,60	7,10	8,40	7,20	8,60	7,00	4,50	7,90	5,80
Peso de tara	19,70	21,00	18,00	18,60	18,30	19,70	13,00	19,60	17,80
Peso de la muestra seca	120,20	117,80	107,10	110,20	135,00	118,20	85,10	117,00	107,90
Contenido humedad %	7,15	6,03	7,84	6,53	6,37	5,92	5,29	6,75	5,38
Promedio cont. humedad	6,59		7,84	6,45		5,92	6,02		5,38
Peso unit.muestra seca	2,02		2,06	2,12		2,17	2,17		2,19

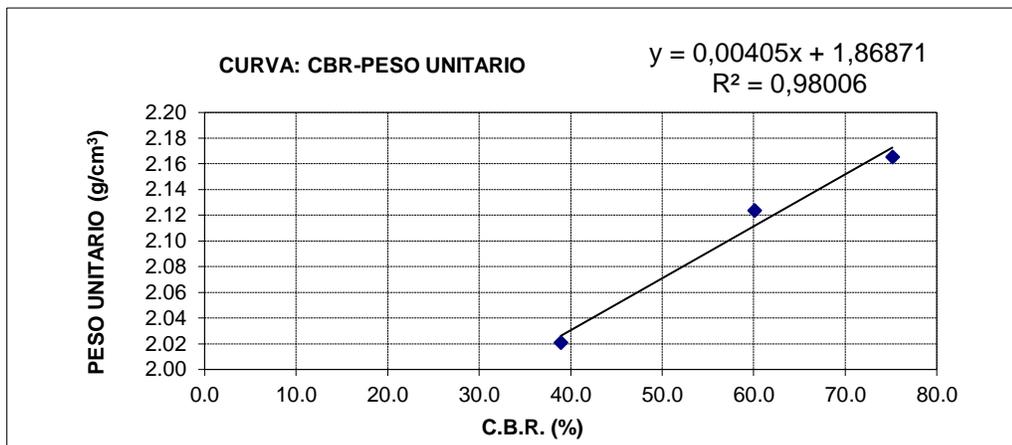
Expansión											
Fecha	Hora	Tiempo en días	Molde N° 1			Molde N° 2			Molde N° 3		
			Lect. extens.	Expansión		Lect. extens.	Expansión		Lect. extens.	Expansión	
				cm	%		cm	%		cm	%
23-oct	16:30	1	9,10	0,91	0	3	0,30	0	3,20	0,32	0
24-oct	17:30	2	9,10	0,91	0	3	0,30	0	3,20	0,32	0
25-oct	16:30	3	9,10	0,91	0	3	0,30	0	3,20	0,32	0
26-oct	16:30	4	9,10	0,91	0	3	0,30	0	3,20	0,32	0

C.B.R.														
Penetración		Carga normal Kg	Molde N° 1				Molde N° 2				Molde N° 3			
Pulg.	mm		Carga ensayo		C.B.R. correg.		Carga ensayo		C.B.R. correg.		Carga ensayo		C.B.R. correg.	
			Kg	Kg/cm ²	Kg	%	Kg	Kg/cm ²	Kg	%	Kg	Kg/cm ²	Kg	%
0	0		0,00	0,00			0,00	0,00			0,00	0,00		
0,025	0,63		149,50	7,72			192,00	9,92			347,00	17,93		
0,05	1,27		267,00	13,80			354,50	18,32			567,00	29,30		
0,075	1,90		404,50	20,90			594,50	30,72			749,50	38,72		
0,1	2,54	1360	529,50	27,36		38,93	817,00	42,21		60,07	1022,00	52,80		75,15
0,2	5,08	2040	829,50	42,86		40,66	1347,00	69,60		66,03	1742,00	90,00		85,39
0,3	7,62		1097,00	56,68			2014,50	104,08			2512,00	129,79		
0,4	10,16		1269,50	65,59			2614,50	135,08			3119,50	161,17		
0,5	12,70		1434,50	74,12			3022,00	156,14			3479,50	179,77		

Fuente: Elaboración propia

Gráfico 4.1.12. Curvas características para determinación de CBR de mezcla suelo/RAP al 30 %





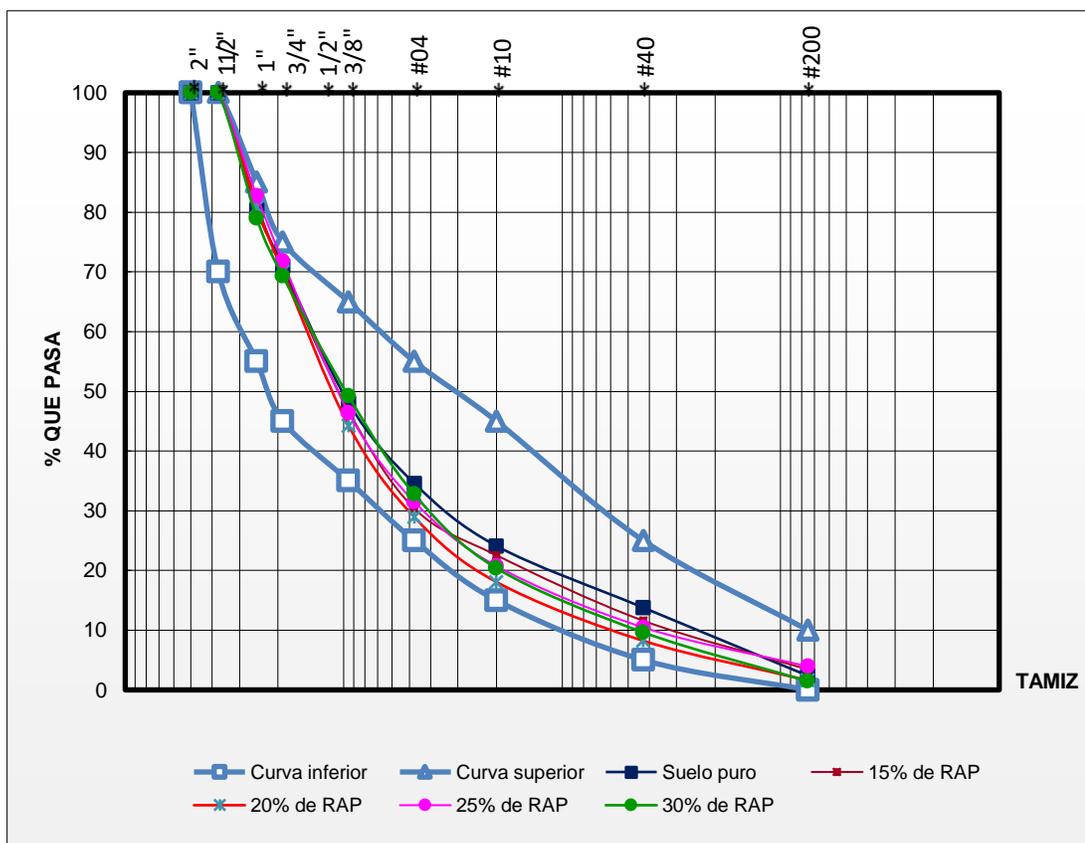
Fuente: Elaboración propia

A partir de estos parámetros se determina el CBR:

CBR 100 % D.máx	CBR 95 % D.máx
77,76 %	50,80 %

4.1.3. Resumen de ensayos de mezclas de suelo capa base y RAP.

Gráfico 4.1.13. Resumen de granulometrías.



Fuente: Elaboración propia

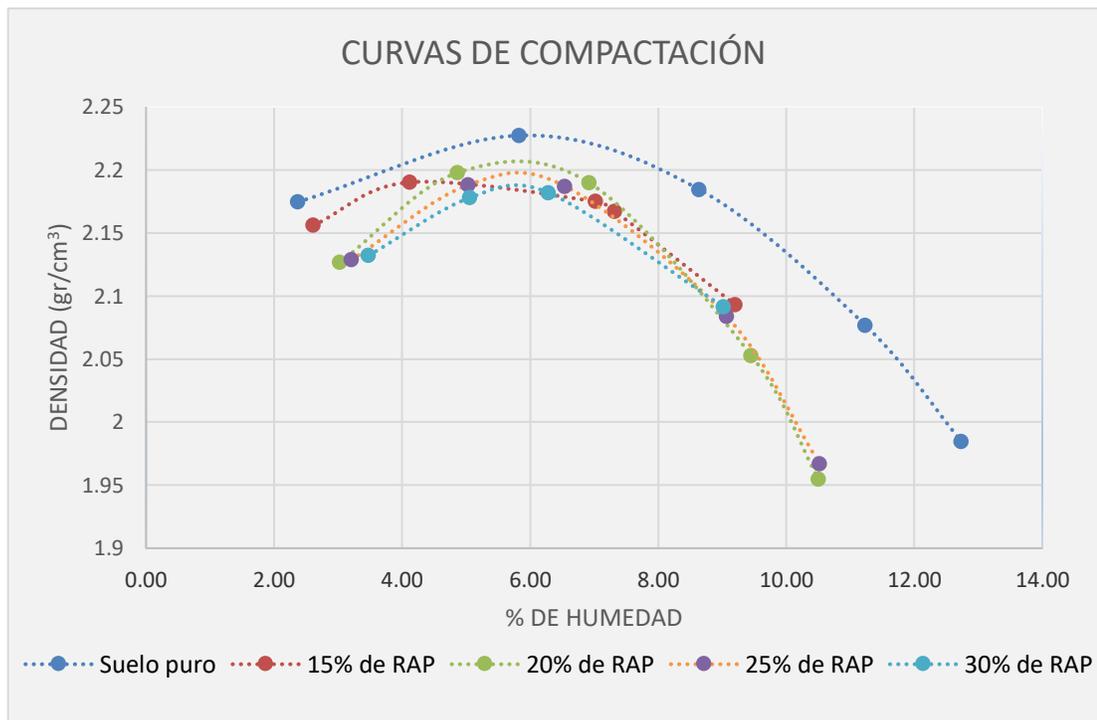
Análisis de resultados

Para realizar el ensayo de granulometría con las mezclas de suelo/RAP a diferentes porcentajes de adición de RAP, se sigue el procedimiento que establece la norma ABC y explicado en el Cap. II y Cap. III, dando como resultado las granulometrías mostradas en los gráficos 4.1.1 al 4.1.4 y resumidos en el gráfico 4.1.13.

Realizando un análisis de las curvas granulométricas resultantes de los ensayos, se puede apreciar que no existen cambios significativos en relación al tamaño de sus partículas y que son relativamente similares al del suelo natural, esto debido a que al momento de realizar las respectivas mezclas se cuidó de elaborar una misma granulometría de cada capa, con el RAP triturado.

4.1.3.2. Curvas de compactación a distintos porcentajes de suelo/RAP.

Gráfico 4.1.14. Curvas de compactación a distintos porcentajes de suelo/RAP.



Fuente: Elaboración propia

Tabla 4.1.14. Humedad óptima y densidad máxima a diferentes porcentajes de suelo/RAP en capa base.

Variables	Unidad	Suelo puro	Pavimento asfáltico reciclado (RAP)			
			15 %	20 %	25 %	30 %
CHO	%	5,67	5,15	5,72	5,76	5,85
Dens. max	gr/cm ³	2,23	2,20	2,21	2,19	2,18

Fuente: Elaboración propia

Análisis de resultados

El gráfico 4.1.14 muestra las curvas de compactación a distintos porcentajes de mezclado de suelo/RAP, se aprecia una variación de contenido de humedad desde 5,67 % hasta 5,85 % y mostrando una variabilidad en la densidad máxima con respecto al suelo puro.

En la mezcla suelo/RAP al 20 % alcanza una mayor densidad máxima.

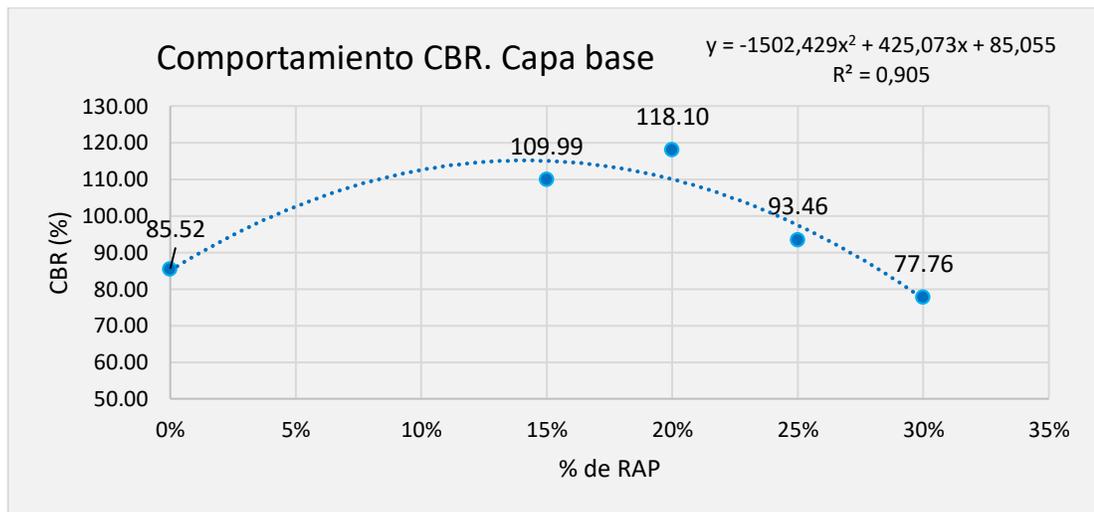
4.1.3.3. Comportamiento de CBR en capa base.

Tabla 4.1.15. Valores de CBR a diferentes mezclas de suelo/RAP.

C.B.R.	Suelo base puro	Pavimento asfáltico reciclado (RAP)			
		15 %	20 %	25 %	30 %
CBR 100 % D.Máx.	85,52	109,40	119,68	93,46	77,76
CBR 95 % D.Máx.	50,39	51,28	72,15	48,14	50,80

Fuente: Elaboración propia

Gráfico 4.1.15. Comportamiento de CBR en capa base.



Fuente: Elaboración propia

Análisis de resultados

En el gráfico 4.1.15 se puede observar que existe un ascenso en el valor del CBR en las mezclas al momento de añadir el RAP, hasta un punto máximo para luego sufrir un descenso.

Cuando el porcentaje de RAP es de 20 % los valores del CBR son mayores al del suelo puro.

Al momento de existir presencia del 25 % de RAP en la mezcla, el valor del CBR desciende.

Con la gráfica anterior y la ecuación se puede calcular valores teóricos del valor de CBR con diferente porcentaje de adición de pavimento asfáltico reciclado.

Tabla 4.1.16. Valores teóricos de CBR para capa base. Con diferente (%) de RAP.

Valores teóricos de CBR. Con diferente (%) de RAP					
% de RAP	Valor de CBR	% de RAP	Valor de CBR	% de RAP	Valor de CBR
0	85,06	34	55,90	68	-320,62
2	92,96	36	43,37	70	-353,58
4	99,65	38	29,63	72	-387,75
6	105,15	40	14,70	74	-423,12
8	109,45	42	-1,44	76	-459,69
10	112,54	44	-18,78	78	-497,47
12	114,43	46	-37,33	80	-536,44
14	115,12	48	-57,07	82	-576,62
16	114,60	50	-78,02	84	-618,00
18	112,89	52	-100,16	86	-660,58
20	109,97	54	-123,51	88	-704,36
22	105,85	56	-148,07	90	-749,35
24	100,53	58	-173,82	92	-795,53
26	94,01	60	-200,78	94	-842,92
28	86,29	62	-228,93	96	-891,51
30	77,36	64	-258,29	98	-941,31
32	67,23	66	-288,85	100	-992,30

Fuente: Elaboración propia

En la tabla anterior se puede apreciar los valores de CBR a diferentes porcentajes de adición de RAP al suelo de capa base, sin embargo se observa que la adición de RAP

mejora el valor de CBR hasta un 24 % para luego descender, a partir de una adición de 40 % el valor de CBR muestra valores negativos.

4.1.4. Determinación de la dosificación óptima de RAP.

Se determina el contenido óptimo para capa base de suelo/RAP al valor que proporcione un CBR mayor a 80 % y un ascenso superior del CBR base de todas las mezclas realizadas, tomando en cuenta que 80 % es el valor mínimo que deber tener un suelo para ser utilizado en capa base según especificaciones locales de la ABC, tomando en cuenta también que este debe cumplir con el valor máximo en expansión que es del 1 %.

También se considera para seleccionar el valor óptimo que los CBR de que las muestras tengan características técnicas de una capa base.

En el caso de capa base la mezcla donde se añade 20 % de RAP es la que cumple con las características anteriores y es por estos motivos que se escoge a esta mezcla para añadir el uso de las geoceldas y mejorar aún más los índices de CBR.

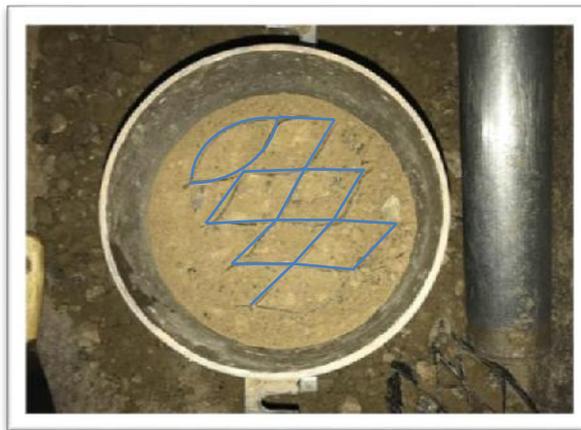
4.1.5. Incorporación de geoceldas a dosificación suelo/RAP óptima seleccionada.

4.1.5.1. Ensayos de laboratorio a suelo/RAP/geoceldas.

4.1.5.5.1. Ensayo de compactación.

Para la incorporación de las geoceldas se realizó un análisis de las mezclas suelo/RAP a diferentes porcentajes, añadiendo las geoceldas a la mezcla que mostraba mayor valor de CBR en cada capa.

Figura 4.2. Aplicación de geoceldas en ensayo de compactación.



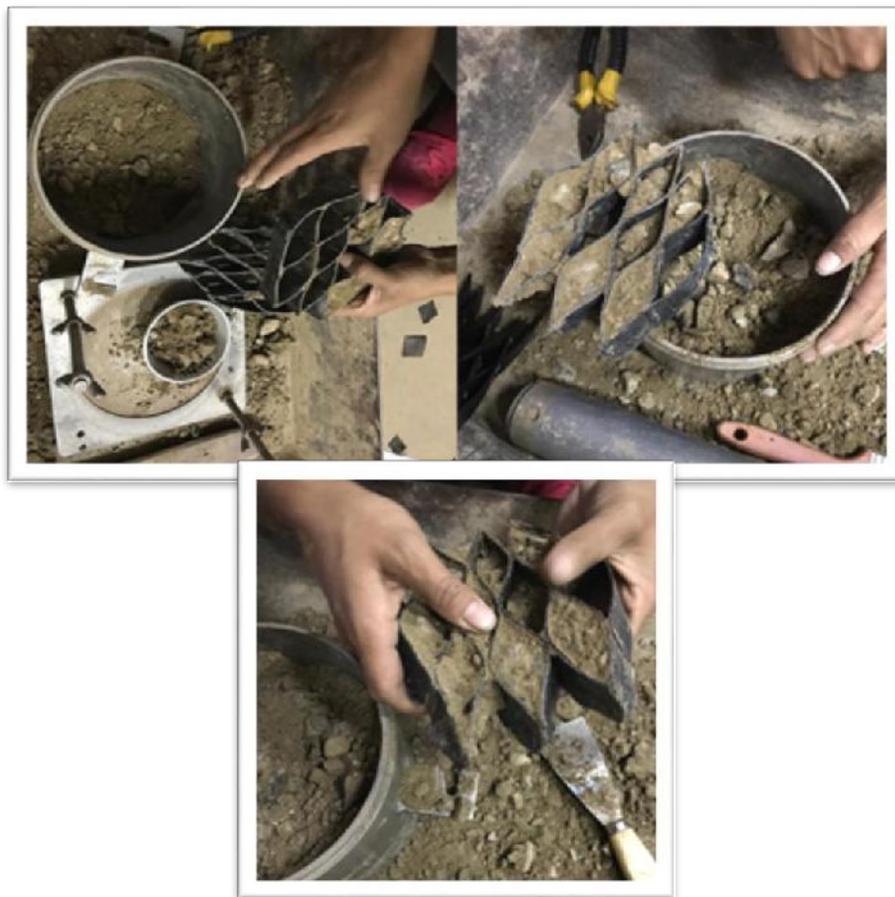
Fuente: Elaboración propia

Figura 4.3. Resultado de aplicación de geoceldas + RAP en ensayo de compactación.



Fuente: Elaboración propia

Figura 4.4. Extracción de muestras de las geoceldas. (Posterior al ensayo de compactación).



Fuente: Elaboración propia

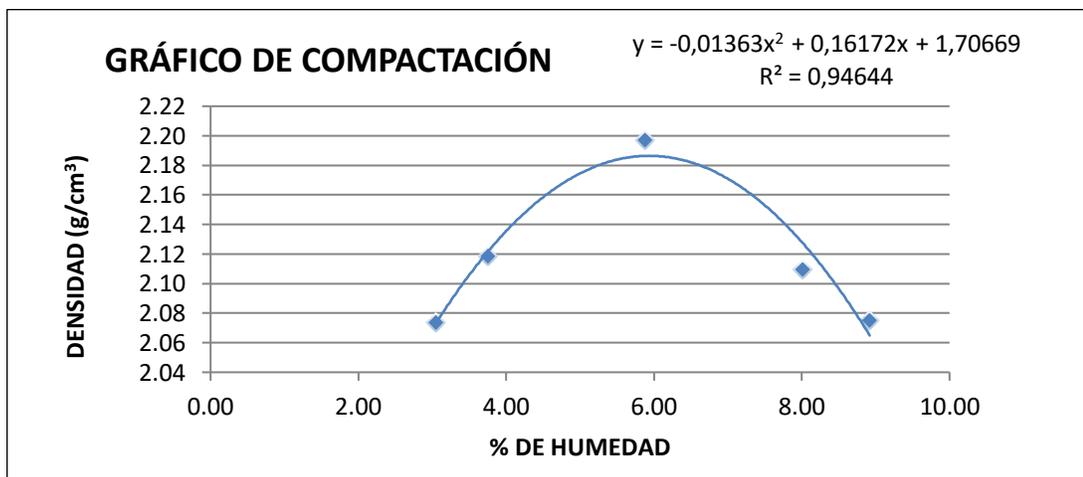
Tabla 4.1.17. Ensayo de compactación suelo/RAP/geoceldas.

N° de capas	5	5	5	5	5
N° de golpes por capa	56	56	56	56	56
Peso suelo húmedo + molde	11010,40	11139,80	11410,40	11310,00	11270,80
Peso del molde	6496,20	6496,20	6496,20	6496,20	6496,20
Peso suelo húmedo	4514,20	4643,60	4914,20	4813,80	4774,60
Volumen de la muestra	2112,50	2112,50	2112,50	2112,50	2112,50
Densidad suelo húmedo (gr/cm ³)	2,14	2,20	2,33	2,28	2,26
Cápsula N°	1	2	3	4	5
Peso suelo húmedo + capsula	180,60	146,40	126,60	166,00	186,00
Peso suelo seco + cápsula	175,80	141,70	120,30	154,60	171,80
Peso del agua	4,80	4,70	6,30	11,40	14,20
Peso de la cápsula	18,60	16,60	13,20	12,40	12,60
Peso suelo seco	157,20	125,10	107,10	142,20	159,20
Contenido de humedad (%)	3,05	3,76	5,88	8,02	8,92
Densidad suelo seco (gr/cm ³)	2,07	2,12	2,20	2,11	2,08

Densidad Máxima	2,19 gr/cm ³
Humedad Óptima	5,93 %

Fuente: Elaboración propia

Gráfico 4.1.16. Curva de compactación suelo/RAP/geoceldas.



Fuente: Elaboración propia

4.1.5.5.2. Ensayo de capacidad de soporte (C.B.R.).

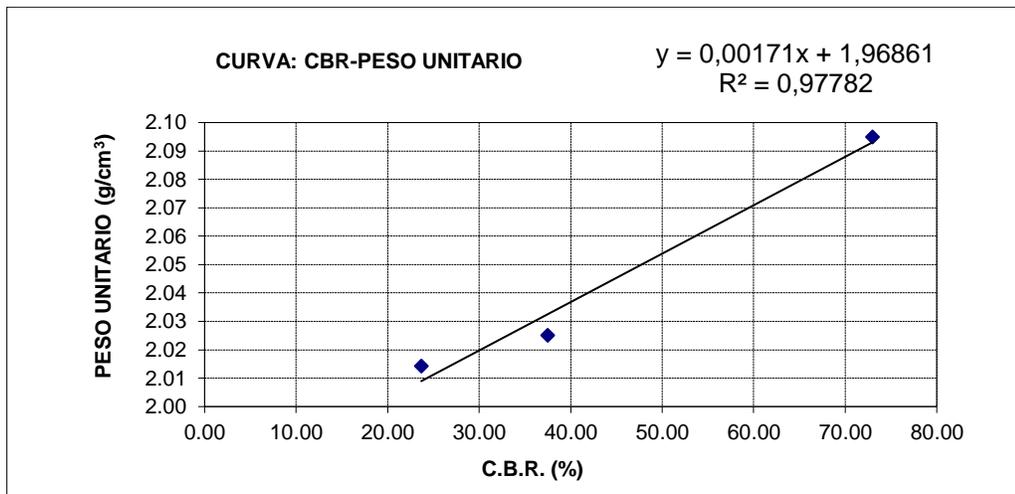
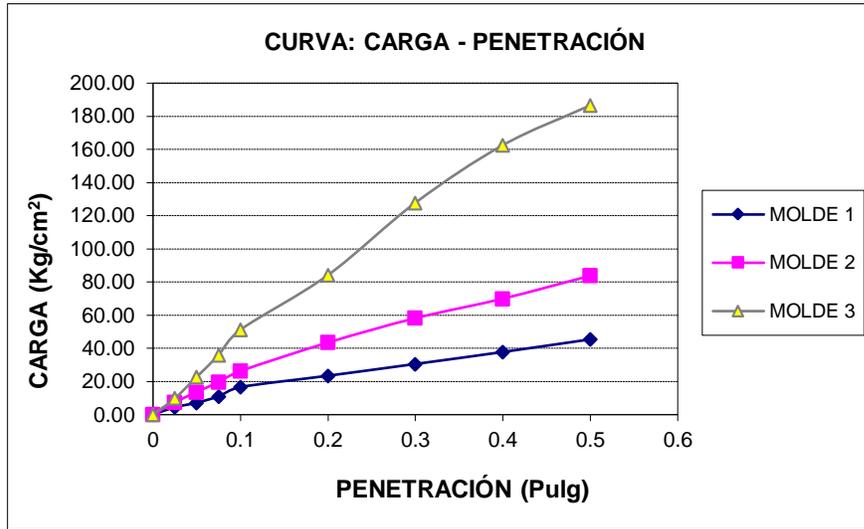
Tabla 4.1.18. Ensayo CBR Mezcla suelo/RAP/geoceldas.

Contenido de humedad y peso unitario									
Nº capas	5			5			5		
Nº golpes por capa	12			25			56		
Condición de muestra	Antes de mojarse		D. de M	Antes de mojarse		D. de M	Antes de mojarse		D. de M
Peso muestra húm.+molde	12570,00		12705,00	12640,00		12730,00	11910,00		11965,00
Peso molde	7952,80		7952,80	8034,00		8034,00	7106,00		7106,00
Peso muestra húmeda	4617,20		4752,20	4606,00		4696,00	4804,00		4859,00
Volumen de la muestra	2121,00		2121,00	2121,00		2121,00	2121,00		2121,00
Peso unit. muestra húm.	2,18		2,24	2,17		2,21	2,26		2,29
Muestra de humedad	Fondo	Superf.	2" sup.	Fondo	Superf.	2" sup.	Fondo	Superf.	2" sup.
Tara Nº	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Peso muestra húm + tara	154,40	137,60	141,60	125,00	163,70	198,70	153,20	149,60	163,60
Peso muestra seca + tara	145,10	127,50	130,50	117,00	154,10	187,80	143,10	138,90	154,60
Peso del agua	9,30	10,10	11,10	8,00	9,60	10,90	10,10	10,70	9,00
Peso de tara	18,50	12,80	12,60	12,80	12,60	12,70	12,60	12,80	12,60
Peso de la muestra seca	126,60	114,70	117,90	104,20	141,50	175,10	130,50	126,10	142,00
Contenido humedad %	7,35	8,81	9,41	7,68	6,78	6,23	7,74	8,49	6,34
Promedio cont. humedad	8,08		9,41	7,23		6,23	8,11		6,34
Peso unit.muestra seca	2,01		2,05	2,03		2,08	2,10		2,15

Expansión											
Fecha	Hora	Tiempo en días	Molde Nº 1			Molde Nº 2			Molde Nº 3		
			Lect.	Expansión		Lect.	Expansión		Lect.	Expansión	
			extens.	cm	%	extens.	cm	%	extens.	cm	%
4-dic	11:00	1	7,50	0,75	0	24,50	2,45	0	4,20	0,42	0
5-dic	11:00	2	7,50	0,75	0	24,50	2,45	0	4,20	0,42	0
6-dic	11:00	3	7,50	0,75	0	24,50	2,45	0	4,20	0,42	0

C.B.R.														
Penetración		Carga normal	Molde Nº 1				Molde Nº 2				Molde Nº 3			
Pulg.	mm		Carga ensayo		C.B.R. correg.		Carga ensayo		C.B.R. correg.		Carga ensayo		C.B.R. correg.	
		Kg	Kg	Kg/cm ²	Kg	%	Kg	Kg/cm ²	Kg	%	Kg	Kg/cm ²	Kg	%
0	0		0,00	0,00			0,00	0,00			0,00	0,00		
0,025	0,63		87,00	4,50			144,50	7,47			192,00	9,92		
0,05	1,27		139,50	7,21			264,50	13,67			442,00	22,84		
0,075	1,90		214,50	11,08			382,00	19,74			697,00	36,01		
0,1	2,54	1360	322,00	16,64		23,68	509,50	26,32		37,46	992,00	51,25		72,94
0,2	5,08	2040	454,50	23,48		22,28	842,00	43,50		41,27	1629,50	84,19		79,88
0,3	7,62		592,00	30,59			1127,00	58,23			2474,50	127,85		
0,4	10,16		732,00	37,82			1354,50	69,98			3147,00	162,60		
0,5	12,70		879,50	45,44			1622,00	83,80			3612,00	186,62		

Gráfico 4.1.17. Curvas características para determinación de CBR de mezcla suelo/RAP/geoceldas.



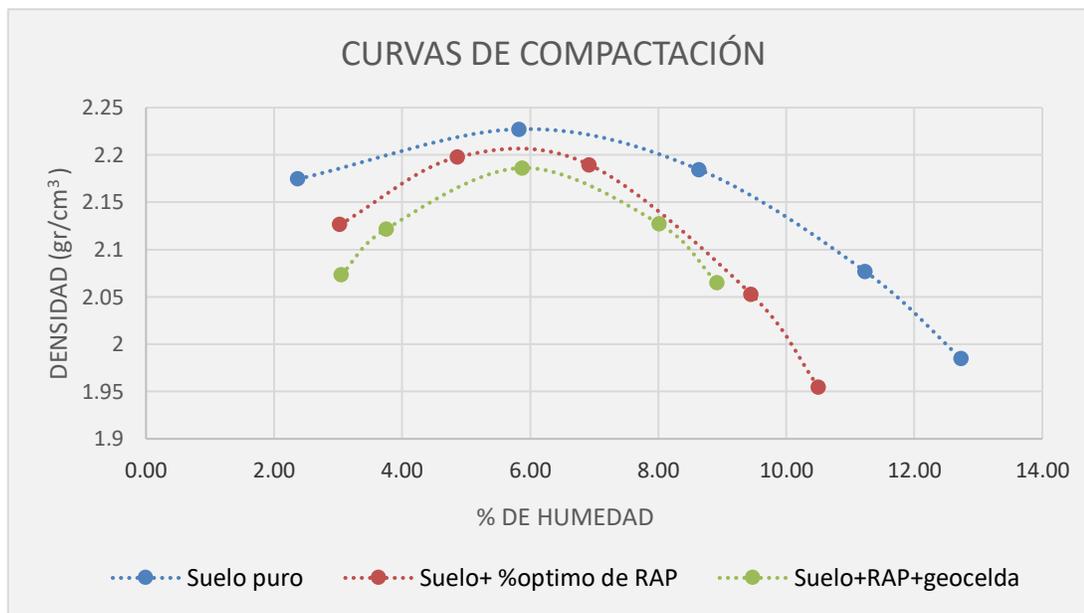
Fuente: Elaboración propia

A partir de estos parámetros se determina el CBR:

CBR 100 % D.máx	CBR 95 % D.máx
127,36 %	63,43 %

4.1.6. Resumen de ensayos de mezcla suelo/RAP/geoceldas.

Gráfico 4.1.18. Comparación de curvas de compactación suelo/RAP/geoceldas.



Fuente: Elaboración propia

Tabla 4.1.19. Resumen de compactación suelo/RAP/geoceldas.

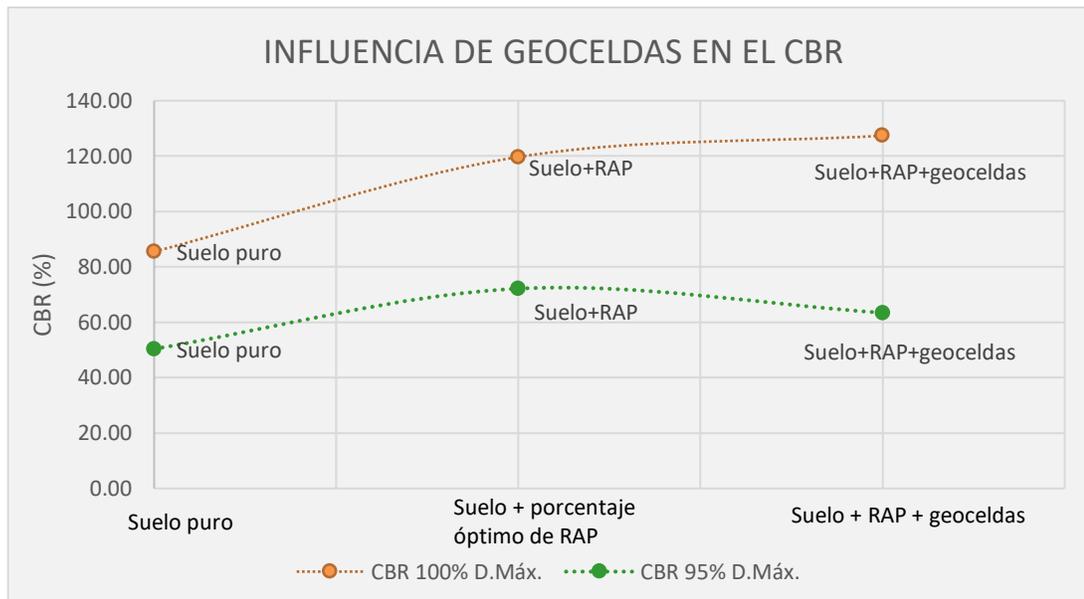
Variabes	Unidad	Suelo puro	Suelo + % óptimo de RAP	Suelo + RAP + geocelda
CHO	%	5,67	5,72	5,93
Dens. máx	gr/cm ³	2,23	2,21	2,19

Fuente: Elaboración propia

Análisis de resultados

Del gráfico 4.1.18, comparación de curvas de compactación se observa un descenso en las densidades máximas pero una variabilidad de los contenidos de humedad, en el caso de suelo/RAP/geocelda existe una disminución en la densidad máxima de 2,23 a 2,19 y un ascenso en el contenido de humedad de 0,26 %, ocurre un caso similar en la mezcla suelo/RAP con porcentaje óptimo, disminuye de igual manera la densidad máxima en 0,02 gr/cm³ y el contenido de humedad en un porcentaje mayor de 0,05 %.

Gráfico 4.1.19. Influencia de RAP en el CBR de mezcla suelo/RAP/geoceladas.



Fuente: Elaboración propia

Tabla 4.1.20. Valores de CBR de mezcla de suelo/RAP/geoceladas.

CBR	Suelo puro 0 %	Suelo + % óptimo de RAP 20 %	Suelo + RAP + geocelda
CBR 100% D.Máx.	85,52	119,68	127,36
CBR 95% D.Máx.	50,39	72,15	63,43

Fuente: Elaboración propia

Análisis de resultados

Del gráfico 4.1.19 se puede apreciar un ascenso en el índice de CBR al momento de añadir la geocelda a la mezcla óptima de suelo/RAP, mejorando de esta manera la capacidad de soporte del suelo en un 7,68 %.

4.2. Proceso de mezclado de material de capa sub-base con incorporación de pavimento asfáltico reciclado (RAP).

4.2.1. Dosificación de suelo capa sub-base y RAP.

Para la dosificación de suelo/rap se procede a realizar dos pruebas frontera es decir una de mayor implementación de RAP y la otra de menor, posteriormente se realiza el análisis de estos resultados, entre ellos el principal, comparación de CBR. Para con estos nuevos datos según la dosificación correspondiente, añadir el uso de las geoceladas.

Tabla 4.2.1. Dosificación capa sub-base/RAP.

Capa sub-base	
Suelo puro (%)	RAP (%)
100	0
80	20
70	30
65	35

Fuente: Elaboración propia

4.2.2. Ensayos de laboratorio a suelo capa sub-base y RAP.

4.2.2.1. Granulometría.

Se realiza el ensayo de granulometría establecido en la norma ABC a diferentes dosificaciones de suelo/RAP.

Para la realización del ensayo se toma un determinado porcentaje de suelo capa sub-base y otro de pavimento asfáltico reciclado, como la dosificación que corresponde al mismo variando según se muestra en la tabla 4.2.1. Dosificación capa sub-base/RAP.

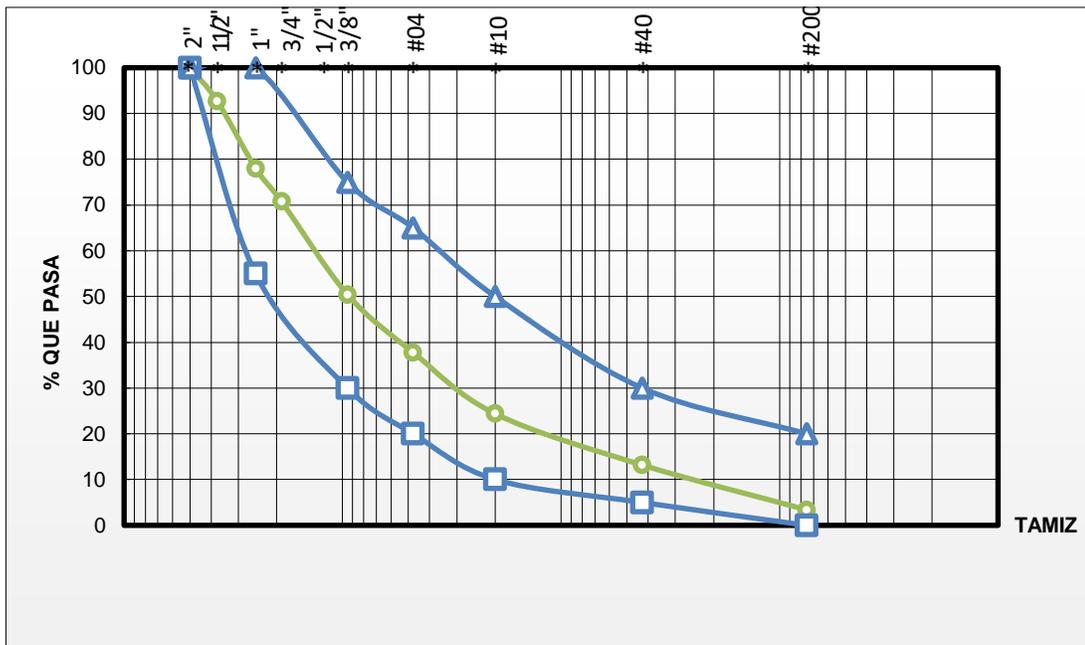
4.2.2.1.1. Mezcla suelo/RAP al 20 %

Tabla 4.2.2. Granulometría de suelo/RAP al 20 %

Peso Total (g)			5000,00			
Tamices	Tamaño (mm)	Peso Ret. (g)	Ret. Acum (g)	% Ret	% Que Pasa del Total	Especificaciones
2"	50	0,00	0,00	0,00	100,00	100%
1 1/2"	37,5	363,30	363,30	7,27	92,73	-
1"	25,00	736,20	1099,50	21,99	78,01	55%-100%
3/4"	19,00	364,10	1463,60	29,27	70,73	-
3/8"	9,50	1015,30	2478,90	49,58	50,42	30%-75%
Nº 4	4,75	710,60	3111,70	62,23	37,77	20%-65%
Nº10	2,00	669,50	3781,20	75,62	24,38	10%-50%
Nº40	0,425	559,80	4341,00	86,82	13,18	5%-30%
Nº200	0,075	490,20	4831,20	96,62	3,38	0%-20%

Fuente: Elaboración propia

Gráfico 4.2.1. Curva de ensayo de distribución granulométrica de suelo/RAP al 20 %



Fuente: Elaboración propia

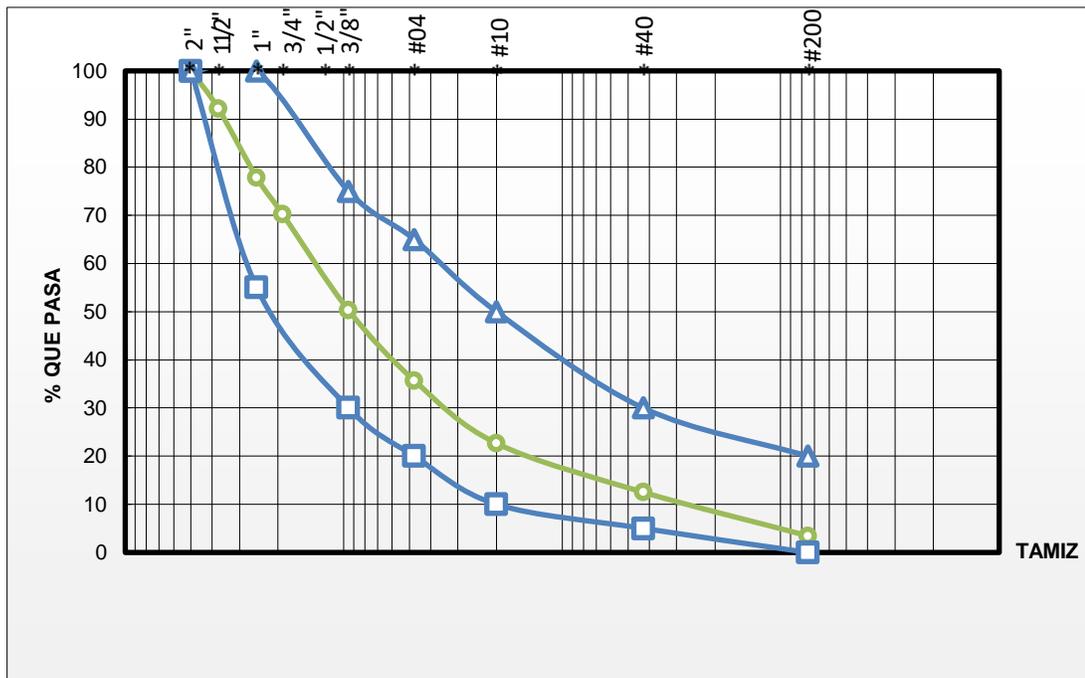
4.2.2.1.2. Mezcla suelo/RAP al 30 %

Tabla 4.2.3. Granulometría de suelo/RAP al 30 %

Peso Total (g)			5000,00			
Tamices	Tamaño (mm)	Peso Ret. (g)	Ret. Acum (g)	% Ret	% Que Pasa del Total	Especificaciones
2"	50	0,00	0,00	0,00	100,00	100%
1 1/2"	37,5	390,00	390,00	7,80	92,20	-
1"	25,00	718,20	1108,20	22,16	77,84	55%-100%
3/4"	19,00	382,10	1490,30	29,81	70,19	-
3/8"	9,50	996,10	2486,40	49,73	50,27	30%-75%
N° 4	4,75	728,60	3215,00	64,30	35,70	20%-65%
N°10	2,00	651,50	3866,50	77,33	22,67	10%-50%
N°40	0,425	507,80	4374,30	87,49	12,51	5%-30%
N°200	0,075	452,80	4827,10	96,54	3,46	0%-20%

Fuente: Elaboración propia

Gráfico 4.2.2. Curva de ensayo de distribución granulométrica de suelo/RAP al 30 %



Fuente: Elaboración propia

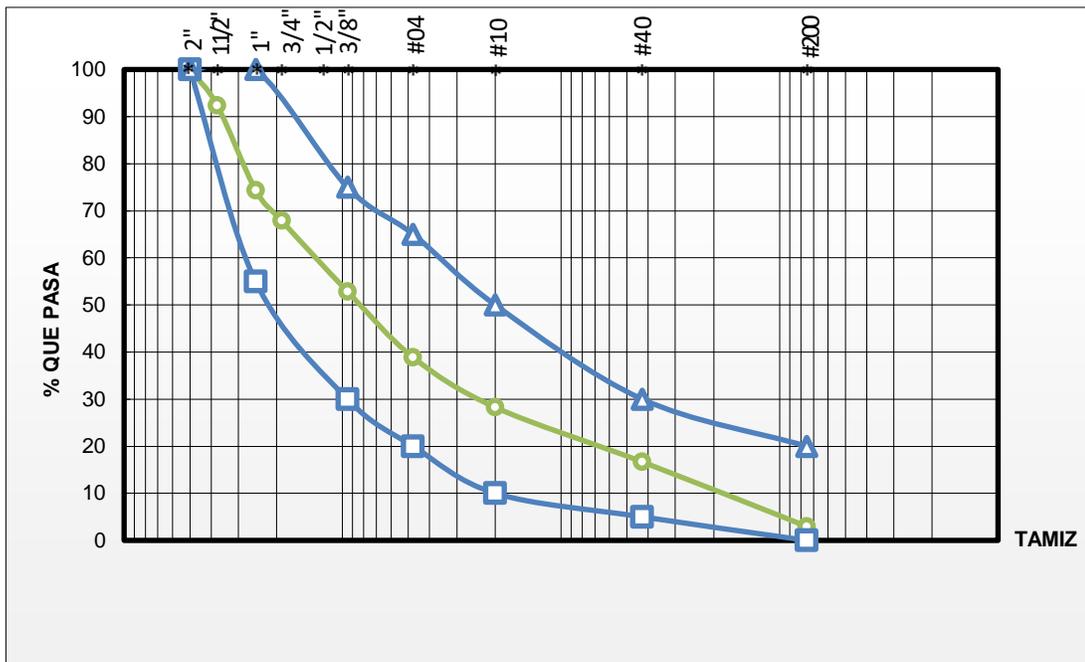
4.2.2.1.3. Mezcla suelo/RAP al 35 %

Tabla 4.2.4. Granulometría de suelo/RAP al 35 %

Peso Total (g)			5000,00			
Tamices	Tamaño (mm)	Peso Ret. (g)	Ret. Acum (g)	% Ret	% Que Pasa del Total	Especificaciones
2"	50	0,00	0,00	0,00	100,00	100%
1 1/2"	37,5	380,20	380,20	7,60	92,40	-
1"	25,00	900,90	1281,10	25,62	74,38	55%-100%
3/4"	19,00	325,20	1606,30	32,13	67,87	-
3/8"	9,50	750,50	2356,80	47,14	52,86	30%-75%
Nº 4	4,75	700,80	3057,60	61,15	38,85	20%-65%
Nº10	2,00	529,30	3586,90	71,74	28,26	10%-50%
Nº40	0,425	579,20	4166,10	83,32	16,68	5%-30%
Nº200	0,075	685,50	4851,60	97,03	2,97	0%-20%

Fuente: Elaboración propia

Gráfico 4.2.3. Curva de ensayo de distribución granulométrica de suelo/RAP al 35 %



Fuente: Elaboración propia

4.2.2.2. Ensayo de compactación.

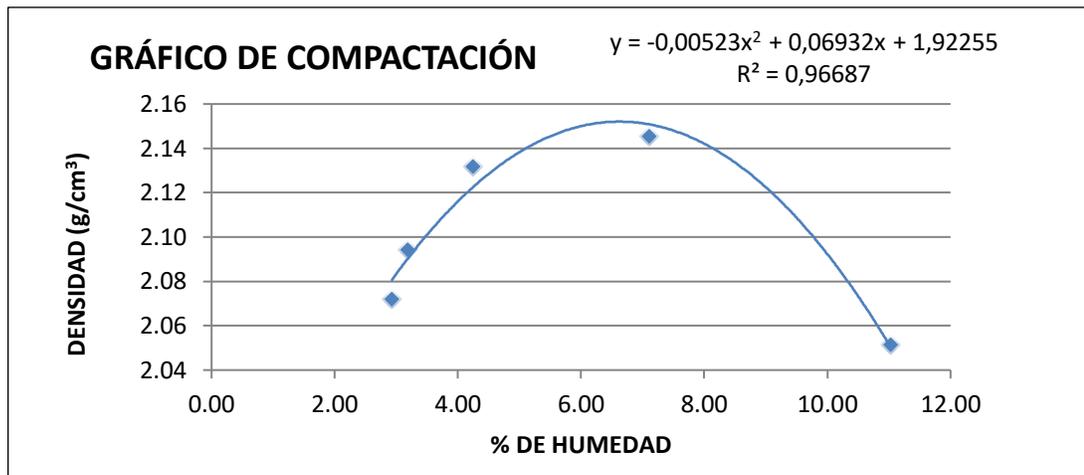
4.2.2.2.1. Mezcla suelo/RAP al 20 %

Tabla 4.2.5. Ensayo de compactación suelo/RAP al 20 %

Nº de capas	5	5	5	5	5
Nº de golpes por capa	56	56	56	56	56
Peso suelo húmedo + molde	11005,70	11065,30	11150,20	11320,80	11305,70
Peso del molde	6500,50	6500,30	6455,50	6466,70	6493,80
Peso suelo húmedo	4505,20	4565,00	4694,70	4854,10	4811,90
Volumen de la muestra	2112,50	2112,50	2112,50	2112,50	2112,50
Densidad suelo húmedo (gr/cm ³)	2,13	2,16	2,22	2,30	2,28
Cápsula Nº	1	2	3	4	5
Peso suelo húmedo + capsula	200,40	191,50	107,90	180,80	187,40
Peso suelo seco + cápsula	195,20	186,20	104,30	170,10	170,70
Peso del agua	5,20	5,30	3,60	10,70	16,70
Peso de la cápsula	17,70	19,90	19,60	19,50	19,30
Peso suelo seco	177,50	166,30	84,70	150,60	151,40
Contenido de humedad (%)	2,93	3,19	4,25	7,10	11,03
Densidad suelo seco (gr/cm ³)	2,07	2,09	2,13	2,15	2,05

Densidad Máxima	2,15 gr/cm ³
Humedad Óptima	6,63 %

Gráfico 4.2.4. Curva de compactación suelo/RAP al 20 %



Fuente: Elaboración propia

4.2.2.2.2. Mezcla suelo/RAP al 30 %

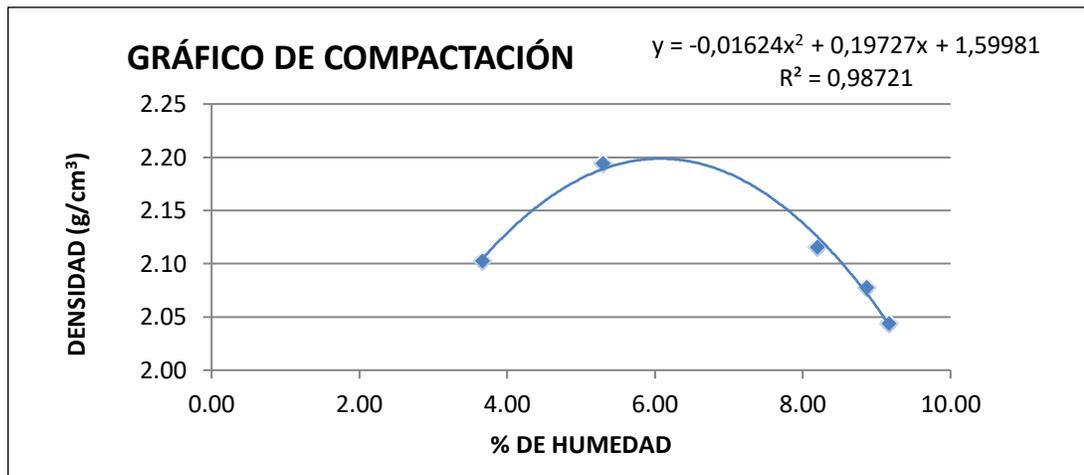
Tabla 4.2.6. Curva de compactación suelo/RAP al 30 %

Nº de capas	5	5	5	5	5
Nº de golpes por capa	56	56	56	56	56
Peso suelo húmedo + molde	11043,20	11318,80	11273,80	11216,10	11152,00
Peso del molde	6438,00	6438,00	6438,00	6438,00	6438,00
Peso suelo húmedo	4605,20	4880,80	4835,80	4778,10	4714,00
Volumen de la muestra	2112,50	2112,50	2112,50	2112,50	2112,50
Densidad suelo húmedo (gr/cm ³)	2,18	2,31	2,29	2,26	2,23
Cápsula Nº	1	2	3	4	5
Peso suelo húmedo + capsula	162,10	172,70	143,10	180,00	174,10
Peso suelo seco + cápsula	157,00	164,90	133,60	166,80	161,00
Peso del agua	5,10	7,80	9,50	13,20	13,10
Peso de la cápsula	18,10	17,60	17,70	17,90	18,10
Peso suelo seco	138,90	147,30	115,90	148,90	142,90
Contenido de humedad (%)	3,67	5,30	8,20	8,87	9,17
Densidad suelo seco (gr/cm ³)	2,10	2,19	2,12	2,08	2,04

Densidad Máxima	2,20 gr/cm ³
Humedad Óptima	6,07 %

Fuente: Elaboración propia

Gráfico 4.2.5. Curva de compactación suelo/RAP al 30 %



Fuente: Elaboración propia

4.2.2.2.3. Mezcla suelo/RAP al 35 %

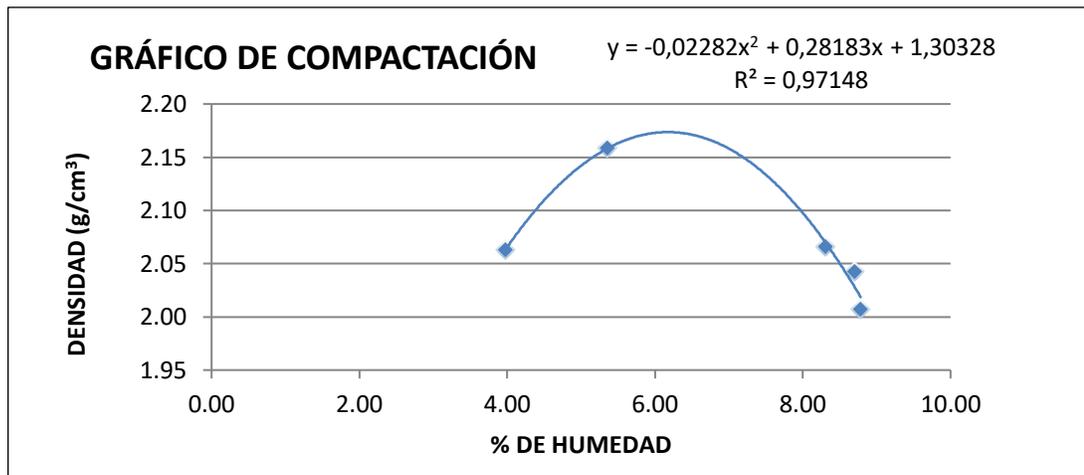
Tabla 4.2.7. Curva de compactación suelo/RAP al 35 %

Nº de capas	5	5	5	5	5
Nº de golpes por capa	56	56	56	56	56
Peso suelo húmedo + molde	11028,40	11300,80	11223,50	11186,40	11108,80
Peso del molde	6496,20	6496,20	6496,20	6496,20	6496,20
Peso suelo húmedo	4532,20	4804,60	4727,30	4690,20	4612,60
Volumen de la muestra	2112,50	2112,50	2112,50	2112,50	2112,50
Densidad suelo húmedo (gr/cm³)	2,15	2,27	2,24	2,22	2,18
Cápsula Nº	1	2	3	4	5
Peso suelo húmedo + capsula	178,60	144,40	124,60	164,00	184,00
Peso suelo seco + cápsula	172,40	137,80	115,90	151,70	170,00
Peso del agua	6,20	6,60	8,70	12,30	14,00
Peso de la cápsula	16,60	14,60	11,20	10,40	10,60
Peso suelo seco	155,80	123,20	104,70	141,30	159,40
Contenido de humedad (%)	3,98	5,36	8,31	8,70	8,78
Densidad suelo seco (gr/cm³)	2,06	2,16	2,07	2,04	2,01

Densidad Máxima	2,17 gr/cm³
Humedad Óptima	6,18 %

Fuente: Elaboración propia

Gráfico 4.2.6. Curva de compactación suelo/RAP al 35 %



Fuente: Elaboración propia

4.2.2.3. Ensayo de capacidad de soporte (C.B.R.).

4.2.2.3.1. Mezcla suelo/RAP al 20 %

Tabla 4.2.8. Ensayo CBR. Mezcla suelo/RAP al 20 %

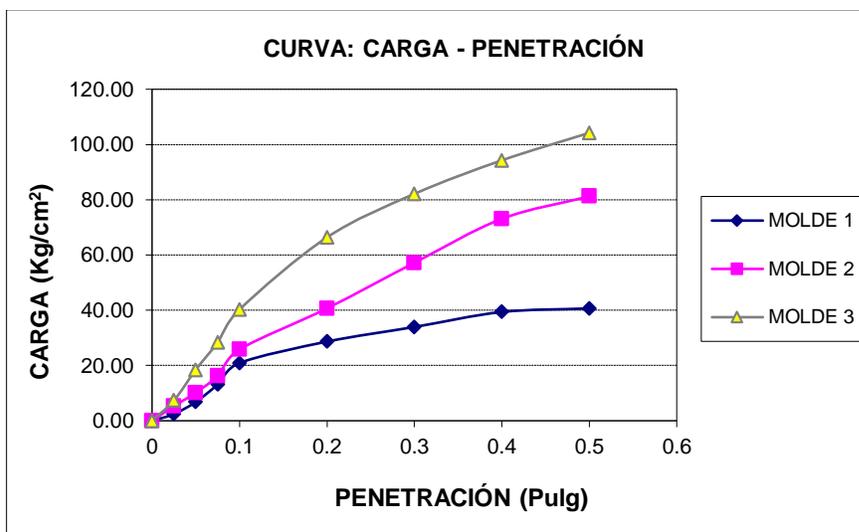
Contenido de humedad y peso unitario									
Nº capas	5			5			5		
Nº golpes por capa	12			25			56		
Condición de muestra	Antes de mojarse		D. de M	Antes de mojarse		D. de M	Antes de mojarse		D. de M
Peso muestra húm.+molde	11895,00		12015,00	11485,00		11565,00	12730,00		12755,00
Peso molde	7324,80		7324,80	6804,20		6804,20	7925,80		7925,80
Peso muestra húmeda	4570,20		4690,20	4680,80		4760,80	4804,20		4829,20
Volumen de la muestra	2121,00		2121,00	2121,00		2121,00	2121,00		2121,00
Peso unit. muestra húm.	2,15		2,21	2,21		2,24	2,27		2,28
Muestra de humedad	Fondo	Superf.	2" sup.	Fondo	Superf.	2" sup.	Fondo	Superf.	2" sup.
Tara Nº	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Peso muestra húm + tara	67,00	70,40	80,60	82,80	74,60	76,60	82,20	72,60	69,20
Peso muestra seca + tara	64,00	67,00	76,30	77,30	70,50	72,20	78,00	68,00	66,10
Peso del agua	3,00	3,40	4,30	5,50	4,10	4,40	4,20	4,60	3,10
Peso de tara	21,20	21,60	21,50	20,00	21,00	21,80	20,00	21,40	20,60
Peso de la muestra seca	42,80	45,40	54,80	57,30	49,50	50,40	58,00	46,60	45,50
Contenido humedad %	7,01	7,49	7,85	9,60	8,28	8,73	7,24	9,87	6,81
Promedio cont. humedad	7,25		7,85	8,94		8,73	8,56		6,81
Peso unit.muestra seca	2,01		2,05	2,03		2,06	2,09		2,13

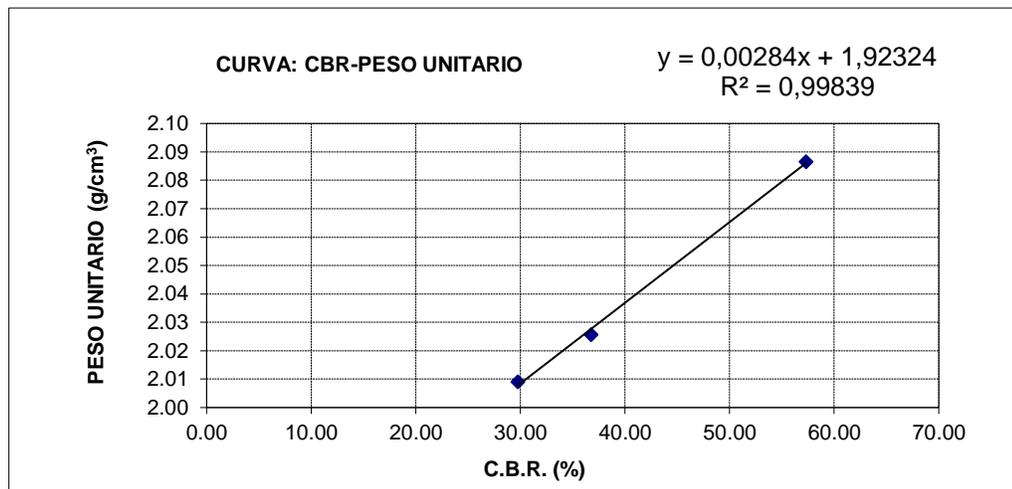
Expansión											
Fecha	Hora	Tiempo en días	Molde N° 1			Molde N° 2			Molde N° 3		
			Lect.		Expansión	Lect.		Expansión	Lect.		Expansión
			extens.	cm	%	extens.	cm	%	extens.	cm	%
13-nov	18:00	1	36.50	3.65	0	38.40	3.84	0	45.10	4.51	0
14-nov	18:00	2	36.50	3.65	0	38.40	3.84	0	45.10	4.51	0
15-nov	18:00	3	36.50	3.65	0	38.40	3.84	0	45.10	4.51	0
16-nov	18:00	4	36.50	3.65	0	38.40	3.84	0	45.10	4.51	0

C.B.R.														
Penetración		Carga normal	Molde N° 1				Molde N° 2				Molde N° 3			
Pulg.	mm		Carga ensayo		C.B.R. correg.		Carga ensayo		C.B.R. correg.		Carga ensayo		C.B.R. correg.	
		Kg	Kg	Kg/cm ²	Kg	%	Kg	Kg/cm ²	Kg	%	Kg	Kg/cm ²	Kg	%
0	0		0,00	0,00			0,00	0,00			0,00	0,00		
0,025	0,63		47,00	2,43			102,00	5,27			142,00	7,34		
0,05	1,27		132,00	6,82			197,00	10,18			357,00	18,45		
0,075	1,90		254,50	13,15			314,50	16,25			549,50	28,39		
0,1	2,54	1360	404,50	20,90		29,74	499,50	25,81		36,73	779,50	40,27		57,32
0,2	5,08	2040	554,50	28,65		27,18	787,00	40,66		38,58	1284,50	66,37		62,97
0,3	7,62		657,00	33,95			1107,00	57,20			1589,50	82,12		
0,4	10,16		762,00	39,37			1414,50	73,08			1824,50	94,27		
0,5	12,70		787,00	40,66			1572,00	81,22			2017,00	104,21		

Fuente: Elaboración propia

Gráfico 4.2.7. Curvas características para determinación de CBR de mezcla suelo/RAP.





Fuente: Elaboración propia

A partir de estos parámetros se determina el CBR:

CBR 100 % D.máx	CBR 95 % D.máx
80,64 %	42,74 %

4.2.2.3.2. Mezcla suelo/RAP al 30 %

Tabla 4.2.9. Ensayo CBR. Mezcla suelo/RAP al 30 %

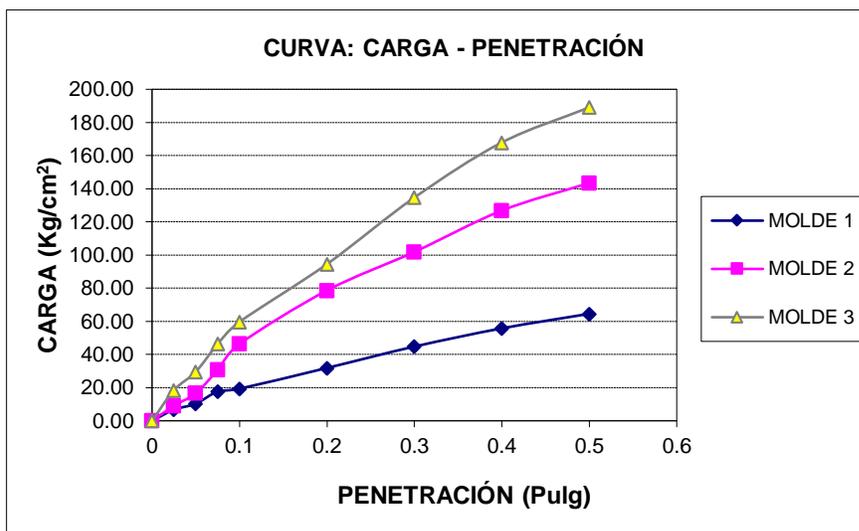
Contenido de humedad y peso unitario									
Nº capas	5			5			5		
Nº golpes por capa	12			25			56		
Condición de muestra	Antes de mojarse		D. de M	Antes de mojarse		D. de M	Antes de mojarse		D. de M
Peso muestra húm.+molde	12630,00	12695,00	12895,00	12940,00	12085,00	12095,00			
Peso molde	7970,50	7970,50	7954,80	7954,80	7170,10	7170,10			
Peso muestra húmeda	4659,50	4724,50	4940,20	4985,20	4914,90	4924,90			
Volumen de la muestra	2121,00	2121,00	2121,00	2121,00	2121,00	2121,00			
Peso unit. muestra húm.	2,20	2,23	2,33	2,35	2,32	2,32			
Muestra de humedad	Fondo	Superf.	2" sup.	Fondo	Superf.	2" sup.	Fondo	Superf.	2" sup.
Tara Nº	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Peso muestra húm + tara	168,00	179,00	176,90	161,00	174,40	169,00	119,00	159,30	128,80
Peso muestra seca + tara	156,00	170,00	167,10	146,30	164,80	158,20	112,20	151,00	122,10
Peso del agua	12,00	9,00	9,80	14,70	9,60	10,80	6,80	8,30	6,70
Peso de tara	17,20	20,60	17,50	17,10	18,50	18,50	13,40	13,10	17,90
Peso de la muestra seca	138,80	149,40	149,60	129,20	146,30	139,70	98,80	137,90	104,20
Contenido humedad %	8,65	6,02	6,55	11,38	6,56	7,73	6,88	6,02	6,43
Promedio cont. humedad	7,33		6,55	8,97		7,73	6,45		6,43
Peso unit.muestra seca	2,05		2,09	2,14		2,18	2,18		2,18

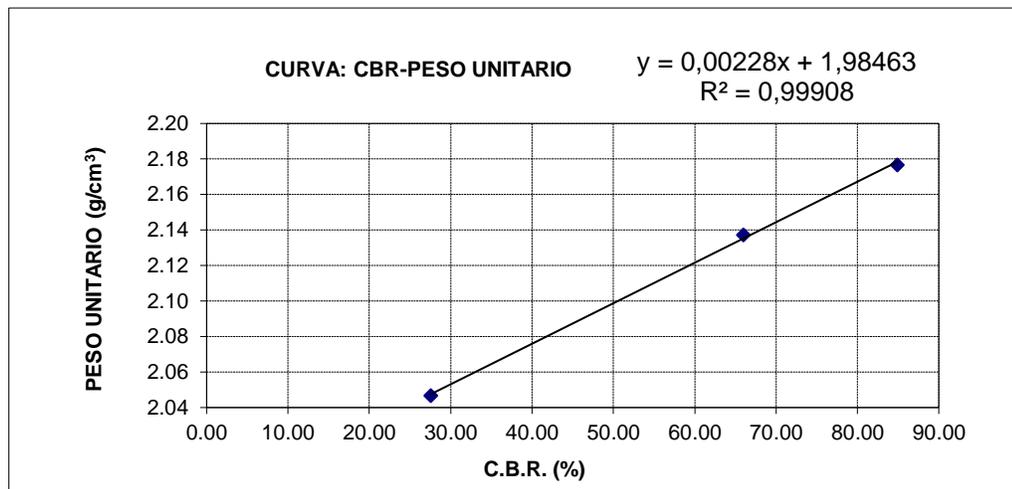
Expansión											
Fecha	Hora	Tiempo en días	Molde N° 1			Molde N° 2			Molde N° 3		
			Lect.	Expansión		Lect.	Expansión		Lect.	Expansión	
			extens.	cm	%	extens.	cm	%	extens.	cm	%
19-nov	17:30	1	10,08	1,01	0	10,00	1,00	0	11,00	1,10	0
20-nov	16:30	2	10,08	1,01	0	10,00	1,00	0	11,00	1,10	0
21-nov	17:30	3	10,08	1,01	0	10,00	1,00	0	11,00	1,10	0
22-nov	16:00	4	10,08	1,01	0	10,00	1,00	0	11,00	1,10	0

C.B.R.														
Penetración		Carga normal	Molde N° 1				Molde N° 2				Molde N° 3			
Pulg.	mm		Carga ensayo		C.B.R. correg.		Carga ensayo		C.B.R. correg.		Carga ensayo		C.B.R. correg.	
		Kg	Kg	Kg/cm ²	Kg	%	Kg	Kg/cm ²	Kg	%	Kg	Kg/cm ²	Kg	%
0	0		0,00	0,00			0,00	0,00			0,00	0,00		
0,025	0,63		129,50	6,69			174,50	9,02			357,00	18,45		
0,05	1,27		199,50	10,31			322,00	16,64			572,00	29,55		
0,075	1,90		342,00	17,67			594,50	30,72			897,00	46,35		
0,1	2,54	1360	374,50	19,35		27,54	897,00	46,35		65,96	1154,50	59,65		84,89
0,2	5,08	2040	617,00	31,88		30,25	1522,00	78,64		74,61	1829,50	94,52		89,68
0,3	7,62		867,00	44,80			1972,00	101,89			2607,00	134,70		
0,4	10,16		1079,50	55,77			2454,50	126,82			3249,50	167,89		
0,5	12,70		1249,50	64,56			2777,00	143,48			3659,50	189,07		

Fuente: Elaboración propia

Gráfico 4.2.8. Curvas características para determinación de CBR de mezcla suelo/RAP.





Fuente: Elaboración propia

A partir de estos parámetros se determina el CBR:

CBR 100 % D.máx	CBR 95 % D.máx
93,97 %	45,75 %

4.2.2.3.3. Mezcla suelo/RAP al 35 %

Tabla 4.2.10. Ensayo CBR. Mezcla suelo/RAP al 35 %

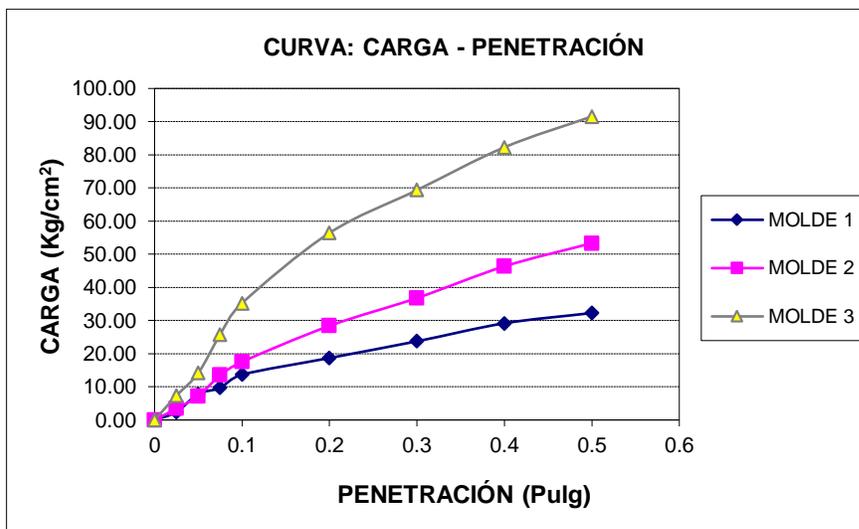
Contenido de humedad y peso unitario									
Nº capas	5			5			5		
Nº golpes por capa	12			25			56		
Condición de muestra	Antes de mojarse		D. de M	Antes de mojarse		D. de M	Antes de mojarse		D. de M
Peso muestra húm.+molde	12595,00	12680,00	12680,00	12490,00	12575,00	12575,00	11935,00	12035,00	12035,00
Peso molde	7953,40	7953,40	7953,40	7834,60	7834,60	7834,60	7105,60	7105,60	7105,60
Peso muestra húmeda	4641,60	4726,60	4726,60	4655,40	4740,40	4740,40	4829,40	4929,40	4929,40
Volumen de la muestra	2121,00	2121,00	2121,00	2121,00	2121,00	2121,00	2121,00	2121,00	2121,00
Peso unit. muestra húm.	2,19		2,23	2,19		2,23	2,28		2,32
Muestra de humedad	Fondo	Superf.	2" sup.	Fondo	Superf.	2" sup.	Fondo	Superf.	2" sup.
Tara Nº	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Peso muestra húm + tara	120,60	113,60	152,00	195,20	121,00	284,60	230,20	207,00	295,00
Peso muestra seca + tara	112,10	106,10	140,10	184,80	114,50	265,80	214,60	195,20	277,00
Peso del agua	8,50	7,50	11,90	10,40	6,50	18,80	15,60	11,80	18,00
Peso de tara	12,80	13,40	12,00	33,60	20,80	35,20	33,60	32,40	33,60
Peso de la muestra seca	99,30	92,70	128,10	151,20	93,70	230,60	181,00	162,80	243,40
Contenido humedad %	8,56	8,09	9,29	6,88	6,94	8,15	8,62	7,25	7,40
Promedio cont. humedad	8,33		9,29	6,91		8,15	7,93		7,40
Peso unit.muestra seca	2,02		2,04	2,05		2,07	2,11		2,16

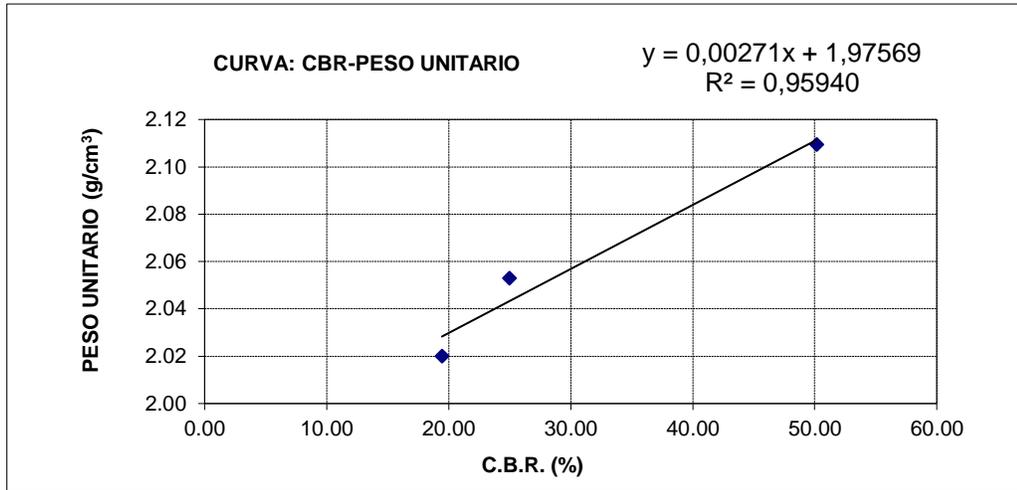
Expansión											
Fecha	Hora	Tiempo en días	Molde N° 1			Molde N° 2			Molde N° 3		
			Lect.		Expansión cm	Lect.		Expansión cm	Lect.		Expansión cm
			extens.	%		extens.	%		extens.	%	
27-nov	10:50	1	11,70	1,17	0	7,10	0,71	0	2,50	0,25	0
28-nov	10:30	2	11,70	1,17	0	7,10	0,71	0	2,50	0,25	0
29-nov	11:00	3	11,70	1,17	0	7,10	0,71	0	2,50	0,25	0
30-nov	10:00	4	11,70	1,17	0	7,10	0,71	0	2,50	0,25	0

C.B.R.														
Penetración		Carga normal Kg	Molde N° 1				Molde N° 2				Molde N° 3			
Pulg.	mm		Carga ensayo		C.B.R. correg.		Carga ensayo		C.B.R. correg.		Carga ensayo		C.B.R. correg.	
		Kg	Kg	Kg/cm ²	Kg	%	Kg	Kg/cm ²	Kg	%	Kg	Kg/cm ²	Kg	%
0	0		0,00	0,00			0,00	0,00			0,00	0,00		
0,025	0,63		47,00	2,43			67,00	3,46			142,00	7,34		
0,05	1,27		152,00	7,85			139,50	7,21			274,50	14,18		
0,075	1,90		187,00	9,66			262,00	13,54			499,50	25,81		
0,1	2,54	1360	264,50	13,67		19,45	339,50	17,54		24,96	682,00	35,24		50,15
0,2	5,08	2040	362,00	18,70		17,75	549,50	28,39		26,94	1092,00	56,42		53,53
0,3	7,62		459,50	23,74			712,00	36,79			1342,00	69,34		
0,4	10,16		564,50	29,17			897,00	46,35			1592,00	82,25		
0,5	12,70		624,50	32,27			1032,00	53,32			1772,00	91,55		

Fuente: Elaboración propia

Gráfico 4.2.9. Curvas características para determinación de CBR de mezcla suelo/RAP.





Fuente: Elaboración propia

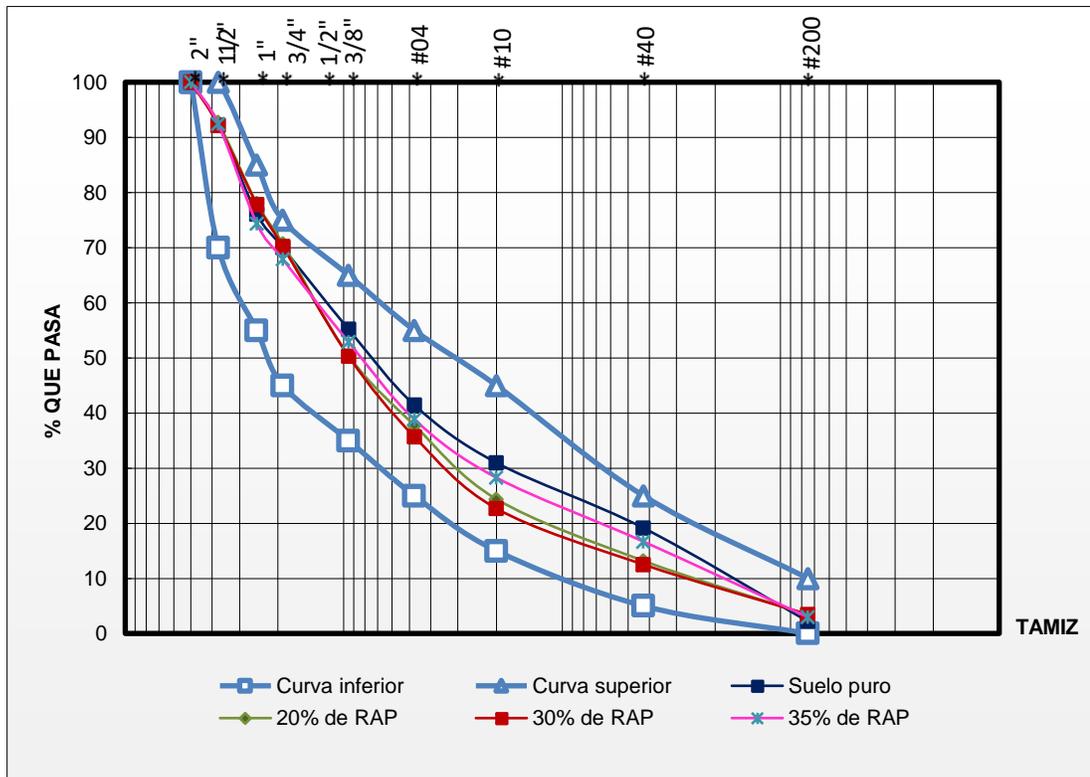
A partir de estos parámetros se determina el CBR:

CBR 100 % D.máx	CBR 95 % D.máx
72,97 %	32,87 %

4.2.3. Resumen de ensayos de mezclas de suelo capa sub-base y RAP.

Influencia de RAP en granulometría de suelo para capa sub-base.

Gráfico 4.2.10. Resumen de granulometrías.



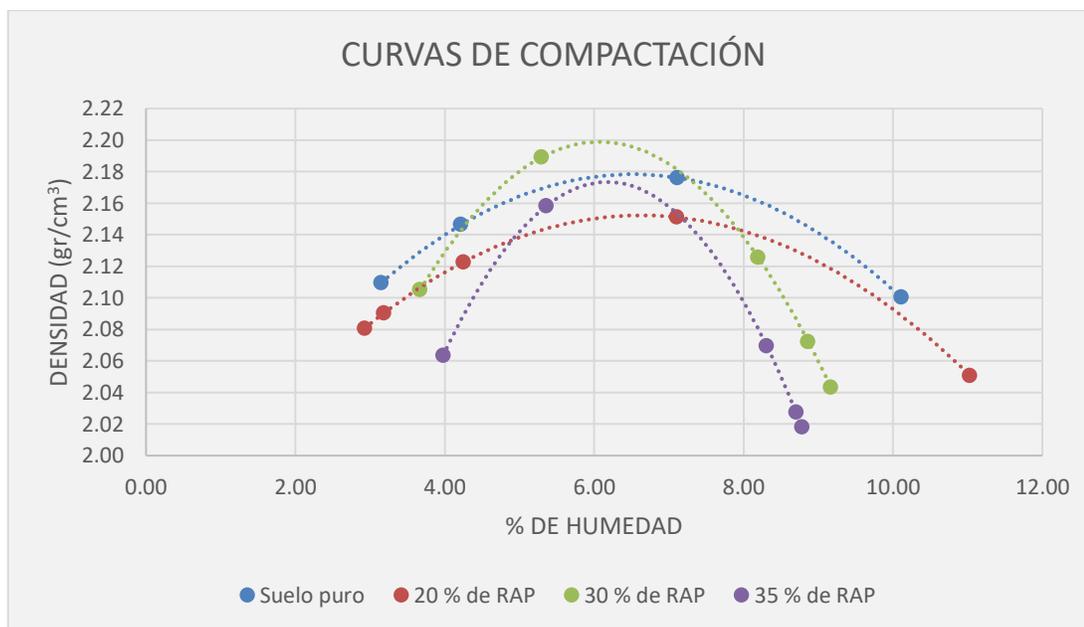
Fuente: Elaboración propia

Análisis de resultados

Se realiza el procedimiento que establece la norma ABC y se explica en el Cap. II y Cap. III, con la diferencia de que en estos casos se realizan con muestras mezcladas a diferentes porcentajes de suelo/RAP, dando como resultado las granulometrías mostradas en los gráficos 4.2.1 al 4.2.3 y resumidos en la gráfico 4.2.10.

Realizando un análisis de las curvas granulométricas resultantes de los ensayos se puede apreciar que no existe variabilidad sustancial y que son relativamente similares, cuidando que las curvas no se salgan de las bandas granulométricas establecidas en la norma ABC, esto debido a que al momento de realizar las respectivas mezclas se cuidó de elaborar la misma granulometría de cada capa, con el RAP triturado.

Gráfico 4.2.11. Curvas de compactación a distintos porcentajes de suelo/RAP.



Fuente: Elaboración propia

Tabla 4.2.11. Humedad óptima y densidad máxima a diferentes porcentajes de suelo/RAP en capa sub-base.

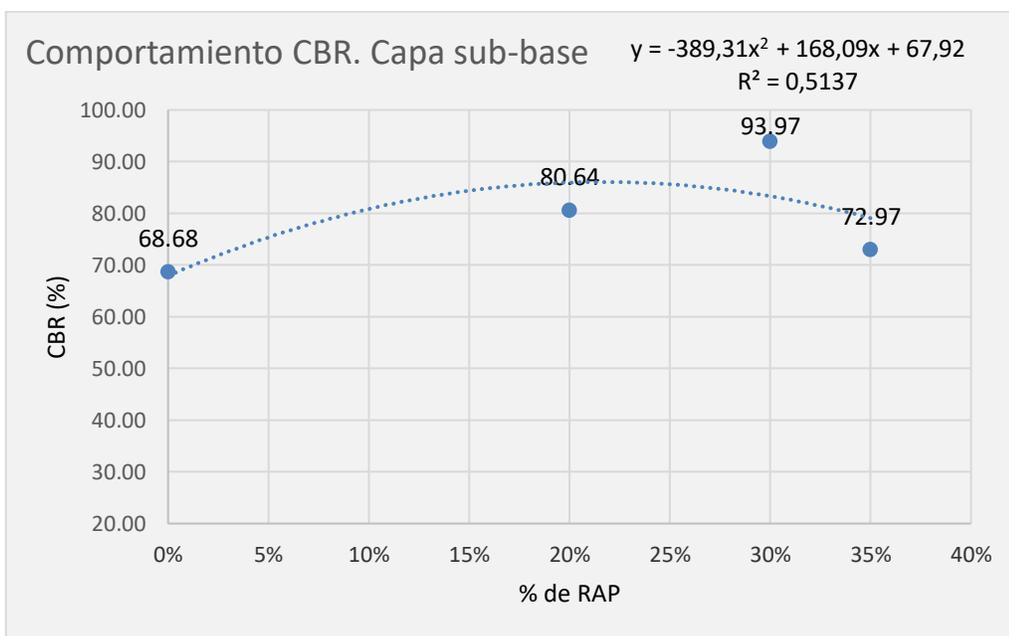
Variables	Unidad	Suelo puro	Pavimento asfáltico reciclado (RAP)		
			20 %	30 %	35 %
CHO	%	6,52	6,63	6,07	6,18
Dens. máx	gr/cm ³	2,18	2,15	2,20	2,17

Fuente: Elaboración propia

Análisis de resultados

Del gráfico 4.2.11. curvas de compactación a distintos porcentajes de mezclado de suelo/RAP se aprecia una variación de contenido de humedad desde 6,52 % hasta 6,63 % y mostrando un descenso en la densidad máxima con respecto a la primera dosificación, con respecto a la comparación con el suelo natural de capa sub-base existe variación en todas las densidades máximas y también una variabilidad en el contenido de humedad, aumentando y disminuyendo con respecto al suelo de capa sub-base.

Grafico 4.2.12. Comportamiento de CBR en capa sub-base.



Fuente: Elaboración propia

Tabla 4.2.12. Valores de CBR a diferentes mezclas de suelo/RAP.

C.B.R.	Suelo 0%	Pavimento asfáltico reciclado (RAP)		
		20%	30%	35%
CBR 100% D.Máx.	68,68	80,64	93,97	72,97
CBR 95% D.Máx.	40,61	42,74	45,75	32,87

Fuente: Elaboración propia

Análisis de resultados

Del gráfico 4.2.12 se puede apreciar que existe un ascenso en el índice de CBR en las mezclas al momento de añadir más % de RAP hasta un punto máximo, luego el CBR desciende.

Al momento de añadir 30 % de RAP al suelo capa sub-base es que alcanza un mayor índice de CBR, aumentando de esta manera la capacidad de soporte del suelo en un 13,33 % y logrando estar dentro de los límites que establece de CBR la administradora boliviana de carreteras para suelos de capa sub-base.

Con la gráfica anterior y la educación dada se puede calcular valores teóricos del valor de CBR con diferentes porcentajes de adición de RAP.

Tabla 4.2.13. Valores teóricos de CBR para capa sub-base. Con diferente (%) de RAP.

Valores teóricos de CBR. Con diferente (%) de RAP					
% de RAP	Valor de CBR	% de RAP	Valor de CBR	% de RAP	Valor de CBR
0	67,92	34	80,07	68	2,20
2	71,13	36	77,98	70	-5,18
4	74,02	38	75,58	72	-12,87
6	76,60	40	72,87	74	-20,88
8	78,88	42	69,84	76	-29,20
10	80,84	44	66,51	78	-37,83
12	82,48	46	62,86	80	-46,77
14	83,82	48	58,91	82	-56,02
16	84,85	50	54,64	84	-65,58
18	85,56	52	50,06	86	-75,46
20	85,97	54	45,17	88	-85,64
22	86,06	56	39,96	90	-96,14
24	85,84	58	34,45	92	-106,95
26	85,31	60	28,62	94	-118,07
28	84,46	62	22,49	96	-129,50
30	83,31	64	16,04	98	-141,25
32	81,84	66	9,28	100	-153,30

Fuente: Elaboración propia

4.2.4. Determinación de la dosificación óptima de RAP.

Se determina el contenido óptimo para capa sub-base de suelo/RAP al valor que proporcione un CBR mayor a 40 % y un ascenso superior del CBR base de todas las mezclas realizadas, tomando en cuenta que 40 % es el valor mínimo que deber tener un suelo para ser utilizado en capa sub-base según especificaciones locales de la ABC, tomando en cuenta también que este debe cumplir con el valor máximo en expansión que es del 1 %.

También se considera para seleccionar el valor óptimo que los CBR de que las muestras tengan características técnicas de una capa sub-base.

En el caso de capa sub-base la mezcla donde se añade 30 % de RAP es la que cumple con las características anteriores y estos por estos motivos que se escoge a esta mezcla para añadir el uso de las geo celdas y mejorar aún más los índices de CBR.

4.2.5. Incorporación de geoceldas a dosificación suelo/RAP optima seleccionada.

4.2.5.1. Ensayos de laboratorio a suelo/RAP/geoceldas.

4.2.5.1.1. Ensayo de compactación.

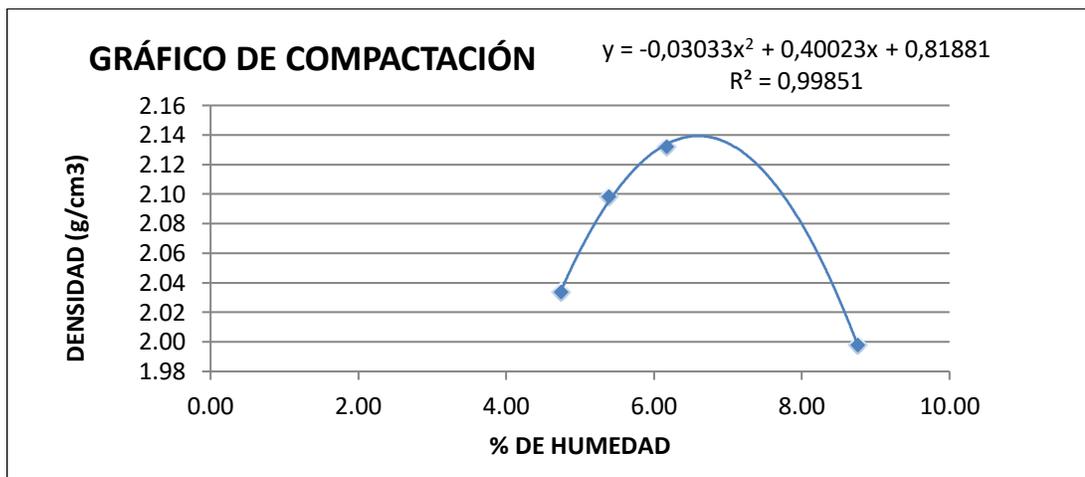
Tabla 4.2.14. Ensayo de compactación suelo/RAP/geoceldas.

N° de capas	5	5	5	5
N° de golpes por capa	56	56	56	56
Peso suelo húmedo + molde	10945,30	11140,40	11250,80	11039,70
Peso del molde	6445,00	6468,80	6468,80	6449,60
Peso suelo húmedo	4500,30	4671,60	4782,00	4590,10
Volumen de la muestra	2112,50	2112,50	2112,50	2112,50
Densidad suelo húmedo (gr/cm ³)	2,13	2,21	2,26	2,17
Cápsula N°	2	3	4	5
Peso suelo húmedo + capsula	111,40	125,80	106,80	148,20
Peso suelo seco + cápsula	107,00	120,00	101,60	137,60
Peso del agua	4,40	5,80	5,20	10,60
Peso de la cápsula	14,30	12,40	17,40	16,60
Peso suelo seco	92,70	107,60	84,20	121,00
Contenido de humedad (%)	4,75	5,39	6,18	8,76
Densidad suelo seco (gr/cm ³)	2,03	2,10	2,13	2,00

Densidad Máxima	2,14 gr/cm ³
Humedad Óptima	6,60 %

Fuente: Elaboración propia

Gráfico 4.2.13. Curva de compactación suelo/RAP/geoceldas.



Fuente: Elaboración propia

4.2.5.1.2. Ensayo de capacidad de soporte (C.B.R.).

Tabla 4.2.15. Ensayo CBR Mezcla suelo/RAP/geoceldas.

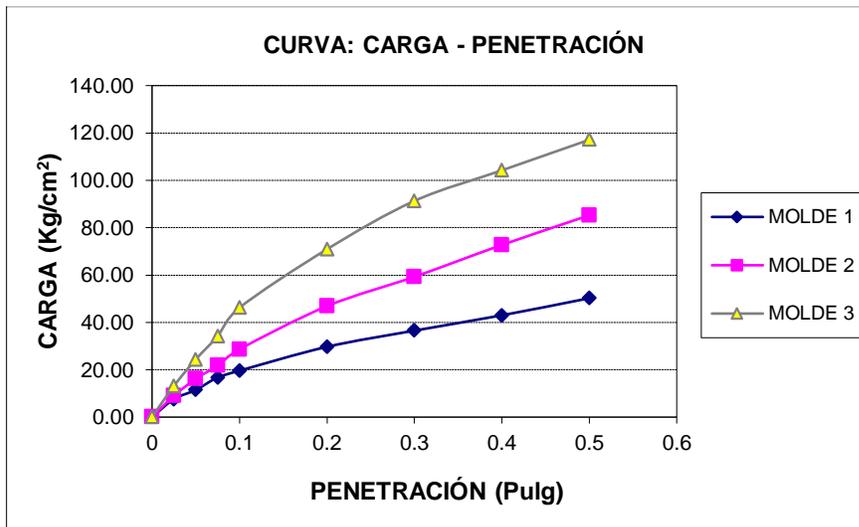
Contenido de humedad y peso unitario									
Nº capas	5			5			5		
Nº golpes por capa	12			25			56		
Condición de muestra	Antes de mojarse		D. de M	Antes de mojarse		D. de M	Antes de mojarse		D. de M
Peso muestra húm.+molde	12295,00	12410,00	12450,00	12570,00	11735,00	11695,00			
Peso molde	7953,40	7953,40	8034,20	8034,20	7105,60	7105,60			
Peso muestra húmeda	4341,60	4456,60	4415,80	4535,80	4629,40	4589,40			
Volumen de la muestra	2121,00	2121,00	2121,00	2121,00	2121,00	2121,00			
Peso unit. muestra húm.	2,05	2,10	2,08	2,14	2,18	2,16			
Muestra de humedad	Fondo	Superf.	2" sup.	Fondo	Superf.	2" sup.	Fondo	Superf.	2" sup.
Tara Nº	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Peso muestra húm + tara	120,60	113,60	152,00	195,20	121,00	284,60	230,20	207,00	295,00
Peso muestra seca + tara	112,90	106,60	140,90	182,80	113,20	265,40	216,00	194,90	277,00
Peso del agua	7,70	7,00	11,10	12,40	7,80	19,20	14,20	12,10	18,00
Peso de tara	12,80	13,40	12,00	33,60	20,80	35,20	33,60	32,40	33,60
Peso de la muestra seca	100,10	93,20	128,90	149,20	92,40	230,20	182,40	162,50	243,40
Contenido humedad %	7,69	7,51	8,61	8,31	8,44	8,34	7,79	7,45	7,40
Promedio cont. humedad	7,60		8,61	8,38		8,34	7,62		7,40
Peso unit.muestra seca	1,90		1,93	1,92		1,97	2,03		2,01

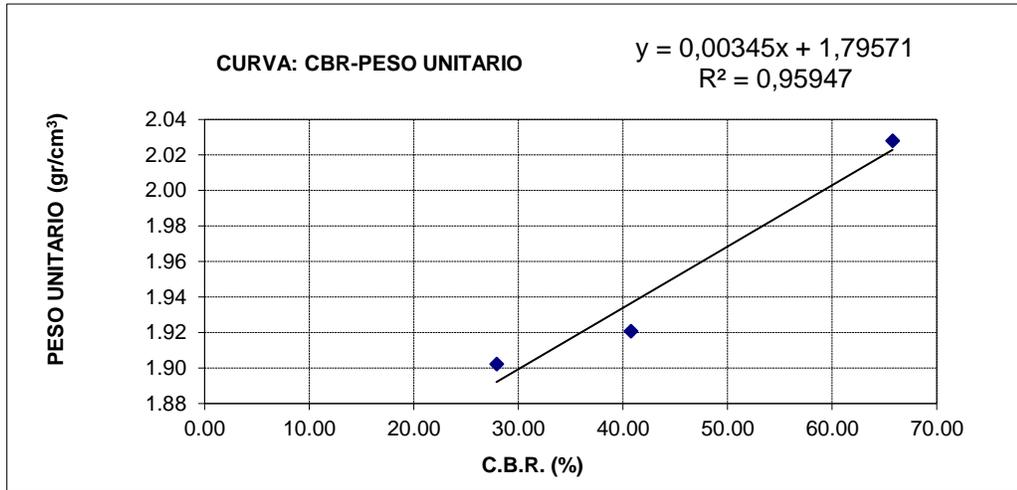
Expansión											
Fecha	Hora	Tiempo en días	Molde N° 1			Molde N° 2			Molde N° 3		
			Lect.		Expansión	Lect.		Expansión	Lect.		Expansión
			extens.	cm	%	extens.	cm	%	extens.	cm	%
11-dic	16:30	1	11,70	1,17	0	7,10	0,71	0	2,50	0,25	0
12-dic	16:30	2	11,70	1,17	0	7,10	0,71	0	2,50	0,25	0
13-dic	16:30	3	11,70	1,17	0	7,10	0,71	0	2,50	0,25	0
14-dic	8:00	4	11,70	1,17	0	7,10	0,71	0	2,50	0,25	0

C.B.R.														
Penetración		Carga normal Kg	Molde N° 1				Molde N° 2				Molde N° 3			
Pulg.	mm		Carga ensayo		C.B.R. correg.		Carga ensayo		C.B.R. correg.		Carga ensayo		C.B.R. correg.	
			Kg	Kg/cm ²	Kg	%	Kg	Kg/cm ²	Kg	%	Kg	Kg/cm ²	Kg	%
0	0		0,00	0,00			0,00	0,00			0,00	0,00		
0,025	0,63		147,00	7,60			174,50	9,02			254,50	13,15		
0,05	1,27		222,00	11,47			312,00	16,12			472,00	24,39		
0,075	1,90		324,50	16,77			422,00	21,80			662,00	34,20		
0,1	2,54	1360	379,50	19,61		27,90	554,50	28,65		40,77	894,50	46,22		65,77
0,2	5,08	2040	574,50	29,68		28,16	907,00	46,86		44,46	1372,00	70,89		67,25
0,3	7,62		707,00	36,53			1147,00	59,26			1767,00	91,30		
0,4	10,16		832,00	42,99			1407,00	72,70			2017,00	104,21		
0,5	12,70		972,00	50,22			1649,50	85,22			2267,00	117,13		

Fuente: Elaboración propia

Gráfico 4.2.14. Curvas características para determinación de CBR de mezcla suelo/RAP/geoceldas.





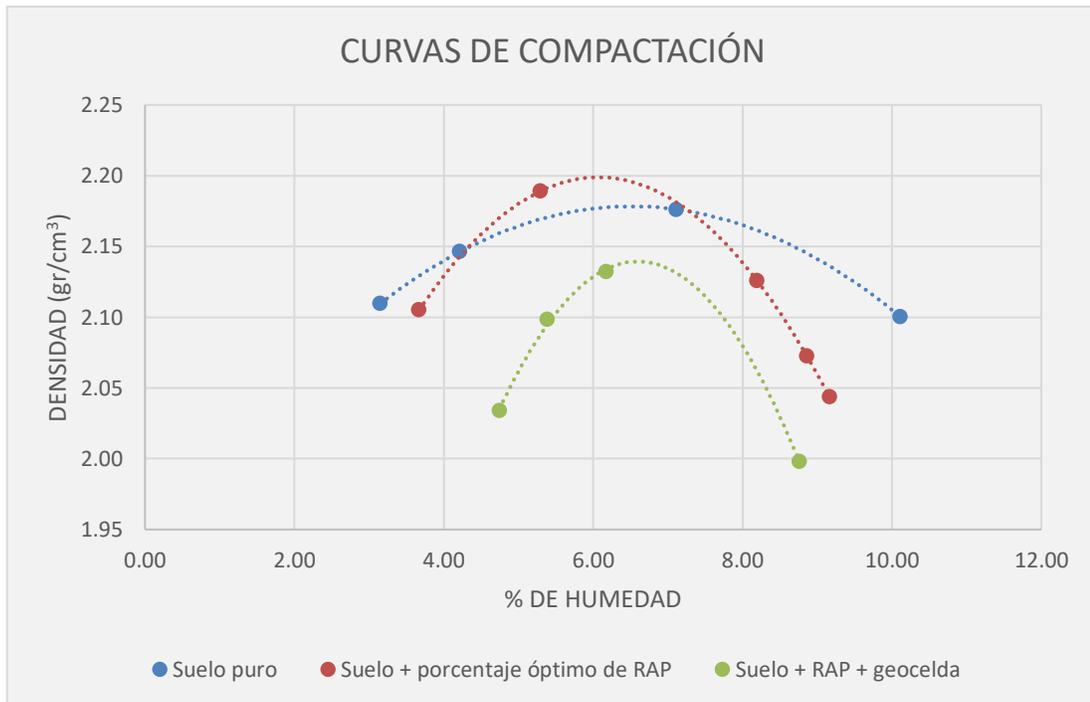
Fuente: Elaboración propia

A partir de estos parámetros se determina el CBR:

CBR 100 % D.máx	CBR 95 % D.máx
99,55 %	68,55 %

4.2.6. Resumen de ensayos de mezcla suelo/RAP/geocelda.

Gráfico 4.2.15. Comparación de curvas de compactación suelo/RAP/geoceldas.



Fuente: Elaboración propia

Tabla 4.2.16. Resumen de compactación suelo/RAP/geoceldas.

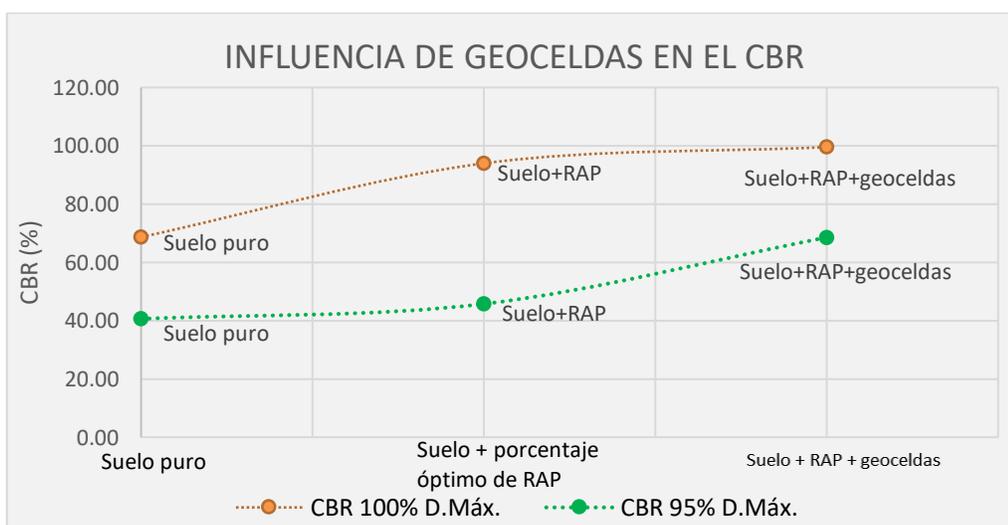
Variable	Unidad	Suelo puro	Suelo + % óptimo de RAP 30%	Suelo + RAP + geocelda
CHO	%	6,52	6,07	6,60
Dens. máx.	gr/cm ³	2,18	2,20	2,14

Fuente: Elaboración propia

Análisis de resultados

La tabla 4.2.16. muestra un descenso en las densidades máximas y una variabilidad de los contenidos de humedad, en el caso de suelo/RAP se aprecia un descenso en el contenido de humedad óptimo para alcanzar una densidad máxima con respecto al suelo puro, esto debido a que el RAP triturado presenta algunas partículas con presencia de asfalto lo que ocasiona que estas sean de un carácter más dócil y que al momento de realizar la compactación estas partículas tienden a disgregarse de manera más fácil en pequeñas partículas, las mismas que van llenando los espacios vacíos evitando que el agua llene estos, de esta manera ocasionando que a un menor contenido de humedad se aprecie una densidad máxima seca similar al del suelo puro. En el caso de la incorporación de las geoceldas a la mezcla se aprecia que existe un descenso en la densidad máxima seca con respecto al suelo puro, esto debido a que las geoceldas son de un peso liviano.

Gráfico 4.2.16. Influencia de RAP en el CBR de mezcla suelo/RAP/geoceldas.



Fuente: Elaboración propia

Tabla 4.2.17. Valores de CBR de mezcla de suelo/RAP/geocelda.

C.B.R.	Suelo puro 0%	Suelo + % óptimo de RAP 30%	Suelo + RAP + geocelda
CBR 100% D.Máx.	68,68	93,97	99,55
CBR 95% D.Máx.	40,61	45,75	68,55

Fuente: Elaboración propia

Del Gráfico 4.2.16 se puede apreciar un ascenso en el índice de CBR al momento de añadir la geoceldas a la mezcla óptima se suelo/RAP, mejorando de esta manera la capacidad de soporte del suelo en un 2,05 %.

4.3. Comportamiento de suelo capa base y sub-base con incorporación de geoceldas.

4.3.1. Ensayo de capacidad de soporte (C.B.R).

Tabla 4.2.18. Ensayo CBR. Mezcla suelo/geoceldas en capa base.

Contenido de humedad y peso unitario									
N° capas	5			5			5		
N° golpes por capa	12			25			56		
Condición de muestra	Antes de mojarse		D. de M	Antes de mojarse		D. de M	Antes de mojarse		D. de M
Peso muestra húm.+molde	11969,00		12064,00	10915,00		11227,00	11374,00		11421,00
Peso molde	7372,00		7372,00	6060,00		6060,00	6305,00		6305,00
Peso muestra húmeda	4597,00		4692,00	4855,00		5167,00	5069,00		5116,00
Volumen de la muestra	2121,00		2121,00	2121,00		2121,00	2121,00		2121,00
Peso unit. muestra húm.	2,17		2,21	2,29		2,44	2,39		2,41
Muestra de humedad	Fondo	Superf.	2" sup.	Fondo	Superf.	2" sup.	Fondo	Superf.	2" sup.
Tara N°	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Peso muestra húm + tara	114,80	116,10	127,20	97,90	103,90	118,90	125,10	103,60	98,20
Peso muestra seca + tara	108,30	109,10	120,10	92,00	98,10	107,00	112,50	97,90	91,00
Peso del agua	6,50	7,00	7,10	5,90	5,80	11,90	12,60	5,70	7,20
Peso de tara	18,50	19,20	16,40	18,60	16,10	17,90	18,70	19,30	16,60
Peso de la muestra seca	89,80	89,90	103,70	73,40	82,00	89,10	93,80	78,60	74,40
Contenido humedad %	7,24	7,79	6,85	8,04	7,07	13,36	13,43	7,25	9,68
Promedio cont. humedad	7,51		6,85	7,56		13,36	10,34		9,68
Peso unit.muestra seca	2,02		2,07	2,13		2,15	2,17		2,20

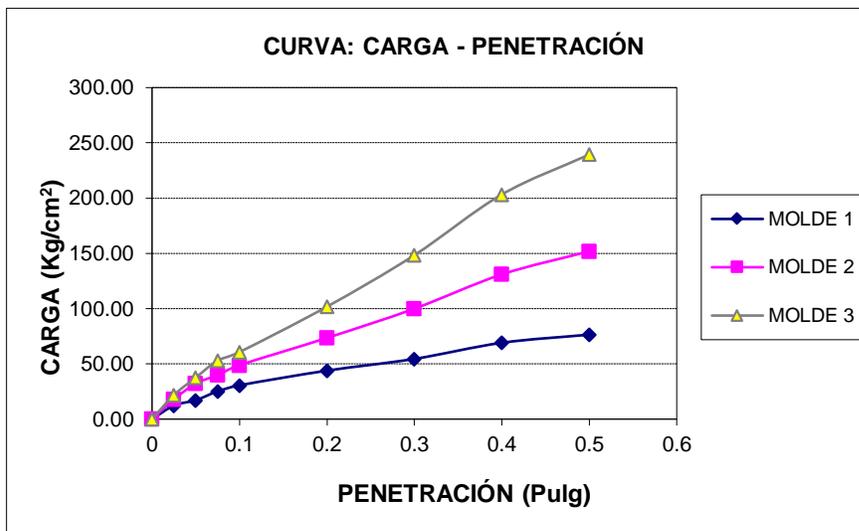
Expansión

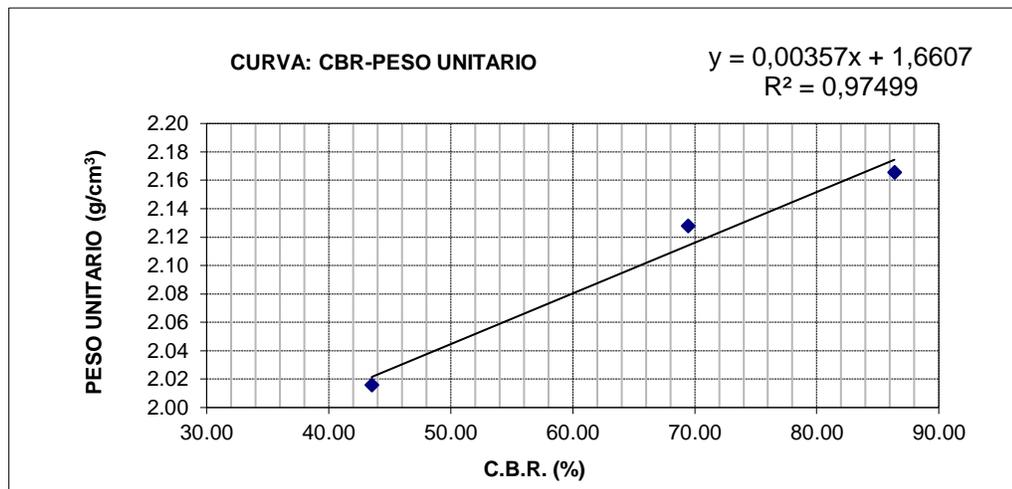
Fecha	Hora	Tiempo en días	Molde N° 1			Molde N° 2			Molde N° 3		
			Lect.		Expansión	Lect.		Expansión	Lect.		Expansión
			extens.	cm	%	extens.	cm	%	extens.	cm	%
15-oct	11:00	1	3,40	0,34	0	11,50	5,20	0	8,30	0,83	0
16-oct	10:30	2	3,40	0,34	0	11,50	5,20	0	8,30	0,83	0
17-oct	11:00	3	3,40	0,34	0	11,50	5,20	0	8,30	0,83	0
18-oct	9:00	4	3,40	0,34	0	11,50	5,20	0	8,30	0,83	0

C.B.R.

Penetración		Carga normal	Molde N° 1				Molde N° 2				Molde N° 3			
Pulg.	mm		Carga ensayo		C.B.R. correg.		Carga ensayo		C.B.R. correg.		Carga ensayo		C.B.R. correg.	
		Kg	Kg	Kg/cm ²	Kg	%	Kg	Kg/cm ²	Kg	%	Kg	Kg/cm ²	Kg	%
0	0		0,00	0,00			0,00	0,00			0,00	0,00		
0,025	0,63		237,00	12,25			347,00	17,93			422,00	21,80		
0,05	1,27		332,00	17,15			622,00	32,14			727,00	37,56		
0,075	1,9		487,00	25,16			772,00	39,89			1027,00	53,06		
0,1	2,54	1360	592,00	30,59		43,53	944,50	48,80		69,45	1174,50	60,68		86,36
0,2	5,08	2040	849,50	43,89		41,64	1422,00	73,47		69,71	1969,50	101,76		96,54
0,3	7,62		1054,50	54,48			1934,50	99,95			2872,00	148,39		
0,4	10,16		1337,00	69,08			2534,50	130,95			3934,50	203,28		
0,5	12,7		1479,50	76,44			2939,50	151,87			4634,50	239,45		

Gráfico 4.2.17. Curvas características para determinación de CBR de mezcla suelo/geoceldas.





Fuente: Elaboración propia

A partir de estos parámetros se determina el CBR:

CBR 100 % D.máx	CBR 95 % D.máx
96,12 %	65,18 %

Tabla 4.2.19. Ensayo CBR. Mezcla suelo/geoceldas en capa sub-base.

	Contenido de humedad y peso unitario								
	5			5			5		
N° capas	5			5			5		
N° golpes por capa	12			25			56		
Condición de muestra	Antes de mojarse		D. de M	Antes de mojarse		D. de M	Antes de mojarse		D. de M
Peso muestra húm.+molde	12699,00	12782,00	12782,00	12853,00	13050,00	13050,00	12725,00	12782,00	12782,00
Peso molde	7982,00	7982,00	7982,00	8028,00	8035,50	8035,50	7835,00	7835,00	7835,00
Peso muestra húmeda	4717,00	4800,00	4800,00	4825,00	5014,50	5014,50	4890,00	4947,00	4947,00
Volumen de la muestra	2171,00	2171,00	2171,00	2101,00	2101,00	2101,00	2099,00	2099,00	2099,00
Peso unit. muestra húm.	2,17	2,21	2,21	2,30	2,39	2,39	2,33	2,36	2,36
Muestra de humedad	Fondo	Superf.	2" sup.	Fondo	Superf.	2" sup.	Fondo	Superf.	2" sup.
Tara N°	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Peso muestra húm + tara	148,10	109,10	16390	124,30	111,60	101,00	104,80	151,20	166,40
Peso muestra seca + tara	140,00	103,00	156,00	115,80	106,80	93,30	98,00	144,10	155,80
Peso del agua	8,10	6,10	7,90	8,50	480	7,70	6,80	7,10	10,60
Peso de tara	19,60	12,40	18,20	13,40	12,70	12,80	16,30	21,40	18,40
Peso de la muestra seca	120,40	90,60	137,80	102,40	94,10	80,50	81,70	122,70	137,40
Contenido humedad %	6,73	6,73	5,73	8,30	5,10	9,57	8,32	5,79	7,71
Promedio cont. humedad	6,73		5,73	6,70		9,57	7,05		7,71
Peso unit.muestra seca	2,04		2,09	2,15		2,18	2,18		2,19

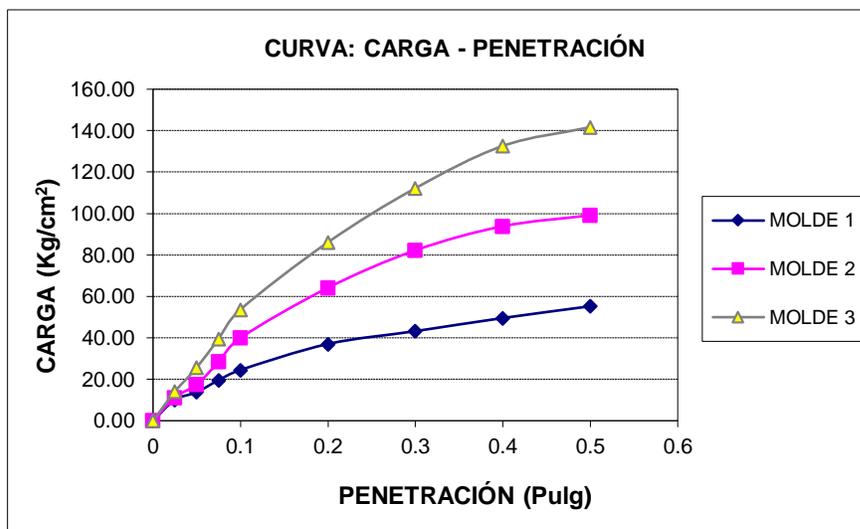
Expansión

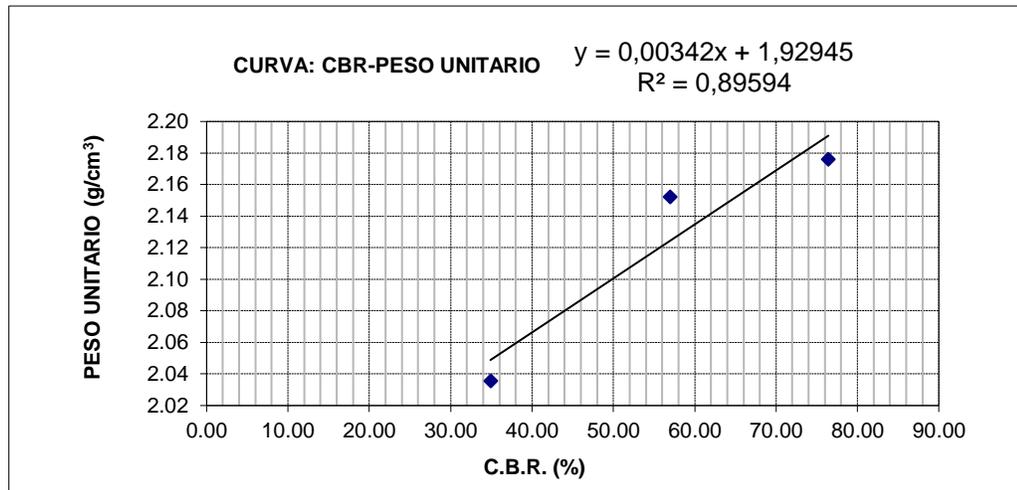
Fecha	Hora	Tiempo en días	Molde N° 1			Molde N° 2			Molde N° 3		
			Lect.		Expansión	Lect.		Expansión	Lect.		Expansión
			extens.	cm	%	extens.	cm	%	extens.	cm	%
15-oct	18:30	1	9,20	0,92	0	10,30	1,03	0	5,40	0,54	0
16-oct	18:30	2	9,20	0,92	0	10,30	1,03	0	5,40	0,54	0
17-oct	18:30	3	9,20	0,92	0	10,30	1,03	0	5,40	0,54	0
18-oct	18:30	4	9,20	0,92	0	10,30	1,03	0	5,40	0,54	0

C.B.R.

Penetración		Carga normal	Molde N° 1				Molde N° 2				Molde N° 3			
Pulg.	mm		Carga ensayo		C.B.R. correg.		Carga ensayo		C.B.R. correg.		Carga ensayo		C.B.R. correg.	
		Kg	Kg	Kg/cm ²	Kg	%	Kg	Kg/cm ²	Kg	%	Kg	Kg/cm ²	Kg	%
0	0		0,00	0,00			0,00	0,00			0,00	0,00		
0,025	0,63		194,50	10,05			217,00	11,21			272,00	14,05		
0,05	1,27		267,00	13,80			339,50	17,54			497,00	25,68		
0,075	1,9		379,50	19,61			549,50	28,39			767,00	39,63		
0,1	2,54	1360	474,50	24,52		34,89	774,50	40,02		56,95	1039,50	53,71		76,43
0,2	5,08	2040	717,00	37,05		35,15	1242,00	64,17		60,88	1667,00	86,13		81,72
0,3	7,62		837,00	43,25			1592,00	82,25			2172,00	112,22		
0,4	10,16		959,50	49,57			1817,00	93,88			2567,00	132,63		
0,5	12,7		1069,50	55,26			1919,50	99,17			2742,00	141,67		

Gráfico 4.2.18. Curvas características para determinación de CBR de mezcla suelo/geoceldas.





Fuente: Elaboración propia

A partir de estos parámetros se determina el CBR:

CBR 100 % D.máx	CBR 95 % D.máx
75,92 %	43,91 %

4.4. Diseño de pavimentos según método AASHTO versión 1993.

Primer análisis de paquete estructural con suelo natural:

Tabla 4.4.1. Parámetros de diseño de paquete estructural (Primer análisis).

Parámetros de diseño	
ESALs	1637202 KN
Confiabilidad "R"	90 %
Desviación estándar normalizada "Z _R "	-1,282
Desviación estándar de las variables "S _o "	0,49
Serviciabilidad "ΔPSI"	1,7
CBR de la subrasante	18 %
Módulo resiliente de la sub-rasante	
M _R	12744,74 psi
M _R	87871,95 kpa

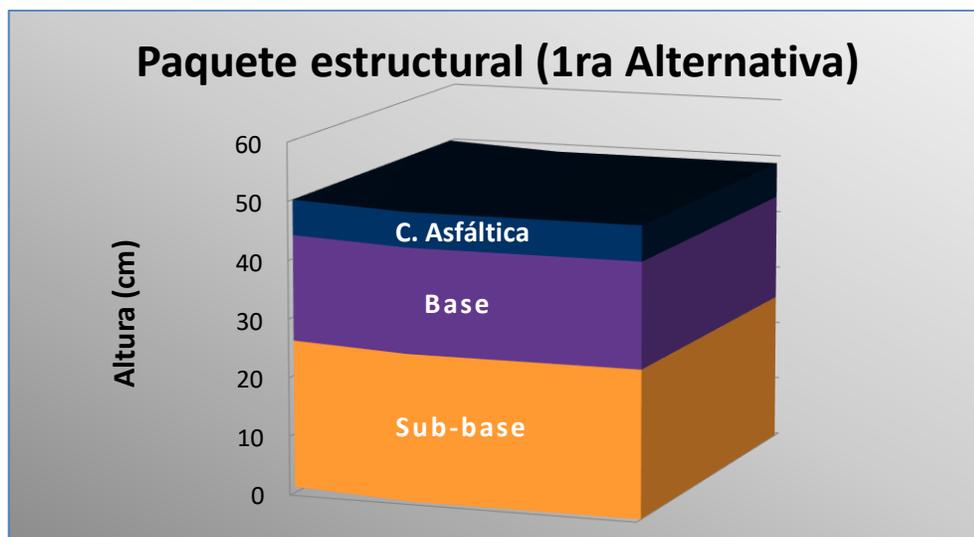
Fuente: Elaboración propia

Tabla 4.4.2. Espesor por capa de paquete estructural. (Primer análisis).

Alternativa N° 1				
Tipo de capa	Coeficiente estructural (ai)	Módulo resiliente (kpa)	Espesor calculado	
			pulg	cm
C. Asfáltica	0,430	2930375	2,36	6
Base	0,133	197617,19	7,09	18
Sub-base	0,130	127426,29	9,84	25

Fuente: Elaboración propia

Figura 4.5. Primer análisis de paquete estructural con suelo natural.



Fuente: Elaboración propia

Segundo análisis de paquete estructural con suelo/RAP:

Tabla 4.4.3 Parámetros de diseño de paquete estructural (Segundo análisis).

Parámetros de diseño	
Confiabilidad "R"	90 %
Desviación estándar normalizada "Z _R "	-1,282
Desviación estándar de las variables "So"	0,49
ESALs	1637202
Serviciabilidad "ΔPSI"	1,7
CBR de la sub-rasante	18 %
CBR de capa base + RAP	119,68 %
CBR de capa sub-base	68,68 %
Módulo resiliente de la sub-rasante	
M _R	12744,74 psi
M _R	87871,95 kpa

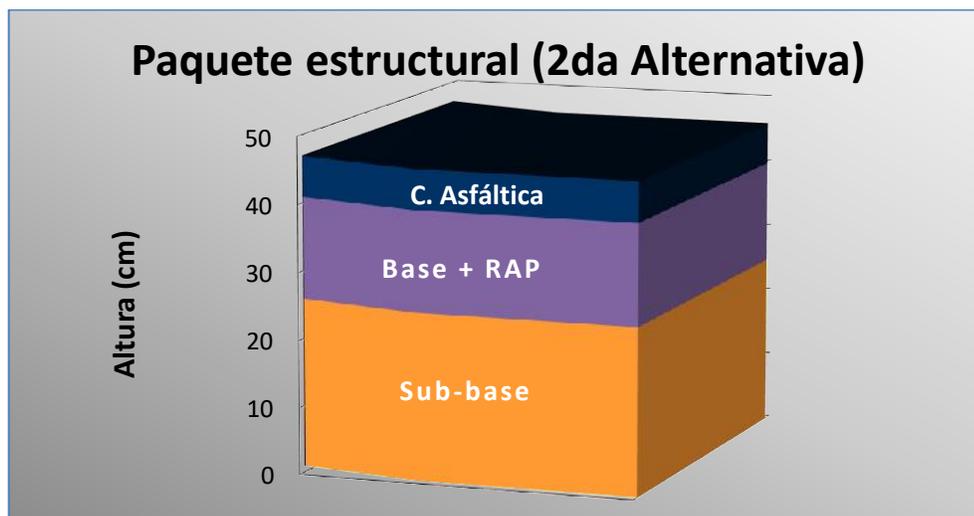
Fuente: Elaboración propia

Tabla 4.4.4. Espesor por capa de paquete estructural. (Segundo análisis).

Alternativa N° 2				
Tipo de capa	Coeficiente estructural (ai)	Módulo resiliente (kpa)	Espesor calculado	
			pulg	cm
C. Asfáltica	0,430	2930375	2,36	6
Base + RAP	0,148	227200,03	5,91	15
Sub-base	0,130	127426,29	9,84	25

Fuente: Elaboración propia

Figura 4.6. Segundo análisis de paquete estructural con suelo natural + RAP.



Fuente: Elaboración propia

Tercer análisis de paquete estructural con suelo/RAP/geoceldas:

Tabla 4.4.5. Parámetros de diseño de paquete estructural (Tercer análisis).

Parámetros de diseño	
Confiabilidad "R"	90 %
Desviación estándar normalizada "Z _R "	-1,282
Desviación estándar de las variables "So"	0,49
ESALs	1637202
Serviciabilidad "ΔPSI"	1,7
CBR de la sub-rasante	18 %
CBR de capa base	119,68 %
CBR de capa sub-base + RAP + geoceldas	99,55 %
Módulo resiliente de la sub-rasante	
M _R	12744,74 psi
M _R	87871,95 kpa

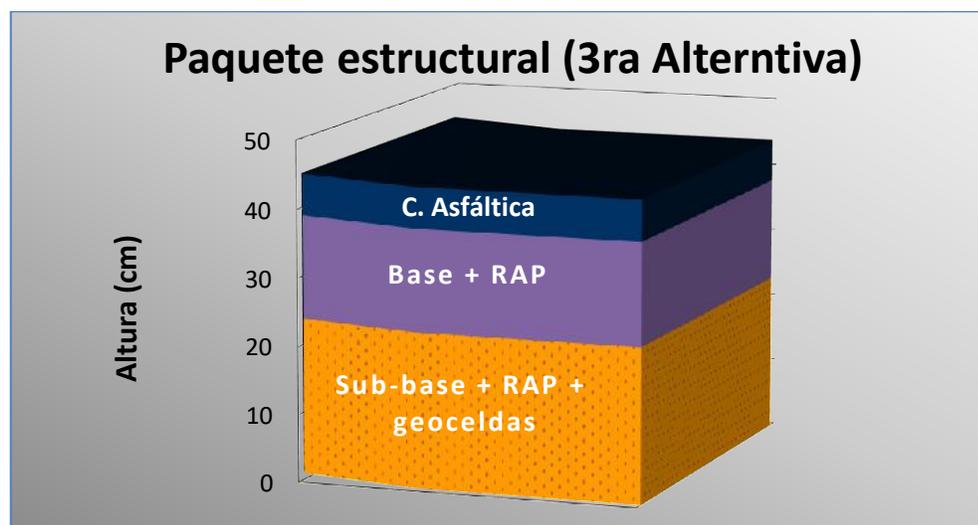
Fuente: Elaboración propia

Tabla 4.4.6. Espesor por capa de paquete estructural. (Tercer análisis).

Alternativa N° 3				
Tipo de capa	Coeficiente estructural (ai)	Módulo resiliente (kpa)	Espesor calculado	
			pulg	cm
C. Asfáltica	0,430	2930375	2,36	6
Base + RAP	0,148	227200,03	5,91	15
Sub-base + RAP + geoceldas	0,139	140269,152	9,06	23

Fuente: Elaboración propia

Figura 4.7. Tercer análisis de paquete estructural con suelo natural.



Fuente: Elaboración propia

4.4.1. Diseño de espesores y análisis de alcance de pavimento asfáltico reciclado.

De tabla 3.14. y 3.15, del capítulo III, se obtiene que aproximadamente un volumen de 3451,71 m³ de RAP son lo que se pueden reutilizar, este valor ya se encuentra afectado por el c_{reu} (coeficiente de reutilización de RAP).

A partir del segundo análisis (Tabla 4.4.3 y Tabla 4.4.4) de paquete estructural con suelo capa base/RAP al 20 %:

Asumiendo:

$$\begin{aligned} \text{Ancho de calzada} &= 7 \text{ m} \\ \text{Ancho de berma} &= 1,5 \text{ m} \end{aligned}$$

Volumen de RAP de las Secretarías para la gestión 2019:

Volumen acumulado de enero a diciembre 2019 = 3451,71 m³

Con los datos anteriores se obtiene que para 1 Km se necesita:

C. Asfáltica = 420,00 m³

Base = 1050,00 m³

Sub-base = 1750,00 m³

Para este análisis se debe tomar en cuenta que se está trabajando con la mezcla capa base/RAP al 20%

Suelo capa base natural = 840,00 m³

RAP para capa base = 210,00 m³

A partir del volumen acumulado de RAP se determina que el mismo puede ser reutilizado en una longitud de:

Longitud total con empleo de RAP = 16436,73 m

Longitud total con empleo de RAP = 16,44 Km

A partir de un cuarto análisis realizado de paquete estructural con suelo capa sub-base/RAP al 30 % :

Asumiendo:

Ancho de calzada = 7 m

Ancho de berma = 1,5 m

Volumen de RAP de las Secretarías para la gestión 2019:

Volumen acumulado de enero a diciembre 2019 = 3451,71 m³

Con los datos anteriores se obtiene que para 1 Km se necesita:

C. Asfáltica = 420,00 m³

Base = 1050,00 m³

Sub-base = 1736,00 m³

Para este análisis se debe tomar en cuenta que se está trabajando con la mezcla capa sub-base/RAP al 30%

Suelo capa base natural = 735,00 m³

$$\text{RAP para capa base} = 315,00 \text{ m}^3$$

A partir del volumen acumulado de RAP se determina que el mismo puede ser reutilizado en una longitud de:

$$\begin{aligned} \text{Longitud total con empleo de RAP} &= 10957,82 \text{ m} \\ \text{Longitud total con empleo de RAP} &= 10,96 \text{ Km} \end{aligned}$$

Al emplear la mezcla de suelo/RAP al 20 % en capa base se logra obtener que lo acumulado de un año de RAP de las diferentes secretarías logra cubrir una longitud de 16,44 Km.

En el caso de la mezcla suelo/RAP al 30 % en capa sub-base, se logra obtener que lo acumulado de un año de RAP de las diferentes secretarías logra cubrir una longitud de 10,96 Km.

Al realizar la comparación de estos valores se logra obtener un mayor porcentaje de ejecución al emplear la combinación suelo/RAP al 20 % en capa base.

Se debe tomar en cuenta que el municipio de Tarija anualmente realiza al asfaltado de aproximadamente 18 Km, por lo tanto con los anteriores resultados obtenidos se podría con un correcto método de reciclado llegar a reutilizar el RAP para un año de asfaltado.

4.5. Costos.

El objetivo principal de realizar un estudio de costos, es para poder mostrar y comparar a partir de una elaboración de precios referenciales de los casos que se mencionan a continuación:

- Costo del paquete estructural del pavimento flexible con la participación agregados naturales.
- Costo del paquete estructural del pavimento flexible con la participación de la combinación más adecuada de suelo/RAP.
- Costo del paquete estructural del pavimento flexible con la participación de la combinación más adecuada de suelo/RAP más la incorporación de geoceldas.

4.5.1. Análisis de precios unitarios referenciales.

Se determinó el precio unitario de los diferentes ítems que intervienen en el paquete estructural de un pavimento flexible.

En la elaboración de los ítems se tomó en cuenta:

- a) Costos directos

Materiales adicionales

Se considera en materiales adicionales al pavimento asfáltico reciclado y a las geoceldas.

Para el caso del pavimento asfáltico se realiza un análisis de precios unitarios tomando en cuenta todos sus respectivos elementos.

Las geoceldas se obtuvieron directamente de la empresa dedicada al comercio de geo-sintéticos y tubos de HPDE.

Mano de obra

Comprende el haber básico del trabajador que interviene directamente en la ejecución de la obra.

El análisis que se realiza está condicionado al salario básico, el pago de beneficios sociales, el pago de impuestos de acuerdo a decretos establecidos por el estado.

Tabla 4.5.1. Costo horario de la mano de obra del proyecto.

Especialidad	Unitario
Ayudante maquinaria y equipo	15,14
Operador	23,28
Operador de equipo pesado	23,28
Operador de equipo liviano	20,00
Operador de planta	24,00
Peón	12,00

Maquinaria, equipo y herramientas

Contempla la productividad, costo de propiedad, vida útil, amortización e intereses, costos de operación, reparación y repuestos, costo de desgaste de herramientas.

Toma en cuenta algunos parámetros como el rendimiento y el costo hora máquina.

b) Costos indirectos

Para el caso de costos indirectos se tomó en cuenta los gastos generales y utilidad para los cuales se designó 10 % de costo directo de la actividad para el primero y 7 % para la utilidad.

4.5.2. Análisis de precios unitarios de las alternativas.

Primer análisis (Agregados naturales):

A partir del cálculo de precios unitarios se tiene:

Carpeta asfáltica = 2012,81 Bs/m³

Base = 172,40 Bs/m³

Sub-base = 158,81 Bs/m³

Para el cálculo se asume un ancho de vía de 7m y una longitud de 1m

Ancho de calzada = 7m

Longitud = 1m

Tomando en cuenta el diseño del paquete estructural realizado con agregados naturales:

Descripción de la capa	Espesor	Unit.
Carpeta asfáltica	6	cm
Base	18	cm
Sub-base	25	cm

Se tiene:

Descripción de la capa	Unit.	Cantidad	P.U. (Bs)
Carpeta asfáltica	m ³	0,42	845,38
Base	m ³	1,26	217,23
Sub-base	m ³	1,75	277,92

Costo paquete estructural por metro = 1340,53 Bs.

Segundo análisis (Agregados naturales + Pavimento asfáltico reciclado) :

A partir del cálculo de precios unitarios se tiene:

$$\text{Carpeta asfáltica} = 2012,81 \text{ Bs/m}^3$$

$$\text{Base + RAP} = 165,02 \text{ Bs/m}^3$$

$$\text{Sub-base} = 158,81 \text{ Bs/m}^3$$

Para el cálculo se asume un ancho de vía de 7m y una longitud de 1m

$$\text{Ancho de calzada} = 7\text{m}$$

$$\text{Longitud} = 1\text{m}$$

Tomando en cuenta el diseño del paquete estructural realizado con agregados naturales + pavimento asfáltico reciclado:

Descripción de la capa	Espesor	Unit.
Carpeta asfáltica	6	cm
Base + RAP	15	cm
Sub-base	25	cm

Se tiene:

Descripción de la capa	Unit.	Cantidad	P.U. (Bs)
Carpeta asfáltica	m ³	0,42	845,38
Base + RAP	m ³	1,05	173,27
Sub-base	m ³	1,75	277,92

Costo paquete estructural por metro = 1296,57 Bs.

Tercer análisis (Agregados naturales + Pavimento asfáltico reciclado + geoceldas) :

A partir del cálculo de precios unitarios se tiene:

$$\text{Carpeta asfáltica} = 2012,81 \text{ Bs/m}^3$$

$$\text{Base + RAP} = 165,02 \text{ Bs/m}^3$$

$$\text{Sub-base + RAP + geoceldas} = 146,15 \text{ Bs/m}^3$$

Para el cálculo se asume un ancho de vía de 7m y una longitud de 1m

$$\text{Ancho de calzada} = 7\text{m}$$

$$\text{Longitud} = 1\text{m}$$

Tomando en cuenta el diseño del paquete estructural realizado con agregados naturales + pavimento asfáltico reciclado + geocelda.

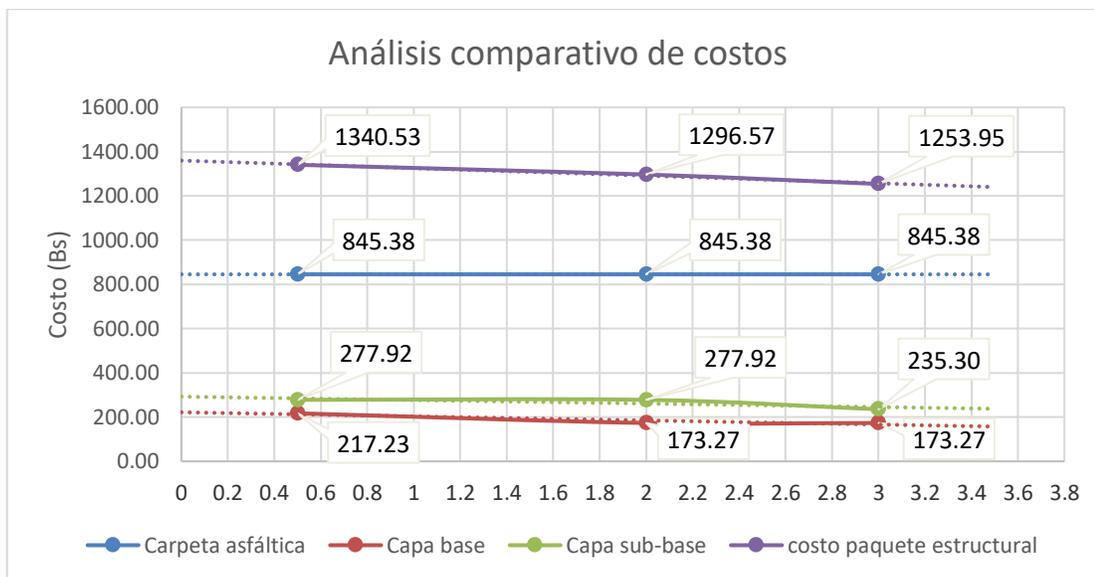
Descripción de la capa	Espesor	Unit.
Carpeta asfáltica	6	cm
Base + RAP	15	cm
Sub-base + RAP + geoceldas	23	cm

Se tiene:

Descripción de la capa	Unit.	Cantidad	P.U. (Bs)
Carpeta asfáltica	m ³	0,42	845,38
Base + RAP	m ³	1,05	173,27
Sub-base + RAP + geoceldas	m ³	1,61	235,30

Costo paquete estructural por metro = 1253,95 Bs

Gráfico 4.3. Análisis de costos



Fuente: Elaboración propia

4.5.3. Comparación técnico-económica de las alternativas.

4.5.3.1. Matriz de comparación.

Se define la configuración del análisis estableciendo niveles para las variables a partir de las cuales se efectúa la comparación.

Los niveles establecidos son 8 tipos de suelos de sub-rasante con diferente módulo resiliente y valores extremos de tráfico. Esto permite definir matrices de comparación y análisis.

Lo que se pretende es dar a conocer los rangos de variación de costos para diferentes paquetes estructurales de pavimento flexible, empleando para ello matrices.

Tabla 4.5. Matriz de comparación. (Tráfico de diseño).

N°	CBR Sub-rasante	Espesores de capas (mm)								
		1ra Alternativa			2da Alternativa			3ra Alternativa		
		Agregados naturales			Agregados naturales + RAP			Agr. Nat. + RAP + geoceldas		
		C. Asf.	Base	Sub-base	C. Asf.	Base	Sub-base	C. Asf.	Base	Sub-base
1	5 %	60	250	300	60	230	300	60	230	280
2	10 %	60	200	270	60	180	270	60	180	248
3	15 %	60	180	250	60	160	250	60	160	232
4	18 %	60	180	250	60	150	250	60	150	230
5	20 %	60	160	250	60	140	250	60	140	231
6	25 %	60	150	240	60	136	240	60	135	222
7	30 %	60	145	235	60	127	235	60	127	219
8	35 %	60	135	235	60	118	235	60	118	219
9	40 %	60	130	230	60	130	215	60	130	201

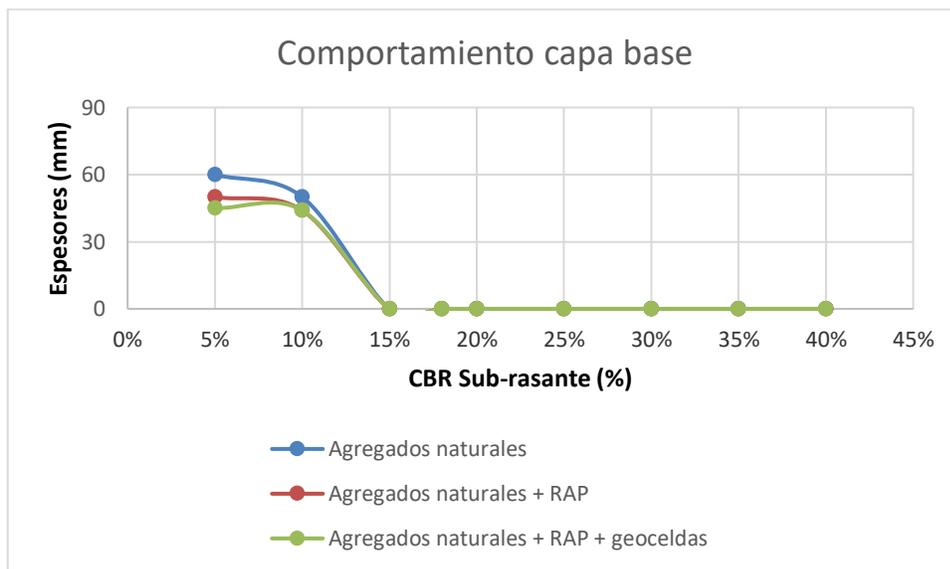
Fuente: Elaboración propia

Tabla 4.6. Matriz de comparación. (Tráfico liviano = 2574,82 KN)

N°	CBR Sub-rasante	Espesores de capas (mm)								
		1ra Alternativa			2da Alternativa			3ra Alternativa		
		Agregados naturales			Agr. Nat. + RAP			Agr. Nat. + RAP + geoceldas		
		C. Asf.	Base	Sub-base	C. Asf.	Base	Sub-base	C. Asf.	Base	Sub-base
1	5 %	60	60	0	60	50	0	60	45	0
2	10 %	50	50	0	50	44	0	50	44	0
3	15 %	50	-	-	50	-	-	50	-	-
4	18 %	50	-	-	50	-	-	50	-	-

Fuente: Elaboración propia

Gráfico 4.4. Resultados del comportamiento de espesores de capa base (Tráfico liviano).



Fuente: Elaboración propia

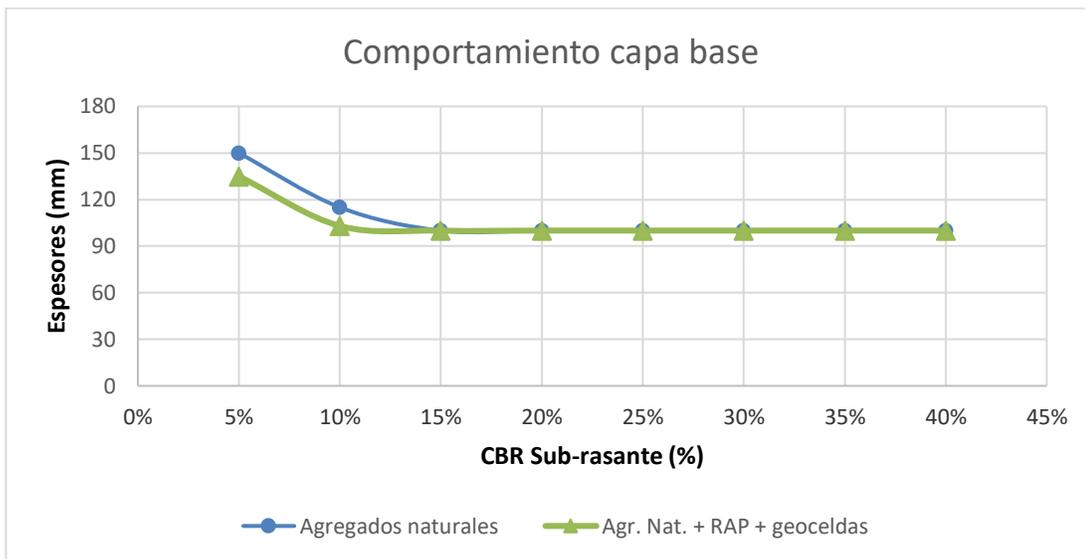
La matriz de comparación en el caso de tráfico liviano muestra que al contar con suelo de sub-rasante con CBR menores al 10 % es necesario implementar capa base con un determinado espesor, pero a partir de un CBR mayor o igual a 15% no es necesario la implementación de una capa base.

La no implementación de capa base debido al tráfico liviano es reiterativo en la alternativa con agregados naturales y aquella donde se añade el RAP y también en la cual se implementa las geoceldas.

Tabla 4.7. Matriz de comparación. (Tráfico mediano = 386133,69 KN)

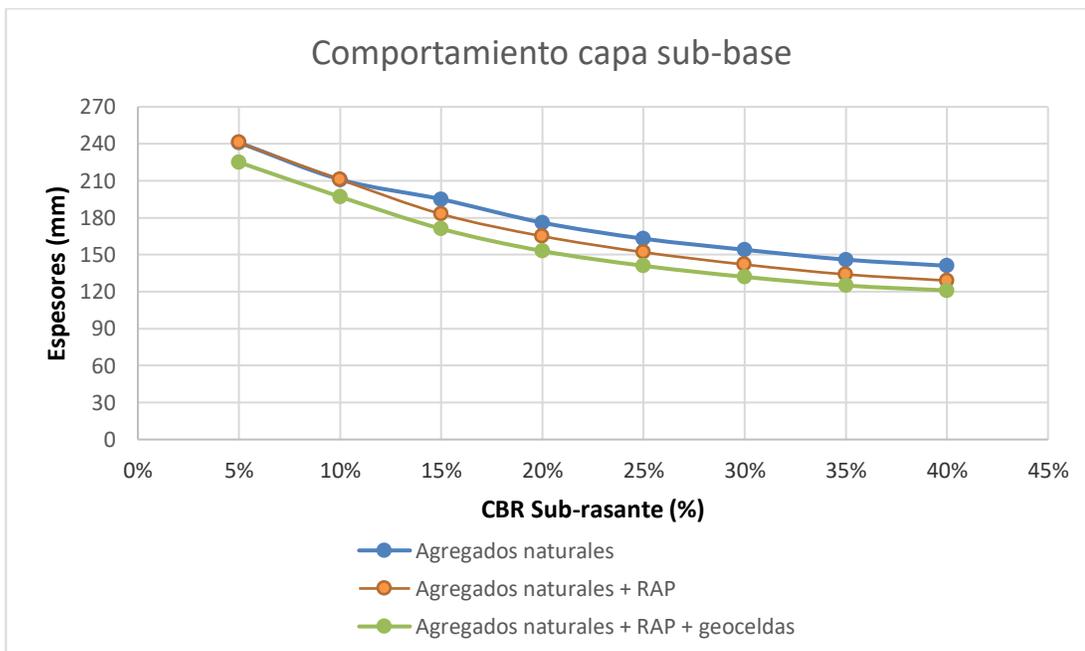
Nº	CBR Sub-rasante	Espesores de capas (mm)								
		1ra Alternativa			2da Alternativa			3ra Alternativa		
		Agregados naturales			Agregados naturales + RAP			Agr. Nat. + RAP + geoceldas		
		C. Asf.	Base	Sub-base	C. Asf.	Base	Sub-base	C. Asf.	Base	Sub-base
1	5%	60	150	241	60	135	241	60	135	225
2	10%	60	115	211	60	103	211	60	103	197
3	15%	60	100	195	60	100	183	60	100	171
4	20%	60	100	176	60	100	165	60	100	153
5	25%	60	100	163	60	100	152	60	100	141
6	30%	60	100	154	60	100	142	60	100	132
7	35%	60	100	146	60	100	134	60	100	125
8	40%	60	100	141	60	100	129	60	100	121

Gráfico 4.5. Resultados del comportamiento de espesores de capa base (Trafico mediano).



Fuente: Elaboración propia

Gráfico 4.6. Resultados del comportamiento de espesores de capa sub-base (Tráfico mediano).



Fuente: Elaboración propia

La matriz de comparación y el gráfico 4.5 en el caso de tráfico mediano muestra que el espesor de capa base decrece cuando el valor del CBR de sub-rasante aumenta (mejora la

calidad del suelo), a partir del 10 % se adopta el valor mínimo para espesor de capa base (100 mm), esto en ambas alternativas.

En el caso de capa sub-base para diseño con agregados naturales, agregados naturales más RAP y agregados naturales más RAP y geoceldas, el espesor de la capa decrece al aumentar el valor del CBR de sub-rasante, esto reflejado en la tabla 4.7 y el grafico 4.6.

Análisis de resultados

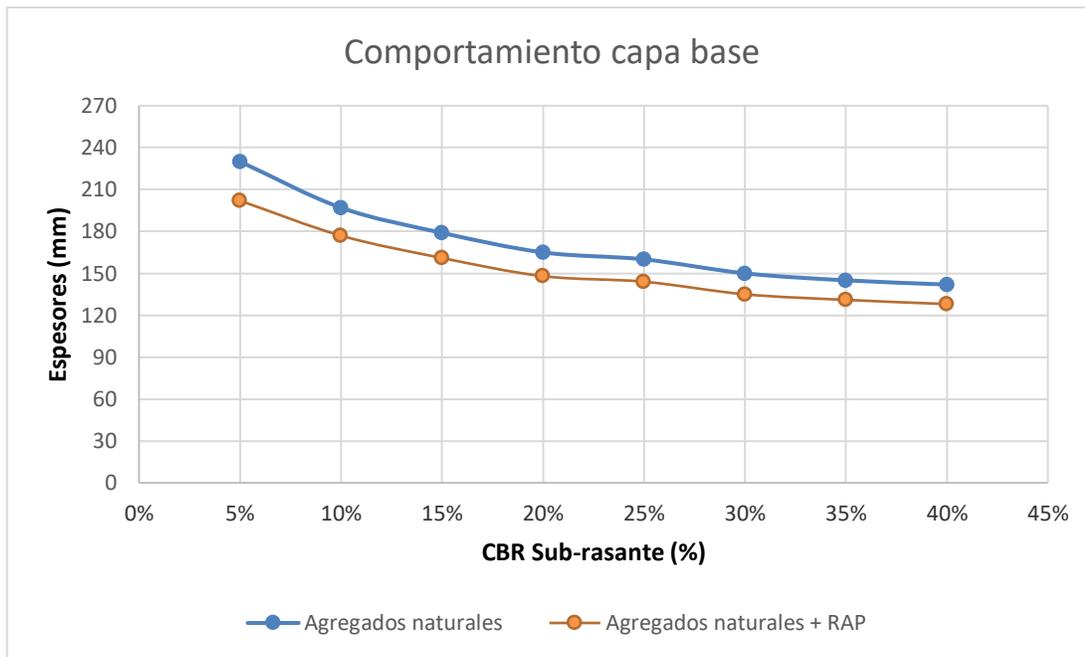
A partir de los resultados presentados en tablas y gráficos, se observa que en ambas alternativas de nuestra investigación, el espesor de las capas reduce en comparación con la alternativa de agregados naturales, pero en el presente caso con tráfico mediano el espesor de capa base llega hasta el mínimo del mismo, provocando que el espesor de capa sub-base tienda a decrecer de la misma forma que en las otras 2 alternativas.

Tabla 4.8. Matriz de comparación. (Tráfico pesado = 1248493,06 KN).

N°	CBR Sub-rasante	Espesores de capas (mm)								
		1ra Alternativa			2da Alternativa			3ra Alternativa		
		Agregados naturales			Agregados naturales + RAP			Agr. Nat. + RAP + geoceldas		
		C. Asf.	Base	Sub-base	C. Asf.	Base	Sub-base	C. Asf.	Base	Sub-base
1	5 %	60	230	291	60	202	291	60	202	271
2	10 %	60	197	240	60	177	240	60	177	223
3	15 %	60	179	220	60	161	220	60	161	205
4	20 %	60	165	212	60	148	212	60	148	198
5	25 %	60	160	202	60	144	202	60	144	188
6	30 %	60	150	200	60	135	200	60	135	187
7	35 %	60	145	196	60	131	196	60	131	182
8	40 %	60	142	193	60	128	193	60	128	180

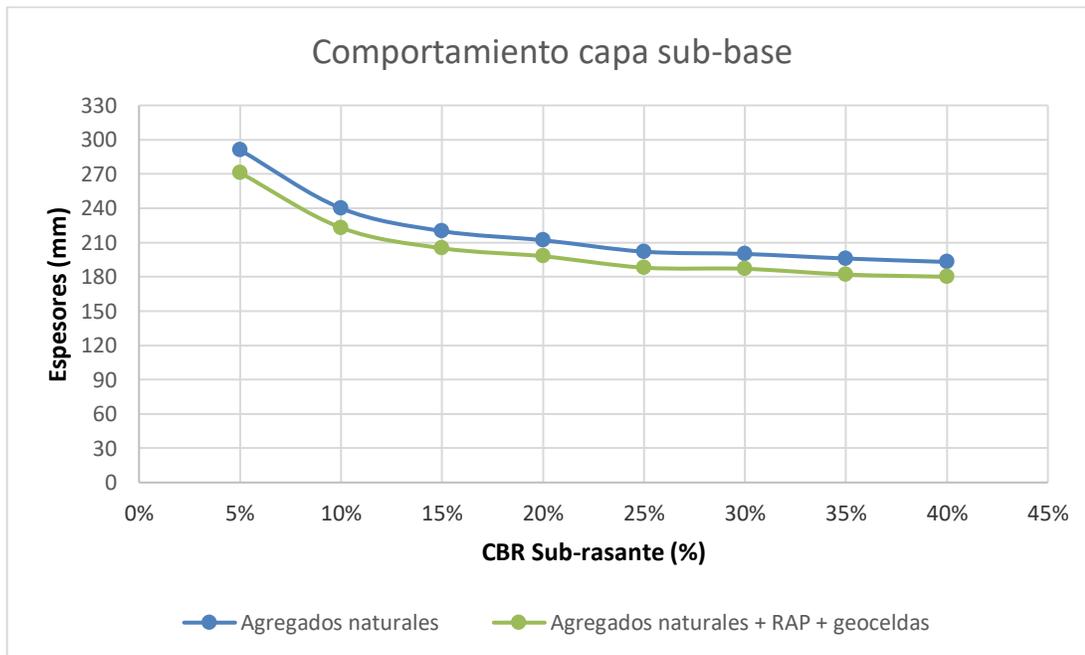
Fuente: Elaboración propia

Gráfico 4.7. Resultados del comportamiento de espesores de capa base (Tráfico pesado).



Fuente: Elaboración propia

Gráfico 4.8. Resultados del comportamiento de espesores de capa sub-base (Tráfico pesado).



Fuente: Elaboración propia

La matriz de comparación y el gráfico 4.7 en el caso de tráfico pesado muestra que el espesor de capa base decrece cuando el valor del CBR de sub-rasante aumenta (mejora la calidad del suelo), para el caso de agregados naturales el valor decrece un 36 % y en el caso de agregados naturales más RAP el valor desciende un 2 % más que el anterior.

Con respecto a capa sub-base se observa que para diseño con agregados naturales el valor del espesor de la misma decrece un 34 % al igual que el caso de agregados naturales más RAP y geoceldas, esto reflejado en el gráfico 4.8 y la tabla 4.8 respectivamente.

Análisis de resultados

A partir de los resultados presentados en tablas y gráficos, se observa que en ambas alternativas de nuestra investigación, el espesor de las capas reduce en comparación con la alternativa de agregados naturales, en el presente caso con tráfico pesado el espesor de capa base decrece para la alternativa con agregados naturales y agregados naturales más RAP.

Para el caso de capa sub-base se observa que el espesor de la capa reduce en comparación con la alternativa de agregados naturales y agregados naturales más RAP y geoceldas.

4.5.3.2. Modelo de costos para alternativas equivalentes.

4.5.3.2.1. Consideraciones generales de diseño.

Utilizando la metodología de diseño AASHTO 93, como se expresa en el capítulo II del presente trabajo y tomando en cuenta las consideraciones técnicas para diseños equivalentes, se calcula la matriz.

Respecto a los parámetros comunes adoptados para el diseño de ambas alternativas se tiene:

Parámetros comunes de diseño	
ESAL's	1637202 KN
Confiabilidad "R"	90 %
Desviación estándar normalizada "Z _R "	-1.282
Desviación estándar de las variables "S _o "	0,49
Serviciabilidad "ΔPSI"	1,70

4.5.3.2.2. Caracterización de módulo resiliente de capa base y capa sub-base

Se presenta el cálculo de los módulos resiliente de cada capa para ambas alternativas. Para la primera alternativa de diseño de paquete estructural se empleó el CBR de las capas con agregados naturales, para la segunda alternativa se calculó con el CBR de la capa base con agregados naturales más RAP y para la tercer alternativa se usó el CBR de la capa sub-base más RAP más geoceldas, a continuación se grafica el esquema de las alternativas:

Tabla 4.9. Módulo resiliente de capas de paquete estructural (1ra Alternativa).

1ra Alternativa		
Agregados naturales		
Nombre de capa	CBR	Módulo resiliente (Kpa)
Carpeta Asfáltica	-	2930375,00
Base	85,52	197617,19
Sub-base	68,68	127426,29

Fuente: Elaboración propia

Tabla 4.10. Módulo resiliente de capas de paquete estructural (2da Alternativa).

2da Alternativa		
Agregados naturales + RAP		
Nombre de capa	CBR	Módulo resiliente (Kpa)
Carpeta Asfáltica	-	2930375,00
Base + RAP	119,68	227200,03
Sub-base	68,68	127426,29

Fuente: Elaboración propia

Tabla 4.11. Módulo resiliente de capas de paquete estructural (3ra Alternativa).

3ra Alternativa		
Agregados Naturales + RAP + geoceldas		
Nombre de capa	CBR	Módulo resiliente (Kpa)
Carpeta Asfáltica	-	2930375,00
Base + RAP	119,68	227200,03
Sub-base + RAP + geoceldas	99,55	140269,15

Fuente: Elaboración propia

4.5.3.2.3. Caracterización de CBR para sub-rasante.

En la caracterización del suelo o sub-rasante se ha optado por simplificar su modelación al valor de CBR para estimar así los valores de módulo resiliente para las alternativas.

Tabla 4.12. La sub-rasante.

N°	CBR Sub-rasante	Módulo resiliente (Psi)
1	5 %	7500,00
2	10 %	10201,98
3	15 %	11956,03
4	20 %	13200,54
5	25 %	14165,86
6	30 %	14954,58
7	35 %	15621,44
8	40 %	16089,57

Fuente: Elaboración propia

Tabla 4.13. Espesores de capa (3ra Alternativa).

Descripción de capa	Espesores de capa (mm)		
	Carpeta asfáltica	Base	Sub-base
Agregados naturales	60	180	250
Agregados naturales + RAP	60	150	250
Agregados naturales + RAP + geoceldas	60	150	230

Fuente: Elaboración propia

4.5.3.2.4. Matriz de paquetes técnicamente equivalentes.

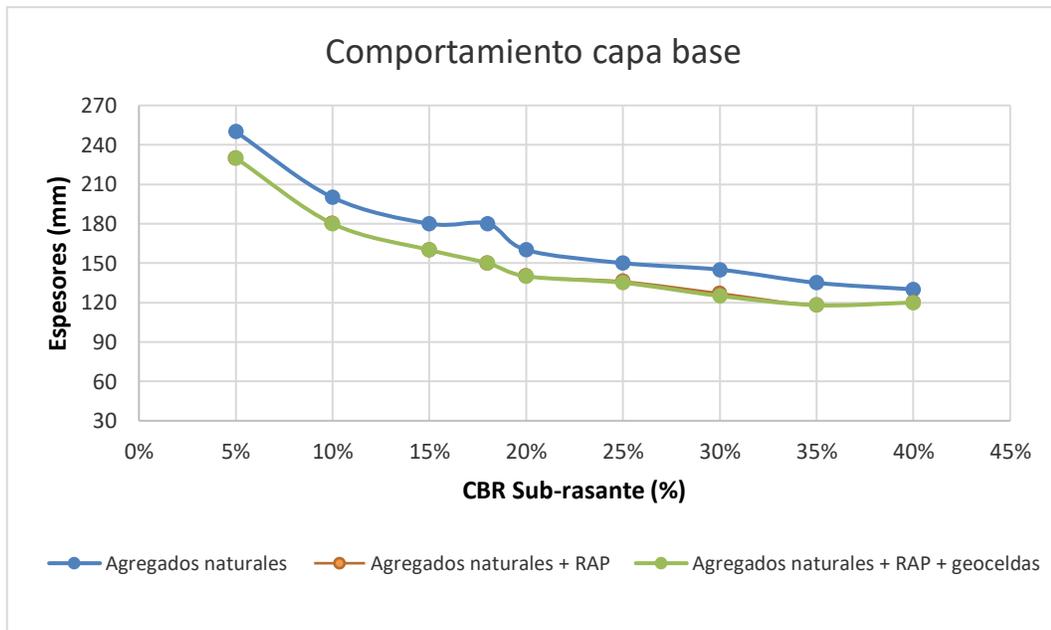
Empleando el método de diseño AASHTO 93, y con los parámetros de diseño arriba mencionados se calcula la matriz de pavimentos equivalentes para cada alternativa.

Tabla 4.14 Matriz de comparación.

N°	CBR Sub-rasante	Espesores de capas (mm)								
		1ra Alternativa			2da Alternativa			3ra Alternativa		
		Agregados naturales			Agregados naturales + RAP			Agr. Nat. + RAP + geoceldas		
		C. Asf.	Base	Sub-base	C. Asf.	Base	Sub-base	C. Asf.	Base	Sub-base
1	5 %	60	250	300	60	230	300	60	230	280
2	10 %	60	200	270	60	180	270	60	180	248
3	15 %	60	180	250	60	160	250	60	160	232
4	18 %	60	180	250	60	150	250	60	150	230
5	20 %	60	160	250	60	140	250	60	140	231
6	25 %	60	150	240	60	136	240	60	135	222
7	30 %	60	145	235	60	127	235	60	125	219
8	35 %	60	135	235	60	118	235	60	118	219
9	40 %	60	130	230	60	130	215	60	130	201

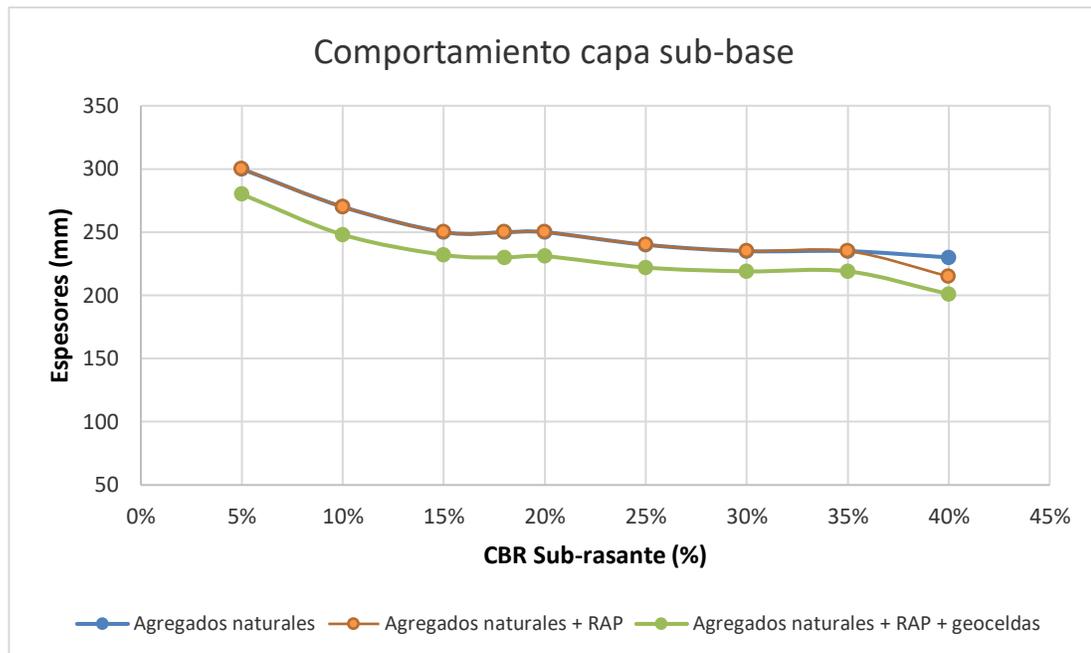
Fuente: Elaboración propia

Gráfico 4.9. Comportamiento capa base.



Fuente: Elaboración propia

Gráfico 4.10. Comportamiento capa sub-base.



Fuente: Elaboración propia

A partir del análisis de la matriz de comparación y la tabla 4.14. se puede observar que en ambas alternativas el espesor de las capas tienden a decrecer a medida que el CBR de la sub-rasante aumenta.

4.5.3.3. Consideraciones para el costeo.

El modelo de costos que se presenta esta en bolivianos y tiene como referencia precios del 2019. Para una calzada de dos carriles, uno por sentido de 3,50 metros de ancho para cada una de ellas. Solo se incluye para la comparación el costo directo de la estructura, mas no, obras adicionales, pues se consideran iguales y la consideración de costos no será absoluta sino relativa para el presente trabajo.

Se realizó un modelo de costo por cada alternativa, dando un total de 27 alternativas de paquete estructural (3 tipos de suelo y 9 tipos de CBR de sub-rasante).

Agregados naturales:

CBR Sub-rasante 5 %			
Descripción de la capa	Espesor		Unidad
Carpeta asfáltica	60		mm
Base	250		mm
Sub-base	300		mm
Precio unitario			
Descripción de la capa	ud.	Cantidad	P.U. (Bs)
Carpeta asf.	m ³	0,42	845,38
Base	m ³	1,75	301,71
Sub-base	m ³	2,10	333,51
Costo total m ³			1480,59

CBR Sub-rasante 40 %			
Descripción de la capa	Espesor		Unidad
Carpeta asfáltica	60		mm
Base	130		mm
Sub-base	230		mm
Precio unitario			
Descripción de la capa	ud.	Cantidad	P.U. (Bs)
Carpeta asf.	m ³	0,42	845,38
Base	m ³	0,91	156,89
Sub-base	m ³	1,61	255,69
Costo total m ³			1257,96

Agregados naturales + RAP:

CBR Sub-rasante 5 %			
Descripción de la capa	Espesor		Unidad
Carpeta asfáltica	60		mm
Base + RAP	230		mm
Sub-base	300		mm
Precio unitario			
Descripción de la capa	ud.	Cantidad	P.U. (Bs)
Carpeta asf.	m ³	0,42	845,38
Base + RAP	m ³	1,61	265,68
Sub-base	m ³	2,10	333,51
Costo total m ³			1444,57

CBR Sub-rasante 40 %			
Descripción de la capa	Espesor		Unidad
Carpeta asfáltica	60		mm
Base + RAP	130		mm
Sub-base	215		mm
Precio unitario			
Descripción de la capa	ud.	Cantidad	P.U. (Bs)
Carpeta asf.	m ³	0,42	845,38
Base + RAP	m ³	0,91	150,17
Sub-base	m ³	1,51	239,01
Costo total m ³			1234,56

Agregados naturales + RAP + geoceldas:

CBR Sub-rasante 5 %			
Descripción de la capa	Espesor		Unidad
Carpeta asfáltica	60		mm
Base + RAP	230		mm
Sub-base	280		mm
Precio unitario			
Descripción de la capa	ud.	Cantidad	P.U. (Bs)
Carpeta asf.	m ³	0,42	845,38
Base + RAP	m ³	1,61	265,68
Sub-base + RAP + geoceldas	m ³	1,96	286,45
Costo total m ³			1397,51

CBR Sub-rasante 40 %			
Descripción de la capa	Espesor		Unidad
Carpeta asfáltica	60		mm
Base + RAP	130		mm
Sub-base	201		mm
Precio unitario			
Descripción de la capa	ud.	Cantidad	P.U. (Bs)
Carpeta asf.	m ³	0,42	845,38
Base + RAP	m ³	0,91	150,17
Sub-base + RAP + geoceldas	m ³	1,41	205,63
Costo total m ³			1201,18

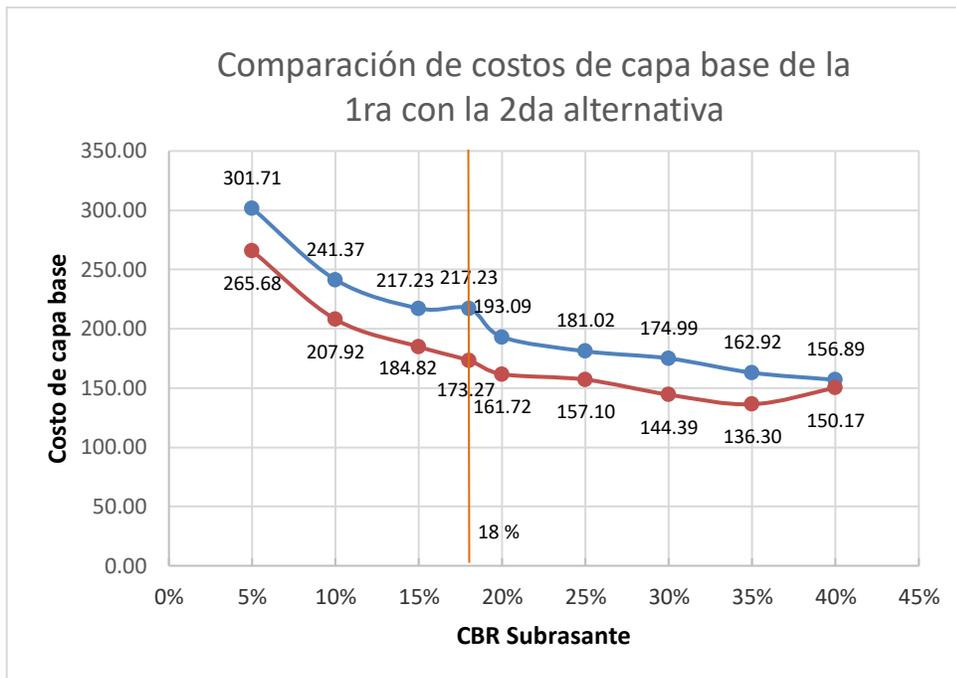
Utilizando la misma lógica de los pavimentos equivalentes presentados en la tabla 4.14 se ordena el análisis de costo por alternativa, sustentado en la tabla 4.15. siguiente:

Tabla 4.15. Matriz de comparación.

N°	CBR Sub-rasante	Costos por espesores de capas (Bs.)								
		1ra Alternativa			2da Alternativa			3ra Alternativa		
		Agregados naturales			Agregados naturales + RAP			Agr. Nat. + RAP + geoceldas		
		C. Asf.	Base	Sub-base	C. Asf.	Base	Sub-base	C. Asf.	Base	Sub-base
1	5 %	845,38	301,71	33,51	845,38	265,68	333,51	845,38	265,68	286,45
2	10 %	845,38	241,37	300,16	845,38	207,92	300,16	845,38	207,92	253,72
3	15 %	845,38	217,23	277,92	845,38	184,82	277,92	845,38	184,82	237,35
4	18 %	845,38	217,23	277,92	845,38	173,27	277,92	845,38	173,27	235,30
5	20 %	845,38	193,09	277,92	845,38	161,72	277,92	845,38	161,72	236,33
6	25 %	845,38	181,02	266,81	845,38	157,10	266,81	845,38	155,94	227,12
7	30 %	845,38	174,99	261,25	845,38	144,39	261,25	845,38	144,39	224,05
8	35 %	845,38	162,92	261,25	845,38	136,30	261,25	845,38	136,30	224,05
9	40 %	845,38	156,89	255,69	845,38	150,17	239,01	845,38	150,17	205,63

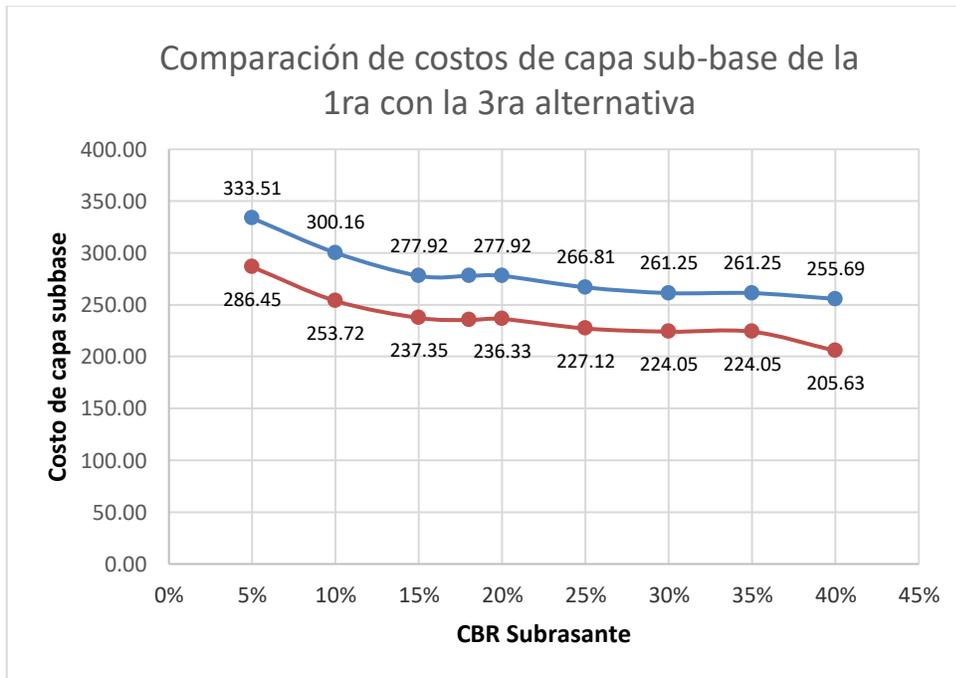
Fuente: Elaboración propia

Gráfico 4.11. Comparación de costos de capa base.



Fuente: Elaboración propia

Gráfico 4.12. Comparación de costos de capa sub-base.



Fuente: Elaboración propia

Evaluación comparativa económica en suelo capa base a diferentes porcentajes de mezcla suelo/RAP.

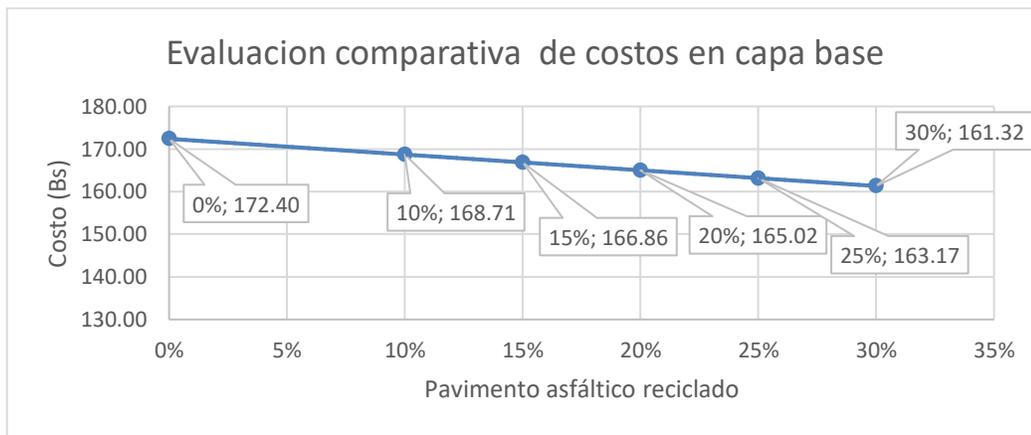
Los valores de la tabla 14.16 y 14.17 se encuentran en bolivianos.

Tabla 4.16. Comparación económica en suelo capa base.

Suelo natural	Pavimento asfáltico reciclado				
	10 %	15 %	20 %	25%	30%
172,40	168,71	166,86	165,02	163,17	161,32

Fuente: Elaboración propia

Gráfico 4.13. Evaluación comparativa de costos en capa base.



Fuente: Elaboración propia

La gráfica 4.13 indica que la capa base decrece en sus costos al momento de añadir más porcentajes de RAP.

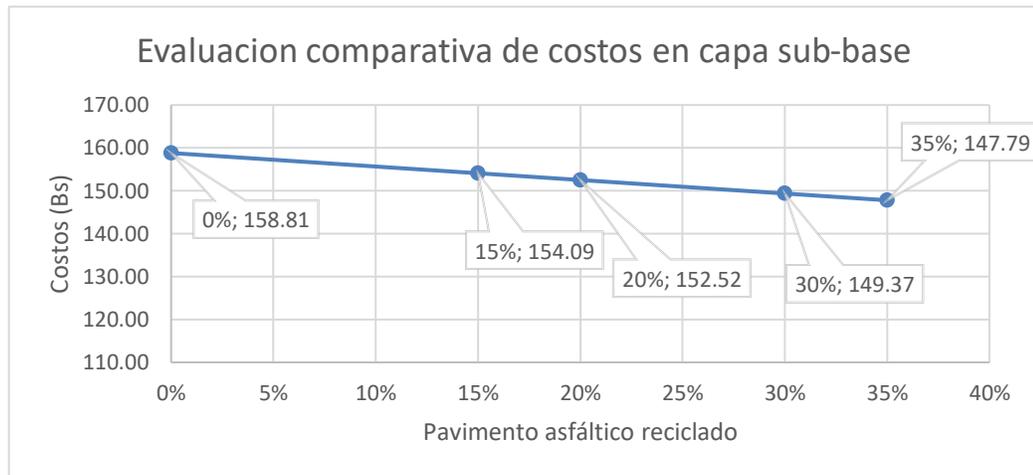
Al realizar un análisis de los costos de capa base con suelo natural y capa base con mezcla de RAP al 20 %, se tiene que es menos costosa esta última, presentando un 10 % menos.

Tabla 4.17. Comparación económica en suelo capa sub-base.

Suelo natural	Pavimento asfáltico reciclado			
	15 %	20 %	30 %	35 %
158,81	154,09	152,52	149,37	147,79

Fuente: Elaboración propia

Gráfico 4.14. Evaluación comparativa de costos en capa sub-base.



Fuente: Elaboración propia

La gráfica 4.14 indica que la capa sub-base decrece en sus costos al momento de añadir más porcentajes de RAP.

Al realizar un análisis de los costos de capa sub-base con suelo natural y capa sub-base con mezcla de RAP al 30 %, se tiene que es menos costosa esta última, presentando un 10 % menos.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y

RECOMENDACIONES

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

Se realizó una evaluación a la metodología empleada del reciclaje de pavimento, llegando a establecer que: No se usa el 100 % del volumen acumulado de RAP, esto por diferentes factores como limpieza, la homogeneidad del material y la calidad del mismo, se establece que para reutilizar el pavimento como agregado de capa base y sub-base debe cumplir con las especificaciones técnicas de la tabla 3.1.

Se realizó la caracterización del suelo para capa base y sub-base siguiendo las especificaciones descritas en la normativa ABC, llegando a establecer que ambas capas se encuentran dentro de los límites establecidos en la misma.

Según la clasificación AASHTO tanto el suelo capa base como capa sub-base son A-1-a (0) y no presentan plasticidad, los valores del soporte CBR arrojaron 85,52 % para base y 68,68 para sub-base, en el caso del desgaste de los Ángeles 29,03 % y 26,56 % respectivamente.

Se efectuaron diferentes dosificaciones de suelo/RAP y con ellas los diferentes ensayos hasta lograr obtener un valor óptimo (máximo en el valor de C.B.R), medido a través del ensayo CBR. Para el caso de capa base el óptimo se dio al realizar la mezcla suelo/RAP al 20 % y en el caso de capa sub-base al 30 %.

Al realizar la comparación de resultados de las mezclas suelo/RAP y suelo puro, se pudo observar que en las mezclas realizadas para capa base, se presenta un ascenso en el valor del CBR hasta llegar a un punto máximo y luego descender, llegando a establecer una conducta similar al de una parábola, sucedió similar situación en la mezcla suelo/RAP para capa su-base.

Una vez obtenidas las mezclas óptimas de suelo/RAP en cada capa, se procedió a añadir las geoceldas generando nuevamente un ascenso en los valores de CBR.

La optimización de espesores que se consigue con la implementación del uso suelo/RAP/geoceldas, lleva implícita disminución del volumen de agregados naturales, lo cual se convierte en una solución efectiva frente a la afectación de redes existentes, evitando sobre-excavaciones y minimizando el transporte y explotación de materiales pétreos no renovables.

Una de las premisas de diseño, contempla que para el llenado de las geoceldas únicamente podrá usarse material granular, tal como grava, sub-base granular, base granular, RAP, entre otros.

Las diferentes matrices de comparación que se presentan a partir de un análisis de empleo de suelo sub-rasante y valores extremos con diferentes tipos de tráfico, arroja valores en los cuales se observa la disminución de espesores y por ende de costos de paquete estructural.

Al realizar la comparación económica empleado la metodología costo-beneficio se concluye que la mejor alternativa de diseño de paquete estructural es la combinación de suelo/RAP/geoceldas en ambas capas.

5.2. Recomendaciones

Se recomienda incluir el reciclado como una alternativa más que considerar en cualquier proyecto de rehabilitación de pavimentos o por la falta de material con características acordes a la obra. Es importante tener en cuenta que no debe reciclarse simplemente porque es una aplicación ecológica, sino porque sea técnicamente adecuado y que de ello deriven ventajas económicas tanto para las empresas como para la administración pública de nuestro medio.

Se recomienda utilizar el pavimento reciclado en la estabilización de suelos capa base y sub-base, para mejorar las características de los mismos y de esta manera lograr mejores resultados y minora costos de compra de material.

En la etapa del triturado del pavimento, se debe tener el cuidado necesario para la obtención de tamaños apropiados, que se encuentren dentro de los parámetros de la norma local establecida.

Así mismo para el proceso de reciclado de pavimentos flexibles es necesario contar con equipos necesario para retirar el pavimento, como también para el transporte a lugares de acopio y una máquina para el proceso de chancado triturado del pavimento reciclado.

En el caso de las geoceldas incentivar su uso y realizar más pruebas con más tipos de geoceldas de otras empresas fabricantes de las mismas.

Se recomienda profundizar en el tema del reciclado de pavimentos, ya que el uso de material reciclado reduce los daños al medio ambiente y da lugar a nuevas materias primas en la construcción de carreteras.

En el empleo de las geoceldas se debe tener los cuidados necesarios para que la misma cumpla la función para lo cual fue diseñada, el confinamiento del material que es introducido en ellas.