

1.1 Generalidades

El reciclado de materiales, es un tema que se está investigando en el campo de la construcción de vías terrestres, el cual está ayudando de gran manera a evitar la contaminación del medio ambiente y a su vez buscando nuevas alternativas para la utilización de estos en combinación con otros materiales convencionales que buscan cumplir con las nuevas exigencias estructurales, debido al incremento de la tecnología automotriz.

Ante este desafío, la industria de la construcción ha sido pionera en el desarrollo de técnicas para la reutilización de los materiales de desperdicio que genera, en primer lugar, por la gran cantidad de residuos que se desprenden de los procesos constructivos, y en segundo, porque la gran mayoría de ellos son reutilizables, tal es el caso de los materiales generados cuando se retiran pavimentos asfálticos de las carreteras durante su reparación o rehabilitación.

Desde el punto de vista ambiental y de aprovechamiento de materiales, las técnicas de reciclado son altamente interesantes y beneficiosas, sin embargo, en Sud América, algunas de las técnicas para el reciclado de pavimentos asfálticos están poco desarrolladas, tal es el caso del reciclado de pavimentos flexibles y su influencia en el diseño estructural de capas base y sub-base.

1.2 Diseño teórico

1.2.1 Problemática

Los crecientes problemas ambientales y energéticos del planeta se convierten en una variable primordial para la ejecución de cualquier obra civil. En el caso particular de la infraestructura vial, el aumento de las cargas por eje en los vehículos pesados, el progreso de la tecnología automotriz y la carencia de materiales granulares con propiedades mecánicas y físicas acorde con las necesidades, han hecho que las instituciones de investigación adelanten procesos para desarrollar aditivos, los cuales

generan o estabilizan las propiedades mecánicas de las capas que conforman la estructura de pavimento.

1.2.2 Problema

Tarija es una ciudad donde se realiza el mantenimiento rutinario de las calles, de las cuales se extrae el pavimento que se encuentra en mal estado debido al envejecimiento del mismo, fisuras, grietas ocasionados por fatiga, etc., lo cual genera un volumen de residuos sólidos siendo el objeto de estudio la reutilización del pavimento flexible reciclado. En tal sentido la utilización de este subproducto constituye una acción concreta para el aprovechamiento de este material, disminuyendo de esta forma el impacto negativo que tiene en el medio ambiente y generando una producción más rentable.

De tal manera que el planteamiento del problema sería:

¿Es factible la utilización del pavimento reciclado, como un material para estabilizar un suelo natural de características mecánicas bajas y utilizarlo como capa sub base y base en la estructura de un pavimento flexible, solo si las propiedades mecánicas del pavimento reciclado le confieren una alta resistencia al suelo natural?

La respuesta a esta interrogante se dará en base al estudio de las características mecánicas de los componentes del pavimento reciclado, así como a los resultados de los ensayos de laboratorio que se debe practicar a todo material que será destinado para la conformación de capa sub base y base de pavimentos según las normas vigentes en el país.

1.2.3 Objetivos

1.2.3.1 Objetivo General

- Evaluar la influencia de las propiedades de capas sub base y base de un pavimento flexible, utilizando el pavimento reciclado en mezcla con suelos naturales de características mecánicas bajas, que serán empleados como capa sub base y base en la construcción de una estructura de pavimentos.

1.2.3.2 Objetivos Específicos

- Realizar una recopilación exhaustiva, de la información existente sobre la utilización de ésta técnica tanto en Bolivia como en el extranjero.
- Analizar las técnicas de reciclado en pavimentos flexibles.
- Realizar un muestreo de material reciclado.
- Efectuar una caracterización del suelo natural, que será combinado con pavimento reciclado.
- Efectuar los ensayos de control de capas sub base y base con la incorporación de material reciclado.
- Comparar los resultados obtenidos de una muestra patrón con materiales reciclados mezclados con capas base y sub-base.
- Realizar el dimensionamiento de un pavimento flexible, con la aplicabilidad de capas sub base y base con material reciclado, estableciendo su influencia.
- Establecer conclusiones y recomendaciones para la aplicación de pavimentos reciclados en capas base y sub-base.

1.2.4 Hipótesis

Si realizamos una combinación de pavimento reciclado con suelo natural de características mecánicas bajas, y observamos una mejora en sus propiedades que cumplan con las especificaciones de capa sub base y base, entonces dimensionamos los espesores de la estructura de pavimentos flexible, haciendo factible su uso como material estabilizante.

1.2.5 Variables

1.2.5.1 Variable dependiente

La estructura de un pavimento flexible

Las capas sub base y base convencionales son utilizadas para la construcción de pavimentos flexibles, por lo tanto sus componentes deben cumplir con los estándares de calidad que exige la normativa del país, para que puedan ser usadas en obras de construcción vial.

1.2.5.2 Variable independiente

Combinaciones de pavimento reciclado con suelo natural de características mecánicas bajas, que conformaran las capas de la estructura de un pavimento flexible

Pudiéndose mezclar ambos materiales generando un mejoramiento de las propiedades mecánicas del suelo natural, que da lugar a la obtención de un nuevo material que cumple con las normas técnicas establecidas para capas sub base y base de la estructura del pavimento flexible.

1.3 Diseño Metodológico

1.3.1 Objeto de Estudio

La unidad de estudio es la reutilización del pavimento flexible reciclado, el cual será empleado para mejorar las propiedades de un suelo que se utilizará como una capa sub base o base de la estructura de un pavimento.

1.3.2 Población

El conjunto de capas que componen la estructura de un pavimento flexible.

1.3.3 Muestra

El pavimento flexible reciclado, que será utilizado para mejorar las propiedades de un suelo no apto para la conformación de capas sub base y base en un pavimento.

1.3.4 Muestreo

Se diseñaran mezclas para capa sub base y base, pavimento reciclado-suelo natural, con diferentes proporciones de material reciclado. Las cuales se les someterá a las pruebas de control para material de capa sub base y base de pavimentos según la norma técnica. Las mezclas se diseñaran de acuerdo TMN (tamaño máximo nominal) que mejor se ajusta a la granulometría del material para capa sub base y base, también por la cantidad de material reciclado que es incorporado a las mezclas, de no más de un 50%, si se sobrepasaría el 50%, seria con fines investigativos para observar el efecto que se tiene empleando mayor cantidad de material reciclado. En cuanto a la variación de porcentajes se realizara cada 10% debido a que de esta manera se podrá observar a mayor detalle el resultado de la variación de las propiedades de cada mezcla, dentro de las mezclas se consideraran las siguientes proporciones:

Combinación para capa sub base (reciclado - suelo natural)		
Mezcla	% Reciclado	% suelo natural
B	70	30
C	60	40
D	50	50
E	40	60
F	30	70

Tabla 1. 1 Tabla de Muestreo

Fuente: Elaboración propia

Combinación para capa base (reciclado – capa sub base)		
Mezcla	% Reciclado	% capa sub base
B-1	20	80
C-1	40	60
D-1	50	50
E-1	60	40

Tabla 1. 2 Tabla de Muestreo

Fuente: Elaboración propia

1.3.5 Tipo de Investigación

Investigación Explicativa: debido a que se va establecer relaciones entre las propiedades de los suelos naturales y las propiedades mecánicas del pavimento reciclado. Específicamente se tratara de establecer si hay una relación causa y efecto entre ambas variables, es decir si aumentamos los valores de la variable independiente mejoraría los valores de la variable dependiente.

1.3.6 Alcance

El alcance que se quiere lograr con el proyecto de investigación de la “**Influencia estructural en la aplicabilidad de pavimentos flexibles reciclados**”, es reducir los crecientes problemas ambientales, que se generan al retirar pavimentos de carreteras o vías urbanas en reparación o rehabilitación y aumentar la resistencia de las capas base y sub-base en el diseño de pavimentos, debido al incremento de las cargas por eje de los vehículos pesados que se generan por el desarrollo de la tecnología automotriz.

Posteriormente se debe considerar los fines que se persigue con la elaboración del proyecto, por medio de la definición de los objetivos generales y específicos, que deberán cumplirse a cabalidad, para lograr aplicar este método como un agregado que ayude a mejorar las propiedades mecánicas de la estructura de un pavimento.

Consecutivamente se presentará una introducción sobre los pavimentos flexibles y sus características, donde se estudiarán y definirán los componentes de los pavimentos flexibles, las características de las carpetas asfálticas entre ellas los tipos de carpetas, como también los métodos más usados en el dimensionamiento de pavimentos flexibles y su proceso de ejecución.

Así mismo, se definirá el reciclado en pavimentos flexibles, haciendo un estudio de las distintas técnicas de reciclaje que existen ya sea reciclado superficial, según el lugar o el reciclado en planta. Definiendo de esta manera la técnica empleada de reciclado para incorporar en capa sub-base y base.

De tal manera se hará un relevamiento de información de los tipos de suelos a ser mejorados, teniendo como punto de partida los ensayos patrón de estos suelos; como ser su granulometría, desgaste de los ángeles y su capacidad soporte C.B.R, para poder distinguir el aumento o la disminución de las propiedades de dichos suelos naturales.

Se procederá a la aplicabilidad de sub-bases y bases con material reciclado y su incidencia estructural, empezando con el muestreo del material reciclado, que vendrían a ser muestras representativas del pavimento flexible reciclado para su posterior uso. En el avance de este capítulo se desarrollara una caracterización de material granular para capas base y sub-base naturales, siguiendo las especificaciones según la norma boliviana, para luego realizar un proceso de mezclado de material de capa sub-base y base con el material reciclado en planta. Posteriormente se volverá a efectuar la caracterización de materiales de capa sub-base y base con la incorporación de material reciclado.

Una vez realizada el proceso de mezclado y la caracterización de materiales de capa base y sub base con la incorporación de material reciclado, se ejecutaran ensayos para determinar, el comportamiento en cada capa obteniendo resultados y una comparación con las propiedades de los suelos naturales, que conforma la estructura de pavimentos.

Finalmente analizar el cumplimiento de los intereses formulados inicialmente en el proyecto, tanto en los objetivos generales y objetivos específicos del proyecto contemplados en el primer capítulo, teniendo en cuenta que cada objetivo específico deberá estar relacionado a una conclusión. Por lo que realizando una observación global de todos los estudios y trabajos realizados, se especificará si los resultados serán satisfactorios en cuanto al desarrollo de nuevas metodologías para el aumento de las propiedades mecánicas y físicas de una estructura de pavimento y al mejoramiento del medio ambiente.

También estarán incluidas algunas recomendaciones para la utilización de esta metodología, acorde a la realización, y experiencia obtenida en la aplicación de la misma.

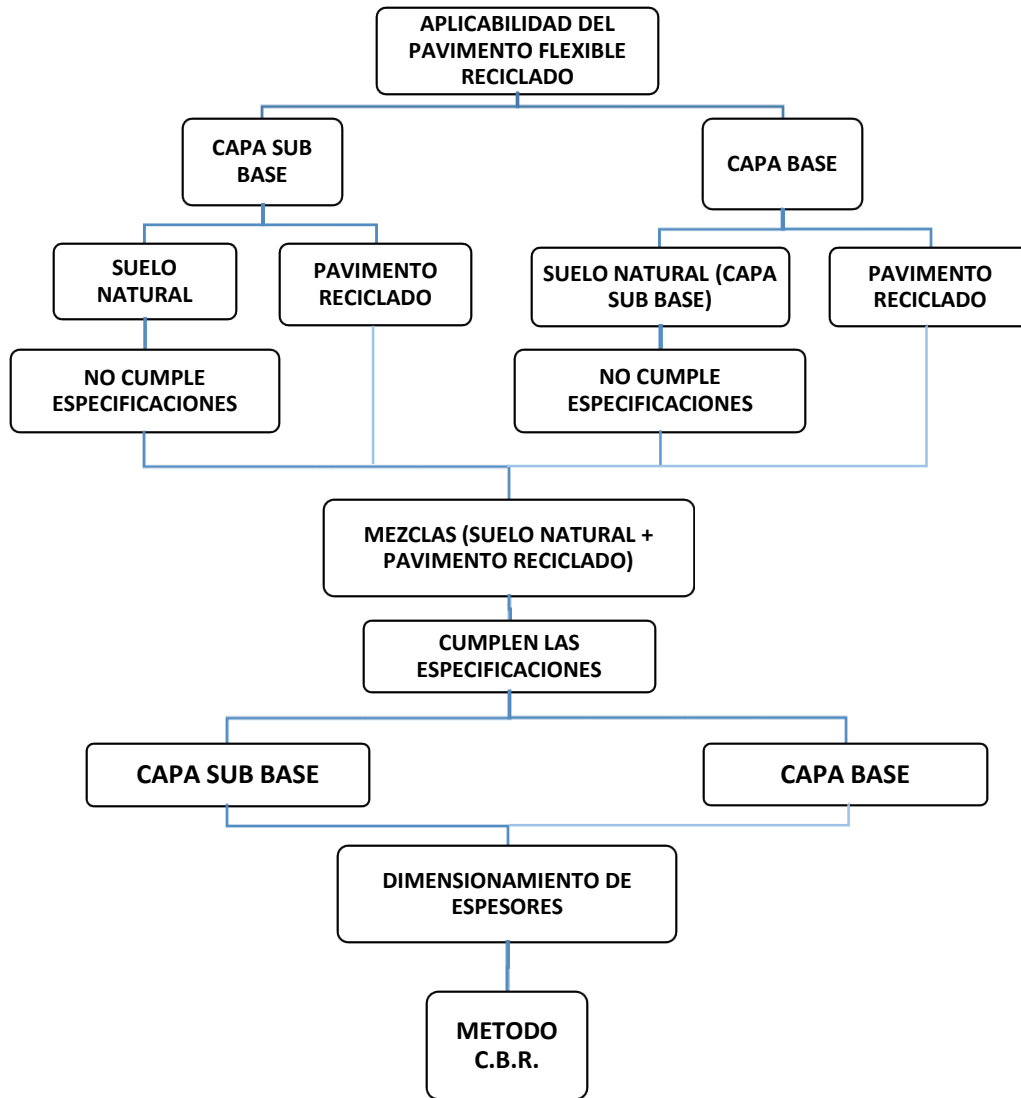
1.3.7 Medios y Metodología

1.3.7.1 Medios

El proyecto de investigación “**Influencia estructural en la aplicabilidad de pavimentos flexibles reciclados**” deberá comprender los siguientes medios para la elaboración del mismo:

- Recopilar información bibliográfica referente al estudio planteado. Esta información, se la obtendrá a través de revisión de libros, páginas web, etc.
- Determinar el área de estudio donde se realizara el reciclado del material. Lo cual se encontrara dentro del departamento de Tarija.
- El pavimento que será muestreado es procedente de las calles de la ciudad de Tarija y su chancado se realizara con una trituradora de conos.
- Los ensayos de caracterización de materiales serán realizados en los laboratorios del SEDECA.

1.3.7.2 Metodología



1.3.8 Aplicación de Instrumentos

1.3.8.1 Descripción de equipos

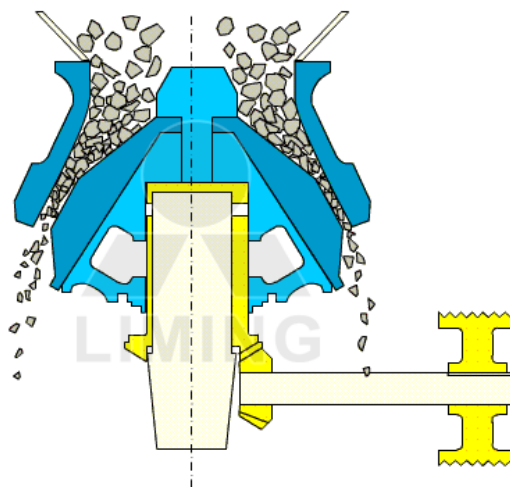
Cortadora de pavimento

Equipo de trabajo que se utiliza para cortar pavimentos mediante el movimiento rotatorio de un disco abrasivo.



Chancadora de cono

La chancadora de cono es una chancadora giratoria modificada, el objetivo de esta es retener el material por más tiempo en la cámara de chancado para realizar mayor reducción de este en su paso por la máquina.



Cuartheador de muestras

Su función está en dividir muestras de gran tamaño en dos partes representativas de la muestra original.



Juego de Tamices

Son utilizados para separar mezclas en las cuales se separan dos sólidos formados por partículas de tamaño diferente.

Tamaños nominales de abertura	
(mm)	ASTM
50	2"
37.5	1 1/2"
25	1"
19	3/4"
9.5	3/8"
4.75	N° 4
2	N° 10
0.425	N° 40
0.075	N° 200



Equipo de Casagrande y ranurador

Es un instrumento de medición utilizado en geotecnia e ingeniería civil, para determinar el límite de liquidez de un terreno.



Equipo para compactación Proctor modificado

Molde de 6" de diámetro y 5" de altura.

Martillo de 10 lb y 18" de caída libre

Es un instrumento que posibilita determinar la compactación máxima de un terreno en relación con su grado de humedad, condición que optimiza el inicio de la obra con relación al costo y el desarrollo estructural e hidráulico.



Capsulas para humedades con tapa



Equipo para C.B.R.

Molde Cilíndrico de base perforada y diámetro interior 6" y altura de 7".

Collarín de 2" de altura.



Disco espaciador de acero de 2,5" de altura.



Martillo de 10 lb y altura de caída de 18”.



Pesas anulares o en forma de herradura de 5lb.



Trípode y extensómetro



Prensa para ensayos C.B.R. manual digital

Prensa C.B.R. Celda de carga de 5000Kg e indicador digital, dial de 0.001" de penetración con su fijador mecánico, gato manual de dos velocidades, pistón de penetración, según Norma NTC 2122



Máquina de desgaste de los ángeles



2.1 Definición de pavimento

El pavimento es la parte superior del paquete estructural es el que recibe directamente las solicitaciones del tráfico, aporta las características funcionales y desde el punto de vista estructural, absorbe los esfuerzos horizontales y parte de los verticales. Los pavimentos de la vía urbana están constituidos por un conjunto de capas superpuestas relativamente horizontales y de varios centímetros de espesor de diferentes materiales adecuadamente compactados, estas estructuras estratificadas se apoyan en la superficie superior del cimiento y han de poder soportar las cargas de tráfico durante un periodo.

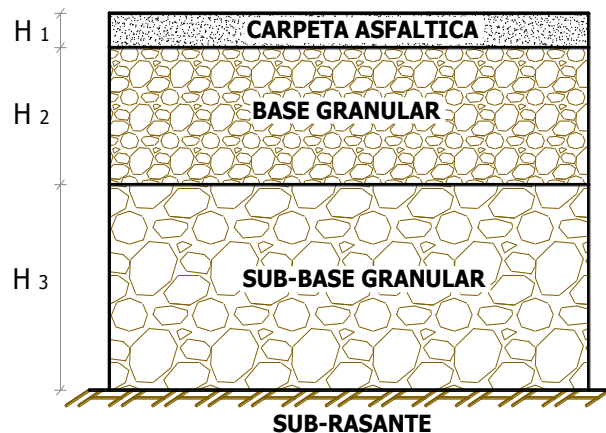


Figura 2. 1 Estructura de pavimento flexible

Fuente: Explanación y firmes Maestría de Ingeniería Vial. Bolivia -2006

2.1.1 Pavimento flexible

El pavimento flexible está caracterizado por tener en la parte superior, una capa bituminosa, apoyada sobre una o varias capas de gran flexibilidad (Base granular y Sub-base granular), las cuales transmiten los esfuerzos al terreno de soporte, mediante un mecanismo de disipación de tensiones, presiones que van disminuyendo en su magnitud, con la profundidad. Este tipo de pavimento, presenta las siguientes particularidades:

- Las capas granulares, se colocan para disminuir el espesor de la carpeta asfáltica.

- Se considera que los esfuerzos se han disipado, cuando el esfuerzo en un punto cualquiera, es menor que el 10% de la presión de contacto.
- Las magnitudes normales de los Módulos de las capas de esta clase de estructuras, están alrededor de:

-Carpeta Asfáltica	➡	25000 Kg/cm ²
-Base Granular	➡	2000 Kg/cm ² a 5000 Kg/cm ²
-Sub-base granular	➡	1000 Kg/cm ² a 3000 Kg/cm ²

- ❖ En pavimentos flexibles, apoyados sobre Sub-rasante fina, por ningún motivo, se debe omitir la Sub-base Granular.

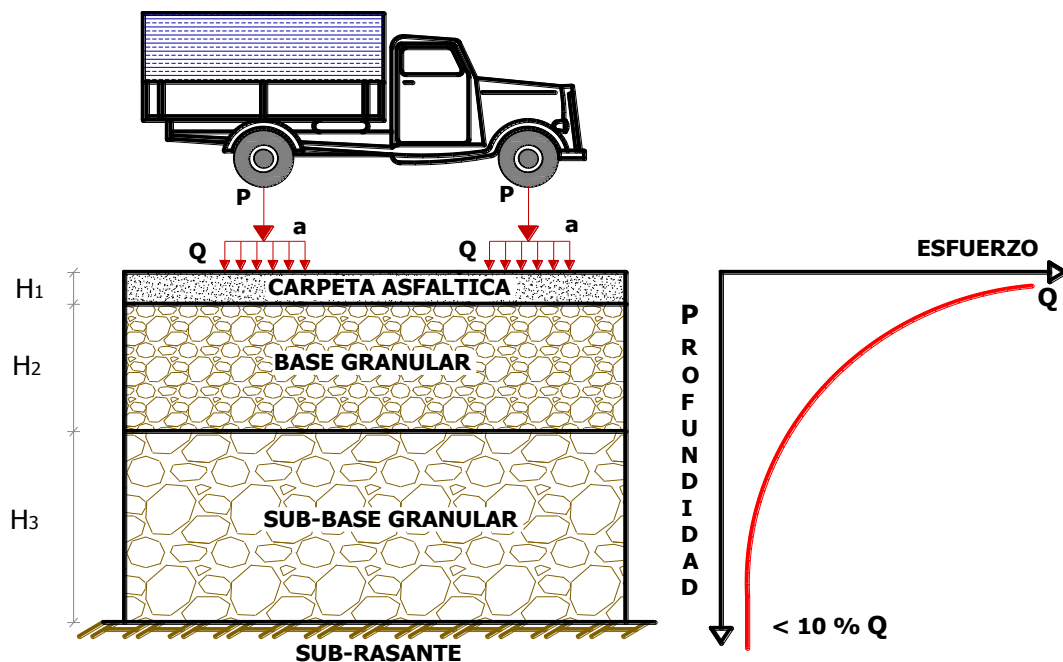


Figura 2. 2 Mecanismo de disipación de tensiones en Pavimentos Flexibles
Fuente: Explanación y firmes Maestría de Ingeniería Vial. Bolivia -2006

El pavimento flexible es una estructura con el fin de satisfacer los siguientes propósitos:

- Resistencia estructural.
- Deformabilidad.
- Durabilidad.

2.1.1.1 Resistencia estructural

La metodología teórica para el análisis de la resistencia de un pavimento es proporcionada por la mecánica de suelos y es sabido, que en ese campo, las teorías de falla de mayor aceptación por hoy son las de él esfuerzo cortante; como consecuencia, en el estudio de los pavimentos flexibles suele considerarse a los mismos esfuerzos como la principal causa de falla desde el punto de vista estructural.

Las teorías de capacidad de carga de la mecánica de suelos suelen referirse a medios homogéneos e isótropos; la heterogeneidad es la estructura de los pavimentos flexibles, así como su anisotropía, conducen a una primera incertidumbre en el planteamiento teórico de resistencia.

Además de los esfuerzos cortantes actúan en los pavimentos esfuerzos adicionales producidos por la aceleración y frenado de los vehículos y esfuerzos de tensión que se desarrollan en los niveles superiores de la estructura, a cierta distancia del área cargada, cuando esta se deforma verticalmente hacia abajo. De hecho, el problema de la resistencia plantea en general en relación con la estructura de los materiales del pavimento, pues aunque los materiales de la terracería sean de peor calidad, el espesor protector que el propio pavimento representa hace que los esfuerzos que llegan a aquellos niveles alcancen valores inferiores a la carga requerida para la falla de los suelos.

La determinación de la resistencia de los materiales que constituyen un pavimento es un problema difícil y no resuelto satisfactoriamente, influye en el no solo el tipo de suelo y su tratamiento, sino también su interacción con los efectos de la intemperie, de

los que la variación del contenido de agua es seguramente el más importante. Este contenido es necesario para el proyecto, que suele tender a definir la resistencia en esa condición crítica. Esta es otra de las incertidumbres básicas de diseño, que se ha resuelto a base de hipótesis más o menos justificadas por la experiencia, como considerar que el suelo llegará a saturarse, adquirirá una humedad de equilibrio, mantendrá la humedad óptima de compactación u otra próxima a ella.

Otro factor que influye substancialmente en la resistencia de los materiales es el tipo de carga que se les aplica y la velocidad con que ello se hace. Los pavimentos están sujetos a cargas móviles y los efectos de estas son menos conocidos y diferentes que los de las cargas estáticas; esto es otra fuente de incertidumbre que se ha tratado de resolver en los análisis teóricos (Boussinesq. Burinister, etc.), admitiendo que las cargas actuales son de tipo estático. En las pruebas de laboratorio y en los métodos de diseño en ellas fundados, la situación es un poco más realista, pues si bien las pruebas se realizan con cargas estáticas o con velocidades de aplicación muy lentas, su correlación para la obtención de normas de criterio se hace con el comportamiento real de los pavimentos bajo cargas móviles.

En resumen, la resistencia de los materiales que forman los pavimentos interesa desde dos puntos de vista:

- a)** En cuanto a la capacidad de carga que pueden desarrollar las capas constituyentes del pavimento para soportar adecuadamente las cargas del tránsito
- b)** En cuanto a la capacidad de carga de la capa sub rasante, que constituye el nexo de unión entre el pavimento y la terracería, para soportar los esfuerzos transmitidos y transmitir, a su vez, esfuerzos a la terracería a niveles convenientes.

Ambos puntos son de primordial importancia en la selección de los materiales que deben constituir las diferentes capas de pavimento.

2.1.1.2 Deformabilidad

En los pavimentos las deformaciones interesan como es usual en la Ingeniería, desde dos puntos de vista: Por un lado, porque las deformaciones excesivas están asociadas a estado de falla y, por otro lado, porque es sabido que un pavimento deformado puede dejar de cumplir sus funciones, independientemente que las deformaciones no hayan conducido a un colapso estructural propiamente dicho.

Las Cargas de él tránsito producen en el pavimento deformaciones de varias clases. Las elásticas son de recuperación instantánea y las plásticas que son aquellas que permanecen en el pavimento después de cesar la causa deformadora.

La deformación elástica repetida preocupa sobre todo en los materiales con resistencia a la tensión, colocados en la parte superior de la estructura, en los que puede llegar a generar falla por fatiga si el monto de la deformación es importante y los materiales susceptibles.

Bajo carga móvil y repetida La deformación plástica tiende a hacerse acumulativa y puede llegar a alcanzar valores inadmisibles.

Existe hoy una fuerte corriente de opinión en el sentido de que la deformabilidad de los pavimentos flexibles es un punto básico a considerar y, de hecho un buen número de métodos de diseño se centran en mantenerla en límites tolerables, el señalar estos límites se basa en normas de experiencia de grupos de Ingenieros.

Otro problema importante radica en medir la deformación que el pavimento va a sufrir realmente bajo la carga. Este problema debe considerarse en dos fases.

Primero, la estimación de las deformaciones elásticas, que es posible hacer con razonable precisión una vez conocidos los materiales que constituirán el pavimento, obteniendo su módulo de deformación por medio de alguna de las diversas pruebas de campo que hoy existen (pruebas de placa) y que pueden realizarse sobre terraplenes de prueba en las condiciones consideradas críticas.

La segunda base del problema de medición de deformaciones se refiere a las plásticas, efecto acumulativo de la carga repetida. Este aspecto se ha atacado con criterios puramente empíricos cuyo aprovechamiento por los métodos de diseño requiere de extrapolaciones experimentales; por ejemplo la diversidad de las cargas se refiere a una carga única, llamada estándar, resultado de estudios estadísticos en tramos experimentales o carreteros, sometidos a la acción del tránsito real á clasificado. Se intenta que la carga estándar, tome en cuenta el efecto de la repetición, pues al definirla se ha correlacionado su propio efecto destructivo con el que causarían las cargas reales de sus repeticiones respectivas. Una vez fijado el tránsito ‘de análisis’, lo que suele hacerse actualmente en todos los métodos de diseño que toman en cuenta estas cuestiones es prefijar con base experimental, una deformación permanente máxima y el pavimento de diseño de manera que ésta se presente únicamente al fin de la vida útil prevista.

Existen dos criterios para fijar la deformación máxima permisible; o bien se habla de la que produce la falla del camino, atendiendo por ésta la condición en la que el pavimento llega a perder las características de servicio para las que fue diseñado (criterio AASHO o de índice de servicio) o bien se toma en cuenta la deformación que obligue a una reconstrucción de determinada importancia económica (criterio británico).

2.1.1.3 Durabilidad

La durabilidad está ligada con una serie de factores económicos y sociales del propio camino.

En un camino de muy alto tránsito y gran importancia económica se requerirán pavimentos muy duraderos a fin de no tener que recurrir a costosas interrupciones de un tránsito importante.

Una vez fijado el criterio que proporcionan la duración deseada en el pavimento, surgen muchas incertidumbres de carácter práctico para lograrla; ya se ha mencionado que el

efecto del clima y del tránsito dista de estar bien establecido, de manera que su influencia en la vida del pavimento no puede definirse con exactitud.

Consecuentemente, los autores no conocen ningún método de diseño que tome en cuenta los requisitos de durabilidad de un modo cuantitativo, racional e independiente del sentimiento particular.

2.2 Composición de los pavimentos flexibles

Estos están constituidos por diferentes capas que son:

- Terreno de Fundación o Subrasante.
- Subrasante Mejorada.
- Capa Sub Base.
- Capa Base.
- Capa de Rodadura (Carpeta Asfáltica)

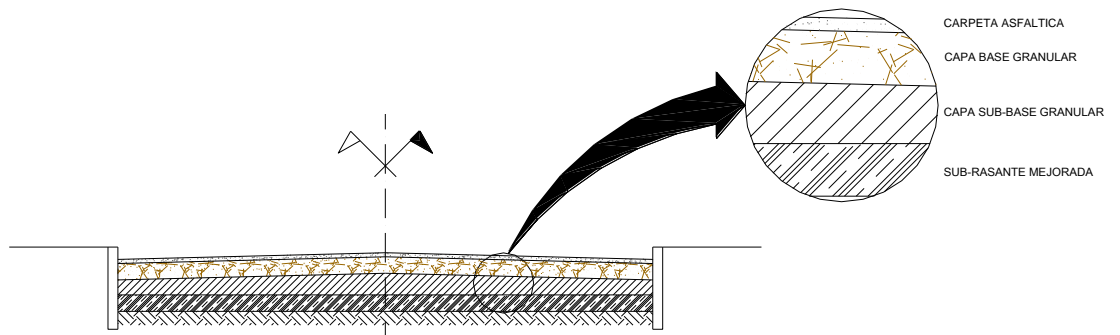


Figura 2. 3 Paquete estructural de pavimentos flexibles

Fuente: Explanación y firmes Maestría de Ingeniería Vial. Bolivia -2006

2.3 Capa Sub Rasante

2.3.1 Definición

Los últimos 30 cm de una terracería de corte o terraplén se conoce como Sub rasante. Esta capa es muy importante para los pavimentos y constituyen su cimiento. Generalmente está formada por el mismo suelo de la terracería. Es muy importante que el nivel de aguas freáticas este cuando menos a 1.50 m., debajo de ésta, esto se consigue drenando el subsuelo o elevando la Sub rasante.

Para diseñar adecuadamente un pavimento principalmente los de tipo flexible, se deben hacer extensos estudios del suelo de la Sub rasante, tanto en el campo como en el laboratorio. Comprende estudios de topografía, geología del ambiente y sobre todo de mecánica de suelos.

2.3.2 Funciones

La función de la sub-rasante es soportar las cargas que transmite el pavimento y darle sustentación, además de considerarse la cimentación del pavimento. Entre mejor calidad se tenga en esta capa el espesor del pavimento será más reducido y habrá un ahorro en costos sin mermar la calidad.

2.4 Capa Sub-Base

2.4.1 Definición

Es una capa, generalmente constituida por agregados pétreos convenientemente graduados y compactados, construida sobre la sub rasante, y sobre la cual puede construirse la base cuando sea necesaria.

Para muchos, una de las principales funciones de esta capa en un pavimento flexible es de carácter económico. Se trata de formar el espesor requerido del pavimento con el material más barato posible. Todo el espesor podría construirse con un material de alta calidad, como el usado en la base, pero se prefiere hacer aquella más delgada y sustituirse en parte por una sub-base de menor calidad, aun cuando esto traiga consigo

un aumento en el espesor total del pavimento, pues, naturalmente cuanto menor sea la calidad del material colocado será mayor el espesor necesario para soportar los esfuerzos transmitidos.

2.4.2 Funciones

Sus funciones son la de resistir las cargas de tránsito y transmitir las adecuadamente a las terracerías.

Otra función consiste en servir de transición entre el material de base, generalmente granular más o menos grueso y la propia sub rasante. La sub-base, más fina que la base, actúa como filtro de esta e impide su incrustación en la sub rasante.

La sub-base también se coloca para absorber deformaciones perjudiciales en la sub rasante, por ejemplo cambios volumétricos asociados a cambios de humedad, impidiendo que se reflejen en la superficie del pavimento.

Otra función de esta capa es la de actuar como dren para desalojar el agua que se infiltre a través de las capas superiores, y para impedir la ascensión capilar hacia la base, de agua procedente de la terracería.

2.4.3 Especificaciones y Características

Los materiales para subbase deberán cumplir con los requerimientos estipulados en

“Requerimientos generales” y en “Materiales para subbase” y con la graduación TM-50a de la Tabla S0102_2

En cuanto a las propiedades mecánicas, el material deberá tener un soporte CBR mayor o igual a 40% y la fracción gruesa deberá tener una resistencia al desgaste, medida por el ensayo de Los Ángeles de no más de 40%.

Tamiz		TM-50a	TM-50b	TM-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

Tabla 2. 1 Bandas granulométricas para sub base, bases y capas de rodadura

Fuente: Manual De Suelos Y Materiales *Suelos ABC

2.5 Capa Base

2.5.1 Definición

Es una capa intermedia entre la sub base y la carpeta del pavimento, generalmente constituida por agregados pétreos convenientemente graduados y compactados, pudiendo contener además un agente estabilizador. Aunque hay diversos estabilizadores, el de uso más generalizado es el cemento hidráulico.

2.5.2 Funciones

Hasta cierto punto existe en la base una función económica análoga a la comentada para el caso de La sub-base, pues permite reducir el espesor de la carpeta que viene a ser la capa más costosa. Pero la función fundamental de esta capa consiste en proporcionar un elemento resistente que transmita a la sub-base y a la sub rasante los esfuerzos producidos por el tránsito en una intensidad apropiada. La base en muchos casos debe también drenar el agua que se introduzca a través de la carpeta o por los acotamientos del pavimento, así como impedir La ascensión capilar. Además sirve como rodadura provisional.

2.5.3 Especificaciones y Características

Los materiales para base granular (estabilización hidráulica) cumplirán con los requerimientos indicados en “Requerimientos generales” y en “Materiales para sub base”. Las granulometrías deberán ajustarse a una de las siguientes bandas: TM-50b, TM-50c o TM-25 de la Tabla S0102_2; el porcentaje de chancado, no deberá ser menor que 50%. Cuando el material se use como base para tratamiento superficial doble el contenido mínimo de chancado será de 70%, su tamaño máximo absoluto será de 40 mm. y su Índice de Plasticidad máximo será de 4%, salvo que el proyecto estipule otro valor, debidamente justificado, el que en ningún caso podrá exceder el 6 %.

En cuanto a las propiedades mecánicas, el material deberá tener un soporte CBR 80%; la fracción gruesa deberá tener una resistencia al desgaste, medida por el ensayo de Los Ángeles, de no más de 35%. En caso de tratamiento superficial doble, el soporte deberá ser CBR \square 100%.

Tamiz		TM-50a	TM-50b	TM-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

Tabla 2. 2 Bandas granulométricas para sub base, bases y capas de rodadura

Fuente: Manual De Suelos Y Materiales *Suelos ABC

2.6 Ensayos de control para materiales de base y sub-base granular

2.6.1 Ensayos en materiales de capa sub-base

2.6.1.1 Granulometría

Este método permite, mediante tamizado, determinar la distribución por tamaños de las partículas mayores que 0,075 mm, de una muestra de suelo. Se procede por el análisis granulométrico por tamizado (ASTM D422 AASHTO T88)

2.6.1.2 Límites de Atterberg

Este método establece el procedimiento para determinar el límite líquido de los suelos, mediante la máquina Casagrande, que describe el procedimiento del ensayo (ASTM D4318 AASHTO T89)

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 máquina Casagrande y dividida en dos porciones simétricas separadas 2 mm entre sí, fluya y entren en contacto en una longitud de 10 mm, aplicando 25 golpes.

El límite plástico e índice de plasticidad (ASTM D4318 AASHTO T90), este método establece el procedimiento para determinar el Límite Plástico y el Índice de Plasticidad de los suelos.

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 3mm de diámetro se disgreguen en trozos de 0,5a 1cm de largo y no puedan ser reamasados ni reconstituidos.

2.6.1.3 Desgaste

El objetivo de la prueba de desgaste por medio de la Máquina de los Ángeles es determinar la resistencia a la trituración o abrasión de los materiales pétreos.

Para determinar la resistencia se hace actuar una carga abrasiva sobre la muestra de material que se desee analizar. La carga abrasiva la proveerán unas esferas metálicas estandarizadas que al interactuar con la muestra de material dentro de la máquina de los ángeles alterarán su composición granulométrica triturando el material, como resultado se tendrá una pérdida de material con respecto a su masa inicial que determinará la calidad del mismo ante el desgaste o la abrasión.

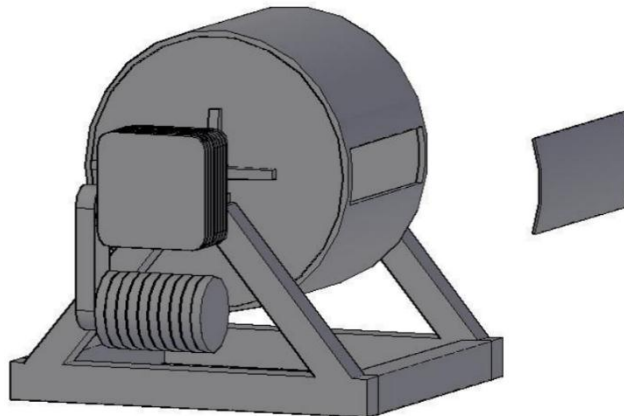


Figura 2. 4 Máquina de los Ángeles
Fuente: Elaboración propia

2.6.1.4 Compactación

El ensayo de compactación considerando familias de curvas método de un punto (AASHTO T272), 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 2,5 Kg. En caída libre desde una altura de 305 mm, con una energía específica de compactación de $0,59 \text{ J/cm}^3$ ($\square 6 \text{ kgf cm/cm}^3$). En los suelos que no permiten obtener una curva definida de relación humedad/densidad y que contengan menos de un 12 % de partículas menores que 0,075mm (Nº 200).

Se describen cuatro procedimientos alternativos:

- a) Método A - molde de 100 mm de diámetro: material de suelo que pasa por el tamiz de n 4,75mm (Nº 4).
- b) Método B - molde de 150 mm de diámetro: material de suelo que pasa por el tamiz de 4,75mm (Nº 4).
- c) Método C - molde de 100 mm de diámetro: material de suelo que pasa por el tamiz de 19mm (3/4’’).
- d) Método D - molde de 150 mm de diámetro: material de suelo que pasa por el tamiz de 19mm (3/4’’)

2.6.1.5 Resistencia C.B.R.

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

Este método se utiliza para evaluar la capacidad de soporte de suelos de subrasante, como también de materiales empleados en la construcción de terraplenes, subbases, 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.

2.6.2 Ensayos en materiales de capa base

2.6.2.1 Granulometría

Este método permite, mediante tamizado, determinar la distribución por tamaños de las partículas mayores que 0,075 mm, de una muestra de suelo. Se procede por el análisis granulométrico por tamizado (ASTM D422 AASHTO T88)

2.6.2.2 Límites de Atterberg

Este método establece el procedimiento para determinar el límite líquido de los suelos, mediante la máquina Casagrande, que describe el procedimiento del ensayo (ASTM D4318 AASHTO T89)

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 máquina Casagrande y dividida en dos porciones simétricas separadas 2 mm entre sí, fluya y entren en contacto en una longitud de 10 mm, aplicando 25 golpes.

El límite plástico e índice de plasticidad (ASTM D4318 AASHTO T90), este método establece el procedimiento para determinar el Límite Plástico y el Índice de Plasticidad de los suelos.

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 3mm de diámetro se disgreguen en trozos de 0,5a 1cm de largo y no puedan ser reamasados ni reconstituidos.

2.6.2.3 Desgaste

El objetivo de la prueba de desgaste por medio de la Máquina de los Ángeles es determinar la resistencia a la trituración o abrasión de los materiales pétreos.

Para determinar la resistencia se hace actuar una carga abrasiva sobre la muestra de material que se desee analizar. La carga abrasiva la proveerán unas esferas metálicas estandarizadas que al interactuar con la muestra de material dentro de la máquina de los ángeles alterarán su composición granulométrica triturando el material, como resultado se tendrá una pérdida de material con respecto a su masa inicial que determinará la calidad del mismo ante el desgaste o la abrasión.

2.6.2.4 Compactación

El ensayo de compactación considerando familias de curvas método de un punto (AASHTO T272) , 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 2,5 Kg. En caída libre desde una altura de 305 mm, con una energía específica de compactación de $0,59 \text{ J/cm}^3$ (6 kgf cm/cm^3). En los suelos que no permiten obtener una curva definida de relación humedad/densidad y que contengan menos de un 12 % de partículas menores que 0,075mm (Nº 200)

Se describen cuatro procedimientos alternativos:

- a) Método A - molde de 100 mm de diámetro: material de suelo que pasa por el tamiz de n 4,75mm (Nº 4).
- b) Método B - molde de 150 mm de diámetro: material de suelo que pasa por el tamiz de 4,75mm (Nº 4).
- c) Método C - molde de 100 mm de diámetro: material de suelo que pasa por el tamiz de 19mm (3/4”).

d) Método D - molde de 150 mm de diámetro: material de suelo que pasa por el tamiz de 19mm (3/4")

2.6.2.5 Resistencia C.B.R.

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

Este método se utiliza para evaluar la capacidad de soporte de suelos de sub rasante, como también de materiales empleados en la construcción de terraplenes, sub bases, 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.

2.7 Características de las carpetas asfálticas

La carpeta asfáltica en general es una mezcla de agregado seleccionado más material asfáltico, dependiendo de la forma y de las características de conformación las carpetas asfálticas pueden ser tipo, concreto asfáltico, macadán asfáltico, mezclas en el lugar, tratamientos superficiales y emulsiones asfálticas.

Las carpetas asfálticas también pueden dividirse en: Carpetas asfálticas en caliente, carpetas asfálticas en frío.

2.7.1 Carpetas asfálticas en caliente

Son aquellos cuya característica principal es que en el proceso de elaboración los elementos que se utilizan que para conformar la mezcla están sometidos a un proceso de calentamiento que deben alcanzar a temperaturas mayores a los 140° siendo este posible solamente utilizando plantas estacionarias que producen mezclas asfálticas en

caliente o carros diluidores preparados específicamente para el calentamiento de asfaltos y su correspondiente distribución o regado.

2.7.2 Carpetas asfálticas en frío

Son aquellos que tienen como característica fundamental la utilización de asfaltos diluidos a temperatura ambiente sin que se produzcan ningún calentamiento de ninguno de los elementos para ello se hace uso de emulsiones asfálticas que son una mezcla del asfalto, un emulsor químico y agua, para su ejecución se utilizan los carros regadores o distribuidores de asfaltos diluidos.

Como se puede evidenciar que para producir una carpeta asfáltica el elemento fundamental es el asfalto cuyo producto para utilizarlo en mezclas asfálticas se denomina cemento asfáltico (C.A.)

2.7.3 Tipos de carpetas asfálticas

Las carpetas empleadas en los pavimentos flexibles se pueden clasificar así:

- Tratamientos superficiales
- Macadam asfáltico
- Mezcla en el lugar
- Concreto Asfáltico dosificado por peso en planta, y empleando cemento asfáltico y agregados calientes.

Antes de explicar en qué consiste cada una de las carpetas asfálticas ya indicadas, es necesario hacer notar que para construir cualquiera de ellas, se debe contar de antemano con una base debidamente conformada, compactada, impregnada y seca.

El riego de impregnación consiste en lo siguiente: Estando la base seca, se barre para retirarle el material suelto y el exceso de polvo de la superficie, Inmediatamente se le da un riego de producto asfáltico de fraguado medio a razón de 1,5 litros por metro cuadrado, esperando unos días para que penetre y seque. El número del fraguado medio a emplear depende de la textura de la base.

2.7.3.1 Tratamientos superficiales

Estos pueden ser:

- Simple o de un riego.
- Doble o de dos riegos
- Triple o de tres riegos.

2.7.3.1.1 Tratamientos superficiales simple o de un riego

Sobre la base de pavimento ya conformada, compacta, impregnada y seca se da un riego de producto asfáltico del tipo FR-3 a razón de 1,5 a 2 litros por metro cuadrado, e inmediatamente se cubre con material pétreo número 3A (clasificado entre las mallas de 3/8" a # 8) a razón de 6 a 8 litros por metro cuadrado; se rastrea para uniformar la superficie y se plancha con plancha liviana de 5 a 8 Tn. pudiendo abrirse al tránsito unos días después, debiendo barrerse de la superficie el material pétreo sobrante para evitar que vaya a ayudar a formar ondulaciones en la carpeta. Esta carpeta asfáltica es aconsejable para tránsito inferior a 200 vehículos por día. En zonas de alta precipitación pluvial, conviene mejor colocar un tratamiento superficial doble como se indica a continuación, para mayor eficiencia y duración del pavimento. Si se emplea emulsión asfáltica puede emplearse de 1,3 a 1,4 lts. Por metro cuadrado y de 10 a 12 lts/m² de material pétreo 3A ó 3E. Una secuencia fotográfica del tratamiento superficial simple se puede ver en la página siguiente. Si se desea usar un mortero asfáltico como tratamiento superficial puede hacerse con arena 100%, emulsión 12 a 15 %, agua 15 a 18 % y filler de 1 a 3%. El filler puede ser cal o cemento.

2.7.3.1.2 Tratamientos superficiales Doble o de dos riegos

Sobre la base de pavimento ya formada, impregnada y seca, se da un riego de producto asfáltico tipo FR-3 a razón de 2 litros por metro cuadrado e inmediatamente se cubre con material pétreo numerados (clasificados entre las mallas de 1/2" y 1/4") a razón de unos 12 a 14 litros por metro cuadrado, se rastrea y se plancha con aplanadora liviana

de 5 a 8 Tn de peso. Dos o tres días después se barre y se le da un nuevo riego de producto asfáltico tipo FR-3 a razón de 1,5 a 2 litros por metro cuadrado y se cubre inmediatamente con material pétreo # 3B (clasificado entre las mallas de ¼” y #8), se rastrea para uniformar la superficie y se plancha con aplanadora pequeña de 5 a 8 Tn. de peso. Tres días después puede abrirse el tránsito. Posteriormente debe retirarse el material pétreo sobrante. Este tipo de carpeta asfáltica es aconsejable para un tránsito inferior a 600 vehículos por día. Si se emplea emulsión asfáltica puede usarse en el primer riego la cantidad de 1,2 lts/m² de emulsión cubriéndola con 7 lts/m² de material pétreo 3B.

2.7.3.1.3 Tratamientos superficiales Triple o de tres riegos

La carpeta Asfáltica formada por tres riegos se construye de la siguiente manera:

Sobre la base de pavimento conformada, impregnada y seca se da un riego de producto asfáltico del tipo de FR-3 a razón de 2,5 litros por metro cuadrado e inmediatamente se cubre con material pétreo número 1 (clasificado entre mallas 1” y 2/2”) a razón de 20 a 22 litros por metro cuadrado, se rastrea y se plancha con aplanadora pequeña de 5 a 8 Tn de peso. Dos o tres días después se barre el material pétreo sobrante y se coloca una carpeta de tres riegos. Esta carpeta asfáltica admite perfectamente bien los 1000 vehículos por día.

2.7.3.2 Macadam asfáltico

El macadán asfáltico o de penetración es una carpeta asfáltica que consiste de capas sucesivas de piedras progresivamente más pequeñas de abajo hacia arriba, limpias y angulosas. Cada capa se extiende y se acuña mediante compactación por vibración después de lo cual se baña con producto asfáltico.

Es necesario contar con una buena base ya que siendo el macadam asfáltico una carpeta que presenta gran porcentaje de vacíos, principalmente en la parte inferior de la capa, si la base se reblandece, el paso constante de los vehículos obligará a que la base se incruste en la carpeta provocándose una deformación perjudicial.

El orden de las operaciones de construcción es el siguiente:

Encontrándose la base debidamente compactada, impregnada, limpia y seca se da la primera aplicación de agregado grueso con un esparcidor o con una tolva esparcidora adaptada a un camión de volteo. Esta capa se compacta con aplanadora de 10 a 12 Tn de peso o preferentemente con un vibrador, para acomodar el agregado en su sitio. Estando compactada esta capa, se le da una aplicación de producto asfáltico. Viene la segunda aplicación de agregados de tamaño menores y en menor cantidad esparcido uniformemente para llenar los huecos dejados en la primera capa. Deben emplearse rastras para ayudar a distribuir este agregado de cierre. Sigue inmediatamente la compactación con aplanadora de 10 a 12 Tn de peso según vibrador, mientras el asfalto está todavía caliente para lograr así una mejor unión. Se da entonces la nueva aplicación del mismo producto asfáltico aplicado en menor cantidad y de inmediato una cantidad y tamaño aún menor de agregado de cierre que actúa como riego de sello. Se da luego una combinación de rastra y compactación con el fin de llenar los huecos y tener una textura uniforme. El primer material pétreo empleado se conoce como material fino. Se han descrito con anterioridad tres pasadas que es el número corriente, pero pueden ser cuatro o más. El producto asfáltico empleado es generalmente el FR-3, entre 65°C y 95°C, pero puede emplearse cualquier tipo según el clima. El agregado grueso del tamaño retenido en la malla 1 – 1/8” no contendrá más del 5% de cantos planos o alargados cuya longitud exceda de tres veces su dimensión menor.

Las cantidades de materiales a emplear pueden ser las siguientes:

Agregado grueso	100 Kg/m ²
Producto Asfáltico FR-3	3.5 a 5 lts/m ²
Agregado de encaje	20 kg/m ²
Producto Asfáltico FR-3	1.5 a 2.0 lts/m ²
Agregado fino	10 kg/m ²

Las cantidades anteriores son aproximadas, dependiendo de los huecos de la superficie, de la porosidad del agregado pétreo y de su peso volumétrico.

2.7.3.3 Mezcla en el lugar

La mezcla asfáltica en el lugar o en el camino se lleva a cabo revolviendo los agregados pétreos con el producto asfáltico mediante el uso de moto-conformadoras o empleando mezcladoras ambulantes. El procedimiento a seguir es el siguiente:

Estando la base conformada, compactada, impregnada y seca se acordara el material pétreo (que con anterioridad haya sido aprobado por un laboratorio por cumplir con las especificaciones de desgaste, granulometría, adherencia, etc.) y después se extenderá en una capa de espesor uniforme a lo largo del camino y se darán riegos sucesivos de producto asfáltico a razón de 3 a 4 litros por metro cuadrado hasta completar la cantidad determinada como óptimo por medio de pruebas de laboratorio. Se puede agregar al asfalto un aditivo a razón de 0.5 al millar para darle trabajabilidad aun a temperatura baja de la mezcla (10°C).

Después de cada riego de producto asfáltico sobre el material pétreo, se procederá a voltear éste con la moto-conformadora con el objeto de que se mezcle bien el producto asfáltico con el material pétreo.

Al final del mezclado el material debe presentar aspecto uniforme.

2.7.3.4 Concreto asfáltico

Los concretos asfálticos son mezclas elaboradas por peso en plantas estacionarias, calentando los agregados y empleando en su elaboración cementos asfálticos. Los concretos asfálticos, debido a la precisión de su dosificación resultan de alta calidad. El agregado pétreo para la mezcla es secado y calentado entre 135° (275°F) y 177°C (350°F) en la planta antes de entrar en la mezcladora. Después de calentado, el agregado se cribará en los tamaños especificados, que se depositarán en compartimientos, listos para ser mezclados con el cemento asfáltico. Una vez

calentados y separados los diversos tamaños de agregado, se procederá a pesarlos exactamente, proporcionando sus cantidades de acuerdo con lo anteriormente explicado, de manera que la mezcla resultante se ajuste a la granulometría especificada. El material pétreo dosificado se introduce en la mezcladora y a continuación se añade el cemento asfáltico para proceder al mezclado. El cemento asfáltico se calienta en pailas o tanques apropiados que produzcan calentamiento uniforme. No deberá calentarse a más de 177°C (350°F). La cantidad de cemento asfáltico la fija el laboratorio.

La temperatura de la mezcla al salir de la mezcladora estará comprendida entre 135°C (275°C) y 177°C(350°F). El tiempo de mezclado se cuenta desde el momento en que se termine de introducir el cemento asfáltico hasta que la mezcla salga de la mezcladora. En el caso de plantas de mezclado continuo, el tiempo de mezclado, en segundos, vendrá dado por la formula en relación de la capacidad total de la planta en kilos entre kilos por segundo que salen de la planta.

2.8 Dimensionamiento de pavimentos flexibles

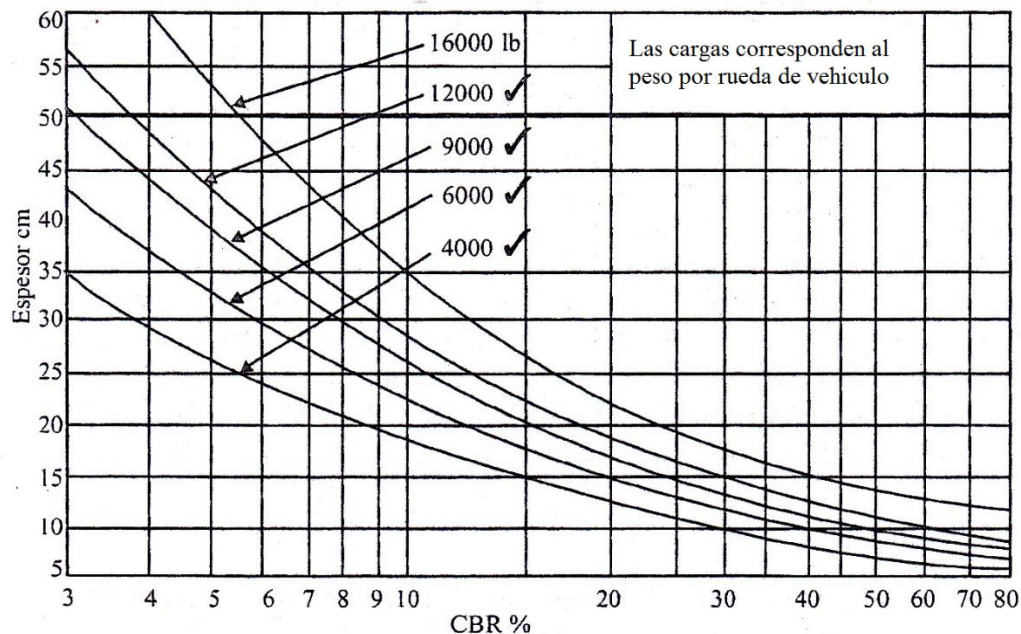
El dimensionamiento de los pavimentos del tipo flexible se puede determinar empleando diferentes métodos:

- ❖ Método C.B.R.
- ❖ Método AASTHO

2.8.1 Método C.B.R.

El método del C.B.R. es uno de los más utilizados en nuestro medio parte del principio de que los espesores del pavimento están en función al valor soporte de los materiales de cada capa por lo que a través de un ensayo común de C.B.R. se determina los C.B.R. de las subrasantes, sub base, base una vez obtenidos estos resultados se determina el C.B.R. de diseño para una deformación de 0.1” ó 0.2” cuando la variación de esta es un porcentaje mayor a 20. Se establece una carga de diseño patrón que normalmente

es de 18000 lb ó 8.2 ton. Y se entra en ábacos ya confeccionados de C.B.R para determinar el espesor necesario para las capas superiores.



Grafica 2. 1 Abaco C.B.R.

Fuente: Vías de Comunicación - CRESPO VILLALAZ - Edición 2005

2.8.2 Método AASTHO

Este método AASTHO nace en el año 1965 bajo un proyecto encargado por el gobierno de los Estados Unidos para que se encargue la temática de carreteras en general bajo este proyecto uno de los componentes era uno de los objetivos a estudiar se hacen innumerables experiencias a lo largo de varios años en un circuito experimental donde se trata de determinar la influencia que tiene cada uno de los parámetros o variables que intervienen para el dimensionamiento del pavimento flexible después de varios estudios de comparación se llega a establecer la ecuación matemática que gobierna el método AASTHO para el dimensionamiento de espesores de capa, a partir de 1986 cada cinco años se reúne el comité de AASTHO para ver los cambios modificaciones y avances que pueden tener el método a partir de nuevas experiencias en el momento

se ha convertido el método AASTHO en un método mundialmente utilizado y es el más importante para dimensionamiento de pavimentos.

Un apoyo que ha recibido el método en los últimos años es la presencia de programas informáticos que facilitan su utilización y permiten el dimensionamiento rápido bajo este método.

Procedimiento.

Para la aplicar la metodología del método AASTHO existen tres posibilidades

- a. Utilizando la fórmula matemática
- b. Utilizando ábacos y monogramas
- c. Utilizando programas computacionales

La fórmula básica que tiene el método AASTHO después de todas las modificaciones realizadas es la siguiente:

$$\log W_{18} = Z_r \times S_o + 9.36 \times \log (SN+1) - 0.20 + \frac{\log \left[\frac{\Delta PSI}{4.2 - 1.5} \right]}{1094} + 2.32 \times \log M_R - 8.07$$

$$0.40 + \frac{1}{(SN+1)^{5.19}}$$

W_{18}	=	Número esperado de repeticiones de ejes equivalentes a 8.2 tn en el periodo de diseño.
Z_r	=	Desviación Estándar del error combinado en la predicción del tráfico y comportamiento estructural.
S_o	=	Desviación Estándar Total
Δ_{PSI}	=	Diferencia entre la Serviciabilidad Inicial (P_o) y Final (P_t).
M_r	=	Módulo Resiliente de la Sub-rasante (psi)
SN	=	Número Estructural, indicador de la Capacidad Estructural requerida (materiales y espesores).
a_i	=	Coficiente Estructural de la capa i
D_i	=	Espesor de la Capa i
m_i	=	Coficiente de Drenaje de la Capa Granular i

Carga equivalente W_{18}

El método AASTHO establece como patrón un vehículo tipo cuya carga es de 18000 lb ó 8.2 tn. Para ello normalmente el tráfico que tiene una carretera tiene una diversidad de vehículos todos con diferente carga por lo que el método establece que nominalmente debe llevarse a cabo vehículo a su equivalente en el vehículo tipo esta convención se realizará en función de la información del tráfico que se tenga y su clasificación además de realizarse una conversión al vehículo tipo debe estimarse su proyección para la vida útil de la carretera que normalmente va a ser de 15 a 20 años.

Para la guía AASHTO corresponde al EAL afectado por coeficientes que representan el sentido y el número de carriles que tendrá la vía

$$W_{18} = D_D * D_L * EAL$$

EAL = Número de ejes equivalentes a 8.2 tn en el periodo de diseño.

D_D = Es un factor de distribución direccional. Por lo general se considera 0.5

D_L = Está dictado por el siguiente cuadro

NÚMERO DE LÍNEAS EN CADA DIRECCIÓN	PORCENTAJE PARA EJES DE 8.2 TN EN CADA DIRECCIÓN
1	100
2	80-100
3	60-80
4	50-75

Tabla 2. 3 Factor Carril
Fuente: Manual de la AASTHO

Valor estadístico de la confiabilidad Z_r

Es una variable probabilística que nos indica la confiabilidad que puede tener el pavimento en su vida útil bajo las condiciones de tráfico y carga a la que estará sometido es importante la selección un nivel de confiabilidad en el momento de realizar el diseño si le damos una alta confiabilidad nos va a dar valores de espesores menores, mientras si le dan una confiabilidad baja los valores de los espesores serán mayores, esto implica una relación con el costo es decir a menor confiabilidad menor costo, para ello es importante saber el grado de utilización que va a tener la carretera.

CLASIFICACIÓN GENERAL	NIVEL DE CONFIABILIDAD RECOMENDADOS	
	URBANO	RURAL
Autopista y Carreteras	85-99,9	80-99,9
Otras Arterias Principales	80-99	75-95
Colectores	80-95	75-95
Locales	50-80	50-80

Tabla 2. 4 Nivel de confiabilidad
Fuente: Manual de la AASTHO

CONFIABILIDAD	DESVIACIÓN ESTÁNDAR
R(%)	NORMAL (ZR)
50	- 0,00
60	- 0,253
70	- 0,524
75	- 0,674
80	- 0,841
85	- 1,037
90	- 1,282
-	-
-	-
99,99	- 3,750

Tabla 2. 5 Desviación Estándar

Fuente: Manual de la AASTHO

Valor estadístico S_0 .-

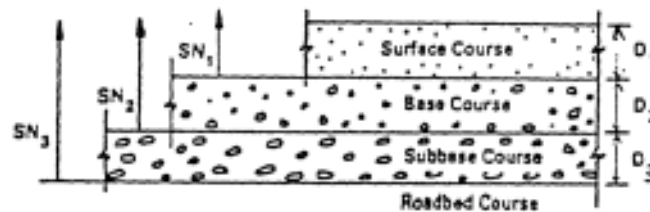
Es un valor de desviación standard que nos indica la variación que podríamos tener en el resultado de los espesores de diseño tomando en cuenta que estos pueden variar de acuerdo a las condiciones cuanto menor sea la desviación standard más próximos estaremos al valor medio. Los valores más usados para este coeficiente estadístico son de 0,44 para pavimento flexible cuando se considera la variación del tráfico a futuro pero este puede variar entre:

0,40 – 0,45 Pavimentos Flexibles

Número estructural del pavimento SN .-

Esta variable a determinar por esta ecuación es decir lo que pretende el método AASTHO es encontrar el valor numérico que sea el representativo para un determinado pavimento que asegure su resistencia estructural ante las cargas y condiciones a las que estará sometida, este número estructural a su vez tiene una ecuación de equilibrio cuya relación es la siguiente:

$$SN = a_1 * D_1 + a_2 * D_2 * m_1 + a_3 * D_3 * m_2$$



Dónde:

a_1, a_2, a_3 = Coeficientes de capa

D_1, D_2, D_3 = Espesores de capa

m_2, m_3 = Coeficiente de drenaje por capa

CARACTERÍSTICAS DE DRENAJE	AGUA ELIMINADA EN	PORCENTAJE DE TIEMPO EN EL AÑO, QUE LA ESTRUCTURA DEL PAVIMENTO ESTA EXPUESTA A UN NIVEL DE HUMEDAD PROXIMA A LA SATURACIÓN			
		< 1%	1% - 5%	5% -25%	>25%
Excelente	2 horas	1.40 – 1.35	1.35 – 1.30	1.30 – 1.20	1.20
Bueno	1 día	1.35 – 1.25	1.25 – 1.15	1.15 – 1.00	1.00
Regular	1 semana	1.25 – 1.15	1.15 – 1.05	1.00 – 0.80	0.80
Pobre	1 mes	1.15 – 1.05	1.05 – 0.80	0.80 – 0.60	0.60
Muy Malo	No drena	1.05 – 0.95	0.95 – 0.75	0.75 – 0.40	0.40

Tabla 2. 6 Coeficiente de drenaje

Fuente: Manual de la AASTHO

RANGO DE TRÁFICO	CONCRETO ASFÁLTICO	ESPESOR DE BASE
MENOS DE 50.000	1 (Tratamiento Superficial)	4
50.001 – 150.000	2,0	4
150.001 – 500.000	2,5	4
500.001 – 2`000.000	3,0	6
2`000.001 – 7`000.000	3,5	6
Mayor a 7`000.000	4,0	6

Tabla 2. 7 Espesores mínimos en pulgadas

Fuente: Manual de la AASTHO

Variabilidad de la serviciabilidad ΔPSI

Un pavimento debe ser medido de acuerdo a la serviciabilidad que presenta cuando el mismo ya está en servicio el método un nivel cinco en la condición de perfecto (ideal) y cero en la condición pésima por fines de cálculo se establece como nivel de serviciabilidad inicial 4.2 para pavimento flexible y de acuerdo al deterioro esperado por un pavimento, la serviciabilidad final extrema en condiciones aceptables para pavimentos flexibles será de 2.5 por lo tanto la variabilidad de la serviciabilidad será la diferencia entre la serviciabilidad inicial menos la serviciabilidad final

$$\Delta PSI = \text{serviciabilidad inicial} - \text{serviciabilidad final}$$

Módulo resiliente de la subrasante

Los últimos años el método AASTHO a cambiado de concepto del valor soporte (C.B.R.) Al módulo resiliente (MR) que aunque el concepto el objeto final es de tener un valor indicativo de la capacidad portante del terreno de fundación o subrasante la determinación y el principio del módulo resiliente es diferente al del C.B.R.

$$MR = K * CBR$$

El módulo resiliente se determina a partir del conocimiento del valor soporte CBR y un coeficiente K que para el método AASTHO puede variar

Si $CBR < 10$ $K = 1500$ pero este valor puede variar entre 750 y 3600 para MR en Psi.

Otras correlaciones desarrolladas en Sudáfrica y utilizadas ampliamente en Venezuela y Chile son las siguientes:

$$MR = 17.6 * CBR^{0.64}$$

MR en Mpa y CBR en %, para suelos finos $CBR < 12$

$$MR = 22.1 * CBR^{0.55}$$

MR en Mpa y CBR en % suelos granulares $12 < CBR < 80$

2.9 Definición de reciclado

Reciclar es cualquier proceso donde materiales de desperdicio son recolectados y transformados en nuevos materiales que pueden ser utilizados o vendidos como nuevos productos o materias primas.

El reciclado de pavimentos es una técnica de rehabilitación de carreteras que consiste en la reutilización de materiales procedentes de las capas que conforman el paquete estructural del pavimento que ya han estado en servicio: materiales que han perdido algunas de sus propiedades iniciales por el uso o envejecimiento (cohesión, textura, composición, geometría) pero que tienen el potencial de ser reutilizados para integrar nuevas capas.

La estimación de durabilidad de una carretera, en función de sus parámetros básicos de deterioro (fisuras, regularidad superficial, capacidad estructural, resistencia al deslizamiento, roderas y textura) es un fenómeno complejo en el cual influyen las cargas de tráfico, la climatología, el grado de envejecimiento del ligante y la calidad de la ejecución (incluidos sus materiales) de la carretera.

Las carreteras, como cualquier otra infraestructura, necesitan una serie de actuaciones de mantenimiento y conservación, con cierta periodicidad, con objeto de dotar de unas condiciones mínimas de servicio a su estado superficial y estructural.

En este sentido, se enmarca la técnica de reciclado de carreteras, cuya principal función es el aprovechamiento de los materiales existentes que la componen.



Figura 2. 5 Pavimento deteriorado



Figura 2. 6 Pavimento deteriorado

En la figura 4.1 y figura 4.2 se puede observar un detalle de una carretera deteriorada, que no hace otra cosa que indicar que se trata de una estructura de pavimento susceptible de ser rehabilitado.

2.10 Campos de aplicación del reciclaje

El reciclado de pavimentos puede emplearse en aquellos casos en que las fallas puedan 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 falla de adherencia con el asfalto o bien por el envejecimiento del mismo.
- c) Deformaciones plásticas que producen ahuellamiento, ondulaciones, etc. Esto es atribuible, principalmente a mezclas con baja estabilidad.
- d) Pulimento de los agregados superficiales que disminuye la resistencia al deslizamiento de la capa de rodamiento.
- e) 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.
- f) Fisuras y grietas ocasionadas por fatiga de la capa asfáltica (piel de cocodrilo), o bien por contracción producida por defectos térmicos (fisuramiento transversal).

2.11 Tipos de reciclaje de pavimentos flexibles

Varias son las técnicas para la renovación de los pavimentos, deteriorados por el efecto combinado de la circulación repetida, sobre todo de vehículos pesados y las inclemencias del tiempo, que provocan el envejecimiento del pavimento y lo convierten en un elemento frágil, ocasionando la aparición de grietas y fisuras que contribuyen a su rápida degradación.

Se designa como reciclaje, al proceso de un material que aparentemente ha terminado su uso inicial, y mediante tratamientos específicos, se obtiene un material con características similares al original, de tal forma que se reutilice en la destinación inicial o en otra diferente.

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

2.11.1 Reciclaje superficial

Consiste en el tratamiento de la superficie del pavimento en bajos espesores, generalmente no superiores a los 2.5 cm, en casos en que los deterioros del pavimento no sean atribuibles a deficiencias estructurales.

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 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 abultamientos producidos por el empleo de mezclas asfálticas de baja estabilidad. El retiro de esta delgada capa puede ser de carácter provisional hasta que se decida extender una nueva capa asfáltica o bien puede ser solución a largo plazo, válida en todos los casos en que no existan defectos de tipo estructural.

Existen diferentes procedimientos para el reciclado superficial como ser:

2.11.1.1 Fresado en frío

Consiste en el molido en frío, controlado automáticamente, de la superficie del pavimento para restaurar las rasantes especificadas y remover ondulaciones y otras imperfecciones, dejando una superficie texturizada resistente al deslizamiento y al hidropilado (*El hidropilado se produce cuando los neumáticos de un vehículo pierden

contacto con el pavimento por una película de agua y por consiguiente disminuye o se elimina el poder de adherencia de las ruedas), que sirve como buena superficie en pavimentos en los que el ruido de rodadura no sea el condicionante básico. Las máquinas que ejecutan esta labor se denominan fresadoras y ejercen su acción mediante una especie de uñas acopladas a un eje de giro horizontal.

El reciclado en frío puede ser realizado en planta o in-situ. En planta, el reciclado se logra mediante el transporte del material recuperado de un pavimento existente a un depósito central, donde el material se trabaja con una unidad de procesamiento (como un mezclador continuo). In-situ, el reciclado se logra utilizando una máquina recicladora móvil.

El fresado ofrece muchas ventajas para el ingeniero de carreteras. Veinte años atrás, las carreteras se diseñaban para un tránsito menor y para vehículos más livianos que los hallados hoy en día. En consecuencia, muchas carreteras sufren deformaciones y fallas prematuras. El restablecimiento de una superficie uniforme es esencial si se han de reparar apropiadamente estas carreteras.

2.11.1.2 Cepillado

Lo realizan máquinas llamadas cepilladoras o más comúnmente rascadoras, las cuales únicamente pueden trabajar previo calentamiento del pavimento y desarrollan su labor por medio de unas cuchillas y son utilizables para levantamientos de muy poco espesor.

2.11.2 Reciclaje en el lugar (in-situ)

Consiste en rehabilitar el pavimento asfáltico hasta una profundidad mayor de 2.5 cm, involucrando o no el material de la capa 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. Como su nombre lo indica, el proceso se realiza generalmente en frío y los aditivos más utilizados son

emulsiones asfálticas, cementos portland, cal y mezclas de cal y cenizas volantes. También es posible el reciclaje in-situ con cementos asfálticos de alto grado de penetración.

Una vez evaluadas las características de los materiales a reciclar, se elige el aditivo que proporcione el resultado final deseado. A menudo, con más de un aditivo se obtienen las características requeridas para mezcla y en tales casos la elección se basa en consideraciones de costos disponibilidad de los estabilizantes. Así mismo, resulta conveniente estudiar la posibilidad de incorporar más de un aditivo. Es el caso, por ejemplo de una base granular que se encuentre contaminada por el suelo arcilloso de la sub rasante. En esta eventualidad, puede resultar conveniente un pre tratamiento con cal que disminuya la plasticidad y haga más trabajable la mezcla a la cual se añadirá después otro aditivo que incremente la resistencia.

2.11.3 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. Para ello, se agregan materiales nuevos que comúnmente incluyen un agente de reciclaje y agregado pétreo virgen, así asfalto nuevo. La nueva mezcla en caliente se lleva al sitio de origen o al que se haya elegido para su colocación, donde se distribuye y compacta mediante métodos y equipos convencionales.

En todos los casos, la estructura resultante del trabajo de reciclaje, respondiendo al proyecto correspondiente, podrá emplearse como capa de rodadura o base, caso este último en el cual se deberá superponer una nueva capa superficial.

2.12 Reciclado para incorporar en sub-base y base

2.12.1 Recuperación de materiales de los pavimentos asfálticos deteriorados para su reciclado

Una vez que se conocen las características de la estructura de pavimento que se va a rehabilitar y si este puede ser reciclado, se procede a la recuperación de los materiales, que se lleva a cabo mediante la demolición mecánica o el fresado de las capas bituminosas.

2.12.1.1 Demolición mecánica

La demolición mecánica de las capas de una estructura de pavimento mediante ripeado con bulldozer, levantamiento con pala o retroexcavadora y bacheo superficial (fig. 4.3 – fig. 4.3 – fig. 4.5 – fig. 4.5), son unas de las alternativas más comúnmente usadas en las demoliciones de estructuras de pavimento.



Figura 2. 7 Demolición mecánica



Figura 2. 8 Demolición mecánica

Fuente: Elaboración propia



Figura 2. 9 Demolición mecánica



Figura 2. 10 Demolición mecánica

Fuente: Elaboración propia

Se genera así un material troceado, en bloques, con una cierta heterogeneidad de tamaños que necesita un tratamiento posterior por machaqueo o triturado, obteniendo una granulometría adecuada para poder ser utilizado en las mezclas recicladas.

2.12.1.2 Fresado de las capas bituminosas

La técnica del fresado permite retirar controladamente el pavimento asfáltico, desde 3 centímetros de profundidad hasta 20 centímetros. En casos especiales la profundidad puede ser mayor. El material es retirado de la obra y almacenado en una planta para su reutilización en mezclas asfálticas, es decir **RECICLAR** pavimento. El material recuperado (RAP=Recycling Asphalt Pavement) se reutiliza en mezclas asfálticas en caliente, no alterando las propiedades de estas.

En la figura 4.7 se puede observar el proceso de reciclado por medio del fresado de la capa de rodadura de la estructura de un pavimento.

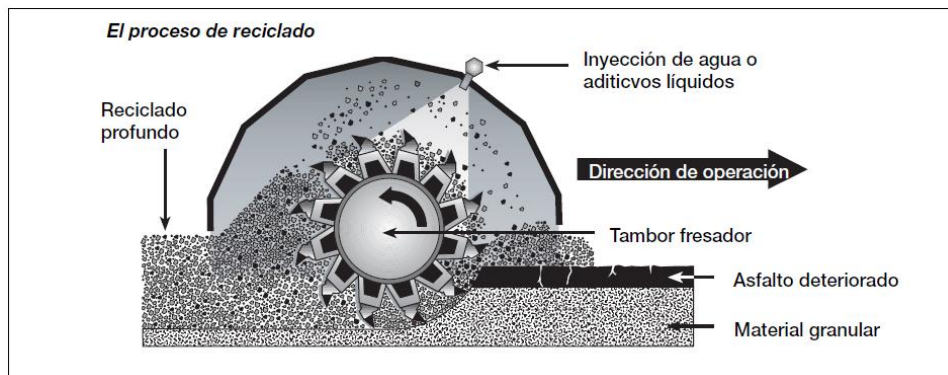


Figura 2. 11 Proceso de reciclado

Fuente: Wirtgen - Manual de Reciclado en Frío

Con una fresadora-cargadora frontal, se recoge automáticamente el material derramado por el transportador, al utilizar un sistema de barredora integral (como se muestra en la Figura 4.8) la mayor parte de los trozos grandes de material fresaado se recogen y se cargan automáticamente al cilindro de corte para colocarlos de nuevo sobre el sistema transportador el cual llevara el material para ser procesado en planta.

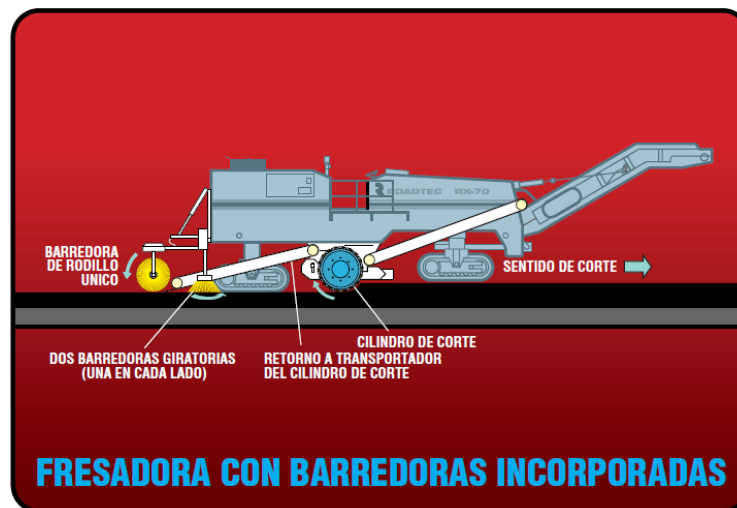


Figura 2. 12 Fresadora con barredoras

Fuente: Boletín técnico T-127S - FRESADO Y RECICLAJE

Varias son las técnicas para la renovación de los pavimentos asfálticos deteriorados por el efecto combinado de la circulación, sobre todo de vehículos pesados, y las inclemencias del tiempo, que provocan el envejecimiento del betún y lo convierten en un elemento frágil y quebradizo, provocando grietas y fisuras en los pavimentos que contribuyen a su rápida degradación.

Esta situación podrá disminuir o retrasarse mediante tratamientos de impermeabilización, principalmente con lechadas asfálticas. Pero la solución definitiva para la rehabilitación estructural de los pavimentos bituminosos debe pasar, sin duda alguna, por el reciclado.

2.12.2 Acopio y caracterización de los materiales que formarán parte de las mezclas recicladas

2.12.2.1 Proceso y acopio del material reciclado en planta

Si el material reciclado es procedente de la demolición de pavimentos o tiene tamaños máximos de partículas superiores a los especificados para la fabricación de mezclas, será necesario realizar un machaqueo en planta que puede hacerse mediante una trituradora que cuente con una primera etapa de machaqueo por impacto y una segunda etapa con una criba y una trituradora de conos, como se muestra en la figura 4.9, de esta manera se reducirá el material reciclado a un todo uno con tamaño máximo de entre los 20-30mm, antes de ser acopiado para su almacenamiento.

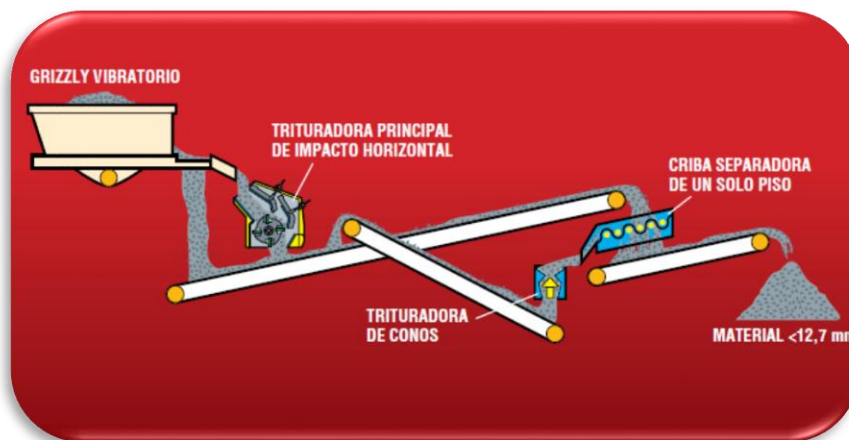


Figura 2. 13 Proceso de acopio

Fuente: Boletín técnico T-127S - FRESADO Y RECICLAJE

Si se pretende utilizar porcentajes muy elevados de reciclado (más del 30%) en la fabricación de mezclas, es recomendable separarlo en dos fracciones para asegurar que el producto final será suficientemente homogéneo, en este caso se debe utilizar una

machacadora de dos etapas que cuente con una criba de dos pisos que nos permita obtener las dos fracciones requeridas (fig. 4.10), que serán acopiadas separadamente para evitar que se mezclen entre ellas.

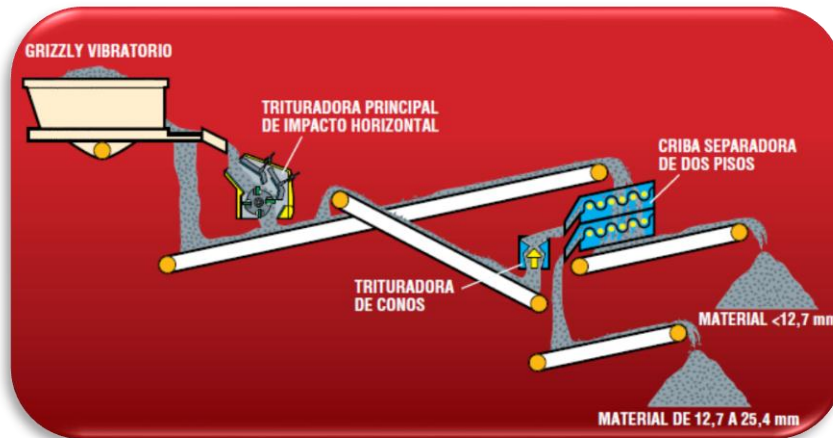


Figura 2. 14 Proceso de acopio

Fuente: Boletín técnico T-127S - FRESADO Y RECICLAJE

Se recomienda que la altura de los acopios se limite a un máximo de 3 metros para prevenir la aglomeración de las partículas de pavimento reciclado. El tiempo de almacenamiento debe minimizarse para evitar que el contenido de humedad de los acopios se vuelva excesivo.

2.12.2.2 Caracterización de los materiales que formarán parte de las mezclas recicladas

Una vez que se logran acopios del pavimento reciclado, es necesario caracterizar todos los materiales que formarán parte de las mezclas recicladas, es decir:

- Granulometría, sin extraer el betún, a fin de evaluar una eventual necesidad de mejoras para obtener un esqueleto mineral suficiente, con una granulometría continua y una porosidad adecuada.
- Calidad del árido grueso: desgaste.
- Limpieza: actividad de los finos y presencia de materias orgánicas.

- Comprobar la homogeneidad de los materiales que se van a reciclar, tanto en lo relativo a su calidad como a la regularidad del espesor de las capas en las que están dispuestos.
- Compatibilidad: determinación del contenido óptimo de fluidos para la compactación, mediante un ensayo de Proctor modificado.
- Resistencia: determinación la relación de soporte de California (CBR) de un suelo que está sometido a esfuerzos cortantes, además evaluar la calidad relativa del suelo para sub rasante, sub base y base.

El primer paso para realizar el reciclado es el análisis de la granulometría del material triturado, sin extracción del betún. Si la granulometría presenta discontinuidades importantes o falta de áridos gruesos, hay que estudiar la manera de aportar esqueleto mineral al conjunto, mediante nuevos áridos, profundización del reciclado o modificaciones en las características de la chancadora.

El paso siguiente es la determinación del contenido óptimo de fluidos para la compactación que normalmente se realiza mediante el ensayo de Proctor modificado, teniendo en cuenta la humedad natural del material. El contenido de agua resultante es en general superior al necesario para la pre humectación.

El tercer paso es determinar la capacidad de soporte (CBR) de suelos y agregados compactados en laboratorio, con una humedad optima y niveles de compactación variable y sirve para evaluar la calidad relativa del suelo para sub rasante, sub base y base de pavimentos.

3.1 Muestreo de material reciclado

La fase de toma de muestras es crítica no sólo desde el punto de vista del reconocimiento de la sección del pavimento a reciclar sino como paso previo para establecer la estrategia más adecuada para su reutilización.

Previamente es importante indicar la ubicación exacta de la zona que fue objeto de la realización del reciclado, por lo cual el lugar de donde se obtuvo el reciclado fueron las calles de la ciudad de Tarija, debido al mantenimiento rutinario de pavimentos flexibles que realiza la Alcaldía Municipal de Tarija (Departamento de Construcción y mantenimiento de calles) para corregir baches, depresiones, rotura de bordes y otras irregularidades que representan peligro, tanto para la vida del pavimento como para los usuarios.

El reciclado en planta fue la técnica de reciclaje utilizada para la recuperación del pavimento, ya que estas son reparaciones a mano de pequeñas áreas dañadas que tienen el propósito de reponer una superficie de rodadura lisa, impermeable y con su debido soporte estructural.

A continuación se detalla el procedimiento para el reciclado de calles pavimentadas:



1. Los bordes verticales se perfilan con un cortador de pavimento, llegando hasta la capa base, donde exista material en buen estado.

Figura 3. 1 Proceso del reciclado

Fuente: Elaboración propia

2. Se retira el material para su posterior acopio y que será reciclado para su uso en la investigación.



Figura 3. 2 Proceso del reciclado
Fuente: Elaboración propia

Una vez recuperado el material se procede a llevar a lugares de acopio, los cuales se encuentran ubicados en la parte de atrás de las oficinas de la Oficialía Mayor Técnica (Posta Municipal), al lado de la Avenida de la Integración como se muestra en las figura 3.3 y 3.4.



Figura 3. 3 Lugares de acopio



Figura 3. 4 Lugares de acopio

Fuente: Elaboración propia

Este es el lugar donde se lleva el pavimento que se extrae al reponer la superficie de rodadura de las calles, por lo tanto es de este lugar de donde se tomaron las muestras para la presente investigación del reciclado de pavimentos flexibles.

3.1.1 Proceso de triturado del material reciclado

Una vez tomadas las muestras del pavimento reciclado, estas se encontraban en bloques (fig. 5.9), con una cierta diversidad de tamaños que necesita un tratamiento posterior por machaqueo o triturado, obteniendo una granulometría adecuada para poder ser utilizado en las mezclas posteriores.



Figura 3. 5 Muestras de pavimento reciclado

Fuente: Elaboración propia

Después de extraer las muestras del material en bloques fue llevado a ser machacado a una chancadora que está ubicada en el barrio san mateo al lado del rio Guadalquivir, donde se realizó el triturado de estos bloques de pavimento, como se detalla a continuación.



Figura 3. 6 Proceso de triturado



Figura 3. 7 Proceso de triturado

Fuente: Elaboración propia



Figura 3. 8 Proceso de triturado



Figura 3. 9 Proceso de triturado

Fuente: Elaboración propia

Obteniéndose de esta manera un material con un tamaño máximo de 1", con el propósito de mejorar las características mecánicas de un suelo no adecuado para capa base y sub base.

3.2. Caracterización del material reciclado

3.2.1 Granulometría

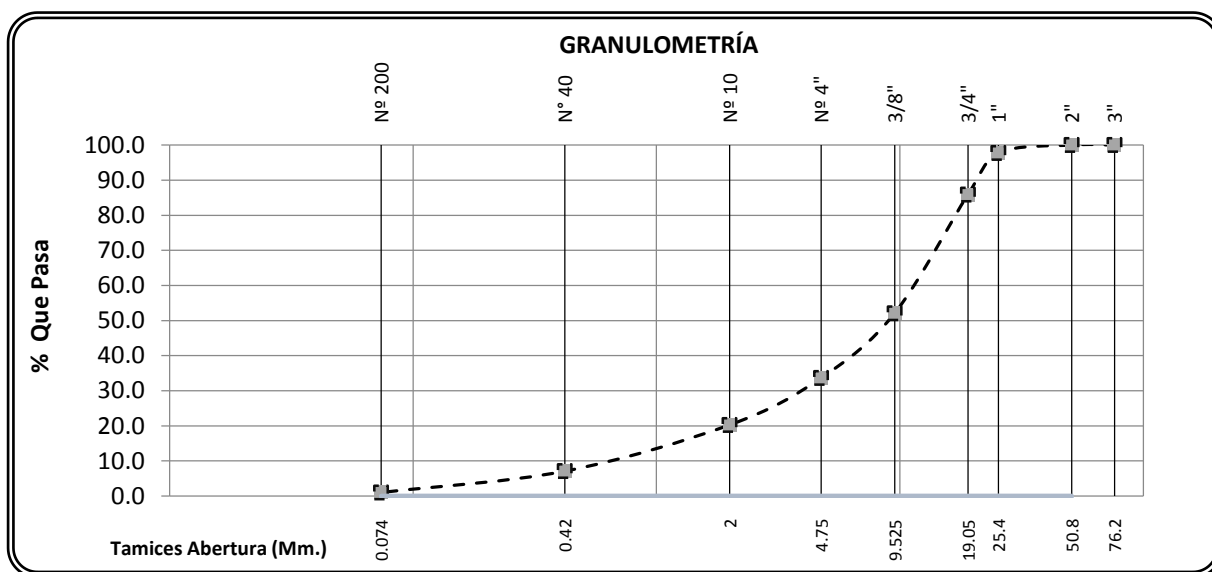
La gradación del material reciclado es para determinar cuantitativamente la distribución de los diferentes tamaños de partículas. El procedimiento más utilizado es el tamizado, el cual consiste en la distribución de fracciones granulométricas de tamaño decreciente, que tiene un tamaño graduado instituido por las normas ASTM C-136 y AASHTO T-27. A continuación se especifica la granulometría del pavimento reciclado de las calles de Tarija.

GRANULOMETRÍA AASHTO T 27

Peso total seco (grs.)		5000					
Tamiz	Peso Retenido	Peso Retenido	% Retenido	% Retenido	% Que	Abertura	Especif.
Nº	Tamiz (grs.)	Acumulado (grs.)	Tamiz	Acumulado	Pasa	Mm.	
1"	111.0	111.0	2.2	2.2	97.78	25.40	
3/4"	592.0	703.0	11.8	14.1	85.94	19.05	
3/8"	1692.0	2395.0	33.8	47.9	52.10	9.525	
4	922.0	3317.0	18.4	66.3	33.66	4.800	
10	3986.0	3986.0	79.7	79.7	20.28	2.000	
40	659.0	4645.0	13.2	92.9	7.10	0.420	
200	304.0	4949.0	6.1	99.0	1.02	0.074	

Tabla 3. 1 Granulometría del pavimento reciclado

Fuente: Elaboración propia



Gráfica 3. 1 Curva granulométrica del material reciclado

Fuente: Elaboración propia

3.3 Caracterización de suelos naturales para ser mejorados

3.3.1 Granulometría

3.3.1.1 Suelo para capa sub base

Para la capa sub base se tomó un material obtenido del barrio la loma de la ciudad de Tarija, debido a la hipótesis proyectada que era la de utilizar un suelo fino, el cual con la adición de pavimento reciclado mejoraría sus características hasta llegar a un suelo con particularidades de capa sub base.



Figura 3. 10 Muestra de suelo fino

Fuente: Elaboración propia

En este suelo se observó que la mayor parte estaba compuesta por material fino, por lo que fue necesario ejecutar el “Método del Lavado”, para esto se empleó aproximadamente 500 gramos de muestra seca, que posteriormente se dejó reposar en agua hasta que dichas muestras se saturaran completamente, se dejó saturar el material en un lapso de 24 hrs.



Figura 3. 11 Muestra para clasificación de suelo fino (método de lavado)

Una vez saturado se colocó el material en el tamiz N°200, y con ayuda de agua se empezó a lavar el suelo, hasta que el agua pasante tomaba aspectos más claros.



Figura 3. 12 Lavado de Material



Figura 3. 13 Lavado de Material

Fuente: Elaboración propia

El material retenido en el tamiz N°200 se introdujo en un recipiente y se procedió a secar el mismo, para posteriormente retamizar por las mallas N°10, N°40 y N°200.



Figura 3. 14 Tamices N° 10, 40 y 200

Fuente: Elaboración propia

Posteriormente, se procedió a pesar el material retenido en cada tamiz y de esta manera desarrollar el trabajo correspondiente a gabinete.

3.3.1.2 Suelo para capa base

Las muestras para capa base se optó por utilizar el material de un banco de préstamo que maneja el SEDECA para la conformación de capa sub base en la localidad de

Erquis, ya que la hipótesis planteada era de reutilizar el pavimento reciclado para mejorar una capa sub base y convertirla en capa base, por lo que este material estaba compuesto por agregado grueso y fino, con lo cual se aplicó el “Método General”, basado en evidencias secas de un peso aproximado de 5000 gramos, este índice fue sometido previamente a un cuarteado con la finalidad de que la muestra sea representativa.



Figura 3. 15 Cuarteado de material

Fuente: Elaboración propia

Luego de tener la muestra preparada y pesada, se pasó a ejecutar el tamizado de la parte gruesa del material con los siguientes tamices: 1", $\frac{3}{4}$ ", $\frac{3}{8}$ " y N°4, mientras que la parte fina del suelo paso por los siguiente tamices N°10, N°40 y N°200. Se desarrolló el agitado de los tamices por un tiempo de 15 min. y posteriormente se realizó el pesaje del material retenido en cada malla, para el posterior trabajo de gabinete.

3.3.2 Límites de Atterberg

Para los dos tipos de suelos con los que se trabajaron, se ensayaron las muestras secas, que hayan pasado por el tamiz N°40, en una cantidad de 100 gramos, desarrollando previamente una desintegración de los granos del suelo debido a la presencia de terrones.

Para la determinación del Límite Líquido se aplicó el aparato de Casagrande sobre una superficie plana, limpia y segura.



Figura 3. 16 Aparato Casagrande para límite líquido

Fuente: Elaboración propia

Posteriormente se colocó el material, ya preparado, de manera horizontal en el aparato, y se realizó la ranura de manera firme en una sola pasada, para luego accionar la copa de Casagrande a un ritmo de dos golpes por segundo.



Figura 3. 17 Colocado de material en aparato Casagrande

Fuente: Elaboración propia

Luego con ayuda de la espátula se realizó dos cortes de manera perpendicular a la ranura, para extraer la porción de suelo entre los cortes y proceder a depositarla en una de las capsulas anteriormente pesadas e identificadas.



Figura 3. 18 Capsulas pesadas e identificadas

Fuente: Elaboración propia

Se pesó el suelo húmedo más cápsula y se introdujo en el horno a temperatura de 105 °C, durante 24 horas, para luego extraer del horno y pesar la muestra seca más capsula y registrar en las planillas.

Mientras que para la determinación del Límite Plástico se manipuló con las manos el material anteriormente preparado y se procede a amasarlo, hasta que el mismo se logró manipular de manera plástica.

Este material se empleó en la formación de rollitos, rodándolos sobre una base de vidrio, hasta que los mismos tengan un diámetro aproximado de tres milímetros y sobre estos exista la presencia de pequeñas rajaduras en ese diámetro. Una vez que los rollitos presentaron a los tres milímetros agrietamientos se los corto en pequeños trozos de material y los mismos se los introdujo en cápsulas, para registrar su peso húmedo más cápsula, las cuales después eran introducidas en el horno a temperatura de 105°C en un lapso de tiempo de 24 horas para su posterior pesaje del suelo seco más cápsula y por último se registró estos datos en una planilla.

Para el material extraído del banco de material de la localidad de Erquis, como capa sub base no se pudo realizar el ensayo para la determinación del límite plástico debido a que la parte fina de este suelo era arenosa, siendo improbable la formación de rollitos.

3.3.3 Ensayo de Compactación

Con las muestra extraída de material en la localidad de Erquis, para capa sub base, durante la preparación del material fue necesario realizar una compensación del mismo entre los tamices de $\frac{3}{4}$ " y N°4, con el objetivo de extraer el material grueso y densificar más el material.

Para estas muestras se empleó un molde de metal (Proctor Modificado T-180), estructurado por cinco capas y en cada una de ellas se destinaron 56 golpes, tanteando una división de altura del molde en cinco partes iguales para la respectiva compactación.



Figura 3. 19 Molde T-180 Proctor modificado **Figura 3. 20 Proceso de compactado**
Fuente: Elaboración propia

De igual manera, se controlaron los valores de contenido de humedad de cada muestra ensayada y el peso del molde más muestra húmeda después de realizar el proceso de compactación.



Figura 3. 21 Pesado de molde más la muestra

Fuente: Elaboración propia

Mientras que para las muestras que se adquirieron del barrio la loma de la ciudad de Tarija, no se realizó una compensación debido a que se contaba con material fino, pero el proceso de preparación del material consistió en triturar los terrones para facilitar el manejo del material y así evitar problemas respecto a la homogenización de la humedad del material provocado por la presencia de terrones.

En la práctica para este tipo de muestra se empleó el molde de metal del Proctor Modificado T-180, estructurado por tres capas y en cada una de ellas se aplicó 56 golpes, tanteando una división de altura del molde de tres capas iguales para la respectiva compactación.

3.3.4 Ensayo de Capacidad Soporte CBR

Esta práctica consistió en la preparación del material que se aprovechará tanto como aquel que se manejará para capa base y capa sub-base. Esta práctica se inició preparando muestras de 6000 gramos, las cuales se les agregó agua en cantidad suficiente para llegar a obtener el contenido de humedad óptimo



Figura 3. 22 Material humedad optima

Fuente: Elaboración propia

Para posteriormente pasar al proceso de compactación por medio del Molde Cilíndrico de Base Perforada, luego de realizar la compactación de las pruebas aplicando en cada molde 12, 25 y 56 golpes se sumergió cada molde en agua, durante el lapso de tiempo de 4 días, midiendo la expansión que sufrían los mismos cada 24 horas.



Figura 3. 23 Medición de la expansión

Fuente: Elaboración propia

Al cuarto día de haber sumergido el material, se retiró el mismo y se procedió a drenar de forma inclinada para luego colocar el molde en la prensa y asentar el pistón de penetración sobre el espécimen.



Figura 3. 24 Drenaje de agua moldes C.B.R **Figura 3. 25 Lectura de cargas aplicadas**
Fuente: Elaboración propia

Luego se hizo lectura de las cargas necesarias para que la aguja penetrara a distintas profundidades, con una velocidad de penetración uniforme de 0.05pulg/min como se muestra en la tabla 5.3.

PENETRACION	
Milímetros	Pulgadas
0.63	0.25
1.27	0.05
1.9	0.075
2.54	0.1
3.81	0.15
5.08	0.2
7.62	0.3
10.16	0.4
12.7	0.5

Tabla 3. 2 Penetración del pistón
Fuente: Manual De Suelos Y Materiales *Suelos ABC

3.3.5 Ensayo de desgaste de los ángeles

La muestra de ensayo y la carga se colocó en la máquina de desgaste de los Ángeles y se puso en funcionamiento la maquina a una velocidad de 30 a 33 revoluciones por minuto. Para la gradaciones A, B, C la maquina se hará girar 500 revoluciones, para las gradaciones E, F y G se hará girar durante 1000 revoluciones. Al final del ensayo el material es descargado de la máquina y se hizo una separación preliminar en un tamiz más grueso que el N° 12; la porción más fina se tamizara luego sobre el tamiz N° 12.

El material retenido en el tamiz N° 12 se lavó, y seco en un horno de 105 a 110 °C y para luego pesarse con una aproximación al gramo.

La diferencia entre el peso original (P) y el peso final (Pf) de la muestra de ensayo es expresado como un porcentaje del peso original de la muestra de ensayo. Este valor será consignado como porcentaje de desgaste.

$$\text{Porcentaje de Desgaste} = \frac{P - Pf}{P} * 100$$

Tamaño de Partículas (mm)	E	F	G	A	B	C	D
	(80-40)	(50-25)	(40-20)	(40-10)	(20-10)	(10-5)	(5-2,5)
	Tamaño de las fracciones (g)						
75 - 63	2.500 ± 50						
63- 50	2.500 ± 50						
50 -37,5	5.000 ± 50	5.000 ± 25					
37,5 - 25		5.000 ± 50	5.000 ± 25	1.250 ± 10			
25 - 19			5.000 ± 25	1.250 ± 25			
19 - 12,5				1.250 ± 10	2.500 ± 10		
12,5 - 9,5				1.250 ± 25	2.500 ± 10		
9,5 - 6,3						2.500 ± 10	
6,3 - 4,75						2.500 ± 10	
4,75 - 2,36							5.000 ± 10
Masa inicial de muestra (Mi)	10.000 ±100	10.000±75	10.000± 50	5.000 ± 10	5.000 ± 10	5.000 ± 10	5.000 ± 10
Esferas							
- numero	12			12	11	8	6
- masa (g)	5-00 ± 25			5.000 ± 25	4.584 ± 25	3.330 ± 25	2.500 ± 15
Numero de revoluciones	1.000			500			

Tabla 3. 3 Ensayo de desgaste de los ángeles

Fuente: Manual de Carretera V4C de Administración Boliviana de Caminos

3.3.6 Cálculos y resultados

3.3.6.1 Análisis granulométrico y clasificación de suelo natural (suelo A-4(7))

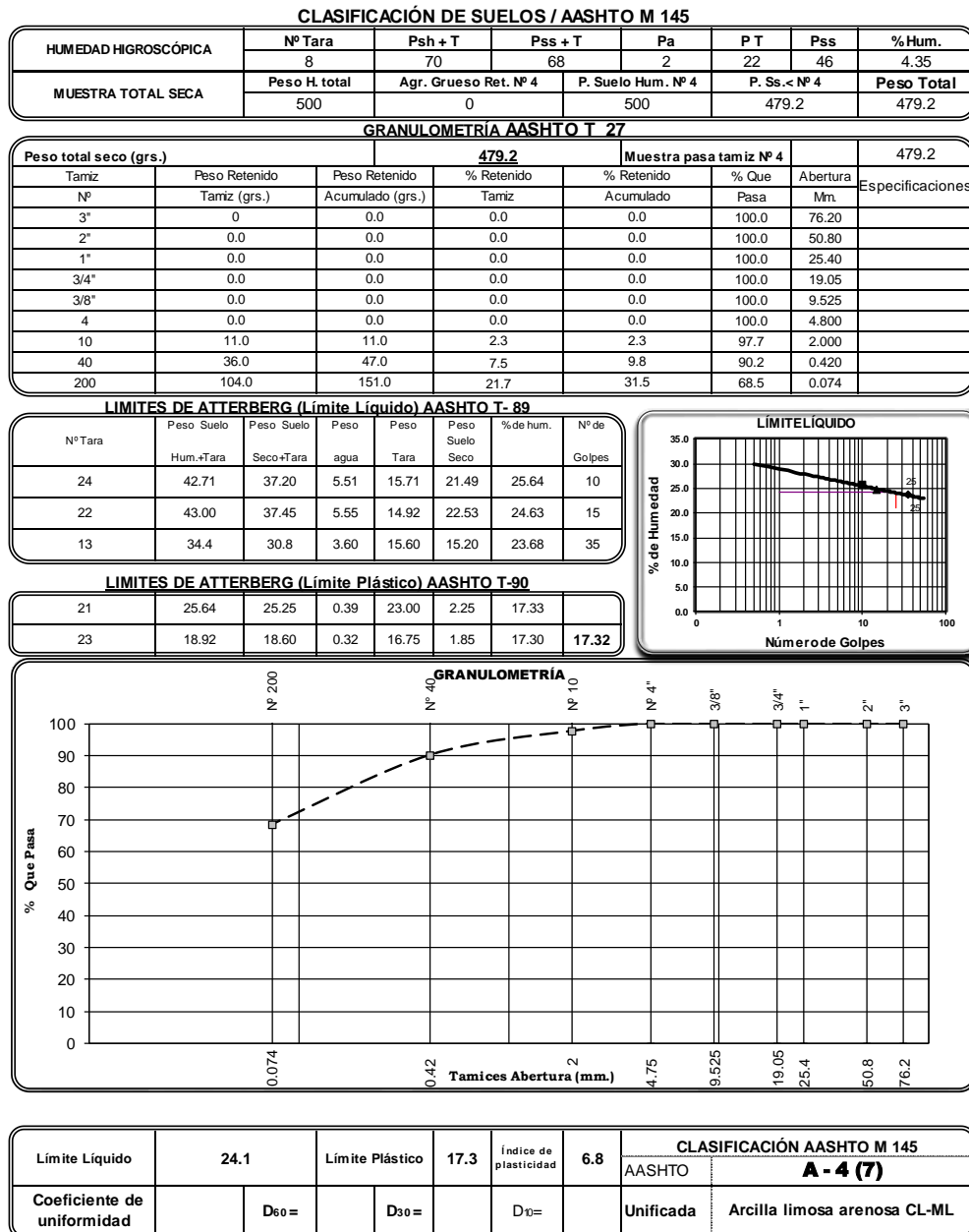


Tabla 3. 4 Clasificación de suelo natural

Fuente: Elaboración propia

3.3.6.2 Ensayo de compactación suelo A-4(7)

ENSAYO DE COMPACTACIÓN AASHTO T - 180

AASHTO T - 180 D

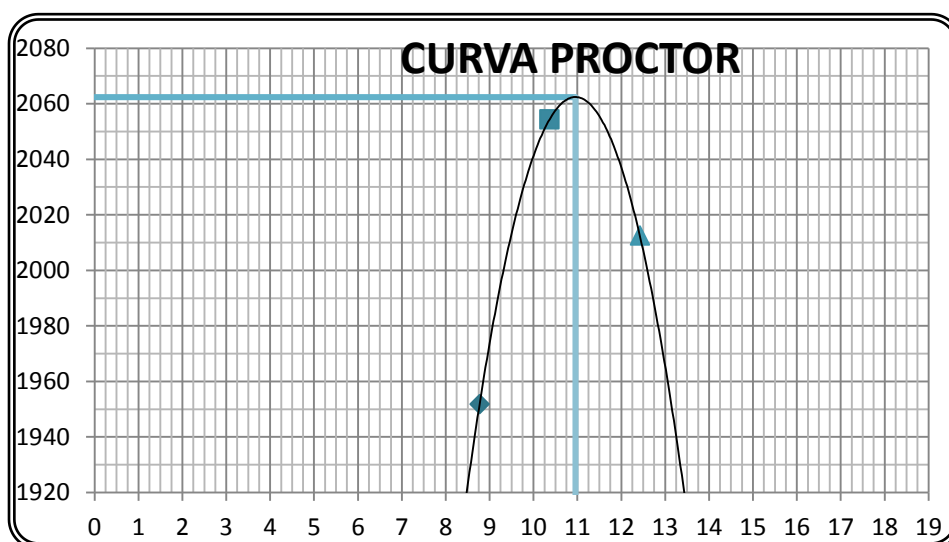
Determinación N°	Unidad	1	2	3
N° Capas	Capas	5	5	5
N° Golpes P/Capas	Golpes	56	56	56
Peso del Molde + Suelo Húmedo	gr.	7690.0	7990.0	7980.0
Peso del Molde	gr.	3274.0	3274.0	3274.0
Peso Suelo Húmedo	gr.	4416.0	4716.0	4706.0
Volumen del Molde	cc	2080.0	2080.0	2080.0
Peso Específico Húmedo	Kg./m3	2123.1	2267.3	2262.5
Cápsula No		134	138	31
Peso Cápsula + Suelo Húmedo	gr.	214.00	208.00	206.00
Peso Cápsula + Suelo Seco	gr.	199.00	191.00	186.00
Peso Agua	gr.	15.00	17.00	20.00
Peso Cápsula	gr.	28.00	27.00	25.00
Peso Suelo Seco	gr.	171.00	164.00	161.00
Contenido de Humedad	%	8.77	10.37	12.42
Peso Específico Seco	Kg./m3	1951.9	2054.4	2012.5

Densidad Máxima = 2062 Kg./m3

Humedad Óptima = 11.0 %

Tabla 3. 5 Ensayo de compactación suelo A-4(7)

Fuente: Elaboración propia



Gráfica 3. 2 Curva de compactación suelo A-4(7)

Fuente: Elaboración propia

3.3.6.3 Ensayo Capacidad Soporte CBR suelo A-4(7)

ENSAYO VALOR SOPORTE CALIFORNIA C.B.R. (AASHTO T-193)

RESUMEN MATERIAL CLASIFICACIÓN AASHTO M 145

Molde Nº	55	55	24	24	22	22
Nº de Capas	5	5	5	5	5	5
Nº de Golpes / Capa	56	56	25	25	12	12
Condición de la Muestra	Antes Embeber	Desp. Embeb.	Antes Embeber	Desp. Embeb.	Antes Embeber	Desp. Embeb.
Peso Muestra Húmeda+Molde (grs.)	12749	12921	10943	11168	10757	11037
Peso Molde (grs.)	8003	8003	6392	6392	6450	6450
Peso Muestra Húmeda (grs.)	4746	4918	4551	4776	4307	4587
Volumen de la muestra (cm3)	2101	2101	2121	2121	2105	2105
Densidad Húmeda (grs./cm3)	2.259	2.341	2.146	2.252	2.046	2.179

COMPACTACIÓN Y EMBEBIMIENTO

	De Compact.	De Embebido	De Compact.	De Embebido	De Compact.	De Embebido
Tara Nº	160	33	14	31	25	30
Peso Suelo Húmedo+Tara	199.00	189.00	187.00	196.00	257.00	175.00
Peso Suelo Seco + Tara	182.00	167.79	171.00	172.08	234.00	151.76
Peso Agua	17.00	21.21	16.00	23.92	23.00	23.24
Peso Tara	28.00	27.00	27.00	28.00	27.00	25.00
Peso Suelo Seco	154.00	140.79	144.00	144.08	207.00	126.76
% de Humedad	11.04	15.06	11.11	16.60	11.11	18.33
Densidad Seca Probeta (grs./cm3)	2.034	2.034	1.931	1.931	1.841	1.841
Densidad Máxima Laboratorio (grs./cm3)	2.062	2.062	2.062	2.062	2.062	2.062
% De Compactación	98.7	98.7	93.7	93.7	89.3	89.3

DETERMINACIÓN DE LA EXPANSIÓN

Fecha	Hora	Lect.	Alt.(mm)	% Expansión	Lect.	Alt.(mm)	% Expansión	Lect.	Alt.(mm)	% Expansión
					0			0		
		461	11.709	3.974	556	14.122	4.7931	655	16.637	5.6466

Factor Aro 5000

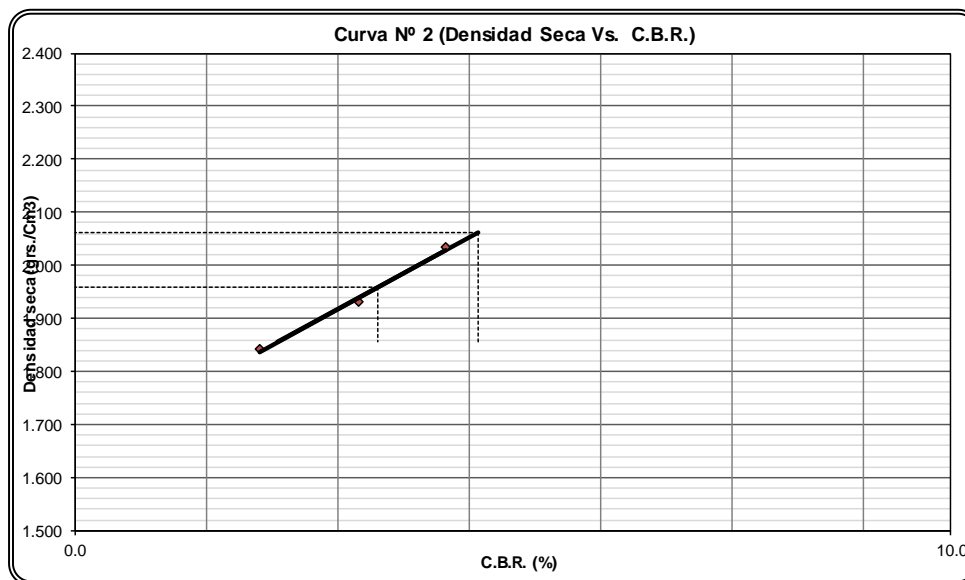
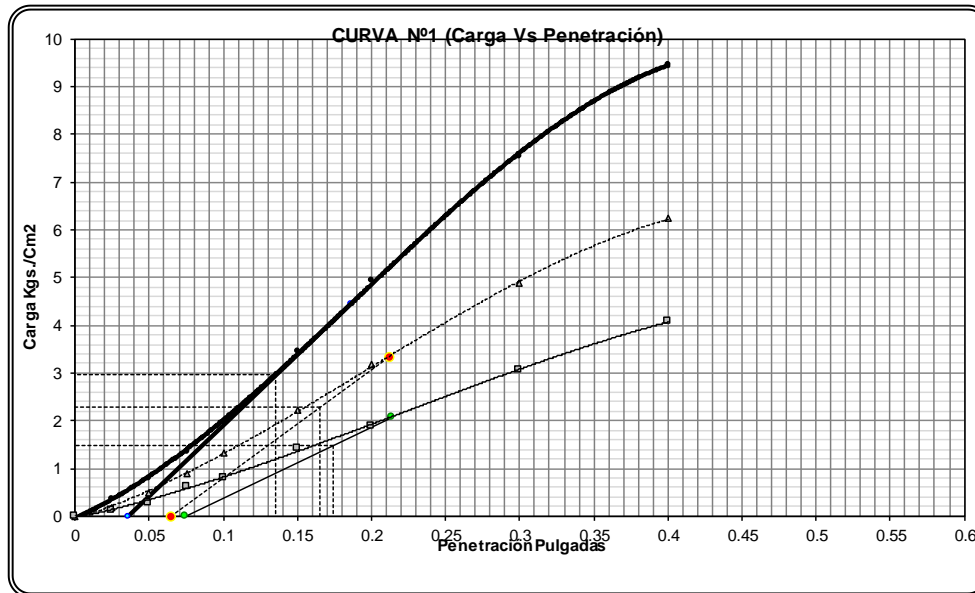
% Exp. Total 4.80

PENETRACIÓN			Carga	Lect.	Carga (Kg/cm ²)			%	Lect.	Carga (Kg/cm ²)			%	Lect.	Carga (Kg/cm ²)			%	
Min.	Pulg.	Mm.	Kg/cm ²	Dial	Calc.	Correg.	C.B.R.	Dial	Calc.	Correg.	C.B.R.	Dial	Calc.	Correg.	C.B.R.	Dial	Calc.	Correg.	C.B.R.
0.5	0.025	0.63		7	0.4			4	0.2			2	0.1						
1.0	0.050	1.27		16	0.8			9	0.5			6	0.3						
1.5	0.075	1.90		26	1.4			17	0.9			12	0.6						
2.0	0.100	2.54	70.3	38	2.0	3.0	4.2	26	1.3	2.3	3.24	15	0.8	1.5	2.11				
3.0	0.150	3.81		67	3.5			43	2.2			28	1.4						
4.0	0.200	5.08	105.5	96	4.9			61	3.2			37	1.9						
6.0	0.300	7.62		146	7.5			94	4.9			59	3.1						
8.0	0.400	10.16		183	9.5			121	6.2			79	4.1						
10.0	0.500	12.70		0	0.0			0	0.0			0	0.0						

Tabla 3. 6 Ensayo CBR suelo A-4(7)

Fuente: Elaboración propia

GRÁFICOS



ENS. AL 90% =	1.856	C.B.R.. AL 90% =	2.3
ENS. AL 95% =	1.959	C.B.R.. AL 95% =	3.5
ENS. AL 100% =	2.062	C.B.R.. AL 100% =	4.6
XP. AL 95% =	4.6	EXP. AL 100% =	3.8

Grafica 3. 3 Carga vs penetración y Densidad vs CBR suelo A-4(7)
Fuente: Elaboración propia

3.3.6.4 Análisis granulométrico y clasificación de suelo natural (A-2-4(0))

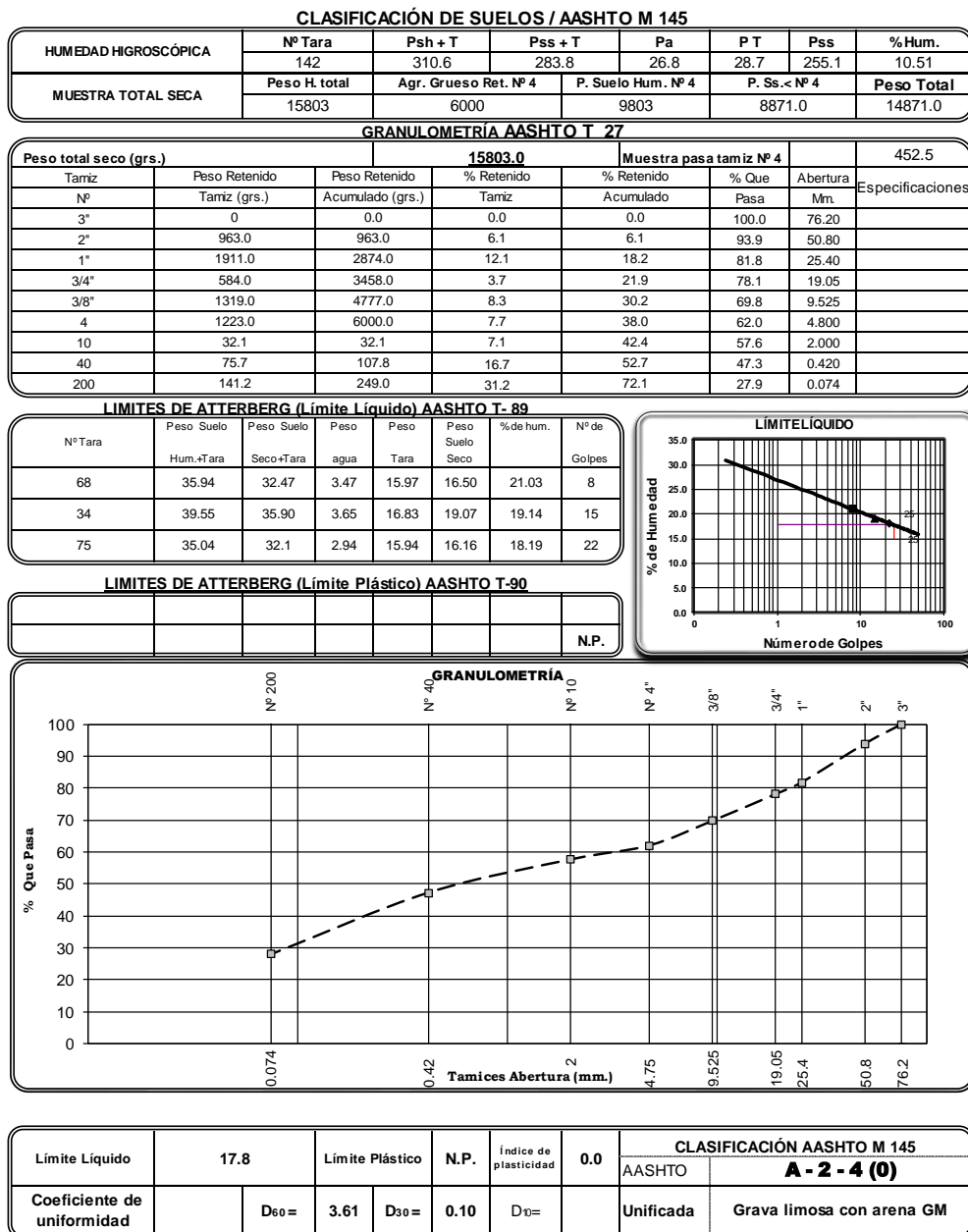


Tabla 3. 7 Clasificación de suelo natural

Fuente: Elaboración propia

3.3.6.5 Ensayo de compactación suelo A-2-4(0)

ENSAYO DE COMPACTACIÓN AASHTO T - 180

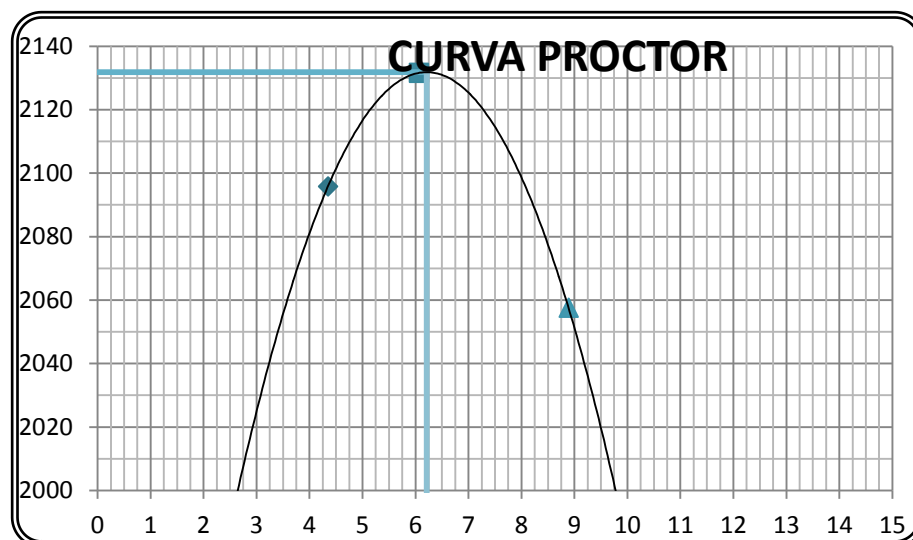
AASHTO T - 180 D

Determinación N°	Unidad	1	2	3
N° Capas	Capas	5	5	5
N° Golpes P/Capas	Golpes	56	56	56
Peso del Molde + Suelo Húmedo	gr.	7284.0	7440.0	7397.0
Peso del Molde	gr.	2663.0	2663.0	2663.0
Peso Suelo Húmedo	gr.	4621.0	4777.0	4734.0
Volumen del Molde	cc	2113.0	2113.0	2113.0
Peso Específico Húmedo	Kg./m3	2186.9	2260.8	2240.4
Cápsula No		48	43	77
Peso Cápsula + Suelo Húmedo	gr.	208.00	213.00	226.00
Peso Cápsula + Suelo Seco	gr.	201.00	203.00	210.00
Peso Agua	gr.	7.00	10.00	16.00
Peso Cápsula	gr.	40.00	38.00	30.00
Peso Suelo Seco	gr.	161.00	165.00	180.00
Contenido de Humedad	%	4.35	6.06	8.89
Peso Específico Seco	Kg./m3	2095.8	2131.6	2057.5

Densidad Máxima = 2132 Kg./m3
 Humedad Optima = 6.2 %

Tabla 3. 8 Ensayo de compactación suelo A-2-4(0)

Fuente: Elaboración propia



Gráfica 3. 4 Curva de compactación suelo A-2-4(0)

Fuente: Elaboración propia

3.3.6.6 Ensayo Capacidad Soporte CBR suelo A-2-4(0)

ENSAYO VALOR SOPORTE CALIFORNIA C.B.R. (AASHTO T-193)

RESUMEN MATERIAL CLASIFICACIÓN AASHTO M 145

Molde Nº	55	55	54	54	53	53
Nº de Capas	5	5	5	5	5	5
Nº de Golpes / Capa	56	56	25	25	12	12
Condición de la Muestra	Antes Embeber	Desp. Embeb.	Antes Embeber	Desp. Embeb.	Antes Embeber	Desp. Embeb.
Peso Muestra Húmeda+Molde (grs.)	12685	12778	12722	12886	12865	13077
Peso Molde (grs.)	8028	8028	8092	8092	8563	8563
Peso Muestra Húmeda (grs.)	4657	4750	4630	4794	4302	4514
Volumen de la muestra (cm3)	2101	2101	2171	2171	2113	2113
Densidad Húmeda (grs./cm3)	2.217	2.261	2.133	2.208	2.036	2.136

COMPACTACIÓN Y EMBEBIMIENTO

	De Compact.	De Embebido	De Compact.	De Embebido	De Compact.	De Embebido
Tara Nº	60	33	70	31	68	30
Peso Suelo Húmedo+Tara	186.00	189.00	200.00	196.00	253.00	175.00
Peso Suelo Seco + Tara	177.00	176.78	190.00	180.87	240.00	159.73
Peso Agua	9.00	12.22	10.00	15.13	13.00	15.27
Peso Tara	28.00	27.00	27.00	28.00	27.00	25.00
Peso Suelo Seco	149.00	149.78	163.00	152.87	213.00	134.73
% de Humedad	6.04	8.16	6.13	9.89	6.10	11.33
Densidad Seca Probeta (grs./cm3)	2.090	2.090	2.009	2.009	1.919	1.919
Densidad Máxima Laboratorio (grs./cm3)	2.132	2.132	2.132	2.132	2.132	2.132
% De Compactación	98.0	98.0	94.2	94.2	90.0	90.0

DETERMINACIÓN DE LA EXPANSIÓN

Fecha	Hora	Lect.	Alt.(mm)	% Expansión	Lect.	Alt.(mm)	% Expansión	Lect.	Alt.(mm)	% Expansión
					0			0		
		22	0.5588	0.19	37	0.9398	0.319	39	0.9906	0.3362

Factor Aro 5000

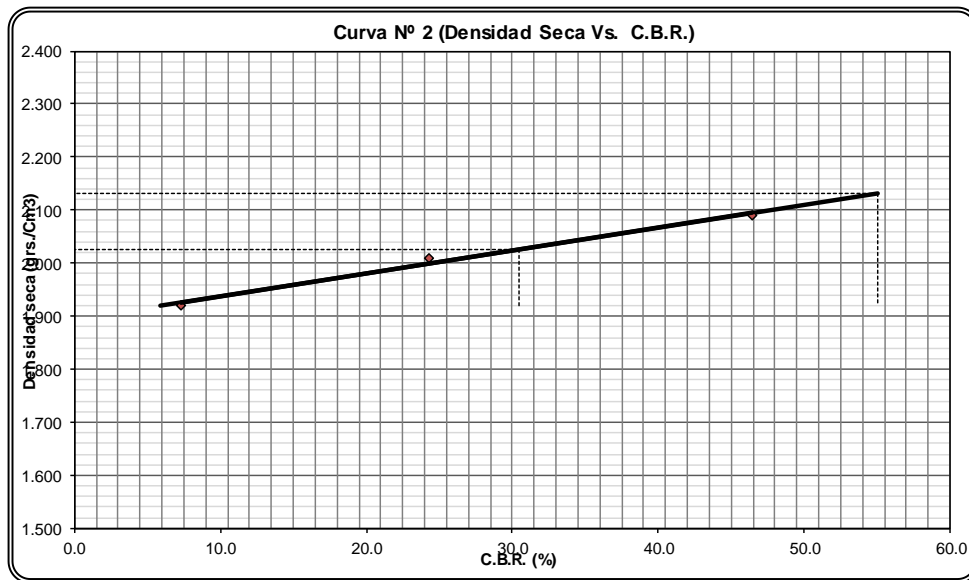
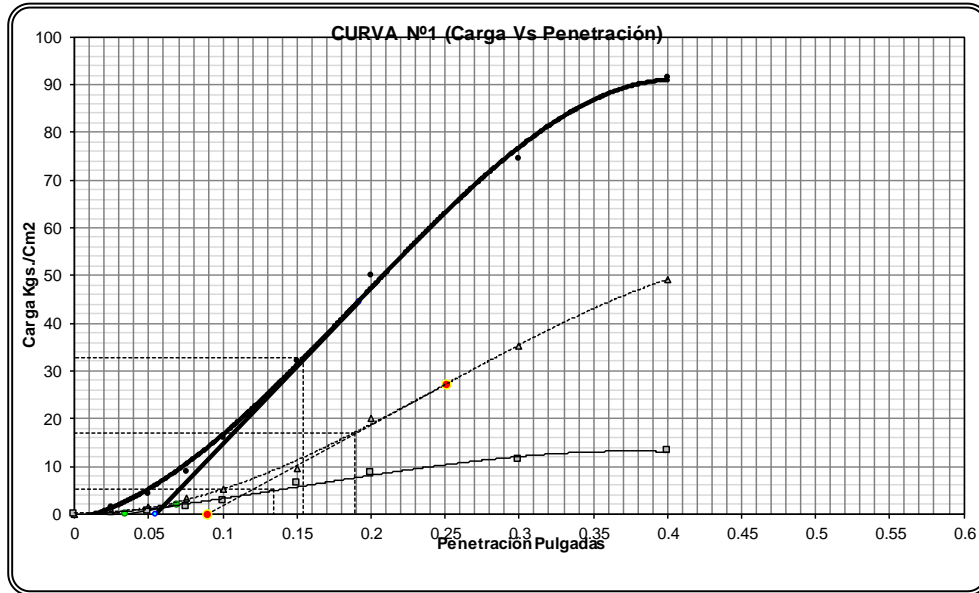
% Exp. Total 0.28

PENETRACIÓN			Carga	Lect.	Carga (Kg./cm ²)	%	Lect.	Carga (Kg./cm ²)	%	Lect.	Carga (Kg./cm ²)	%		
Min.	Pulg.	Mm.	Kg./cm ²	Dial	Calc.	Correg.	C.B.R.	Dial	Calc.	Correg.	C.B.R.	Calc.	Correg.	C.B.R.
0.5	0.025	0.63		31	1.6			14	0.7			5	0.3	
1.0	0.050	1.27		82	4.3			30	1.6			13	0.7	
1.5	0.075	1.90		173	8.9			67	3.5			31	1.6	
2.0	0.100	2.54	70.3	312	16.1	32.7	46.5	103	5.3	17.1	24.31	55	2.9	5.1
3.0	0.150	0.38		624	32.2			183	9.4			126	6.5	
4.0	0.200	5.08	105.5	967	50.0			390	20.2			168	8.7	
6.0	0.300	7.62		1445	74.6			682	35.3			218	11.2	
8.0	0.400	10.16		1774	91.7			953	49.2			256	13.2	
10.0	0.500	12.70		0	0.0			0	0.0			0	0.0	

Tabla 3. 9 Ensayo CBR suelo A-2-4(0)

Fuente: Elaboración propia

GRÁFICOS



DENS. AL 90% =	1.919	C.B.R.. AL 90% =	5.9
DENS. AL 95% =	2.025	C.B.R.. AL 95% =	30.5
DENS. AL 100% =	2.132	C.B.R.. AL 100% =	55.0
EXP. AL 95% =	0.3	EXP. AL 100% =	0.1

Grafica 3. 5 Carga vs penetración y Densidad vs CBR suelo A-2-4(0)
Fuente: Elaboración propia

3.3.6.7 Ensayo de Desgaste de los Ángeles Suelo A-2-4(0)

DESGASTE LOS ANGELES

GRADACION: B
CARGA ABRASIVA CON: 11

Esferas a 32,5 RPM
500 Revoluciones

PORCIONES DE MUESTRA:

PASADO	RETENIDO	CANTIDAD TOMADA
3/4	1/2	2500
1/2	3/8	2500
RETENIDO TAMIZ DE CORTE Nº 12 (1,7 mm)		2.987
DIFERENCIA		2.013

CALCULO:

$\text{Desgaste} = \frac{\text{Diferencia}}{5000} * 100$	40.26 %
--	----------------

Tabla 3. 10 Ensayo Desgaste de los Ángeles suelo A-2-4(0)
Fuente: Elaboración propia

4.1 Proceso de mezclado y caracterización de material para capa sub base con incorporación del pavimento flexible reciclado

4.1.1 Proceso de mezclado para capa sub base

Este procedimiento de mezcla provisional presenta al agregado de un pavimento asfáltico recuperado que es mezclado con un suelo natural, de características granulométricas de un suelo fino A-4(7), para luego obtener una gradación de agregado combinado que cumpla los requerimientos de la especificación establecida para capa sub base. El proceso de mezclado de material reciclado con el material natural se lo realiza de manera manual en porcentajes con respecto al total de la muestra en peso de cada ensayo.

Los porcentajes de mezcla que se realizaron fueron:

Combinación para capa sub base (reciclado - suelo A-4(7))		
Mezcla	% Reciclado	% Suelo A-4(7)
B	70	30
C	60	40
D	50	50
E	40	60
F	30	70

Tabla 4. 1 Combinación para capa sub base (reciclado - suelo A-4(7))

Fuente: Elaboración propia

4.1.2 Criterios para el mezclado

Para realizar el mezclado del material reciclado con suelo natural se tomó como punto de partida el criterio de causa y efecto, dando como resultado los siguientes criterios:

- Cuando se adiciona un material o aditivo para estabilizar un suelo, este se lo mezcla o agrega en una proporción que no sea mayor a la cantidad de suelo natural, estableciendo los porcentajes de las mezclas D, E y F.

- Para las mezclas donde la cantidad de material reciclado es mayor a la cantidad de suelo natural (mezclas B y C), estas se efectuaran con fines investigativos para conocer el efecto que causa el pavimento reciclado en mayor proporción.
- Las mezclas se las realizara variando en un 10% del total de cada material, buscando de esta manera ver el efecto del reciclado en el suelo natural, ya sea en el aumento o disminución de las características mecánicas de las mezclas, así mismo si se mezclaría en proporciones que varíen cada 1% sería menos notorio el efecto de las propiedades de cada mezcla.

Para cada diferente mezcla en porcentajes se tuvo que efectuar su caracterización respectiva, que será descrita a continuación.

4.1.3 Caracterización del material para capa sub base

4.1.3.1 Granulometría

4.1.3.1.1 Mezcla B

Primeramente se efectuó el pesaje de la muestra de material en porcentaje 70% reciclado y 30 % suelo natural fino, de un total de 5000 gr para la granulometría.



Figura 4. 1 (70% reciclado)



Figura 4. 2 (30% suelo fino)

Fuente: Elaboración propia

Luego se procedió a realizar el tamizado por los tamices 1", 3/8", N°4, N°10, N°40 y N° 200.



Figura 4. 3 Material retenido en 1"



Figura 4. 4 Material retenido en 3/8"

Fuente: Elaboración propia



Figura 4. 5 Material retenido en N°4



Figura 4. 6 Retenido en N°10,40 y 200

Fuente: Elaboración propia

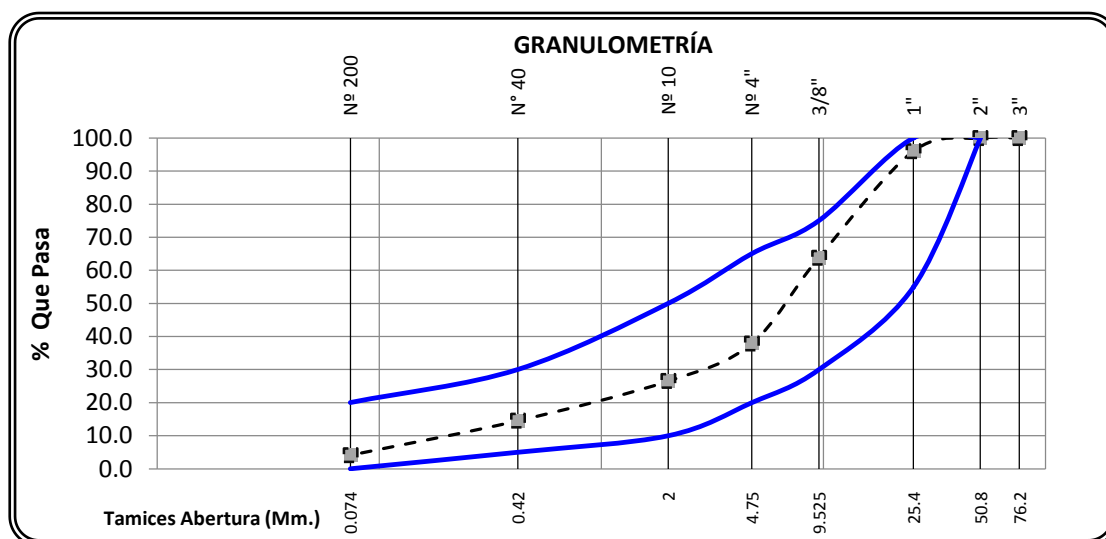
Llegando de esta manera a obtener las fracciones de material retenidas en cada uno de los tamices según las especificaciones requeridas.

GRANULOMETRÍA AASHTO T 27

Peso total seco (grs.)		5000					
Tamiz	Peso Retenido	Peso Retenido	% Retenido	% Retenido	% Que	Abertura	Especif.
Nº	Tamiz (grs.)	Acumulado (grs.)	Tamiz	Acumulado	Pasa	Mm.	
2"	0.0	0.0	0.0	0.0	100.00	50.80	100
1"	200.0	200.0	4.0	4.0	96.00	25.40	55-100
3/8"	1607.0	1807.0	32.1	36.1	63.86	9.525	30-75
4	1297.0	3104.0	25.9	62.1	37.92	4.800	20-65
10	3674.0	3674.0	73.5	73.5	26.52	2.000	10-50
40	600.0	4274.0	12.0	85.5	14.52	0.420	5-30
200	520.0	4794.0	10.4	95.9	4.12	0.074	0-20

Tabla 4. 2 Análisis granulométrico mezcla "B"

Fuente: Elaboración propia



Grafica 4. 1 Curva granulométrica mezcla "B"

Fuente: Elaboración propia

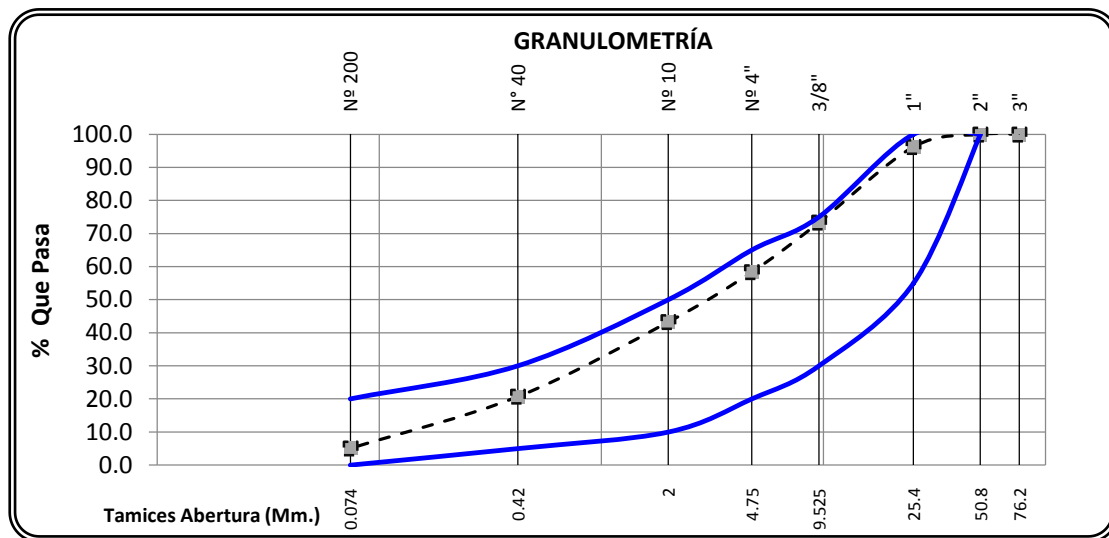
4.1.3.1.2 Mezcla C

GRANULOMETRÍA AASHTO T 27

Peso total seco (grs.)			5000					Especif.
Tamiz N°	Peso Retenido Tamiz (grs.)	Peso Retenido Acumulado (grs.)	% Retenido Tamiz	% Retenido Acumulado	% Que Pasa	Abertura Mm.		
2"	0.0	0.0	0.0	0.0	100.00	50.80	100	
1"	190.0	190.0	3.8	3.8	96.20	25.40	55-100	
3/8"	1145.0	1335.0	22.9	26.7	73.30	9.525	30-75	
4	748.5	2083.5	15.0	41.7	58.33	4.800	20-65	
10	2837.5	2837.5	56.8	56.8	43.25	2.000	10-50	
40	1129.0	3966.5	22.6	79.3	20.67	0.420	5-30	
200	782.5	4749.0	15.7	95.0	5.02	0.074	0-20	

Tabla 4. 3 Análisis granulométrico mezcla "C"

Fuente: Elaboración propia



Grafica 4. 2 Curva granulométrica mezcla "C"

Fuente: Elaboración propia

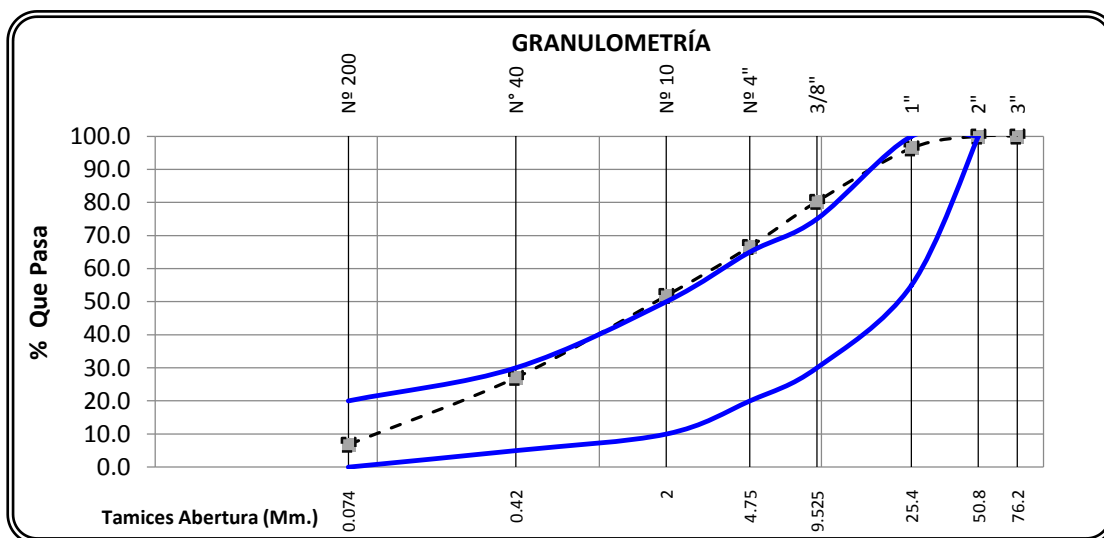
4.1.3.1.3 Mezcla D

GRANULOMETRÍA AASHTO T 27

Peso total seco (grs.)		5000					
Tamiz	Peso Retenido	Peso Retenido	% Retenido	% Retenido	% Que	Abertura	Especif.
Nº	Tamiz (grs.)	Acumulado (grs.)	Tamiz	Acumulado	Pasa	Mm.	
2"	0.0	0.0	0.0	0.0	100.00	50.80	100
1"	181.0	181.0	3.6	3.6	96.38	25.40	55-100
3/8"	808.5	989.5	16.2	19.8	80.21	9.525	30-75
4	680.5	1670.0	13.6	33.4	66.60	4.800	20-65
10	2410.0	2410.0	48.2	48.2	51.80	2.000	10-50
40	1238.5	3648.5	24.8	73.0	27.03	0.420	5-30
200	1011.5	4660.0	20.2	93.2	6.80	0.074	0-20

Tabla 4. 4 Análisis granulométrico mezcla "D"

Fuente: Elaboración propia



Grafica 4. 3 Curva granulométrica mezcla "D"

Fuente: Elaboración propia

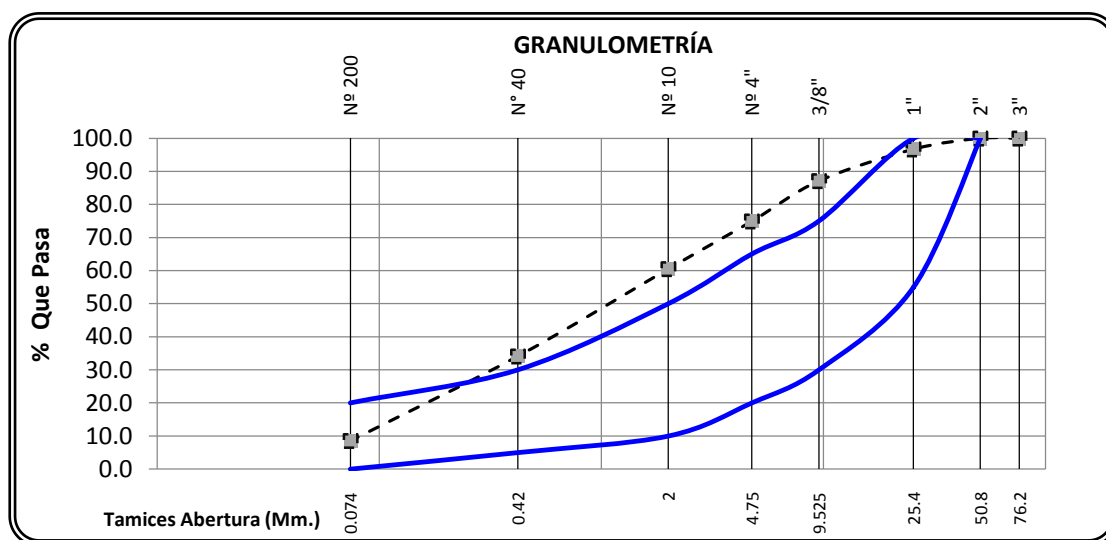
4.1.3.1.4 Mezcla E

GRANULOMETRÍA AASHTO T 27

Peso total seco (grs.)		5000					
Tamiz	Peso Retenido	Peso Retenido	% Retenido	% Retenido	% Que	Abertura	Especif.
Nº	Tamiz (grs.)	Acumulado (grs.)	Tamiz	Acumulado	Pasa	Mm.	
2"	0.0	0.0	0.0	0.0	100.00	50.80	100
1"	165.0	165.0	3.3	3.3	96.70	25.40	55-100
3/8"	480.0	645.0	9.6	12.9	87.10	9.525	30-75
4	610.0	1255.0	12.2	25.1	74.90	4.800	20-65
10	1975.0	1975.0	39.5	39.5	60.50	2.000	10-50
40	1320.0	3295.0	26.4	65.9	34.10	0.420	5-30
200	1280.0	4575.0	25.6	91.5	8.50	0.074	0-20

Tabla 4. 5 Análisis granulométrico mezcla "E"

Fuente: Elaboración propia



Grafica 4. 4 Curva granulométrica mezcla "E"

Fuente: Elaboración propia

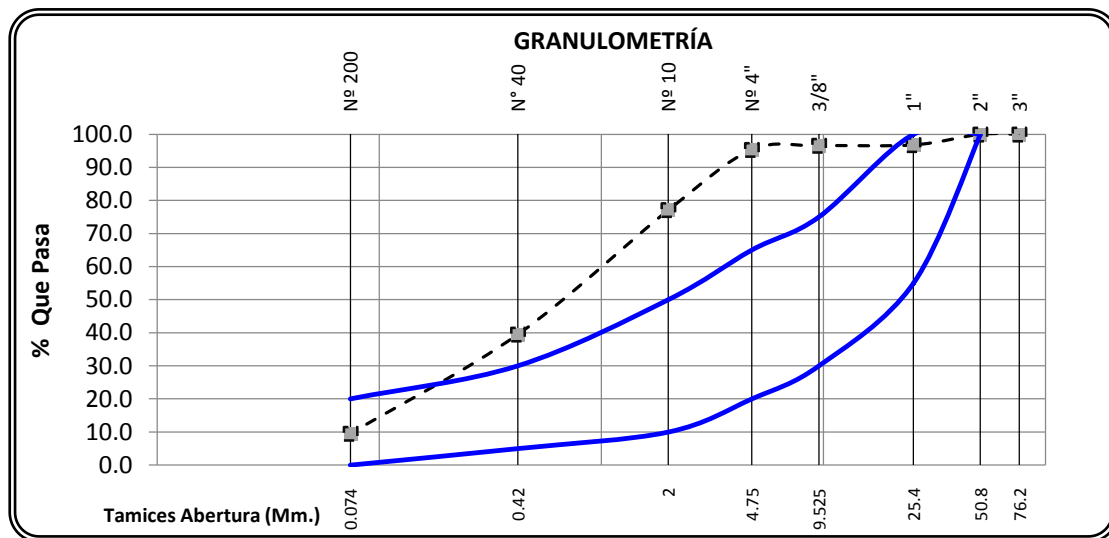
4.1.3.1.5 Mezcla F

GRANULOMETRÍA AASHTO T 27

Peso total seco (grs.)		5000					
Tamiz	Peso Retenido	Peso Retenido	% Retenido	% Retenido	% Que	Abertura	Especif.
Nº	Tamiz (grs.)	Acumulado (grs.)	Tamiz	Acumulado	Pasa	Mm.	
2"	0.0	0.0	0.0	0.0	100.00	50.80	100
1"	161.0	161.0	3.2	3.2	96.78	25.40	55-100
3/8"	12.0	173.0	0.2	3.5	96.54	9.525	30-75
4	62.0	235.0	1.2	4.7	95.30	4.800	20-65
10	1146.0	1146.0	22.9	22.9	77.08	2.000	10-50
40	1878.5	3024.5	37.6	60.5	39.51	0.420	5-30
200	1500.5	4525.0	30.0	90.5	9.50	0.074	0-20

Tabla 4. 6 Análisis granulométrico mezcla "F"

Fuente: Elaboración propia



Grafica 4. 5 Curva granulométrica mezcla "F"

Fuente: Elaboración propia

4.1.3.2 Ensayo de Compactación

Se procedió a tamizar una adecuada cantidad de suelo sobre el tamiz de 19.0mm, desechando el material grueso, si alguno es retenido en el tamiz de 19.0 mm (3/4”). Luego se pesaron tres muestra representativas, con una masa aproximada de 6 kg de material para su posterior mezclado con agua.



Figura 4. 7 Separando el material por la malla 3/4”
Fuente: Elaboración propia



Figura 4. 8 Material para compactación Figura 4. 9 Almacenamiento de material
Fuente: Elaboración propia

Para el ensayo se coloca una muestra de suelo con un contenido de agua seleccionado, en cinco capas, en un molde de dimensiones dadas, y cada capa se compacta con 56 golpes de un martillo de 44.5N (10lb) que se deja caer desde una distancia de 457mm

(18") dándole al suelo un esfuerzo de compactación total de alrededor de 2700kNm/m^3 (56000lbpie/pie^3).



Figura 4. 10 Material para compactación **Figura 4. 11 Primera capa de compactación**
Fuente: Elaboración propia

Luego de la compactación, se removió el collar de extensión quitando el material adherido en el collar, separando el suelo excedente compacto de la parte superior del molde usando el borde recto de la regla y los agujeros producidos en la superficie por la remoción de material grueso fueron rellenos con material más pequeño.



Figura 4. 12 Enrasado de material excedente del Proctor
Fuente: Elaboración propia

Se determina el peso unitario seco resultante y el procedimiento se repite para un número suficiente de contenidos de agua para establecer una relación entre el contenido de agua para el suelo y el peso unitario seco. Al graficar estos datos resulta una relación curvilínea conocida como la curva de compactación. Los valores del contenido óptimo de agua y el peso unitario seco máximo se determinan de la curva de compactación.

A continuación se presentan tablas y graficas del cálculo de densidad máxima y humedad óptima.

4.1.3.2.1 Mezcla B

ENSAYO DE COMPACTACIÓN AASHTO T - 180

AASHTO T - 180 D

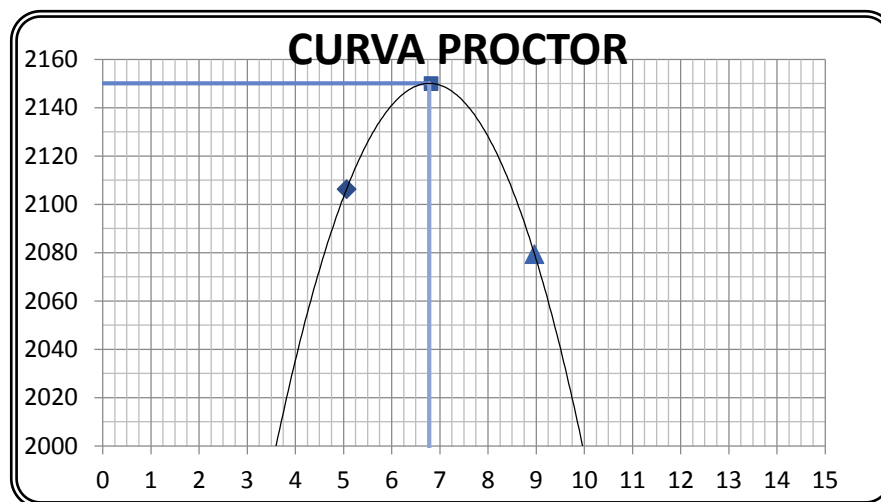
Determinación N°	Unidad	1	2	3
N° Capas	Capas	5	5	5
N° Golpes P/Capas	Golpes	56	56	56
Peso del Molde + Suelo Húmedo	gr.	7877.0	8051.0	7987.0
Peso del Molde	gr.	3274.0	3274.0	3274.0
Peso Suelo Húmedo	gr.	4603.0	4777.0	4713.0
Volumen del Molde	cc	2080.0	2080.0	2080.0
Peso Específico Húmedo	Kg./m3	2213.0	2296.6	2265.9
Cápsula No		160	134	37
Peso Cápsula + Suelo Húmedo	gr.	193.00	215.00	183.00
Peso Cápsula + Suelo Seco	gr.	185.00	203.00	170.00
Peso Agua	gr.	8.00	12.00	13.00
Peso Cápsula	gr.	27.00	27.00	25.00
Peso Suelo Seco	gr.	158.00	176.00	145.00
Contenido de Humedad	%	5.06	6.82	8.97
Peso Específico Seco	Kg./m3	2106.3	2150.0	2079.4

Densidad Máxima = 2150 Kg./m3

Humedad Optima = 6.8 %

Tabla 4. 7 Ensayo de compactación mezcla “B”

Fuente: Elaboración propia



Grafica 4. 6 Curva de compactación mezcla "B"
Fuente: Elaboración propia

4.1.3.2.2 Mezcla C

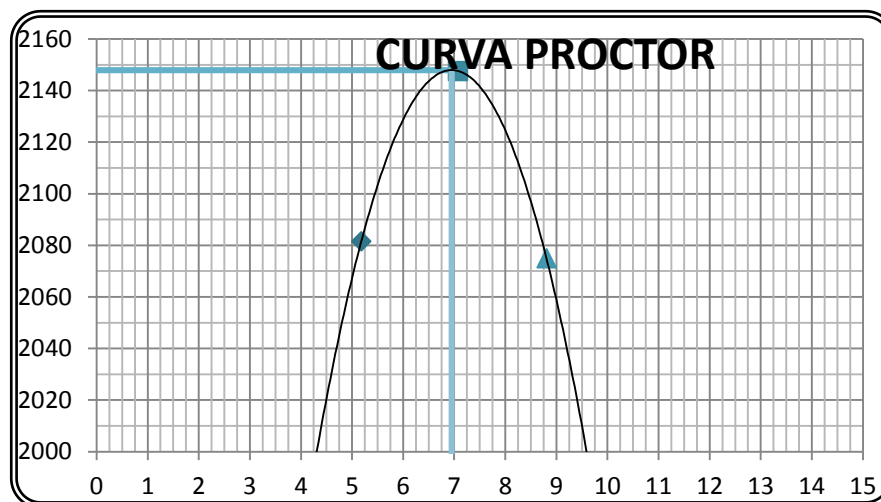
ENSAYO DE COMPACTACIÓN AASHTO T - 180 AASHTO T - 180 D

Determinación N°	Unidad	1	2	3
N° Capas	Capas	5	5	5
N° Golpes P/Capas	Golpes	56	56	56
Peso del Molde + Suelo Húmedo	gr.	7828.0	8057.0	7970.0
Peso del Molde	gr.	3274.0	3274.0	3274.0
Peso Suelo Húmedo	gr.	4554.0	4783.0	4696.0
Volumen del Molde	cc	2080.0	2080.0	2080.0
Peso Específico Húmedo	Kg./m ³	2189.4	2299.5	2257.7
Cápsula No		214	152	31
Peso Cápsula + Suelo Húmedo	gr.	231.00	238.00	201.00
Peso Cápsula + Suelo Seco	gr.	221.00	224.00	187.00
Peso Agua	gr.	10.00	14.00	14.00
Peso Cápsula	gr.	28.00	26.00	28.00
Peso Suelo Seco	gr.	193.00	198.00	159.00
Contenido de Humedad	%	5.18	7.07	8.81
Peso Específico Seco	Kg./m ³	2081.6	2147.7	2075.0

Densidad Máxima = 2148 Kg./m³

Humedad Optima = 7.0 %

Tabla 4. 8 Ensayo de compactación mezcla "C"
Fuente: Elaboración propia



Grafica 4. 7 Curva de compactación mezcla "C"

Fuente: Elaboración propia

4.1.3.2.3 Mezcla D

ENSAYO DE COMPACTACIÓN AASHTO T - 180 AASHTO T - 180 D

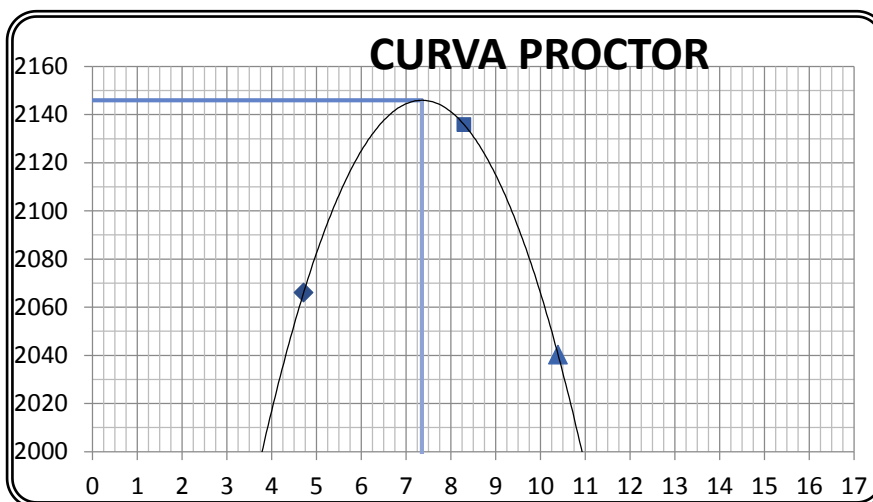
Determinación N°	Unidad	1	2	3
N° Capas	Capas	5	5	5
N° Golpes P/Capas	Golpes	56	56	56
Peso del Molde + Suelo Húmedo	gr.	7774.0	8085.0	7959.0
Peso del Molde	gr.	3274.0	3274.0	3274.0
Peso Suelo Húmedo	gr.	4500.0	4811.0	4685.0
Volumen del Molde	cc	2080.0	2080.0	2080.0
Peso Específico Húmedo	Kg./m3	2163.5	2313.0	2252.4
Cápsula No		136	149	148
Peso Cápsula + Suelo Húmedo	gr.	228.00	235.00	198.00
Peso Cápsula + Suelo Seco	gr.	219.00	219.00	182.00
Peso Agua	gr.	9.00	16.00	16.00
Peso Cápsula	gr.	28.00	26.00	28.00
Peso Suelo Seco	gr.	191.00	193.00	154.00
Contenido de Humedad	%	4.71	8.29	10.39
Peso Específico Seco	Kg./m3	2066.1	2135.9	2040.4

Densidad Máxima = 2146 Kg./m3

Humedad Óptima = 7.4 %

Tabla 4. 9 Ensayo de compactación mezcla "D"

Fuente: Elaboración propia



Gráfica 4. 8 Curva de compactación mezcla “D”

Fuente: Elaboración propia

4.1.3.2.4 Mezcla E

ENSAYO DE COMPACTACIÓN AASHTO T - 180 AASHTO T - 180 D

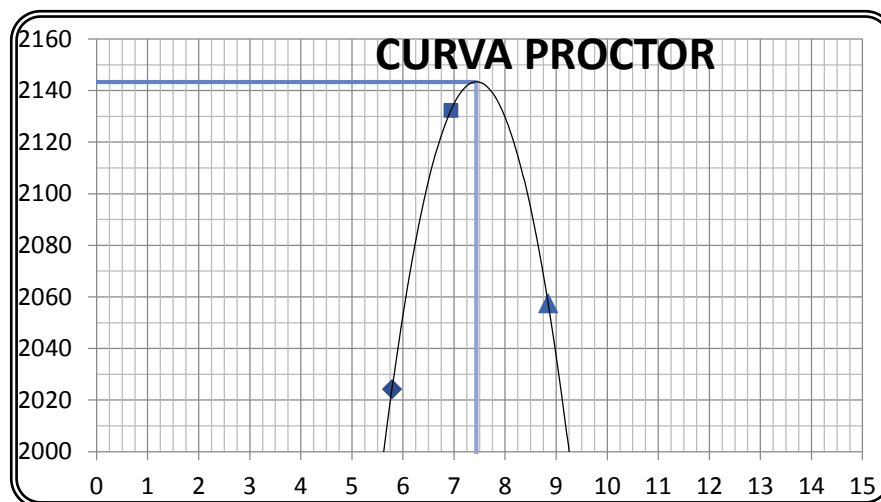
Determinación N°	Unidad	1	2	3
N° Capas	Capas	5	5	5
N° Golpes P/Capas	Golpes	56	56	56
Peso del Molde + Suelo Húmedo	gr.	7728.0	8017.0	7932.0
Peso del Molde	gr.	3274.0	3274.0	3274.0
Peso Suelo Húmedo	gr.	4454.0	4743.0	4658.0
Volumen del Molde	cc	2080.0	2080.0	2080.0
Peso Específico Húmedo	Kg./m3	2141.3	2280.3	2239.4
Cápsula No		160	14	138
Peso Cápsula + Suelo Húmedo	gr.	220.00	212.00	187.00
Peso Cápsula + Suelo Seco	gr.	209.50	200.00	174.00
Peso Agua	gr.	10.50	12.00	13.00
Peso Cápsula	gr.	28.00	27.00	27.00
Peso Suelo Seco	gr.	181.50	173.00	147.00
Contenido de Humedad	%	5.79	6.94	8.84
Peso Específico Seco	Kg./m3	2024.2	2132.4	2057.5

Densidad Máxima = 2143 Kg./m³

Humedad Óptima = 7.4 %

Tabla 4. 10 Ensayo de compactación mezcla “E”

Fuente: Elaboración propia



Gráfica 4. 9 Curva de compactación mezcla “E”

Fuente: Elaboración propia

4.1.3.2.5 Mezcla F

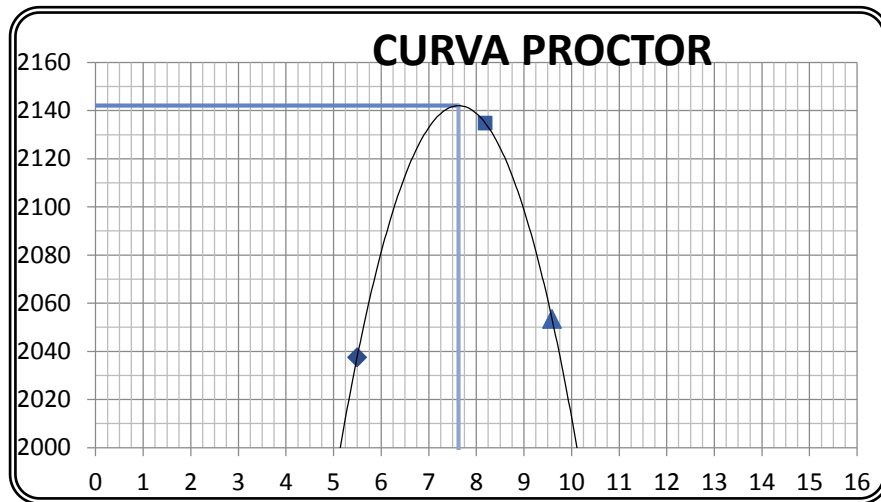
ENSAYO DE COMPACTACIÓN AASHTO T - 180 AASHTO T - 180 D

Determinación N°	Unidad	1	2	3
N° Capas	Capas	5	5	5
N° Golpes P/Capas	Golpes	56	56	56
Peso del Molde + Suelo Húmedo	gr.	7745.0	8078.0	7955.0
Peso del Molde	gr.	3274.0	3274.0	3274.0
Peso Suelo Húmedo	gr.	4471.0	4804.0	4681.0
Volumen del Molde	cc	2080.0	2080.0	2080.0
Peso Específico Húmedo	Kg./m3	2149.5	2309.6	2250.5
Cápsula No		160	14	138
Peso Cápsula + Suelo Húmedo	gr.	220.00	212.00	187.00
Peso Cápsula + Suelo Seco	gr.	210.00	198.00	173.00
Peso Agua	gr.	10.00	14.00	14.00
Peso Cápsula	gr.	28.00	27.00	27.00
Peso Suelo Seco	gr.	182.00	171.00	146.00
Contenido de Humedad	%	5.49	8.19	9.59
Peso Específico Seco	Kg./m3	2037.6	2134.8	2053.6

Densidad Máxima = 2142 Kg./m3
 Humedad Optima = 7.6 %

Tabla 4. 11 Ensayo de compactación mezcla “F”

Fuente: Elaboración propia



Gráfica 4. 10 Curva de compactación mezcla "F"

Fuente: Elaboración propia

4.1.3.3 Ensayo de Capacidad Soporte (C.B.R.)

La finalidad de este ensayo es determinar la relación de soporte de California (C.B.R.) de un suelo que está sometido a esfuerzos cortantes, además evaluar la calidad relativa del suelo para sub rasante, sub-base y base.

A continuación se muestran las tablas de cálculos y graficas del C.B.R.

4.1.3.3.1 Mezcla B

ENSAYO VALOR SOPORTE CALIFORNIA C.B.R. (AASHTO T-193)

RESUMEN MATERIAL CLASIFICACIÓN AASHTO M 145

Molde Nº	36	36	22	22	18	18
Nº de Capas	5	5	5	5	5	5
Nº de Golpes / Capa	56	56	25	25	12	12
Condición de la Muestra	Antes Embeber	Desp. Embeb.	Antes Embeber	Desp. Embeb.	Antes Embeber	Desp. Embeb.
Peso Muestra Húmeda+Molde (grs.)	10560	10580	11012	11084	11200	11337
Peso Molde (grs.)	5827	5827	6450	6450	6761	6761
Peso Muestra Húmeda (grs.)	4733	4753	4562	4634	4439	4576
Volumen de la muestra (cm3)	2100	2100	2105	2105	2130	2130
Densidad Húmeda (grs./cm3)	2.254	2.263	2.167	2.201	2.084	2.148

COMPACTACIÓN Y EMBEBIMIENTO

	De Compact.	De Embebido	De Compact.	De Embebido	De Compact.	De Embebido
Tara Nº	14	33	25	31	160	30
Peso Suelo Húmedo+Tara	207.00	189.00	257.00	196.00	210.00	175.00
Peso Suelo Seco + Tara	196.00	178.46	243.00	183.23	199.00	161.71
Peso Agua	11.00	10.54	14.00	12.77	11.00	13.29
Peso Tara	27.00	27.00	29.00	28.00	28.00	25.00
Peso Suelo Seco	169.00	151.46	214.00	155.23	171.00	136.71
% de Humedad	6.51	6.96	6.54	8.22	6.43	9.72
Densidad Seca Probeta (grs./cm3)	2.116	2.116	2.034	2.034	1.958	1.958
Densidad Máxima Laboratorio (grs./cm3)	2.150	2.150	2.150	2.150	2.150	2.150
% De Compactación	98.4	98.4	94.6	94.6	91.1	91.1

DETERMINACIÓN DE LA EXPANSIÓN

Fecha	Hora	Lect.	Alt(mm)	% Expansión	Lect.	Alt(mm)	% Expansión	Lect.	Alt(mm)	% Expansión
					0			0		
		40	1.016	0.345	51	1.2954	0.4397	60	1.524	0.5172

Factor Aro 5000

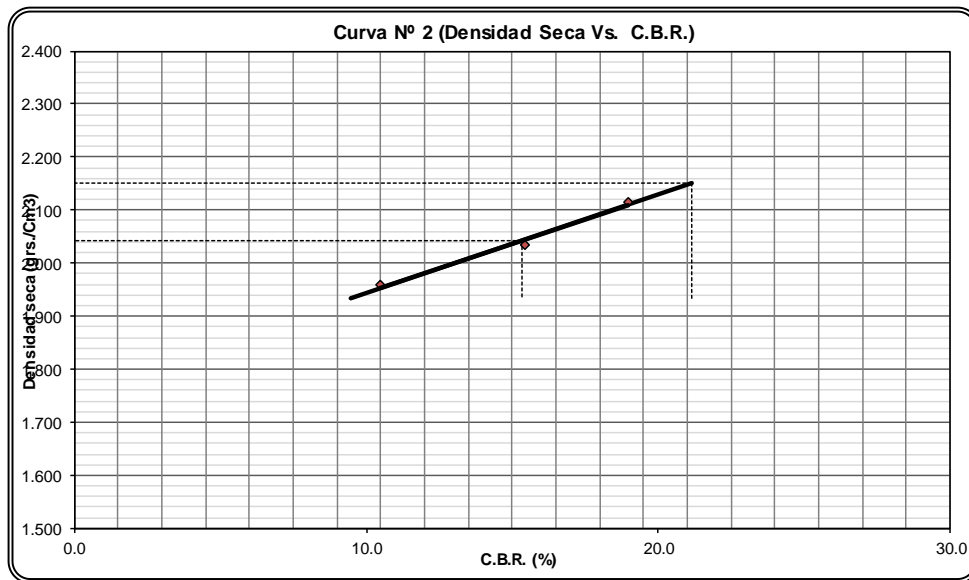
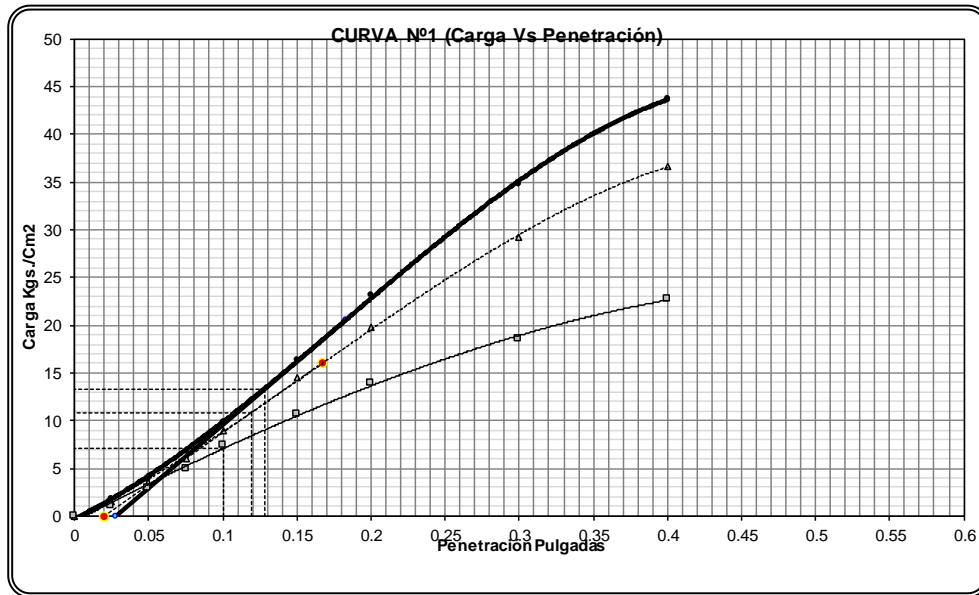
% Exp. Total **0.43**

PENETRACIÓN			Carga	Lect.	Carga (Kg./cm2)			%	Lect.	Carga (Kg./cm2)			%	
Min.	Pulg.	Mm.	Kg/cm2	Dial	Calc.	Correg.	C.B.R.	Dial	Calc.	Correg.	C.B.R.	Calc.	Correg.	C.B.R.
0.5	0.025	0.63		36	1.8			30	1.5			19	1.0	
1.0	0.050	1.27		73	3.8			67	3.5			58	3.0	
1.5	0.075	1.90		132	6.8			117	6.1			96	4.9	
2.0	0.100	2.54	70.3	190	9.8	13.3	19.0	173	8.9	10.9	15.45	142	7.4	7.4
3.0	0.150	0.38		318	16.4			282	14.6			207	10.7	
4.0	0.200	5.08	105.5	450	23.2			381	19.7			270	14.0	
6.0	0.300	7.62		672	34.7			564	29.2			358	18.5	
8.0	0.400	10.16		847	43.7			710	36.7			440	22.7	
10.0	0.500	12.70		0	0.0			0	0.0			0	0.0	

Tabla 4. 12 Ensayo C.B.R. mezcla "B"

Fuente: Elaboración propia

GRÁFICOS



DENS. AL 90% =	1.935	C.B.R.. AL 90% =	9.4
DENS. AL 95% =	2.043	C.B.R.. AL 95% =	15.3
DENS. AL 100% =	2.150	C.B.R.. AL 100% =	21.2
EXP. AL 95% =	0.4	EXP. AL 100% =	0.3

Grafica 4. 11 Carga vs penetración y Densidad vs C.B.R. mezcla “B”
Fuente: Elaboración propia

4.1.3.3.2 Mezcla C

ENSAYO VALOR SOPORTE CALIFORNIA C.B.R. (AASHTO T-193)

RESUMEN MATERIAL CLASIFICACIÓN AASHTO M 145

Molde Nº	31	31	30	30	24	24
Nº de Capas	5	5	5	5	5	5
Nº de Golpes / Capa	56	56	25	25	12	12
Condición de la Muestra	Antes Embeber	Desp. Embeb.	Antes Embeber	Desp. Embeb.	Antes Embeber	Desp. Embeb.
Peso Muestra Húmeda+Molde (grs.)	11055	11117	10566	10698	10767	10965
Peso Molde (grs.)	6274	6274	5990	5990	6393	6393
Peso Muestra Húmeda (grs.)	4781	4843	4576	4708	4374	4572
Volumen de la muestra (cm3)	2112	2112	2112	2112	2121	2121
Densidad Húmeda (grs./cm3)	2.264	2.293	2.167	2.229	2.062	2.156

COMPACTACIÓN Y EMBEBIMIENTO

	De Compact.	De Embebido	De Compact.	De Embebido	De Compact.	De Embebido
Tara Nº	134	33	160	31	25	30
Peso Suelo Húmedo+Tara	214.00	189.00	214.00	196.00	202.00	175.00
Peso Suelo Seco + Tara	202.00	176.77	202.00	180.75	191.00	159.43
Peso Agua	12.00	12.23	12.00	15.25	11.00	15.57
Peso Tara	25.00	27.00	28.00	28.00	28.00	25.00
Peso Suelo Seco	177.00	149.77	174.00	152.75	163.00	134.43
% de Humedad	6.78	8.16	6.90	9.98	6.75	11.58
Densidad Seca Probeta (grs./cm3)	2.120	2.120	2.027	2.027	1.932	1.932
Densidad Máxima Laboratorio (grs./cm3)	2.143	2.143	2.143	2.143	2.143	2.143
% De Compactación	98.9	98.9	94.6	94.6	90.1	90.1

DETERMINACIÓN DE LA EXPANSIÓN

Fecha	Hora	Lect.	Alt(mm)	% Expansión	Lect.	Alt(mm)	% Expansión	Lect.	Alt(mm)	% Expansión
						0			0	
		44	1.1176	0.379	52	1.3208	0.4483	63	1.6002	0.5431

Factor Aro 5000

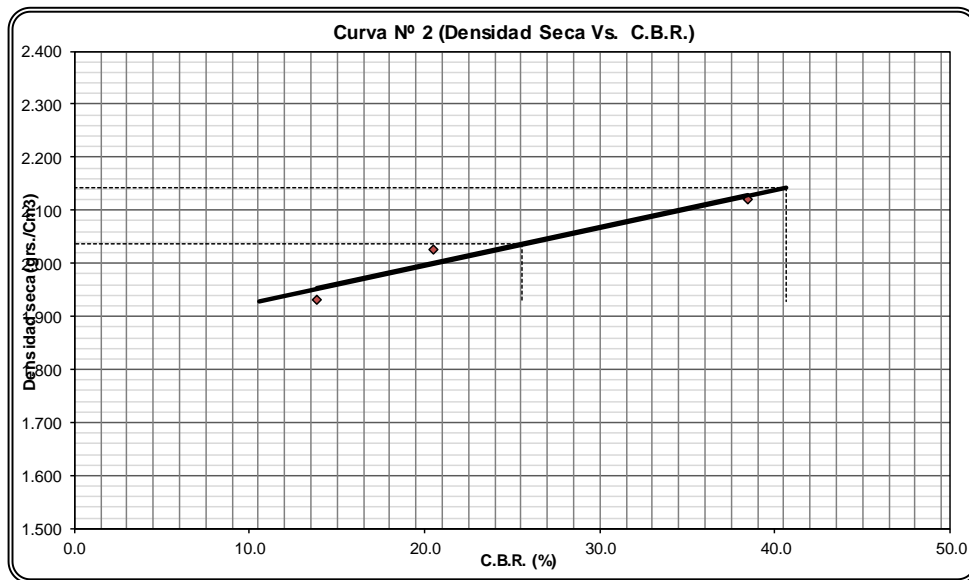
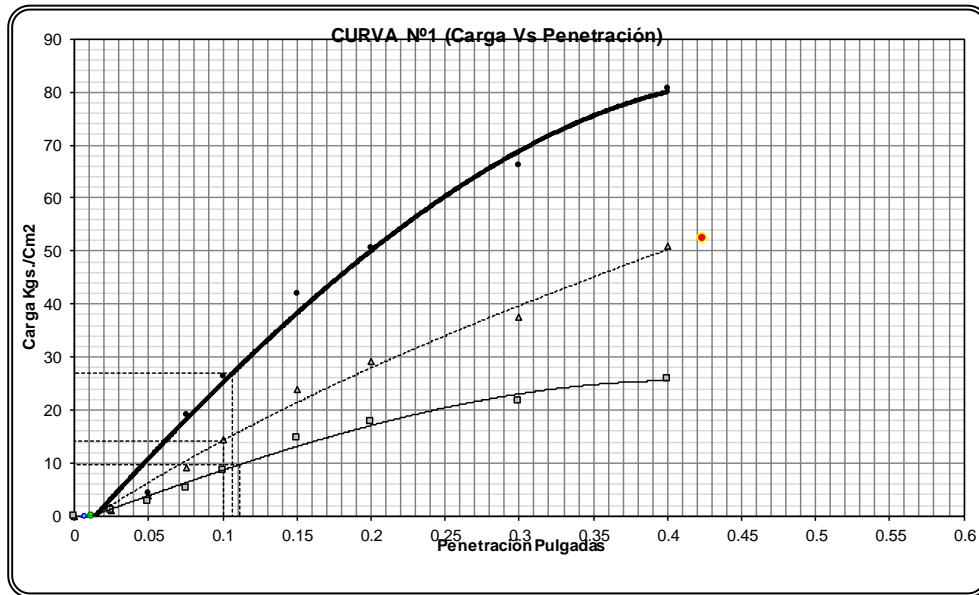
% Exp. Total **0.46**

PENETRACIÓN			Carga	Lect.	Carga (Kg./cm2)			%	Lect.	Carga (Kg./cm2)			%	Lect.	Carga (Kg./cm2)			%	
Min.	Pulg.	Mm.	Kg./cm2	Dial	Calc.	Correg.	C.B.R.	Dial	Calc.	Correg.	C.B.R.	Dial	Calc.	Correg.	C.B.R.	Dial	Calc.	Correg.	C.B.R.
0.5	0.025	0.63		29	1.5			23	1.2			19	1.0						
1.0	0.050	1.27		83	4.3			74	3.8			55	2.9						
1.5	0.075	1.90		369	19.1			179	9.2			99	5.1						
2.0	0.100	2.54	70.3	510	26.4	27.0	38.5	279	14.4	14.4	20.47	167	8.6	9.7	13.82				
3.0	0.150	3.81		812	42.0			465	24.0			285	14.7						
4.0	0.200	5.08	105.5	978	50.6			564	29.2			346	17.9						
6.0	0.300	7.62		1283	66.3			725	37.5			421	21.7						
8.0	0.400	10.16		1565	80.9			986	51.0			502	25.9						
10.0	0.500	12.70		0	0.0			0	0.0			0	0.0						

Tabla 4. 13 Ensayo C.B.R. mezcla "C"

Fuente: Elaboración propia

GRÁFICOS



DENS. AL 90% =	1.929	C.B.R.. AL 90% =	10.6
DENS. AL 95% =	2.036	C.B.R.. AL 95% =	25.6
DENS. AL 100% =	2.143	C.B.R.. AL 100% =	40.6
EXP. AL 95% =	0.4	EXP. AL 100% =	0.4

Grafica 4. 12 Carga vs penetración y Densidad vs C.B.R. mezcla “C”
Fuente: Elaboración propia

4.1.3.3.3 Mezcla D

ENSAYO VALOR SOPORTE CALIFORNIA C.B.R. (AASHTO T-193)

RESUMEN MATERIAL CLASIFICACIÓN AASHTO M 145

Molde Nº	54	54	50	50	18	18
Nº de Capas	5	5	5	5	5	5
Nº de Golpes / Capa	56	56	25	25	12	12
Condición de la Muestra	Antes Embeber	Desp. Embeb.	Antes Embeber	Desp. Embeb.	Antes Embeber	Desp. Embeb.
Peso Muestra Húmeda+Molde (grs.)	12995	13070	12577	12668	11221	11337
Peso Molde (grs.)	8079	8079	8013	8013	6761	6761
Peso Muestra Húmeda (grs.)	4916	4991	4564	4655	4460	4576
Volumen de la muestra (cm3)	2171	2171	2109	2109	2130	2130
Densidad Húmeda (grs./cm3)	2.264	2.299	2.164	2.207	2.094	2.148

COMPACTACIÓN Y EMBEBIMIENTO

	De Compact.	De Embebido	De Compact.	De Embebido	De Compact.	De Embebido
Tara Nº	160	33	14	31	25	30
Peso Suelo Húmedo+Tara	230.00	189.00	244.00	196.00	209.00	175.00
Peso Suelo Seco + Tara	216.00	175.51	229.00	181.33	196.00	160.70
Peso Agua	14.00	13.49	15.00	14.67	13.00	14.30
Peso Tara	28.00	27.00	27.00	28.00	28.00	25.00
Peso Suelo Seco	188.00	148.51	202.00	153.33	168.00	135.70
% de Humedad	7.45	9.09	7.43	9.57	7.74	10.54
Densidad Seca Probeta (grs./cm3)	2.107	2.107	2.014	2.014	1.944	1.944
Densidad Máxima Laboratorio (grs./cm3)	2.133	2.133	2.133	2.133	2.133	2.133
% De Compactación	98.8	98.8	94.4	94.4	91.1	91.1

DETERMINACIÓN DE LA EXPANSIÓN

Fecha	Hora	Lect.	Alt.(mm)	% Expansión	Lect.	Alt.(mm)	% Expansión	Lect.	Alt.(mm)	% Expansión
					0			0		
		45	1.143	0.388	55	1.397	0.4741	64	1.6256	0.5517

Factor Aro 5000

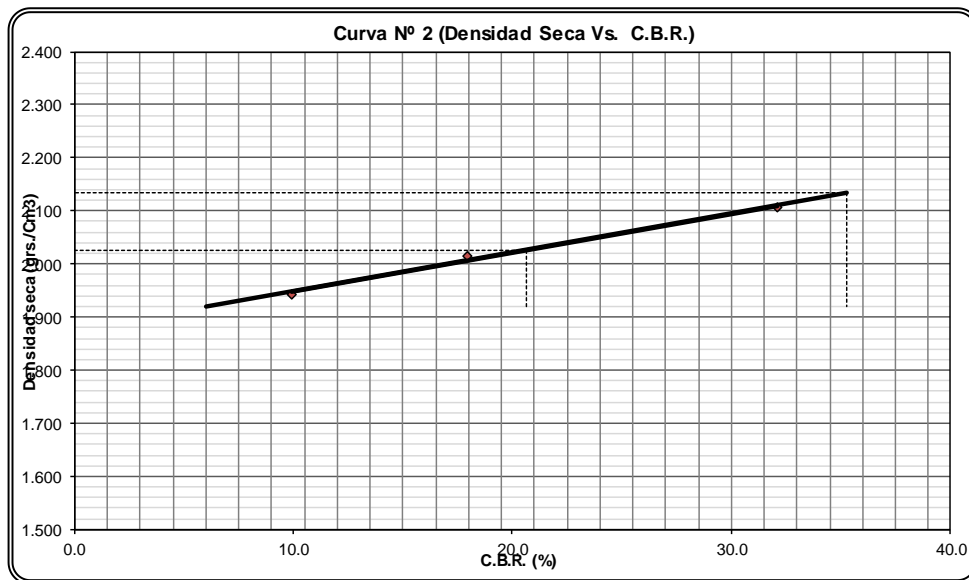
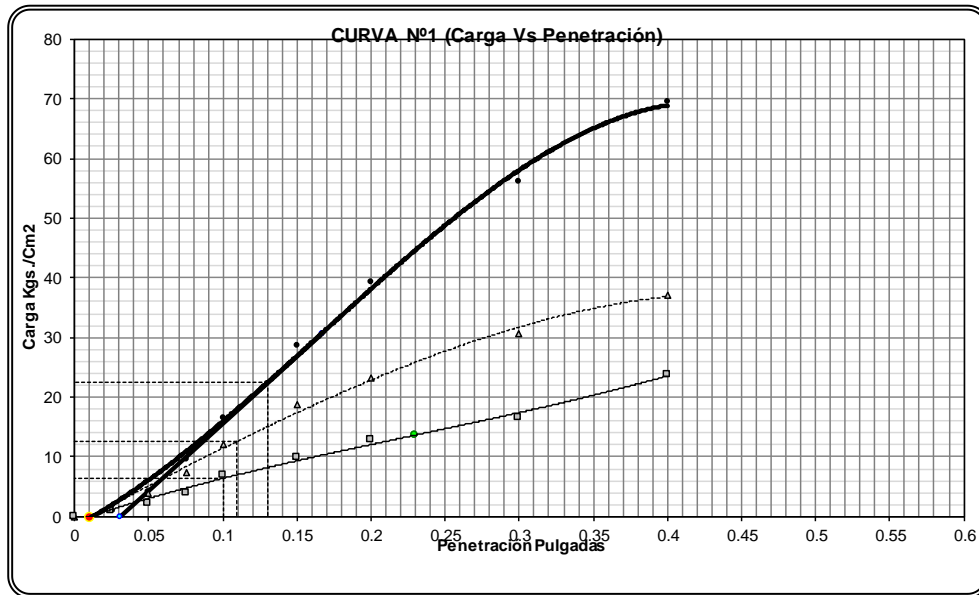
% Exp. Total 0.47

PENETRACIÓN			Carga	Lect.	Carga (Kg./cm2)	%	Lect.	Carga (Kg./cm2)	%	Lect.	Carga (Kg./cm2)	%			
Min.	Pulg.	Mm.	Kg./cm2	Dial	Calc.	Correg. C.B.R.	Dial	Calc.	Correg. C.B.R.	Calc.	Correg. C.B.R.				
0.5	0.025	0.63		29	1.5		28	1.4		18	0.9				
1.0	0.050	1.27		82	4.2		74	3.8		41	2.1				
1.5	0.075	1.90		185	9.5		143	7.4		77	4.0				
2.0	0.100	2.54	70.3	319	16.5	22.6	32.1	232	12.0	12.6	17.95	135	7.0	7.0	9.92
3.0	0.150	3.81		554	28.6			362	18.7			191	9.8		
4.0	0.200	5.08	105.5	760	39.3			451	23.3			246	12.7		
6.0	0.300	7.62		1090	56.3			594	30.7			321	16.6		
8.0	0.400	10.16		1344	69.4			720	37.2			461	23.8		
10.0	0.500	12.70		0	0.0			0	0.0			0	0.0		

Tabla 4. 14 Ensayo C.B.R. mezcla "D"

Fuente: Elaboración propia

GRÁFICOS



DENS. AL 90% =	1.920	C.B.R.. AL 90% =	6.0
DENS. AL 95% =	2.026	C.B.R.. AL 95% =	20.6
DENS. AL 100% =	2.133	C.B.R.. AL 100% =	35.3
EXP. AL 95% =	0.5	EXP. AL 100% =	0.4

Grafica 4. 13 Carga vs penetración y Densidad vs C.B.R. mezcla “D”
Fuente: Elaboración propia

4.1.3.3.4 Mezcla E

ENSAYO VALOR SOPORTE CALIFORNIA C.B.R. (AASHTO T-193)

RESUMEN MATERIAL CLASIFICACIÓN AASHTO M 145

Molde Nº	52	52	50	50	18	18
Nº de Capas	5	5	5	5	5	5
Nº de Golpes / Capa	56	56	25	25	12	12
Condición de la Muestra	Antes Embeber	Desp. Embeb.	Antes Embeber	Desp. Embeb.	Antes Embeber	Desp. Embeb.
Peso Muestra Húmeda+Molde (grs.)	12724	12775	12649	12722	11154	11279
Peso Molde (grs.)	7978	7978	8012	8012	6763	6763
Peso Muestra Húmeda (grs.)	4746	4797	4637	4710	4391	4516
Volumen de la muestra (cm3)	2096	2096	2109	2109	2130	2130
Densidad Húmeda (grs./cm3)	2.264	2.289	2.199	2.233	2.062	2.120

COMPACTACIÓN Y EMBEBIMIENTO

	De Compact.	De Embebido	De Compact.	De Embebido	De Compact.	De Embebido
Tara Nº	134	33	160	31	25	30
Peso Suelo Húmedo+Tara	189.00	189.00	215.00	196.00	212.00	175.00
Peso Suelo Seco + Tara	178.00	176.39	202.00	181.90	199.00	160.54
Peso Agua	11.00	12.61	13.00	14.10	13.00	14.46
Peso Tara	27.00	27.00	28.00	28.00	28.00	25.00
Peso Suelo Seco	151.00	149.39	174.00	153.90	171.00	135.54
% de Humedad	7.28	8.44	7.47	9.16	7.60	10.67
Densidad Seca Probeta (grs./cm3)	2.111	2.111	2.046	2.046	1.916	1.916
Densidad Máxima Laboratorio (grs./cm3)	2.148	2.148	2.148	2.148	2.148	2.148
% De Compactación	98.3	98.3	95.2	95.2	89.2	89.2

DETERMINACIÓN DE LA EXPANSIÓN

Fecha	Hora	Lect.	Alt(mm)	% Expansión	Lect.	Alt(mm)	% Expansión	Lect.	Alt(mm)	% Expansión
					0			0		
		133	3.3782	1.147	156	3.9624	1.3448	181	4.5974	1.5603

Factor Aro 5000

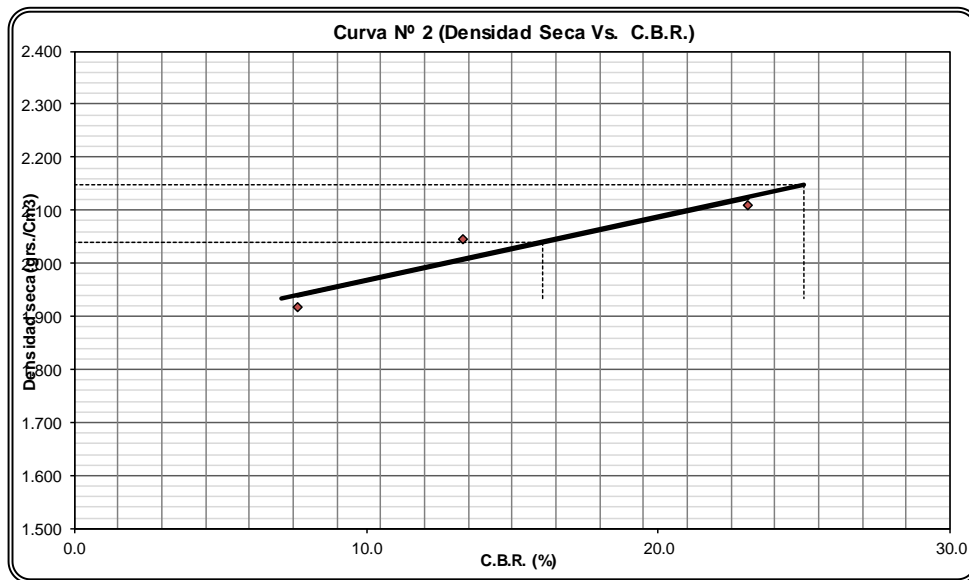
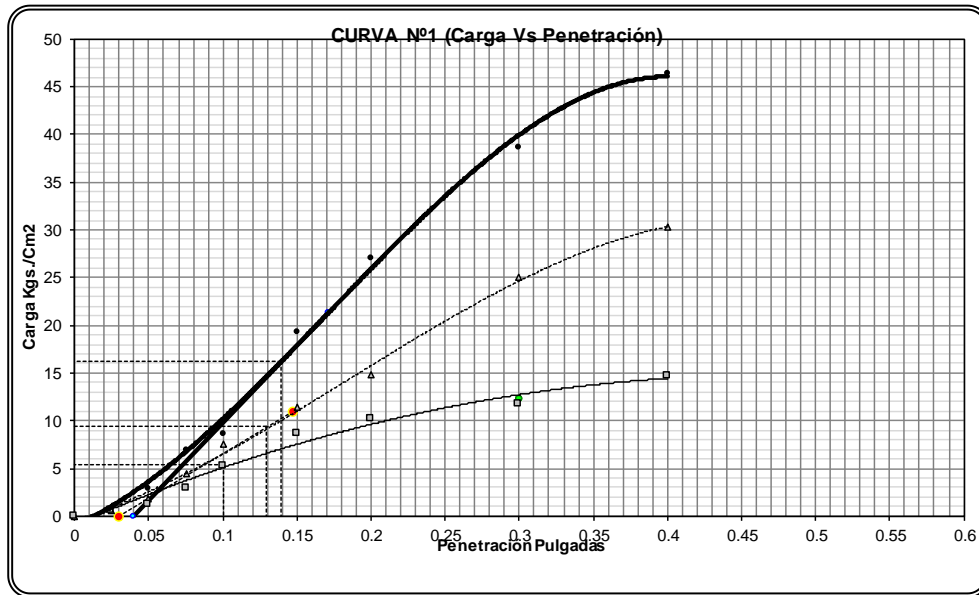
% Exp. Total 1.35

PENETRACIÓN			Carga	Lect.	Carga (Kg/cm2)	%	Lect.	Carga (Kg/cm2)	%	Lect.	Carga (Kg/cm2)	%
Min.	Pulg.	Mm.	Kg/cm2	Dial	Calc.	Correg. C.B.R.	Dial	Calc.	Correg. C.B.R.	Calc.	Correg. C.B.R.	
0.5	0.025	0.63		12	0.6		11	0.6		10	0.5	
1.0	0.050	1.27		56	2.9		35	1.8		24	1.2	
1.5	0.075	1.90		134	6.9		87	4.5		56	2.9	
2.0	0.100	2.54	70.3	168	8.7	16.2 23.1	145	7.5	9.4 13.30	101	5.2	5.4 7.63
3.0	0.150	0.38		375	19.4		220	11.4		169	8.7	
4.0	0.200	5.08	105.5	523	27.0		287	14.8		197	10.2	
6.0	0.300	7.62		747	38.6		484	25.0		227	11.7	
8.0	0.400	10.16		899	46.4		586	30.3		285	14.7	
10.0	0.500	12.70		0	0.0		0	0.0		0	0.0	

Tabla 4. 15 Ensayo C.B.R. mezcla "E"

Fuente: Elaboración propia

GRÁFICOS



DENS. AL 90% =	1.933	C.B.R.. AL 90% =	7.1
DENS. AL 95% =	2.041	C.B.R.. AL 95% =	16.0
DENS. AL 100% =	2.148	C.B.R.. AL 100% =	25.0
EXP. AL 95% =	1.4	EXP. AL 100% =	1.0

Grafica 4. 14 Carga vs penetración y Densidad vs C.B.R. mezcla “E”
Fuente: Elaboración propia

4.1.3.3.5 Mezcla F

ENSAYO VALOR SOPORTE CALIFORNIA C.B.R. (AASHTO T-193)

RESUMEN MATERIAL CLASIFICACIÓN AASHTO M 145

Molde Nº	54	54	51	51	50	50
Nº de Capas	5	5	5	5	5	5
Nº de Golpes / Capa	56	56	25	25	12	12
Condición de la Muestra	Antes Embeber	Desp. Embeb.	Antes Embeber	Desp. Embeb.	Antes Embeber	Desp. Embeb.
Peso Muestra Húmeda+Molde (grs.)	13003	13124	12389	12587	12356	12628
Peso Molde (grs.)	8080	8080	7802	7802	8003	8003
Peso Muestra Húmeda (grs.)	4923	5044	4587	4785	4353	4625
Volumen de la muestra (cm3)	2171	2171	2099	2099	2109	2109
Densidad Húmeda (grs./cm3)	2.268	2.323	2.185	2.280	2.064	2.193

COMPACTACIÓN Y EMBEBIMIENTO

	De Compact.	De Embebido	De Compact.	De Embebido	De Compact.	De Embebido
Tara Nº	14	33	160	31	134	30
Peso Suelo Húmedo+Tara	213.00	189.00	217.00	196.00	207.00	175.00
Peso Suelo Seco + Tara	200.00	174.00	204.00	177.97	194.00	155.93
Peso Agua	13.00	15.00	13.00	18.03	13.00	19.07
Peso Tara	28.00	27.00	28.00	28.00	28.00	25.00
Peso Suelo Seco	172.00	147.00	176.00	149.97	166.00	130.93
% de Humedad	7.56	10.20	7.39	12.02	7.83	14.57
Densidad Seca Probeta (grs./cm3)	2.108	2.108	2.035	2.035	1.914	1.914
Densidad Máxima Laboratorio (grs./cm3)	2.130	2.130	2.130	2.130	2.130	2.130
% De Compactación	99.0	99.0	95.5	95.5	89.9	89.9

DETERMINACIÓN DE LA EXPANSIÓN

Fecha	Hora	Lect.	Alt(mm)	% Expansión	Lect.	Alt(mm)	% Expansión	Lect.	Alt(mm)	% Expansión
					0			0		
		206	5.2324	1.776	247	6.2738	2.1293	283	7.1882	2.4397

Factor Aro 5000

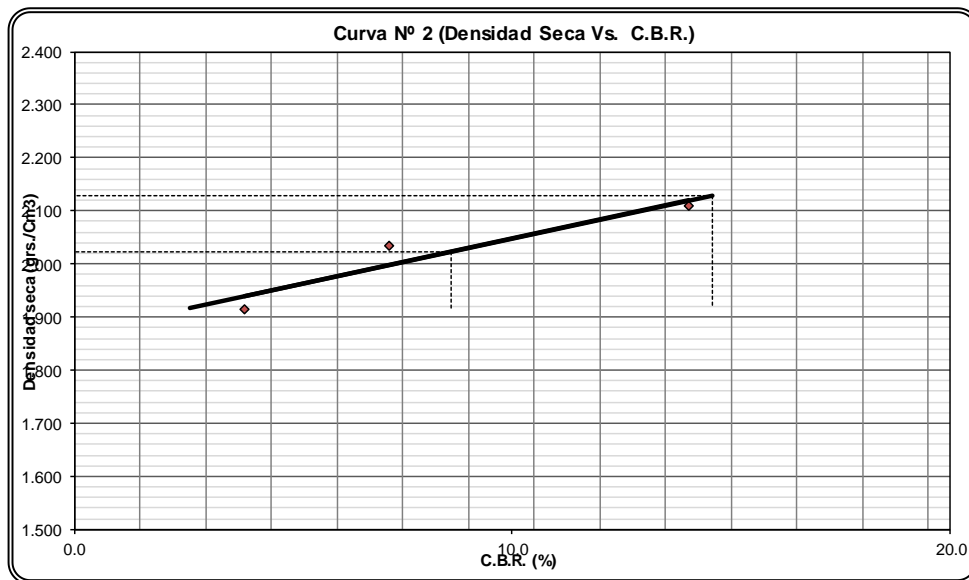
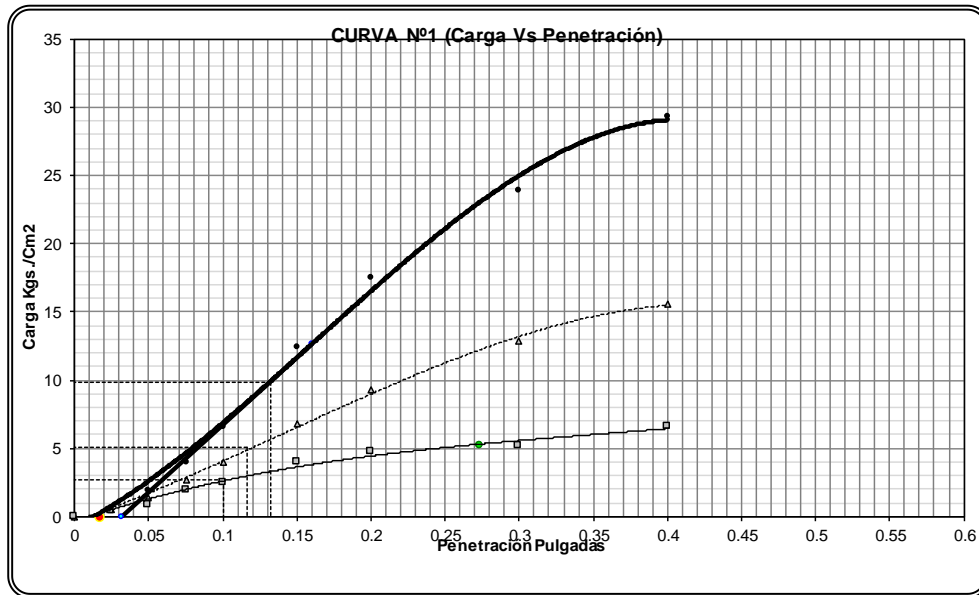
% Exp. Total 2.11

PENETRACIÓN			Carga	Lect.	Carga (Kg./cm2)			%	Lect.	Carga (Kg./cm2)			%	Lect.	Carga (Kg./cm2)			%		
Min.	Pulg.	Mm.	Kg./cm2	Dial	Calc.	Correg.	C.B.R.	Dial	Calc.	Correg.	C.B.R.	Dial	Calc.	Correg.	C.B.R.	Dial	Calc.	Correg.	C.B.R.	
0.5	0.025	0.63		12	0.6			10	0.5			7	0.4							
1.0	0.050	1.27		37	1.9			28	1.4			17	0.9							
1.5	0.075	1.90		78	4.0			53	2.7			37	1.9							
2.0	0.100	2.54	70.3	128	6.6	9.9	14.0	77	4.0	5.0	7.18	49	2.5	2.7	3.87					
3.0	0.150	3.81		240	12.4			133	6.8			77	4.0							
4.0	0.200	5.08	105.5	340	17.6			180	9.3			91	4.7							
6.0	0.300	7.62		462	23.9			248	12.8			100	5.2							
8.0	0.400	10.16		569	29.4			302	15.6			127	6.6							
10.0	0.500	12.70		0	0.0			0	0.0			0	0.0							

Tabla 4. 16 Ensayo C.B.R. mezcla "F"

Fuente: Elaboración propia

GRÁFICOS



DENS. AL 90% =	1.917	C.B.R.. AL 90% =	2.6
DENS. AL 95% =	2.024	C.B.R.. AL 95% =	8.6
DENS. AL 100% =	2.130	C.B.R.. AL 100% =	14.6
EXP. AL 95% =	2.2	EXP. AL 100% =	1.6

Grafica 4. 15 Carga vs penetración y Densidad vs C.B.R. mezcla “F”
Fuente: Elaboración propia

4.1.3.4 Ensayo de Desgaste de los Ángeles

Para este ensayo se tomó como material granular al derivado del reciclado de pavimentos, con el que se procedió a verificar el desgaste que tiene el material.

El tipo de desgaste que se hizo fue del tipo C, debido a que entre los tamices 1/4" y N°4 existía mayor porcentaje de material retenido, por lo que se procedió a tamizar material reciclado retenido en estos tamices tomando en cuenta que se debe trabajar con el material que sea pasante del tamiz 3/8 y se retenga en el 1/4" con un total de peso retenido de 2500 gr como también el material que sea pase el tamiz 1/4" y se retenga en el tamiza N° 4, de esta manera se realizó el ensayo.

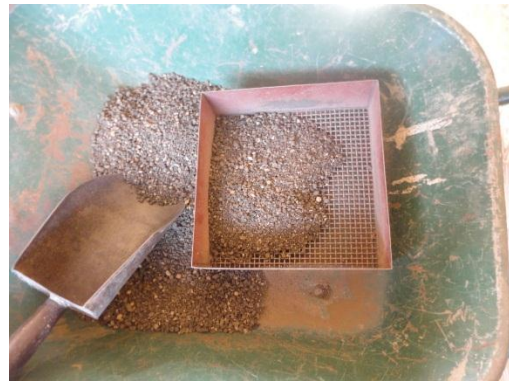


Figura 4. 13 Material pasante el tamiz 3/8" Figura 4. 14 Retenido el tamiz 1/4"
Fuente: Elaboración propia

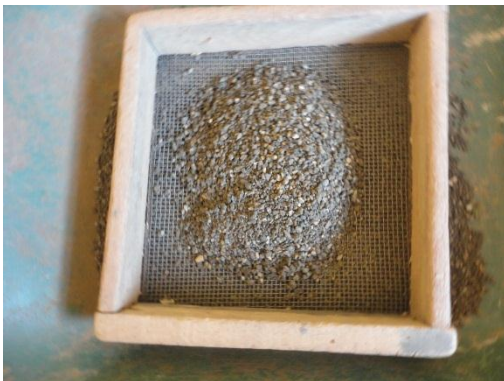


Figura 4. 15 Retenido en el tamiz N°4 Figura 4. 16 Retenido el tamiz 1/4" y N°4
Fuente: Elaboración propia



Figura 4. 17 Colocado de material en la Maquina de los ángeles
 Fuente: Elaboración propia



Figura 4. 18 Material después del ensayo de desgaste
 Fuente: Elaboración propia

DESGASTE LOS ANGELES

GRADACION: C
 CARGA ABRASIVA CON: 8

Esferas a 32,5 RPM 500 Revoluciones
--

PORCIONES DE MUESTRA:

PASADO	RETENIDO	CANTIDAD TOMADA
3/8	1/4	2500
1/4	4	2500
RETENIDO TAMIZ DE CORTE Nº 12 (1.7 mm)		4.185

DIFERENCIA	815
-------------------	-----

CALCULO:

$Desgaste = \frac{Diferencia}{5000} * 100$	16.3 %
--	--------

Tabla 4. 17 Ensayo Desgaste de los Ángeles pavimento reciclado
 Fuente: Elaboración propia

4.2 Proceso de mezclado y caracterización de material para capa base con incorporación del pavimento flexible reciclado

4.2.1 Proceso de mezclado para capa base

Para la caracterización de la capa base se efectuó una mezcla provisional que presenta al agregado de un pavimento asfáltico recuperado que es mezclado con un suelo natural, de características granulométricas de un suelo que cumple las especificaciones de capa sub base (suelo A-2-4(0)), para luego obtener un material que cumpla los requerimientos de la especificación establecida de capa base. El proceso de mezclado de material reciclado con el material natural se lo realizó de manera manual en porcentajes con respecto al total de la muestra en peso de cada mezcla.

Los porcentajes de mezcla que se realizaron fueron:

Combinación para base (reciclado – suelo A-2-4(0))		
Mezcla	% Reciclado	% Suelo A-2-4(0)
B-1	20	80
C-1	40	60
D-1	50	50
E-1	60	40

}Tabla 4. 18 Combinación para capa base (reciclado – suelo A-2-4(0))

Fuente: Elaboración propia

4.2.2 Criterios para el mezclado

Al realizar el mezclado del material reciclado con suelo natural suelo A-2-4(0), se tomó como punto de partida el criterio de causa y efecto, dando como resultado los siguientes criterios:

- Cuando se adiciona un material o aditivo para estabilizar un suelo, este se lo mezcla o agrega en una proporción que no sea mayor a la cantidad de suelo natural, estableciendo los porcentajes de las mezclas B-1, C-1 y D-1.

- La mezcla E-1 donde la cantidad de material reciclado es mayor a la cantidad de suelo natural, será realizada con fines investigativos para conocer el efecto que causa el pavimento reciclado en una mayor proporción con respecto al total.
- Las mezclas se las realizara variando en un 10% del total de cada material, buscando de esta manera ver el efecto del reciclado en el suelo natural, ya sea en el aumento o disminución de las características mecánicas de las mezclas, así mismo si se mezclaría en proporciones que varíen cada 1% sería menos notorio el efecto de las propiedades de cada mezcla.

Para cada diferente mezcla en porcentajes se tuvo que efectuar su caracterización respectiva, que será detallada a continuación.

4.2.3 Caracterización del material para capa sub base

4.2.3.1 Granulometría

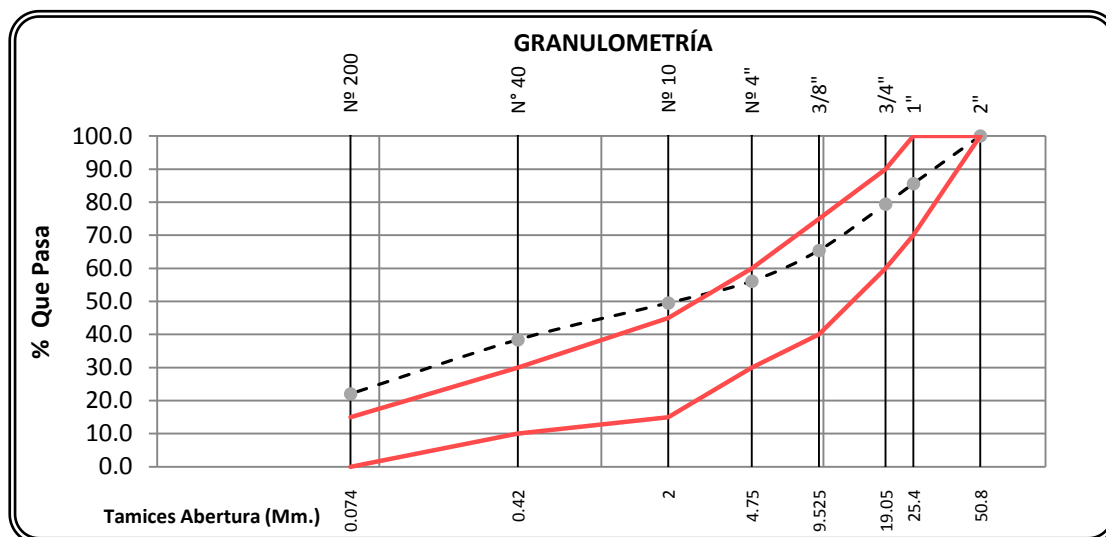
4.2.3.1.1 Mezcla B-1

GRANULOMETRÍA AASHTO T 27

Peso total seco (grs.)		5000					
Tamiz	Peso Retenido	Peso Retenido	% Retenido	% Retenido	% Que	Abertura	Especif.
Nº	Tamiz (grs.)	Acumulado (grs.)	Tamiz	Acumulado	Pasa	Mm.	
2"	210.0	210.0	4.2	4.2	95.80	38.10	100
1"	510.0	720.0	10.2	14.4	85.60	25.40	70-100
3/4"	310.0	1030.0	6.2	20.6	79.40	19.05	60-90
3/8"	700.0	1730.0	14.0	34.6	65.40	9.525	40-75
4	465.0	2195.0	9.3	43.9	56.10	4.800	30-60
10	2525.0	2525.0	50.5	50.5	49.50	2.000	15-45
40	555.0	3080.0	11.1	61.6	38.40	0.420	10-30
200	820.0	3900.0	16.4	78.0	22.00	0.074	0-15

Tabla 4. 19 Análisis granulométrico mezcla "B-1"

Fuente: Elaboración propia



Grafica 4. 16 Curva granulométrica mezcla "B-1"

Fuente: Elaboración propia

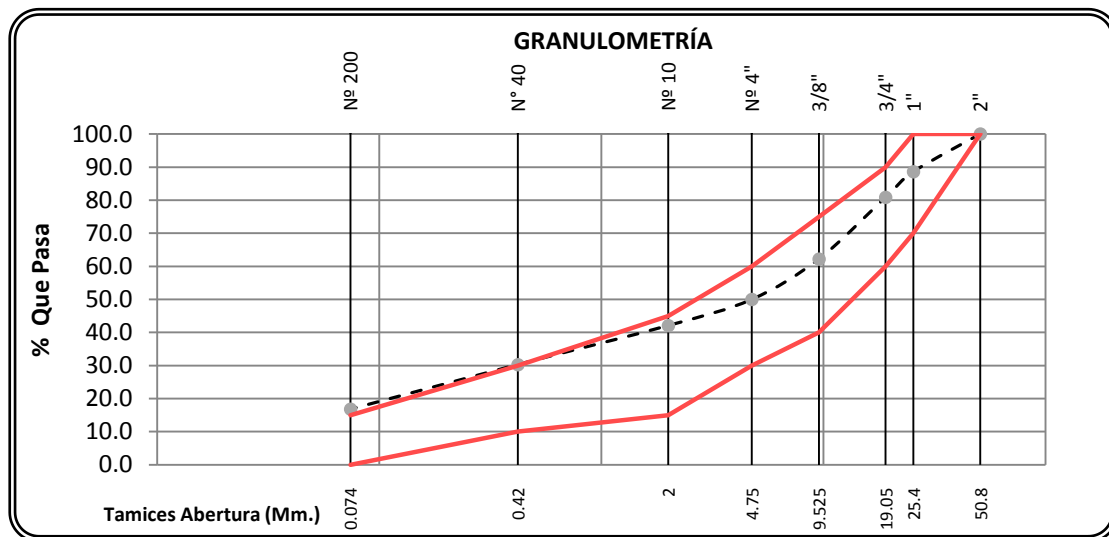
4.2.3.1.2 Mezcla C-1

GRANULOMETRÍA AASHTO T 27

Peso total seco (grs.)		5000					
Tamiz	Peso Retenido	Peso Retenido	% Retenido	% Retenido	% Que	Abertura	Especif.
Nº	Tamiz (grs.)	Acumulado (grs.)	Tamiz	Acumulado	Pasa	Mm.	
2"	175.0	175.0	3.5	3.5	96.50	38.10	100
1"	395.0	570.0	7.9	11.4	88.60	25.40	70-100
3/4"	385.0	955.0	7.7	19.1	80.90	19.05	60-90
3/8"	935.0	1890.0	18.7	37.8	62.20	9.525	40-75
4	610.0	2500.0	12.2	50.0	50.00	4.800	30-60
10	2895.0	2895.0	57.9	57.9	42.10	2.000	15-45
40	590.0	3485.0	11.8	69.7	30.30	0.420	10-30
200	675.0	4160.0	13.5	83.2	16.80	0.074	0-15

Tabla 4. 20 Análisis granulométrico mezcla "C-1"

Fuente: Elaboración propia



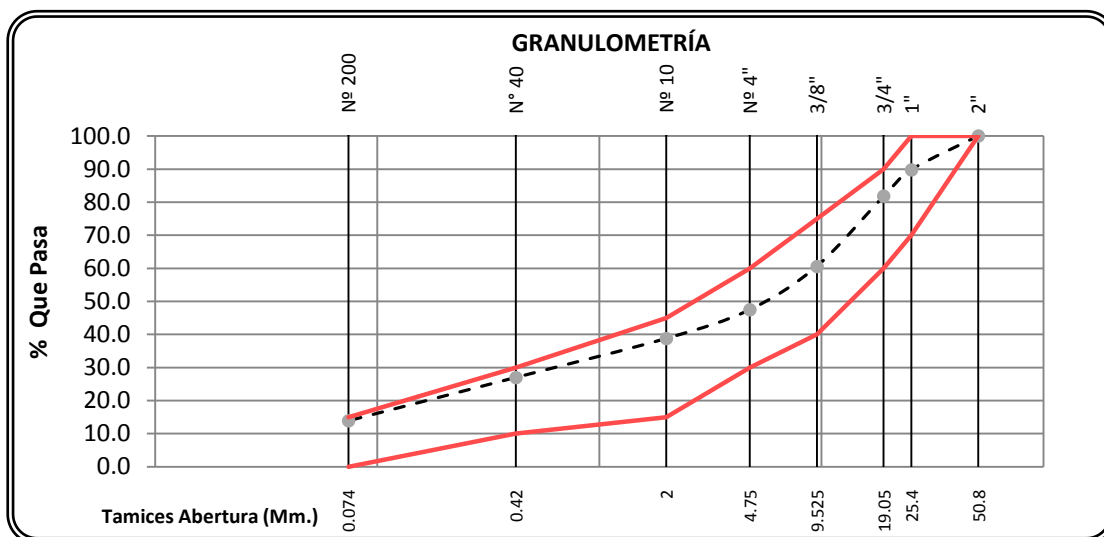
Gráfica 4.17 Curva granulométrica mezcla "C-1"
Fuente: Elaboración propia

4.2.3.1.3 Mezcla D-1

GRANULOMETRÍA AASHTO T 27

Peso total seco (grs.)		5000					
Tamiz	Peso Retenido	Peso Retenido	% Retenido	% Retenido	% Que	Abertura	Especif.
Nº	Tamiz (grs.)	Acumulado (grs.)	Tamiz	Acumulado	Pasa	Mm.	
2"	150.0	150.0	3.0	3.0	97.00	38.10	100
1"	360.0	510.0	7.2	10.2	89.80	25.40	70-100
3/4"	400.0	910.0	8.0	18.2	81.80	19.05	60-90
3/8"	1060.0	1970.0	21.2	39.4	60.60	9.525	40-75
4	655.0	2625.0	13.1	52.5	47.50	4.800	30-60
10	3060.0	3060.0	61.2	61.2	38.80	2.000	15-45
40	590.0	3650.0	11.8	73.0	27.00	0.420	10-30
200	655.0	4305.0	13.1	86.1	13.90	0.074	0-15

Tabla 4.21 Análisis granulométrico mezcla "D-1"
Fuente: Elaboración propia



Grafica 4. 18 Curva granulométrica mezcla "D-1"

Fuente: Elaboración propia

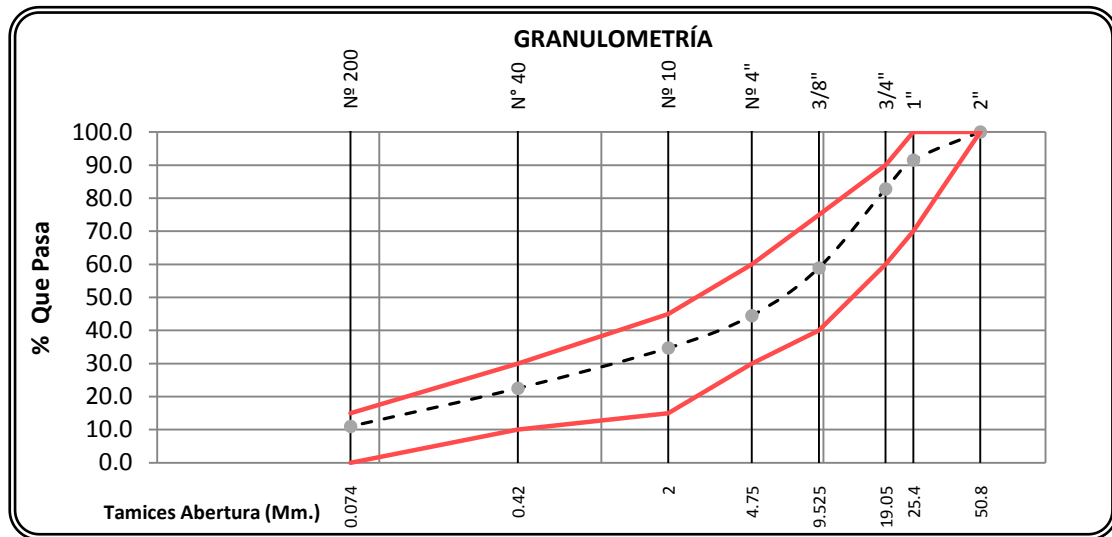
4.2.3.1.4 Mezcla E-1

GRANULOMETRÍA AASHTO T 27

Peso total seco (grs.)		5000					
Tamiz	Peso Retenido	Peso Retenido	% Retenido	% Retenido	% Que	Abertura	Especif.
Nº	Tamiz (grs.)	Acumulado (grs.)	Tamiz	Acumulado	Pasa	Mm.	
2"	105.0	105.0	2.1	2.1	97.90	38.10	100
1"	320.0	425.0	6.4	8.5	91.50	25.40	70-100
3/4"	435.0	860.0	8.7	17.2	82.80	19.05	60-90
3/8"	1195.0	2055.0	23.9	41.1	58.90	9.525	40-75
4	720.0	2775.0	14.4	55.5	44.50	4.800	30-60
10	3265.0	3265.0	65.3	65.3	34.70	2.000	15-45
40	610.0	3875.0	12.2	77.5	22.50	0.420	10-30
200	575.0	4450.0	11.5	89.0	11.00	0.074	0-15

Tabla 4. 22 Análisis granulométrico mezcla "E-1"

Fuente: Elaboración propia



Grafica 4. 19 Curva granulométrica mezcla "E-1"

Fuente: Elaboración propia

4.2.3.2 Ensayo de Compactación

4.2.3.2.1 Mezcla B-1

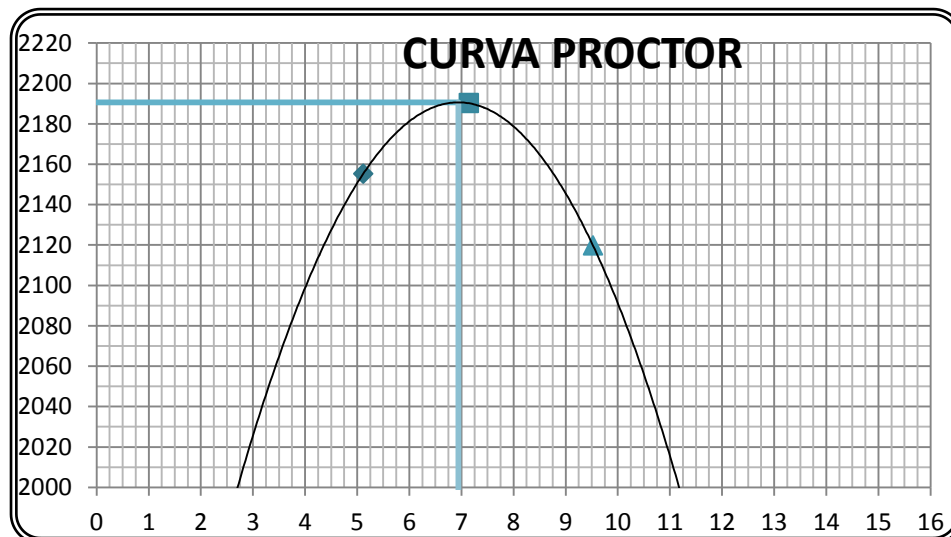
ENSAYO DE COMPACTACIÓN AASHTO T - 180
AASHTO T - 180 D

Determinación N°	Unidad	1	2	3
N° Capas	Capas	5	5	5
N° Golpes P/Capas	Golpes	56	56	56
Peso del Molde + Suelo Húmedo	gr.	7986.0	8155.0	8103.0
Peso del Molde	gr.	3274.0	3274.0	3274.0
Peso Suelo Húmedo	gr.	4712.0	4881.0	4829.0
Volumen del Molde	cc	2080.0	2080.0	2080.0
Peso Específico Húmedo	Kg./m3	2265.4	2346.6	2321.6
Cápsula No		134	114	136
Peso Cápsula + Suelo Húmedo	gr.	213.00	221.00	212.00
Peso Cápsula + Suelo Seco	gr.	204.00	208.00	196.00
Peso Agua	gr.	9.00	13.00	16.00
Peso Cápsula	gr.	28.00	26.00	28.00
Peso Suelo Seco	gr.	176.00	182.00	168.00
Contenido de Humedad	%	5.11	7.14	9.52
Peso Específico Seco	Kg./m3	2155.2	2190.2	2119.8

Densidad Máxima = 2191 Kg./m3
Humedad Optima = 6.9 %

Tabla 4. 23 Ensayo de compactación mezcla “B-1”

Fuente: Elaboración propia



Gráfica 4. 20 Curva de compactación mezcla “B-1”

Fuente: Elaboración propia

4.2.3.2.2 Mezcla C-1

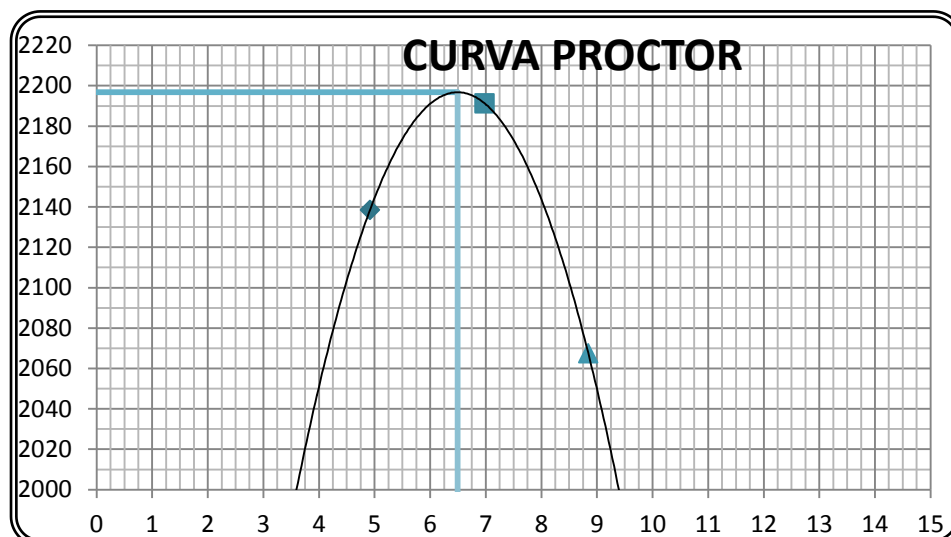
ENSAYO DE COMPACTACIÓN AASHTO T - 180
AASHTO T - 180 D

Determinación N°	Unidad	1	2	3
N° Capas	Capas	5	5	5
N° Golpes P/Capas	Golpes	56	56	56
Peso del Molde + Suelo Húmedo	gr.	7941.0	8150.0	7955.0
Peso del Molde	gr.	3274.0	3274.0	3274.0
Peso Suelo Húmedo	gr.	4667.0	4876.0	4681.0
Volumen del Molde	cc	2080.0	2080.0	2080.0
Peso Específico Húmedo	Kg./m3	2243.8	2344.2	2250.5
Cápsula No		160	14	138
Peso Cápsula + Suelo Húmedo	gr.	220.00	212.00	187.00
Peso Cápsula + Suelo Seco	gr.	211.00	200.00	174.00
Peso Agua	gr.	9.00	12.00	13.00
Peso Cápsula	gr.	28.00	28.00	27.00
Peso Suelo Seco	gr.	183.00	172.00	147.00
Contenido de Humedad	%	4.92	6.98	8.84
Peso Específico Seco	Kg./m3	2138.6	2191.3	2067.6

Densidad Máxima = 2197 Kg./m3
Humedad Optima = 6.5 %

Tabla 4. 24 Ensayo de compactación mezcla “C-1”

Fuente: Elaboración propia



Grafica 4. 21 Curva de compactación mezcla “C-1”

Fuente: Elaboración propia

4.2.3.2.3 Mezcla D-1

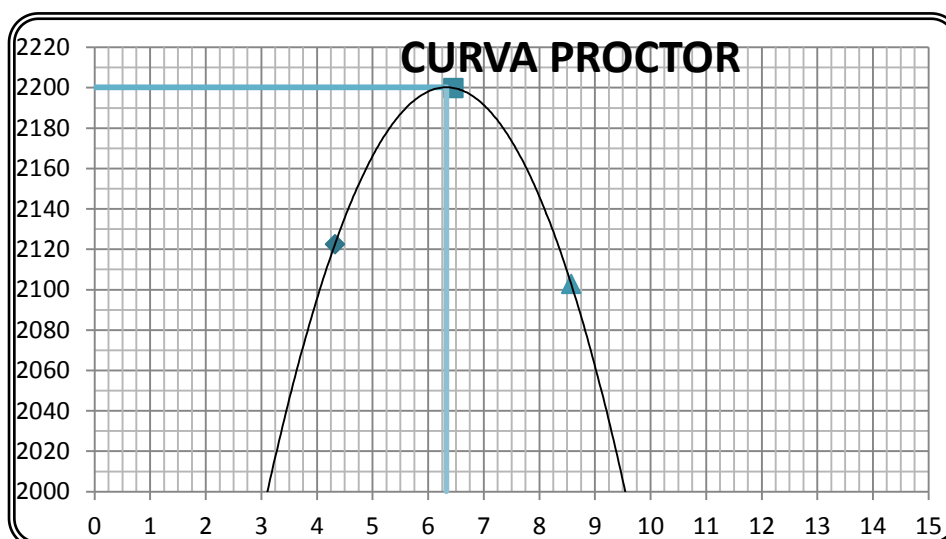
ENSAYO DE COMPACTACIÓN AASHTO T - 180
AASHTO T - 180 D

Determinación N°	Unidad	1	2	3
N° Capas	Capas	5	5	5
N° Golpes P/Capas	Golpes	56	56	56
Peso del Molde + Suelo Húmedo	gr.	7880.0	8145.0	8023.0
Peso del Molde	gr.	3274.0	3274.0	3274.0
Peso Suelo Húmedo	gr.	4606.0	4871.0	4749.0
Volumen del Molde	cc	2080.0	2080.0	2080.0
Peso Específico Húmedo	Kg./m3	2214.4	2341.8	2283.2
Cápsula No		160	138	31
Peso Cápsula + Suelo Húmedo	gr.	220.00	192.00	215.00
Peso Cápsula + Suelo Seco	gr.	212.00	182.00	200.00
Peso Agua	gr.	8.00	10.00	15.00
Peso Cápsula	gr.	27.00	27.00	25.00
Peso Suelo Seco	gr.	185.00	155.00	175.00
Contenido de Humedad	%	4.32	6.45	8.57
Peso Específico Seco	Kg./m3	2122.6	2199.9	2102.9

Densidad Máxima = 2200 Kg./m3
Humedad Optima = 6.3 %

Tabla 4. 25 Ensayo de compactación mezcla “D-1”

Fuente: Elaboración propia



Grafica 4. 22 Curva de compactación mezcla “D-1”

Fuente: Elaboración propia

4.2.3.2.4 Mezcla E-1

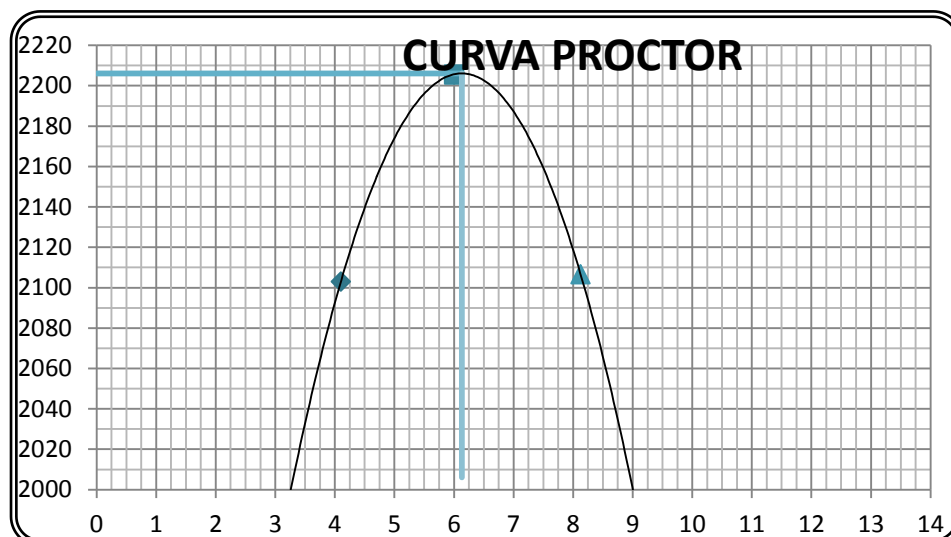
ENSAYO DE COMPACTACIÓN AASHTO T - 180
AASHTO T - 180 D

Determinación N°	Unidad	1	2	3
N° Capas	Capas	5	5	5
N° Golpes P/Capas	Golpes	56	56	56
Peso del Molde + Suelo Húmedo	gr.	7828.0	8137.0	8012.0
Peso del Molde	gr.	3274.0	3274.0	3274.0
Peso Suelo Húmedo	gr.	4554.0	4863.0	4738.0
Volumen del Molde	cc	2080.0	2080.0	2080.0
Peso Específico Húmedo	Kg./m3	2189.4	2338.0	2277.9
Cápsula No		214	152	31
Peso Cápsula + Suelo Húmedo	gr.	231.00	238.00	201.00
Peso Cápsula + Suelo Seco	gr.	223.00	226.00	188.00
Peso Agua	gr.	8.00	12.00	13.00
Peso Cápsula	gr.	28.00	26.00	28.00
Peso Suelo Seco	gr.	195.00	200.00	160.00
Contenido de Humedad	%	4.10	6.00	8.13
Peso Específico Seco	Kg./m3	2103.1	2205.6	2106.7

Densidad Máxima = 2206 Kg./m3
Humedad Optima = 6.1 %

Tabla 4. 26 Ensayo de compactación mezcla “E-1”

Fuente: Elaboración propia



Grafica 4. 23 Curva de compactación mezcla “E-1”

Fuente: Elaboración propia

4.2.3.3 Ensayo de Capacidad Soporte (CBR)

4.2.3.3.1 Mezcla B-1

ENSAYO VALOR SOPORTE CALIFORNIA C.B.R. (AASHTO T-193)

RESUMEN MATERIAL CLASIFICACIÓN AASHTO M 145

Molde Nº	31	31	30	30	24	24
Nº de Capas	5	5	5	5	5	5
Nº de Golpes / Capa	56	56	25	25	12	12
Condición de la Muestra	Antes Embeber	Desp. Embeb.	Antes Embeber	Desp. Embeb.	Antes Embeber	Desp. Embeb.
Peso Muestra Húmeda+Molde (grs.)	11176	11257	10687	10829	10840	11017
Peso Molde (grs.)	6274	6274	5990	5990	6393	6393
Peso Muestra Húmeda (grs.)	4902	4983	4697	4839	4447	4624
Volumen de la muestra (cm3)	2112	2112	2112	2112	2121	2121
Densidad Húmeda (grs./cm3)	2.321	2.359	2.224	2.291	2.097	2.180

COMPACTACIÓN Y EMBEBIMIENTO

	De Compact.	De Embebido	De Compact.	De Embebido	De Compact.	De Embebido
Tara Nº	31	33	145	31	149	30
Peso Suelo Húmedo+Tara	217.00	189.00	210.00	196.00	231.00	175.00
Peso Suelo Seco + Tara	204.50	175.99	198.00	180.32	217.50	159.76
Peso Agua	12.50	13.01	12.00	15.68	13.50	15.24
Peso Tara	25.00	27.00	28.00	28.00	26.00	25.00
Peso Suelo Seco	179.50	148.99	170.00	152.32	191.50	134.76
% de Humedad	6.96	8.73	7.06	10.30	7.05	11.31
Densidad Seca Probeta (grs./cm3)	2.170	2.170	2.077	2.077	1.959	1.959
Densidad Máxima Laboratorio (grs./cm3)	2.191	2.191	2.191	2.191	2.191	2.191
% De Compactación	99.0	99.0	94.8	94.8	89.4	89.4

DETERMINACIÓN DE LA EXPANSIÓN

Fecha	Hora	Lect.	Alt(mm)	% Expansión	Lect.	Alt(mm)	% Expansión	Lect.	Alt(mm)	% Expansión
					0			0		
		0	0	0	0	0	0	0	0	0

Factor Aro 5000

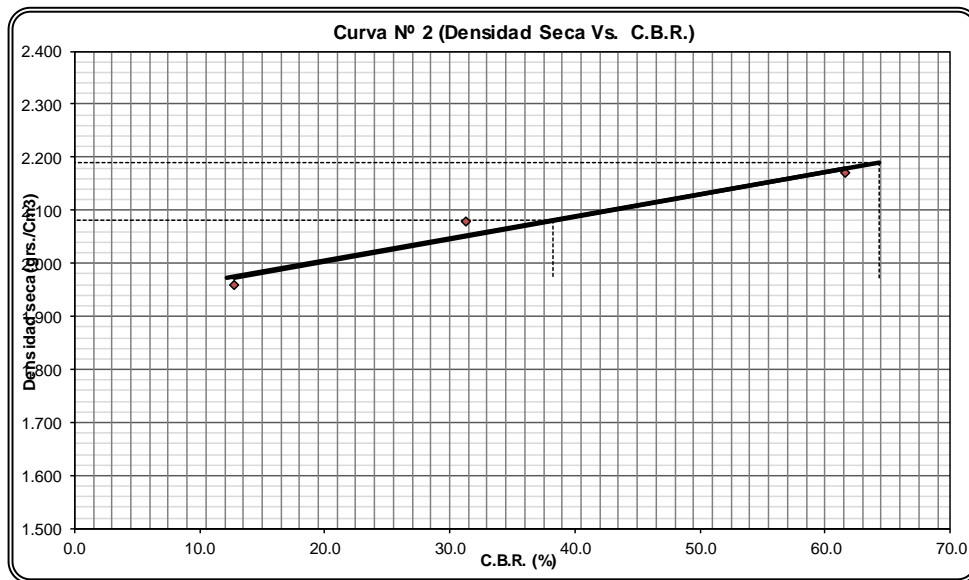
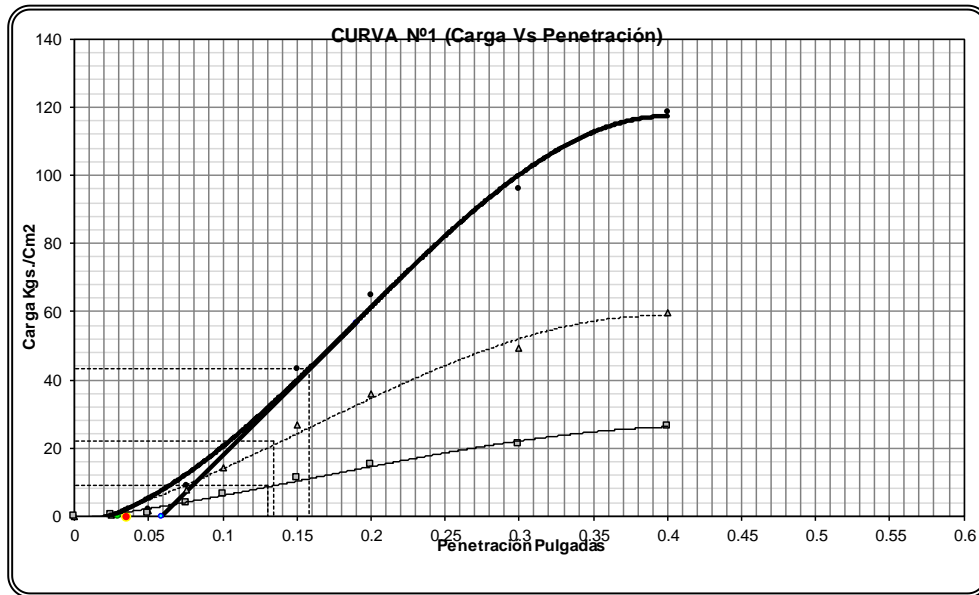
% Exp. Total **0.00**

PENETRACIÓN			Carga	Lect.	Carga (Kg./cm2)	%	Lect.	Carga (Kg./cm2)	%	Lect.	Carga (Kg./cm2)	%
Min.	Pulg.	Mm.	Kg/cm2	Dial	Calc.	Correg. C.B.R.	Dial	Calc.	Correg. C.B.R.	Dial	Calc.	Correg. C.B.R.
0.5	0.025	0.63		6	0.3		5	0.3		3	0.2	
1.0	0.050	1.27		43	2.2		30	1.6		17	0.9	
1.5	0.075	1.90		175	9.0		146	7.5		73	3.8	
2.0	0.100	2.54	70.3	393	20.3	43.3 61.6	276	14.3	22.0 31.33	123	6.3	9.0 12.76
3.0	0.150	0.38		839	43.4		521	26.9		213	11.0	
4.0	0.200	5.08	105.5	1253	64.8		699	36.1		291	15.0	
6.0	0.300	7.62		1858	96.0		957	49.4		410	21.2	
8.0	0.400	10.16		2294	118.5		1152	59.5		512	26.5	
10.0	0.500	12.70		0	0.0		0	0.0		0	0.0	

Tabla 4. 27 Ensayo C.B.R. mezcla "B-1"

Fuente: Elaboración propia

GRÁFICOS



DENS. AL 90%=	1.972	C.B.R.. AL 90%=	12.2
DENS. AL 95%=	2.081	C.B.R.. AL 95%=	38.3
DENS. AL 100%=	2.191	C.B.R.. AL 100%=	64.4
EXP. AL 95%=	0.0	EXP. AL 100%=	0.0

Grafica 4. 24 Carga vs penetración y Densidad vs C.B.R. mezcla “B-1”
Fuente: Elaboración propia

4.2.3.3.2 Mezcla C-1

ENSAYO VALOR SOPORTE CALIFORNIA C.B.R. (AASHTO T-193)

RESUMEN MATERIAL CLASIFICACIÓN AASHTO M 145

Molde Nº	31	31	30	30	24	24
Nº de Capas	5	5	5	5	5	5
Nº de Golpes / Capa	56	56	25	25	12	12
Condición de la Muestra	Antes Embeber	Desp. Embeb.	Antes Embeber	Desp. Embeb.	Antes Embeber	Desp. Embeb.
Peso Muestra Húmeda+Molde (grs.)	11167	11243	10671	10796	10867	11026
Peso Molde (grs.)	6274	6274	5990	5990	6393	6393
Peso Muestra Húmeda (grs.)	4893	4969	4681	4806	4474	4633
Volumen de la muestra (cm3)	2112	2112	2112	2112	2121	2121
Densidad Húmeda (grs./cm3)	2.317	2.353	2.216	2.276	2.109	2.184

COMPACTACIÓN Y EMBEBIMIENTO

	De Compact.	De Embebido	De Compact.	De Embebido	De Compact.	De Embebido
Tara Nº	134	33	160	31	25	30
Peso Suelo Húmedo+Tara	214.00	189.00	214.00	196.00	202.00	175.00
Peso Suelo Seco + Tara	202.50	176.82	202.50	181.51	191.50	161.11
Peso Agua	11.50	12.18	11.50	14.49	10.50	13.89
Peso Tara	25.00	27.00	28.00	28.00	28.00	25.00
Peso Suelo Seco	177.50	149.82	174.50	153.51	163.50	136.11
% de Humedad	6.48	8.13	6.59	9.44	6.42	10.20
Densidad Seca Probeta (grs./cm3)	2.176	2.176	2.079	2.079	1.982	1.982
Densidad Máxima Laboratorio (grs./cm3)	2.197	2.197	2.197	2.197	2.197	2.197
% De Compactación	99.0	99.0	94.6	94.6	90.2	90.2

DETERMINACIÓN DE LA EXPANSIÓN

Fecha	Hora	Lect.	Alt(mm)	% Expansión	Lect.	Alt(mm)	% Expansión	Lect.	Alt(mm)	% Expansión
					0			0		
		0	0	0	0	0	0	0	0	0

Factor Aro 5000

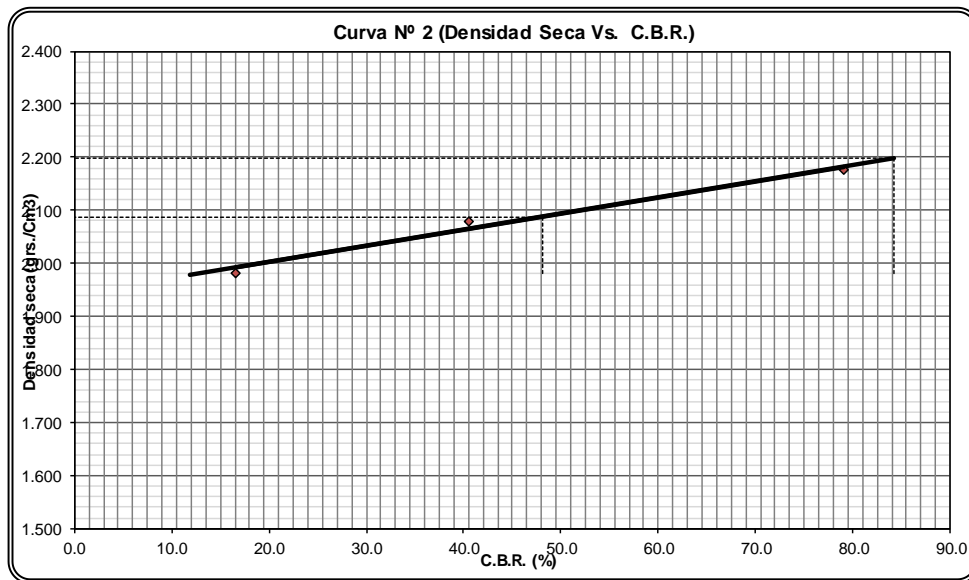
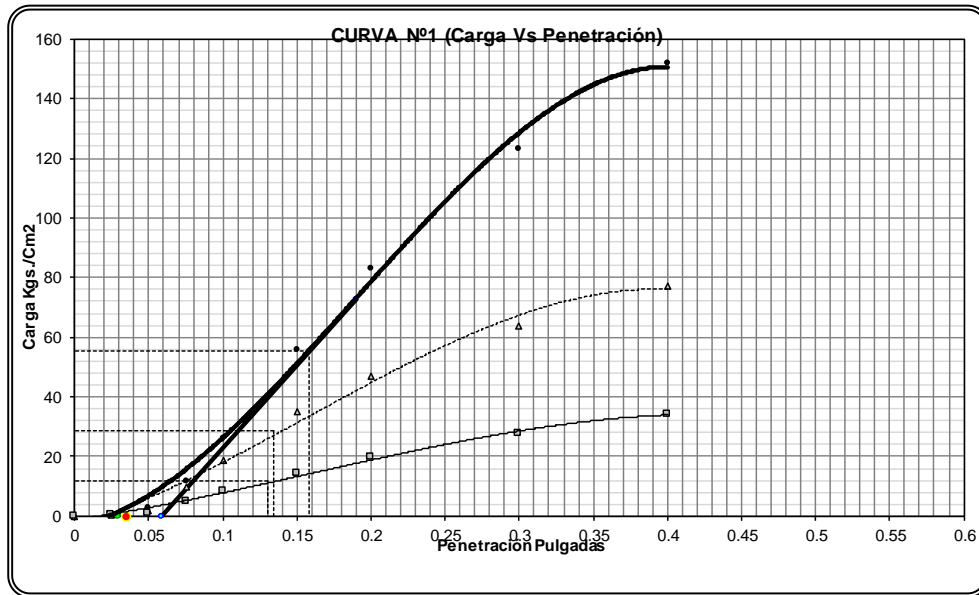
% Exp. Total 0.00

PENETRACIÓN			Carga	Lect.	Carga (Kg/cm2)			%	Lect.	Carga (Kg/cm2)			%	Lect.	Carga (Kg/cm2)			%		
Min.	Pulg.	Mm.	Kg/cm2	Dial	Calc.	Correg.	C.B.R.	Dial	Calc.	Correg.	C.B.R.	Dial	Calc.	Correg.	C.B.R.	Dial	Calc.	Correg.	C.B.R.	
0.5	0.025	0.63		8	0.4			7	0.4			4	0.2							
1.0	0.050	1.27		55	2.8			39	2.0			22	1.1							
1.5	0.075	1.90		224	11.6			189	9.8			95	4.9							
2.0	0.100	2.54	70.3	504	26.0	55.6	79.1	358	18.5	28.5	40.58	159	8.2	11.6	16.52					
3.0	0.150	3.81		1077	55.6			675	34.9			276	14.3							
4.0	0.200	5.08	105.5	1609	83.1			905	46.8			377	19.5							
6.0	0.300	7.62		2385	123.2			1239	64.0			531	27.4							
8.0	0.400	10.16		2945	152.2			1492	77.1			663	34.3							
10.0	0.500	12.70		0	0.0			0	0.0			0	0.0							

Tabla 4. 28 Ensayo C.B.R. mezcla "C-1"

Fuente: Elaboración propia

GRÁFICOS



DENS. AL 90%=	1.977	C.B.R.. AL 90%=	11.9
DENS. AL 95%=	2.087	C.B.R.. AL 95%=	48.1
DENS. AL 100%=	2.197	C.B.R.. AL 100%=	84.2
EXP. AL 95%=	0.0	EXP. AL 100%=	0.0

Grafica 4. 25 Carga vs penetración y Densidad vs C.B.R. mezcla “C-1”
Fuente: Elaboración propia

4.2.3.3.3 Mezcla D-1

ENSAYO VALOR SOPORTE CALIFORNIA C.B.R. (AASHTO T-193)

RESUMEN MATERIAL CLASIFICACIÓN AASHTO M 145

Molde Nº	22	22	18	18	15	15
Nº de Capas	5	5	5	5	5	5
Nº de Golpes / Capa	56	56	25	25	12	12
Condiciones de la Muestra	Antes Embeber	Desp. Embeb.	Antes Embeber	Desp. Embeb.	Antes Embeber	Desp. Embeb.
Peso Muestra Húmeda+Molde (grs.)	11326	11381	11489	11601	11328	11461
Peso Molde (grs.)	6449	6449	6763	6763	6889	6889
Peso Muestra Húmeda (grs.)	4877	4932	4726	4838	4439	4572
Volumen de la muestra (cm3)	2105	2105	2130	2130	2155	2155
Densidad Húmeda (grs./cm3)	2.317	2.343	2.219	2.271	2.060	2.122

COMPACTACIÓN Y EMBEBIMIENTO

	De Compact.	De Embebido	De Compact.	De Embebido	De Compact.	De Embebido
Tara Nº	136	33	35	31	374	30
Peso Suelo Húmedo+Tara	209.00	189.00	209.00	196.00	217.00	175.00
Peso Suelo Seco + Tara	198.00	177.51	198.00	182.30	205.50	161.82
Peso Agua	11.00	11.49	11.00	13.70	11.50	13.18
Peso Tara	27.00	27.00	25.00	28.00	27.00	25.00
Peso Suelo Seco	171.00	150.51	173.00	154.30	178.50	136.82
% de Humedad	6.43	7.63	6.36	8.88	6.44	9.63
Densidad Seca Probeta (grs./cm3)	2.177	2.177	2.086	2.086	1.935	1.935
Densidad Máxima Laboratorio (grs./cm3)	2.200	2.200	2.200	2.200	2.200	2.200
% De Compactación	98.9	98.9	94.8	94.8	88.0	88.0

DETERMINACIÓN DE LA EXPANSIÓN

Fecha	Hora	Lect.	Alt(mm)	% Expansión	Lect.	Alt(mm)	% Expansión	Lect.	Alt(mm)	% Expansión
					0			0		
		0	0	0	0	0	0	0	0	0

Factor Aro 5000

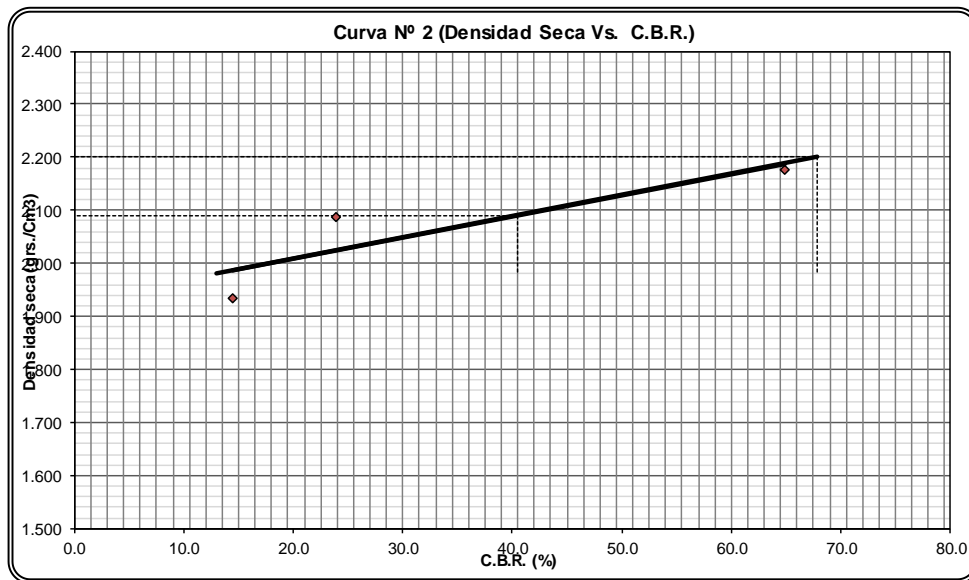
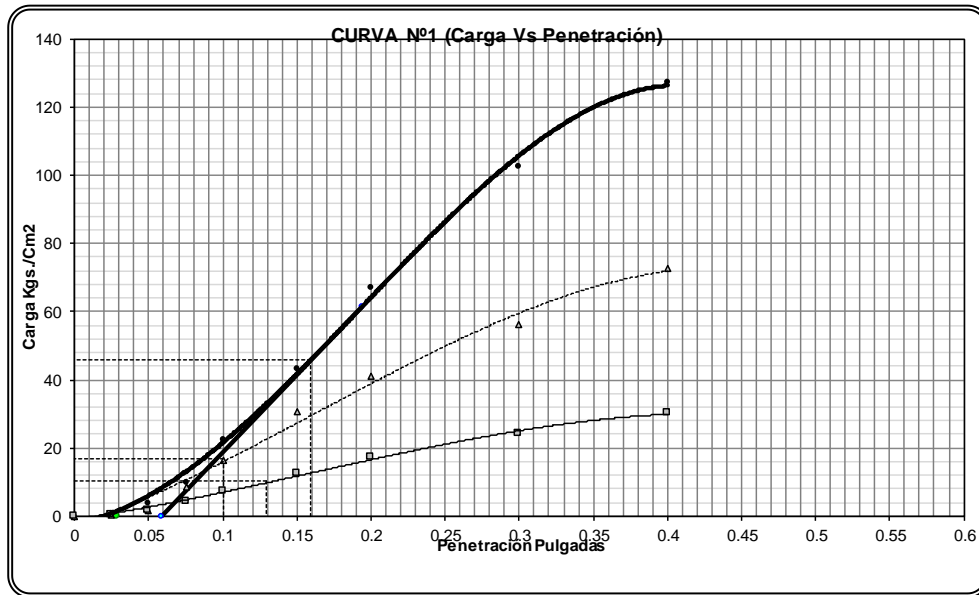
% Exp. Total 0.00

PENETRACIÓN			Carga	Lect.	Carga (Kg./cm2)			%	Lect.	Carga (Kg./cm2)			%	Lect.	Carga (Kg./cm2)			%		
Min.	Pulg.	Mm.	Kg./cm2	Dial	Calc.	Correg.	C.B.R.	Dial	Calc.	Correg.	C.B.R.	Dial	Calc.	Correg.	C.B.R.	Dial	Calc.	Correg.	C.B.R.	
0.5	0.025	0.63		12	0.6			10	0.5			8	0.4							
1.0	0.050	1.27		78	4.0			34	1.8			29	1.5							
1.5	0.075	1.90		195	10.1			166	8.6			84	4.3							
2.0	0.100	2.54	70.3	438	22.7	45.7	65.0	314	16.2	16.8	23.92	140	7.2	10.2	14.48					
3.0	0.150	0.38		837	43.2			593	30.6			243	12.5							
4.0	0.200	5.08	105.5	1300	67.2			795	41.1			332	17.1							
6.0	0.300	7.62		1989	102.8			1088	56.2			467	24.1							
8.0	0.400	10.16		2462	127.2			1410	72.9			583	30.1							
10.0	0.500	12.70		0	0.0			0	0.0			0	0.0							

Tabla 4. 29 Ensayo C.B.R. mezcla "D-1"

Fuente: Elaboración propia

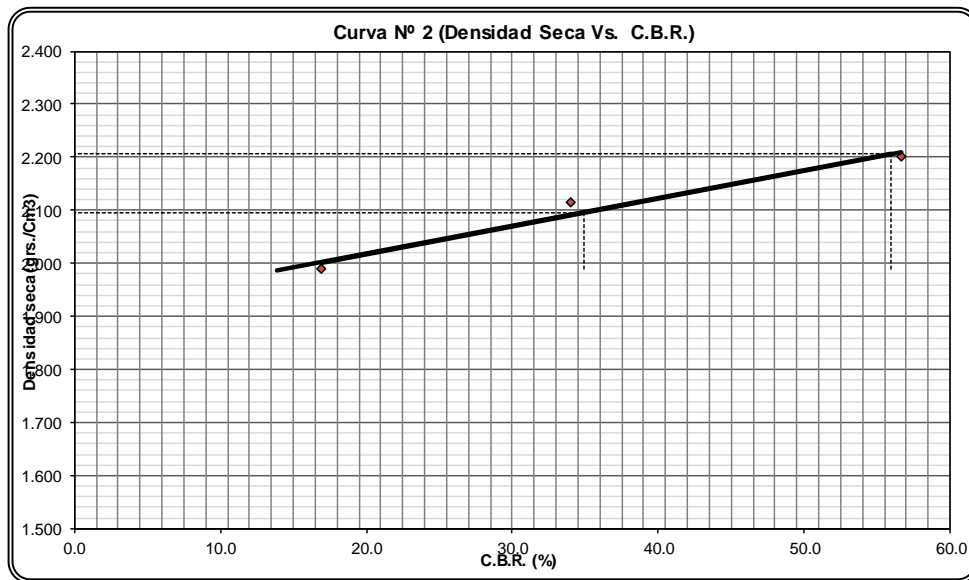
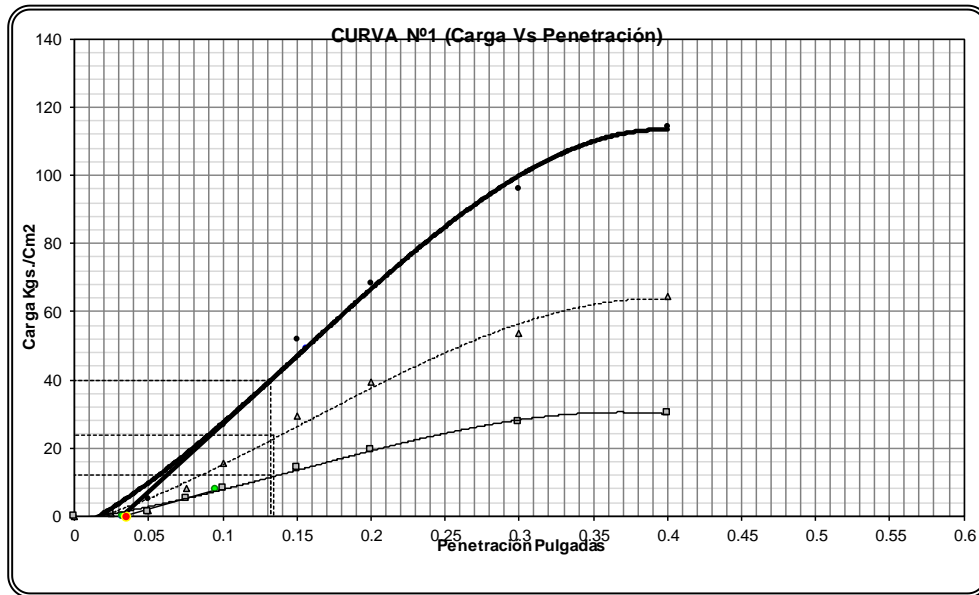
GRÁFICOS



DENS. AL 90%=	1.980	C.B.R.. AL 90%=	13.0
DENS. AL 95%=	2.090	C.B.R.. AL 95%=	40.4
DENS. AL 100%=	2.200	C.B.R.. AL 100%=	67.8
EXP. AL 95%=	0.0	EXP. AL 100%=	0.0

Grafica 4. 26 Carga vs penetración y Densidad vs C.B.R. mezcla “D-1”
Fuente: Elaboración propia

GRÁFICOS



DENS. AL 90%=	1.985	C.B.R.. AL 90%=	13.9
DENS. AL 95%=	2.096	C.B.R.. AL 95%=	34.9
DENS. AL 100%=	2.206	C.B.R.. AL 100%=	55.9
EXP. AL 95%=	0.0	EXP. AL 100%=	0.0

Grafica 4. 27 Carga vs penetración y Densidad vs C.B.R. mezcla “E-1”
Fuente: Elaboración propia

4.2.3.4 Ensayo de Desgaste de los Ángeles

4.2.3.4.1 Mezcla B-1

DESGASTE LOS ANGELES

GRADACION: **B**
CARGA ABRASIVA CON: **11**

Esferas a 32,5 RPM
500 Revoluciones

PORCIONES DE MUESTRA:

PASADO	RETENIDO	CANTIDAD TOMADA
3/4	1/2	2500
1/2	3/8	2500
RETENIDO TAMIZ DE CORTE Nº 12 (1.7 mm)		3,085
DIFERENCIA		1,915

CALCULO:

$Desgaste = \frac{Diferencia}{5000} * 100$	38.3 %
--	---------------

Tabla 4. 31 Ensayo Desgaste de los Ángeles mezcla “B-1”
Fuente: Elaboración propia

4.2.3.4.2 Mezcla C-1

DESGASTE LOS ANGELES

GRADACION: B
 CARGA ABRASIVA CON: 11

Esferas a 32,5 RPM
 500 Revoluciones

PORCIONES DE MUESTRA:

PASADO	RETENIDO	CANTIDAD TOMADA
3/4	1/2	2500
1/2	3/8	2500
RETENIDO TAMIZ DE CORTE Nº 12 (1.7 mm)		3.256
DIFERENCIA		1.744

CALCULO:

$\text{Desgaste} = \frac{\text{Diferencia}}{5000} * 100$	34.88 %
--	----------------

Tabla 4. 32 Ensayo Desgaste de los Ángeles mezcla “C-1”
 Fuente: Elaboración propia

4.2.3.4.3 Mezcla D-1

DESGASTE LOS ANGELES

GRADACION: B
 CARGA ABRASIVA CON: 11

Esferas a 32,5 RPM
 500 Revoluciones

PORCIONES DE MUESTRA:

PASADO	RETENIDO	CANTIDAD TOMADA
3/4	1/2	2500
1/2	3/8	2500
RETENIDO TAMIZ DE CORTE Nº 12 (1.7 mm)		3.396
DIFERENCIA		1.604

CALCULO:

$Desgaste = \frac{Diferencia}{5000} * 100$	32.08 %
--	----------------

Tabla 4. 33 Ensayo Desgaste de los Ángeles mezcla “D-1”
 Fuente: Elaboración propia

4.2.3.4.4 Mezcla E-1

DESGASTE LOS ANGELES

GRADACION: B
CARGA ABRASIVA CON: 11

Esferas a 32,5 RPM
500 Revoluciones

PORCIONES DE MUESTRA:

PASADO	RETENIDO	CANTIDAD TOMADA
3/4	1/2	2500
1/2	3/8	2500
RETENIDO TAMIZ DE CORTE N° 12 (1.7 mm)		3.474
DIFERENCIA		1.526

CALCULO:

$Desgaste = \frac{Diferencia}{5000} * 100$	30.52 %
--	---------

Tabla 4. 34 Ensayo Desgaste de los Ángeles mezcla “E-1”
Fuente: Elaboración propia

Tabla resumen de ensayos

Suelo 1

Descripción	Suelo A-4(7)	Mezcla "B" (70-30)	Mezcla "C" (60-40)	Mezcla "D" (50-50)	Mezcla "E" (40-60)	Mezcla "F" (30-70)	Parámetros para capa sub base
Limite Liquido	24.3	-	-	-	-	-	< 35
Índice de Plasticidad	7	-	-	-	-	-	< 8
Máxima Densidad Seca (gr/cm ³)	2.062	2.15	2.148	2.146	2.143	2.142	-
Optimo Contenido de Humedad (%)	11	6.8	7	7.4	7.4	7.6	-
Valor de Soporte CBR (%) al 100% MDS	4.6	21.2	40.6	35.3	25	14.6	> 40
Expansión	3.8	0.3	0.4	0.4	1	1.6	-
Desgaste de los Ángles (%)	-	16.3	16.3	16.3	16.3	16.3	< 40

Tabla 4. 35 Resumen de ensayos con suelo A-4(7)

Fuente: Elaboración propia

Suelo 2

Descripción	Suelo A-2-4(0)	Mezcla "B-1" (20-80)	Mezcla "C-1" (40-60)	Mezcla "D-1" (50-50)	Mezcla "E-1" (60-40)	Parámetros para capa base
Limite Liquido	17.8	-	-	-	-	< 35
Índice de Plasticidad	NP	-	-	-	-	< 6
Máxima Densidad Seca (gr/cm ³)	2.132	2.191	2.197	2.2	2.206	-
Optimo Contenido de Humedad (%)	6.2	6.9	6.5	6.3	6.1	-
Valor de Soporte CBR (%) al 100% MDS	55	64.4	84.2	67.8	55.9	> 80
Expansión	0.1	0	0	0	0	-
Desgaste de los Angeles (%)	40.26	38.3	34.88	32.08	30.52	< 35

Tabla 4. 36 Resumen de ensayos con suelo A-2-4(0)

Fuente: Elaboración propia

4.3 Incidencia Estructural

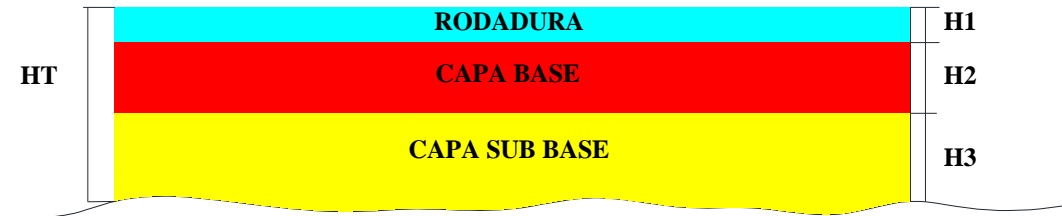
Primer Análisis (Suelo Natural)

Las características del suelo que será estudiado son las siguientes:

Sub rasante:	Suelo A-4(7)
Valor de Soporte CBR (%) al 100% MDS:	4.5 %
Sub Base:	Suelo A-2-4 (0)
Valor de Soporte CBR (%) al 100% MDS:	55 %
Base:	Suelo A-1a
Valor de Soporte CBR (%) al 100% MDS:	80 %

Para el análisis se tomará una carga por eje estándar correspondiente a los estudios realizados y plasmados por la AASTHO 93, cuyo valor es:

Carga por eje:	18 Kips: 80 KN
Carga por rueda:	9000 lbs

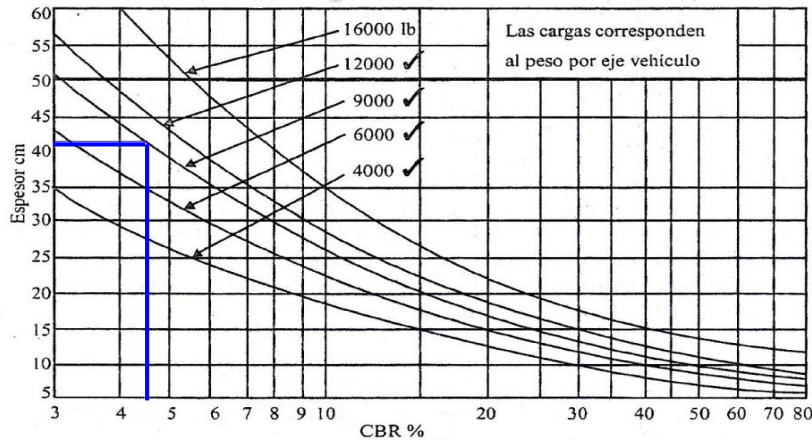


Donde:

- H1: Altura de capa de rodadura
- H2: Altura de capa base
- H3: Altura de capa sub base
- Ht: Altura del paquete estructural

Inicialmente tomamos el valor del CBR correspondiente a la sub rasante para predeterminar una altura inicial del paquete estructural: CBR subr: 4.5 %

Ht: 43 (cm)



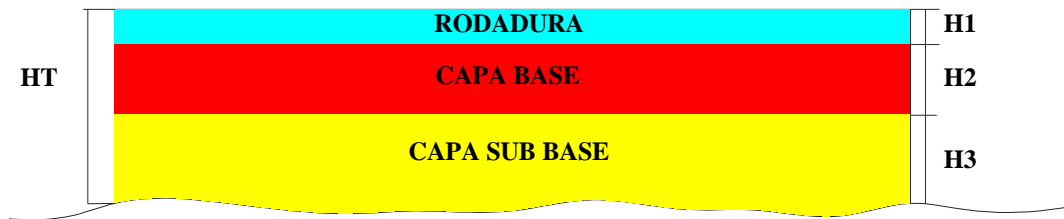
Segundo Análisis (Suelo Natural + Pavimento Reciclado)

Para este análisis se tienen las siguientes características:

Sub rasante:	Mezcla "F" (30-70)
Valor de Soporte CBR (%) al 100% MDS:	14.6 %
Sub Base:	Mezcla "C" (60-40)
Valor de Soporte CBR (%) al 100% MDS:	40.6 %
Base:	Mezcla "C-1" (40-60)
Valor de Soporte CBR (%) al 100% MDS:	84.2 %

Para el análisis se tomará una carga por eje estándar correspondiente a los estudios realizados y plasmados por la AASTHO 93, cuyo valor es:

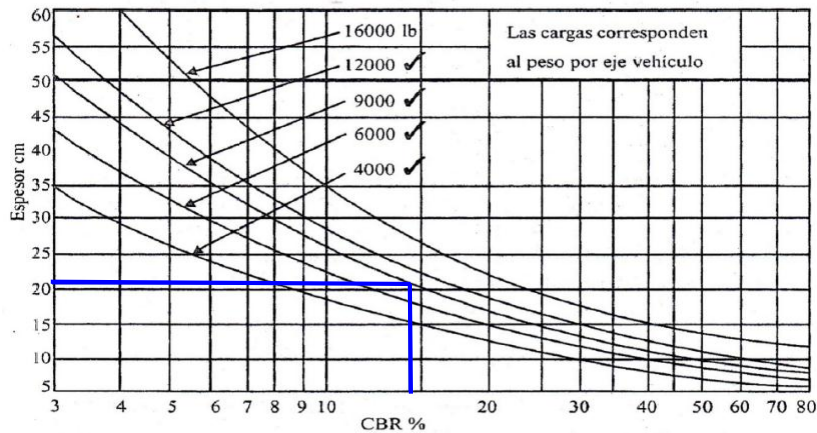
Carga por eje:	18 Kips: 80 KN
Carga por rueda:	9000 lbs



Donde:

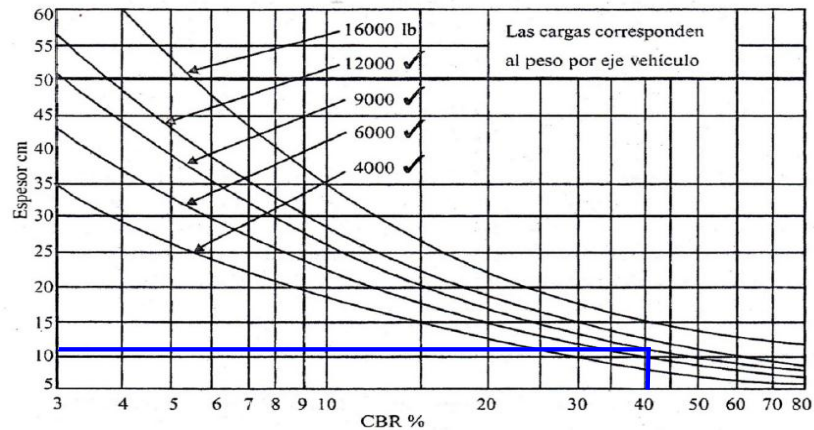
- Altura de capa de
- H1: rodadura
- H2: Altura de capa de base
- Altura de capa de sub
- H3: base
- Ht: Altura del paquete estructural

Inicialmente tomamos el valor del CBR correspondiente a la sub rasante para predeterminar una altura inicial del paquete estructural: CBR subr: 14.6 %
 Ht: 22 (cm)



Posteriormente, mediante el valor obtenido de ensayos para la capa Sub Base del CBR entramos al abaco ya definido para este método: CBR sub base: 40.6 %

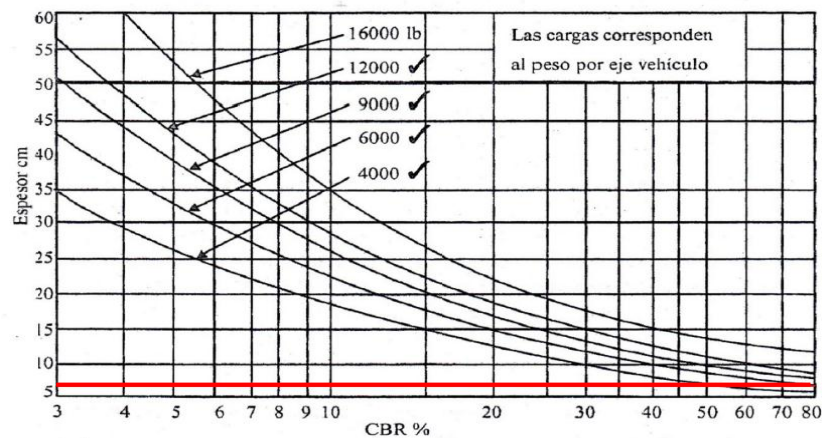
$$H2+H1: 11 \quad (\text{cm})$$



Por último, se emplea el valor del CBR definido anteriormente:

$$\text{CBR base: } 84.2 \quad \%$$

$$H1: 7 \quad (\text{cm})$$



Por lo tanto: se definen los siguientes espesores de acuerdo a lo establecido por la normativa vigente del país

Esesor de Rodadura: H1:	7 cm	(Valor Adoptado)
Esesor de Capa Base: H2:	4 cm	
	H2:	10 cm (Valor mínimo recomendado en el medio)
Esesor de Capa Sub Base: H3:	5 cm	
	H3:	15 cm (Valor constructivo)
H total:	32	(cm)

4.4 Costos

El objetivo principal de este análisis de costos es mostrar y realizar una comparación entre el presupuesto de los casos que se indican a continuación:

- Presupuesto de la construcción de una estructura de pavimento flexible con agregados naturales.
- Presupuesto de la construcción de una estructura de pavimento flexible con estabilización de suelos con pavimento reciclado.

4.4.1 Análisis de precios unitarios

Para la elaboración de los Precios Unitarios se usó como parámetros las siguientes características geométricas de la carretera.

- Ancho de calzada 7 m.
- Longitud de 1m.

Se determinó el Precio Unitario de los diferentes ítems que intervienen en la confección de una estructura de pavimento. Cada ítem fue desglosado tanto en el material, mano de obra y equipo que se utiliza para realizarlo.

A continuación se detalla los precios unitarios utilizados para el cálculo:

Primer análisis (suelo natural)**Item: CAPA SUB-BASE (PROV Y EJEC)****Unidad: m³**

Nº	P.	Insumo/Parámetro	Und.	Cant.	Unit. (Bs)	Parcial (Bs)
	A	MATERIAL				
1	-	MATERIAL CAPA SUB BASE	m ³	1.20	80.00	96.00
	D	TOTAL MATERIALES			(A) =	96.00
	B	OBRAERO				
1	-	OPERADOR	hr	0.16	18.00	2.88
2	-	AYUDANTE OPERADOR	hr	0.08	10.00	0.80
	E	Mano de obra indirecta		100.00% de	(B) =	3.68
	F	Beneficios Sociales		55.00% de	(E) =	2.02
	G	TOTAL MANO DE OBRA			(E+F+O) =	6.56
	C	EQUIPO				
1	-	CISTERNA	hr	0.02	230.00	4.60
2	-	RODILLO LISO VIBRATORIO	hr	0.07	280.00	19.60
3	-	MOTONIVELADORA	hr	0.07	250.00	17.50
	H	Herramientas menores		5.00% de	(G) =	0.33
	I	TOTAL HERRAMIENTAS Y EQUIPO			(C+H) =	42.03
	J	SUB TOTAL			(D+G+I) =	144.58
	L	Gastos Generales		10.00% de	(J) =	14.46
	M	Utilidad		10.00% de	(J+L) =	15.90
	N	PARCIAL			(J+L+M) =	174.95
	O	IVA		14.94% de	(E+F) =	0.85
	P	IT		3.09% de	(N) =	5.41
>	Q	TOTAL ITEM			(N+P) =	180.35
>		PRECIO ADOPTADO:				180.35
		Son: Ciento Ochenta con 35/100 Bolivianos				

Item: CAPA BASE (PROV Y EJEC)

**Unidad:
m³**

Nº	P.	Insumo/Parámetro	Und.	Cant.	Unit. (Bs)	Parcial (Bs)
	A	MATERIAL				
1	-	MATERIAL CAPA BASE	m ³	1.20	90.00	108.00
	D	TOTAL MATERIALES			(A) =	108.00
	B	OBRERO				
1	-	OPERADOR	hr	0.17	18.00	3.06
2	-	AYUDANTE OPERADOR	hr	0.14	10.00	1.40
	E	Mano de obra indirecta		100.00% de	(B) =	4.46
	F	Beneficios Sociales		55.00% de	(E) =	2.45
	G	TOTAL MANO DE OBRA			(E+F+O) =	7.95
	C	EQUIPO				
1	-	CISTERNA	hr	0.04	230.00	9.20
2	-	COMPACTADOR DE NEUMATICOS	hr	0.04	260.00	10.40
3	-	RODILLO LISO VIBRATORIO	hr	0.04	280.00	11.20
4	-	MOTONIVELADORA	hr	0.05	250.00	12.50
	H	Herramientas menores		5.00% de	(G) =	0.40
	I	TOTAL HERRAMIENTAS Y EQUIPO			(C+H) =	43.70
	J	SUB TOTAL			(D+G+I) =	159.64
	L	Gastos Generales		10.00% de	(J) =	15.96
	M	Utilidad		10.00% de	(J+L) =	17.56
	N	PARCIAL			(J+L+M) =	193.17
	O	IVA		14.94% de	(E+F) =	1.03
	P	IT		3.09% de	(N) =	5.97
>	Q	TOTAL ITEM			(N+P) =	199.14
>		PRECIO ADOPTADO:				199.14
		Son: Ciento Noventa y Nueve con 14/100 Bolivianos				

Item: CARPETA DE CONCRETO ASFALTICO**Unidad:
m³**

Nº	P.	Insumo/Parámetro	Und.	Cant.	Unit. (Bs)	Parcial (Bs)
	A	MATERIAL				
1	-	ARENA	m ³	0.40	100.00	40.00
2	-	GRAVA CLASIFICADA Y TRITURADA	m ³	0.45	90.00	40.50
3	-	ASFALTO DILUIDO MC 30	l	140.00	8.65	1,211.00
4	-	DIESEL	l	20.00	3.60	72.00
	D	TOTAL MATERIALES			(A) =	1,363.50
	B	OBRERO				
1	-	PEON	hr	1.00	8.50	8.50
2	-	OPERADOR DE EQUIPO	hr	1.00	18.00	18.00
3	-	OPERADOR DE PLANTA	hr	0.05	13.00	0.65
4	-	OP. COMPACTADOR DE RODILLO LISO	hr	0.09	13.00	1.17
5	-	OP. COMPACTADORA NEUMATICOS	hr	0.07	13.00	0.91
	E	Mano de obra indirecta		100.00% de	(B) =	29.23
	F	Beneficios Sociales		55.00% de	(E) =	16.08
	G	TOTAL MANO DE OBRA			(E+F+O) =	52.08
	C	EQUIPO				
1	-	COMPACTADOR DE NEUMATICOS	hr	0.02	260.00	5.20
2	-	COMPACTADOR MANUAL DE RODILLO LISO	hr	0.02	250.00	5.00
3	-	TERMINADORA DE CONCRETO ASFALTICO ASF 100 TN/H	hr	0.02	360.00	7.20
4	-	ESCOBA MECANICA	hr	0.02	60.00	1.20
5	-	PLANTA ASFALTICA	hr	0.10	700.00	70.00
	H	Herramientas menores		5.00% de	(G) =	2.60
	I	TOTAL HERRAMIENTAS Y EQUIPO			(C+H) =	91.20
	J	SUB TOTAL			(D+G+I) =	1,506.78
	L	Gastos Generales		10.00% de	(J) =	150.68
	M	Utilidad		10.00% de	(J+L) =	165.75
	N	PARCIAL			(J+L+M) =	1,823.20
	O	IVA		14.94% de	(E+F) =	6.77
	P	IT		3.09% de	(N) =	56.34
>	Q	TOTAL ITEM			(N+P) =	1,879.54
>		PRECIO ADOPTADO:				1,879.54
		Son: Un Mil Ochocientos Setenta y Nueve con 54/100 Bolivianos				

Segundo análisis (suelo natural + pavimento reciclado)

Item: SUB RASANTE MEJORADA

Unidad: m³

Nº	P.	Insumo/Parámetro	Und.	Cant.	Unit. (Bs)	Parcial (Bs)
	A	MATERIAL				
1	-	PAVIMENTO RECICLADO CHANCADO	m ³	0.40	70.00	28.00
	D	TOTAL MATERIALES			(A) =	28.00
	B	OBRERO				
1	-	OPERADOR	hr	0.06	18.00	1.03
2	-	CHOFER	hr	0.01	17.00	0.17
3	-	AYUDANTE OPERADOR	hr	0.06	10.00	0.57
	E	Mano de obra indirecta		100.00% de	(B) =	1.77
	F	Beneficios Sociales		55.00% de	(E) =	0.97
	G	TOTAL MANO DE OBRA			(E+F+O) =	3.15
	C	EQUIPO				
1	-	TRACTOR D7	hr	0.02	450.00	7.65
2	-	RODILLO LISO VIBRATORIO	hr	0.01	280.00	2.80
3	-	RODILLO PATA DE CABRA AUTOPROPULSADO	hr	0.01	300.00	3.00
4	-	MOTONIVELADORA	hr	0.02	250.00	5.00
5	-	CISTERNA	hr	0.01	230.00	2.30
	H	Herramientas menores		5.00% de	(G) =	0.16
	I	TOTAL HERRAMIENTAS Y EQUIPO			(C+H) =	22.66
	J	SUB TOTAL			(D+G+I) =	53.80
	L	Gastos Generales		10.00% de	(J) =	5.38
	M	Utilidad		10.00% de	(J+L) =	5.92
	N	PARCIAL			(J+L+M) =	65.10
	O	IVA		14.94% de	(E+F) =	0.41
	P	IT		3.09% de	(N) =	2.01
>	Q	TOTAL ITEM			(N+P) =	67.11
>		PRECIO ADOPTADO:				67.11
		Son: Sesenta y Siete con 11/100 Bolivianos				

Item: CAPA SUB BASE ESTABILIZADA **Unidad:**
m³

Nº	P.	Insumo/Parámetro	Und.	Cant.	Unit. (Bs)	Parcial (Bs)
	A	MATERIAL				
1	-	PAVIMENTO RECICLADO CHANCADO	m ³	0.75	70.00	52.50
	D	TOTAL MATERIALES			(A) =	52.50
	B	OBRERO				
1	-	OPERADOR	hr	0.25	18.00	4.50
2	-	AYUDANTE OPERADOR	hr	0.12	10.00	1.20
	E	Mano de obra indirecta		100.00% de	(B) =	5.70
	F	Beneficios Sociales		55.00% de	(E) =	3.14
	G	TOTAL MANO DE OBRA			(E+F+O) =	10.15
	C	EQUIPO				
1	-	CISTERNA	hr	0.03	230.00	6.90
2	-	RODILLO LISO VIBRATORIO	hr	0.09	280.00	23.80
3	-	MOTONIVELADORA	hr	0.09	250.00	21.25
	H	Herramientas menores		5.00% de	(G) =	0.51
	I	TOTAL HERRAMIENTAS Y EQUIPO			(C+H) =	52.46
	J	SUB TOTAL			(D+G+I) =	115.11
	L	Gastos Generales		10.00% de	(J) =	11.51
	M	Utilidad		10.00% de	(J+L) =	12.66
	N	PARCIAL			(J+L+M) =	139.29
	O	IVA		14.94% de	(E+F) =	1.32
	P	IT		3.09% de	(N) =	4.30
>	Q	TOTAL ITEM			(N+P) =	143.59
>		PRECIO ADOPTADO:				143.59
		Son: Ciento Cuarenta y Tres con 59/100 Bolivianos				

Item: CAPA BASE ESTABILIZADA**Unidad: m³**

Nº	P.	Insumo/Parámetro	Und.	Cant.	Unit. (Bs)	Parcial (Bs)
	A	MATERIAL				
1	-	PAVIMENTO RECICLADO CHANCADO	m ³	0.48	70.00	33.60
2	-	SUELO NATURAL A-2-4(0)	m ³	0.72	80.00	57.60
	D	TOTAL MATERIALES			(A) =	91.20
	B	OBRERO				
1	-	OPERADOR	hr	0.25	18.00	4.50
2	-	AYUDANTE OPERADOR	hr	0.09	10.00	0.90
	E	Mano de obra indirecta		100.00% de	(B) =	5.40
	F	Beneficios Sociales		55.00% de	(E) =	2.97
	G	TOTAL MANO DE OBRA			(E+F+O) =	9.62
	C	EQUIPO				
1	-	CISTERNA	hr	0.03	230.00	6.90
2	-	RODILLO LISO VIBRATORIO	hr	0.09	280.00	23.80
3	-	MOTONIVELADORA	hr	0.09	250.00	21.25
	H	Herramientas menores		5.00% de	(G) =	0.48
	I	TOTAL HERRAMIENTAS Y EQUIPO			(C+H) =	52.43
	J	SUB TOTAL			(D+G+I) =	153.25
	L	Gastos Generales		10.00% de	(J) =	15.33
	M	Utilidad		10.00% de	(J+L) =	16.86
	N	PARCIAL			(J+L+M) =	185.43
	O	IVA		14.94% de	(E+F) =	1.25
	P	IT		3.09% de	(N) =	5.73
>	Q	TOTAL ITEM			(N+P) =	191.16
>		PRECIO ADOPTADO:				191.16
		Son: Ciento Noventa y Uno con 16/100 Bolivianos				

Item: CARPETA DE CONCRETO ASFALTICO**Unidad:
m³**

Nº	P.	Insumo/Parámetro	Und.	Cant.	Unit. (Bs)	Parcial (Bs)
	A	MATERIAL				
1	-	ARENA	m ³	0.40	100.00	40.00
2	-	GRAVA CLASIFICADA Y TRITURADA	m ³	0.45	90.00	40.50
3	-	ASFALTO DILUIDO MC 30	l	140.00	8.65	1,211.00
4	-	DIESEL	l	20.00	3.60	72.00
	D	TOTAL MATERIALES			(A) =	1,363.50
	B	OBRERO				
1	-	PEON	hr	1.00	8.50	8.50
2	-	OPERADOR DE EQUIPO	hr	1.00	18.00	18.00
3	-	OPERADOR DE PLANTA	hr	0.05	13.00	0.65
4	-	OP. COMPACTADOR DE RODILLO LISO	hr	0.09	13.00	1.17
5	-	OP. COMPACTADORA NEUMATICOS	hr	0.07	13.00	0.91
	E	Mano de obra indirecta		100.00% de	(B) =	29.23
	F	Beneficios Sociales		55.00% de	(E) =	16.08
	G	TOTAL MANO DE OBRA			(E+F+O) =	52.08
	C	EQUIPO				
1	-	COMPACTADOR DE NEUMATICOS	hr	0.02	260.00	5.20
2	-	COMPACTADOR MANUAL DE RODILLO LISO	hr	0.02	250.00	5.00
3	-	TERMINADORA DE CONCRETO ASFALTICO ASF 100 TN/H	hr	0.02	360.00	7.20
4	-	ESCOBA MECANICA	hr	0.02	60.00	1.20
5	-	PLANTA ASFALTICA	hr	0.10	700.00	70.00
	H	Herramientas menores		5.00% de	(G) =	2.60
	I	TOTAL HERRAMIENTAS Y EQUIPO			(C+H) =	91.20
	J	SUB TOTAL			(D+G+I) =	1,506.78
	L	Gastos Generales		10.00% de	(J) =	150.68
	M	Utilidad		10.00% de	(J+L) =	165.75
	N	PARCIAL			(J+L+M) =	1,823.20
	O	IVA		14.94% de	(E+F) =	6.77
	P	IT		3.09% de	(N) =	56.34
>	Q	TOTAL ITEM			(N+P) =	1,879.54
>		PRECIO ADOPTADO:				1,879.54
		Son: Un Mil Ochocientos Setenta y Nueve con 54/100 Bolivianos				

4.5 Análisis de resultados

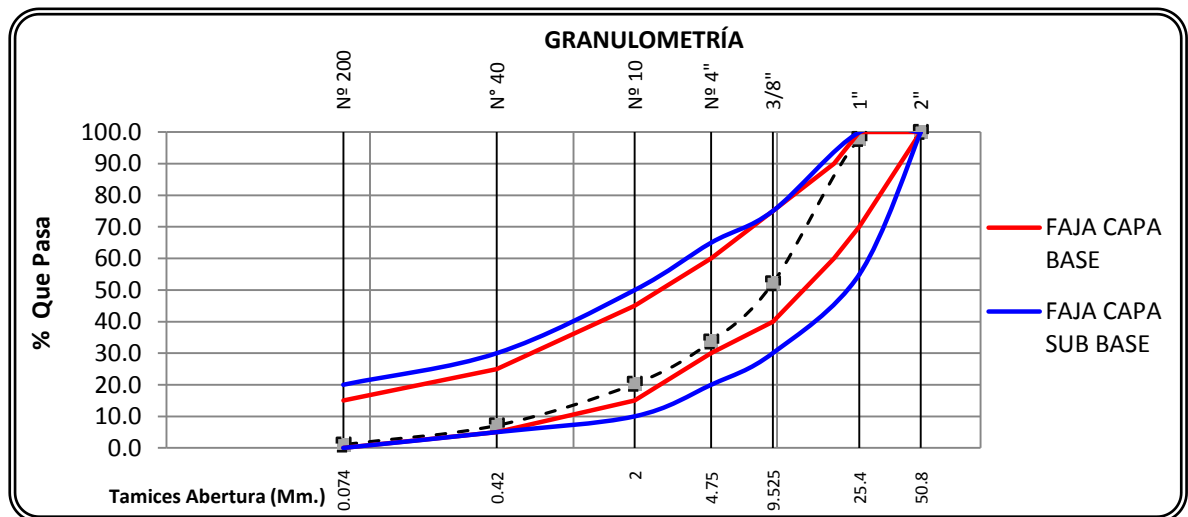
Luego de haber realizado la investigación acerca del Reciclaje de Pavimentos Flexibles y su incidencia estructural, se puede considerar el siguiente análisis:

Para la caracterización del pavimento reciclado se tomó una muestra representativa, previo cuarteo del material, realizando la granulometría del mismo, para determinar la distribución de los diferentes tamaños de partículas que posee este material, obteniendo el resultado mostrado en la tabla 4.35 y grafica 4.28.

Tamiz N°	% Que pasa
1"	97.78
3/4"	85.94
3/8"	52.1
4	33.66
10	20.28
40	7.1
200	1.02

Tabla 4. 37 Granulometría del pavimento flexible reciclado

Fuente: Elaboración propia



Grafica 4. 28 Curva granulométrica del pavimento reciclado

Fuente: Elaboración propia

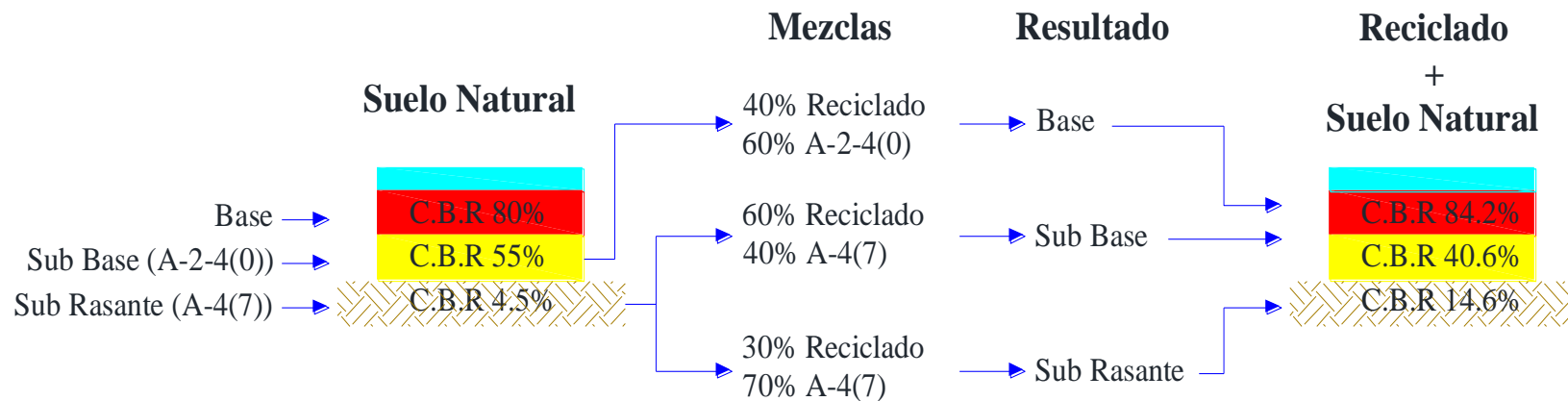
Estos resultados muestran una curva granulométrica del pavimento reciclado, en la cual se observa en la parte inferior de la curva la falta de materiales de granulometría fina como son las arcillas, limos y arenas, por lo cual la primera hipótesis sería la mezcla de un suelo de características mecánicas bajas de granulometría fina con el pavimento reciclado.

El estudio de la granulometría nos ha llevado a poder afirmar que el proceso del triturado es un factor a tener muy en cuenta, ya que el porcentaje de la fracción gruesa (1”), se ve afectado debido al tipo de chancadora que se utilice para triturar el pavimento reciclado.

La granulometría del material reciclado afecta de manera muy directa al porcentaje de suelo natural a añadir. De este modo, una granulometría demasiado fina requeriría un porcentaje de suelo natural con agregado grueso y, en cambio, con una granulometría demasiado gruesa tendríamos dificultades para conseguir un correcto mezclado y nos sería más complicado que ésta adquiriese una cohesión aceptable.

Pese a que no sabemos las características y condiciones del pavimento reciclado, ni el proceso de deterioro que ha sufrido, una comparación con las granulometrías para capas sub base y base lleva a afirmar que el pavimento reciclado se puede asemejar a una granulometría acorde a las especificaciones para capa sub base y base, con un tamaño máximo de árido 1”. Advirtiéndole que esto no se trata de una afirmación rotunda sino de un simple intento por catalogar el material reciclado procedente del mantenimiento rutinario de un pavimento, que ha podido sufrir numerosas transformaciones a lo largo de su vida útil y sobre la que en principio no conocemos nada.

Una vez caracterizado el pavimento reciclado, se establecieron hipótesis para reutilizar este material como una estabilización de suelos para una estructura de pavimento, dando a los suelos características mecánicas acordes a las especificaciones de la norma. En la gráfica 4.29 se muestra el procedimiento que se siguió y los resultados que se consiguieron de la investigación.



Grafica 4. 29 Esquema de procedimiento de mezclas y resultados

Fuente: Elaboración propia

Para empezar con el análisis, los suelos que se escogieron fueron suelos que no cumplían con las especificaciones para capa sub base y base, empleando los mismos para su estabilización con pavimento reciclado.

4.5.1 Estabilización para capa sub base

El primer suelo empleado fue un suelo fino A-4(7) con características mecánicas de capacidad soporte C.B.R. de 4.5%, menor a 40% exigido por las especificaciones de la norma para capa sub base.

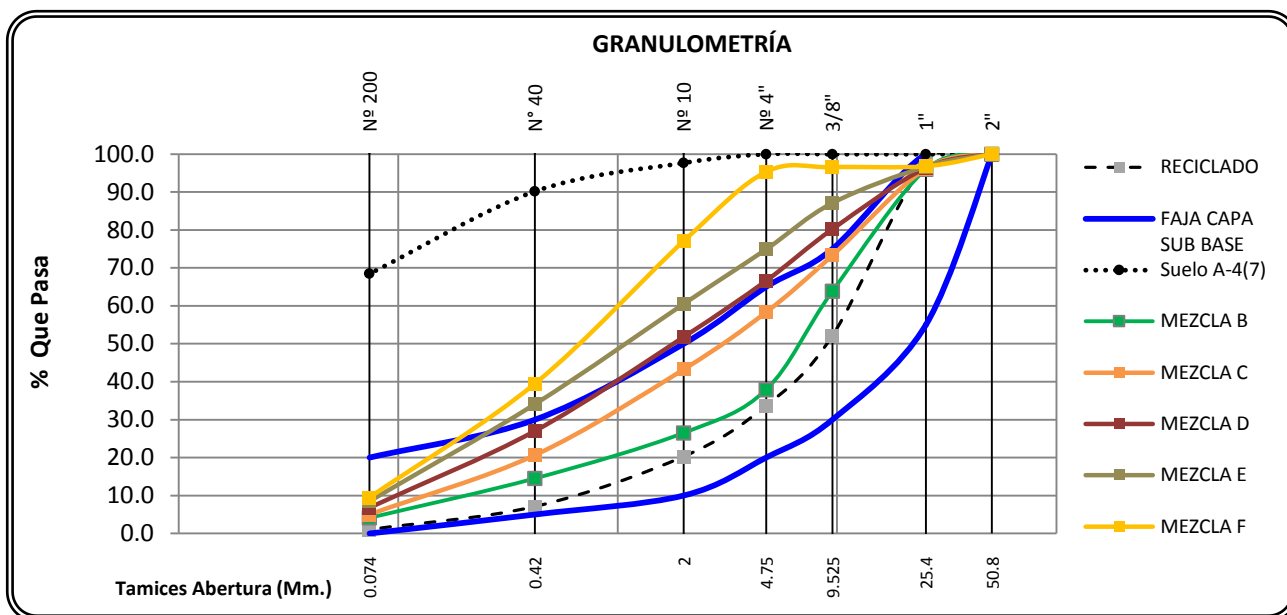
Este suelo fue estabilizado con pavimento reciclado en diferentes porcentajes de mezcla como se muestra en la tabla 4.36.

Combinación para capa sub base (reciclado - suelo natural)		
Mezcla	% Reciclado	% Suelo A-4(7)
B	70	30
C	60	40
D	50	50
E	40	60
F	30	70

Tabla 4. 38 Combinación para capa sub base (reciclado – Suelo A-4(7))

Fuente: Elaboración propia

Llegando a obtener las siguientes granulometrías mostradas en la gráfica 4.30, de las cuales solo la mezcla B, C y D cumplen las especificaciones establecidas para capa sub base según su granulometría.



Gráfica 4. 30 Comparación granulométrica capa sub base

Fuente: Elaboración propia

La gradación de las mezclas puede cumplir como capa sub base según su granulometría, pero se debe analizar las características mecánicas de estas para cumplir con las especificaciones según norma.

Con las mezclas en diferentes proporciones se determinaron sus propiedades mecánicas como ser el C.B.R. y la resistencia al desgaste, obteniendo resultados que figuran en la tabla 4.37.

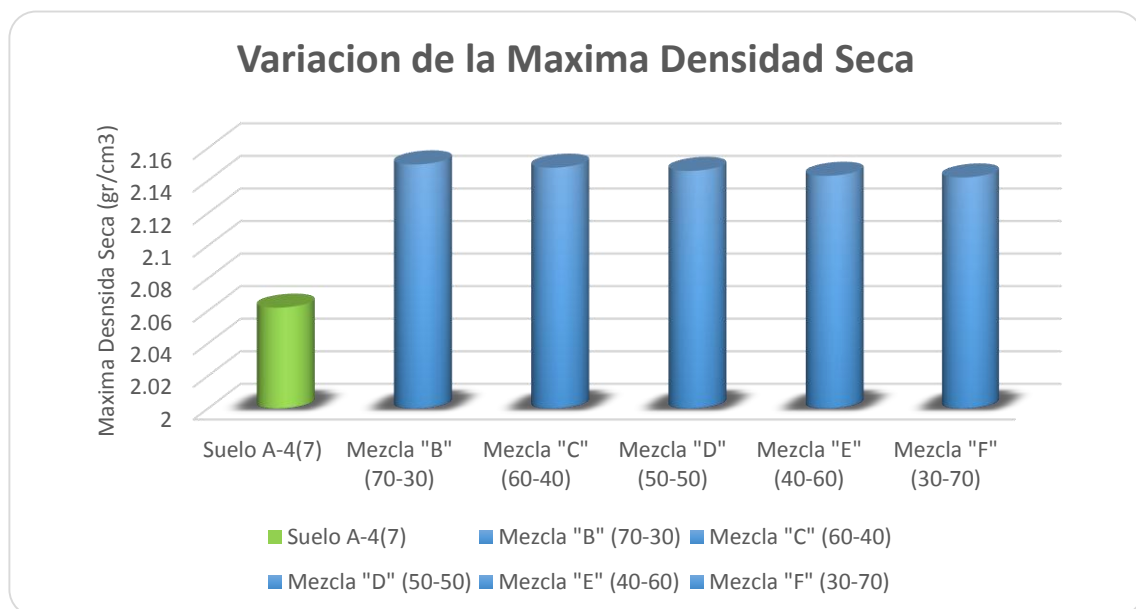
Descripción	Suelo A-4(7)	Mezcla "B" (70-30)	Mezcla "C" (60-40)	Mezcla "D" (50-50)	Mezcla "E" (40-60)	Mezcla "F" (30-70)
Máxima Densidad Seca (gr/cm ³)	2.062	2.15	2.148	2.146	2.143	2.142
Óptimo Contenido de Humedad (%)	11	6.8	7	7.4	7.4	7.6
Valor de Soporte CBR (%) al 100% MDS	4.6	21.2	40.6	35.3	25	14.6
Expansión	3.8	0.3	0.4	0.4	1	1.6
Desgaste de los Ángeles (%)	-	16.3	16.3	16.3	16.3	16.3

Tabla 4. 39 Propiedades mecánicas de las mezclas B, C, D, E y F

Fuente: Elaboración propia

Como se puede observar en la tabla 4.37, los resultados del desgaste de los ángeles, cumple con las especificaciones de desgaste de no más de 40% para una capa sub base, para este desgaste se empleó en su totalidad el material de pavimento reciclado ya que el suelo A-4(7) es un suelo fino y no posee material granular.

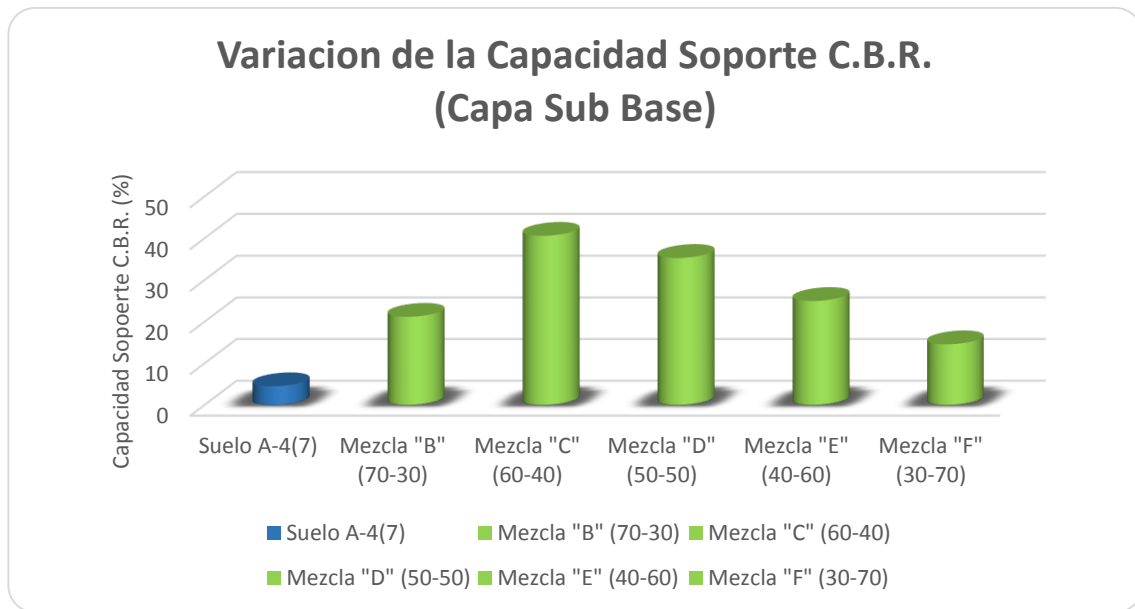
En la gráfica 4.31 se presenta la variación de la densidad seca con adición de pavimento para diferentes tipos de mezcla, donde se muestra un decrecimiento a medida que se va disminuyendo la cantidad de pavimento reciclado, como también se puede notar que todas las densidades son mayores con respecto al suelo A-4(7), debido al material granular que aporta el pavimento reciclado.



Grafica 4. 31 Comparación Densidad máxima vs Tipo de mezcla capa sub base

Fuente: Elaboración propia

En la gráfica 4.32 se muestra la variación de la capacidad soporte respecto al ensayo C.B.R. con la adición del pavimento reciclado para los diferentes tipos de mezcla siendo la óptima o la más adecuada la mezcla C de porcentaje de un 60 % de pavimento reciclado y 40% suelo A-4(7), dando como resultado un CBR de 40.6 % cumpliendo las propiedades mecánicas de una capa sub base.



Grafica 4. 32 Comparación C.B.R. vs Tipo de mezcla capa sub base
Fuente: Elaboración propia

4.5.2 Estabilización para capa base

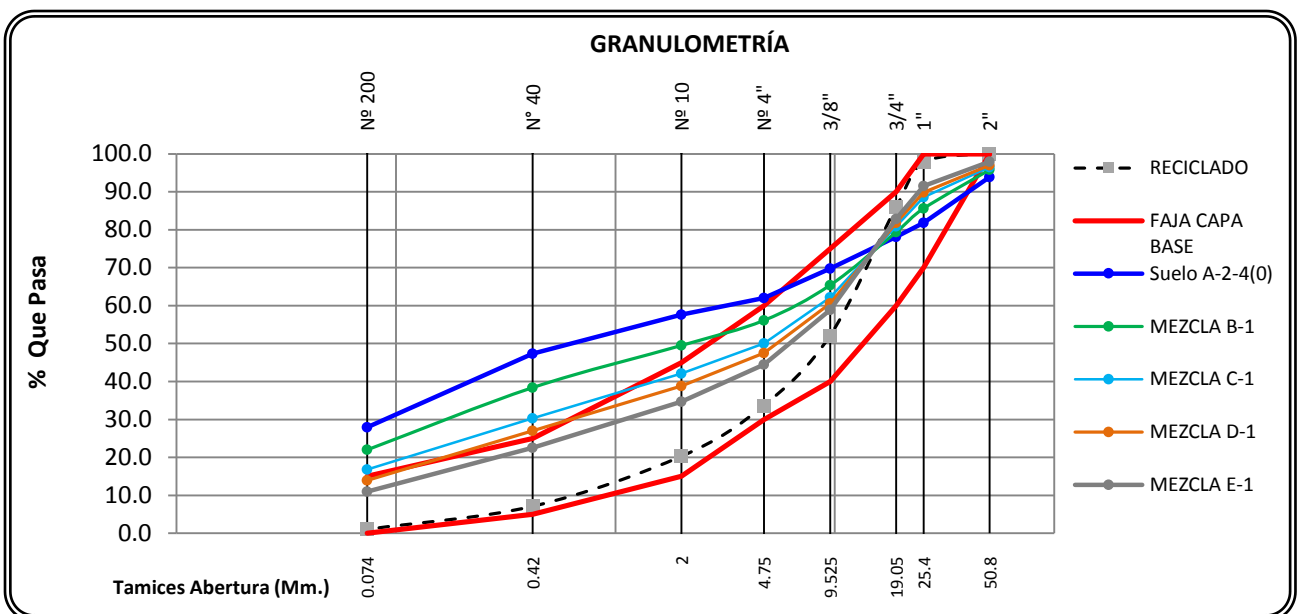
Al igual que con la mezcla de un suelo fino con el pavimento reciclado se obtuvo un material con características de capa sub base, en la segunda alternativa empleada, el pavimento reciclado mezclado con un material de capa sub base (suelo A-2-4), llegaría a cumplir las características mecánicas de un material de capa base.

Para esta mezcla se eligió un suelo A-2-4(0), con características de material para capa sub base, con el cual se combinó el pavimento reciclado en diferentes porcentajes como se muestra en la tabla 4.38, consiguiendo las siguientes granulometrías expuestas en la gráfica 4.33.

Combinación para base (reciclado – capa sub base)		
Mezcla	% Reciclado	% Suelo A-2-4(0)
B-1	20	80
C-1	40	60
D-1	50	50
E-1	60	40

Tabla 4. 40 Combinación para capa base (reciclado – suelo A-2-4(0))

Fuente: Elaboración propia



Grafica 4. 33 Comparación granulométrica capa base

Se observa que las mezclas C-1, D-1 y E-1 cumplen con las especificaciones de capa base según su granulometría, pero se deben establecer las propiedades mecánicas como ser el C.B.R y la resistencia al desgaste, para cumplir con las especificaciones de capa base según norma. En la tabla 4.39 se detalla las características mecánicas según el tipo de mezcla y también las características del suelo natural A-2-4(0).

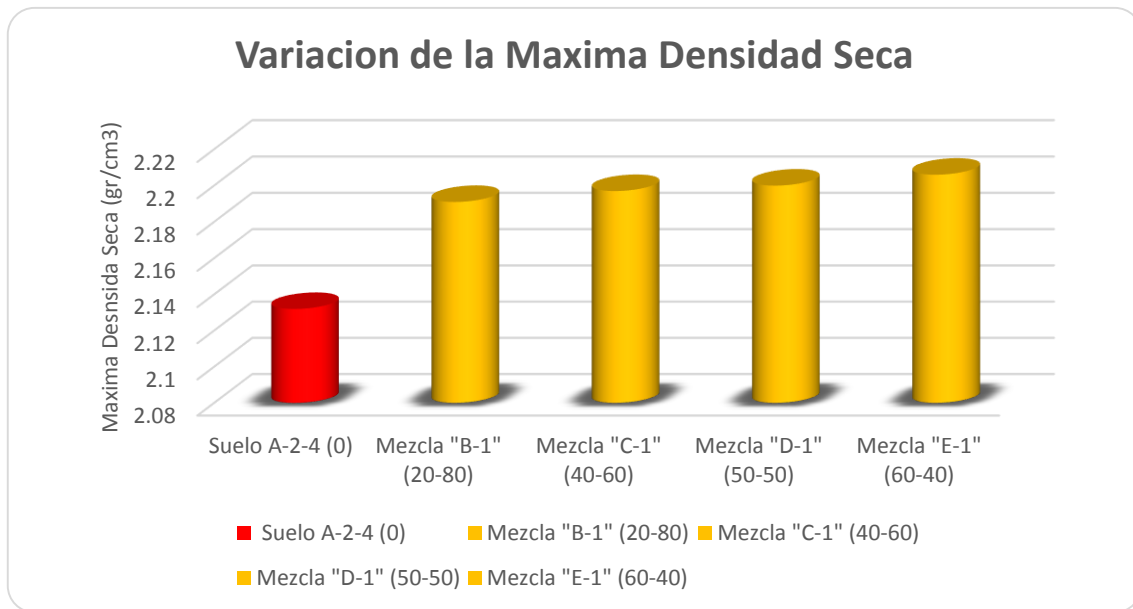
Descripción	Suelo A-2-4 (0)	Mezcla "B-1" (20-80)	Mezcla "C-1" (40-60)	Mezcla "D-1" (50-50)	Mezcla "E-1" (60-40)
Máxima Densidad Seca (gr/cm³)	2.132	2.191	2.197	2.2	2.206
Óptimo Contenido de Humedad (%)	6.2	6.9	6.5	6.3	6.1
Valor de Soporte CBR (%) al 100% MDS	55	64.4	84.2	67.8	55.9
Expansión	0.1	0	0	0	0
Desgaste de los Ángulos (%)	40.26	38.3	34.88	32.08	30.52

Tabla 4. 41 Propiedades mecánicas de las mezclas B-1, C-1, D-1 y E-1

Fuente: Elaboración propia

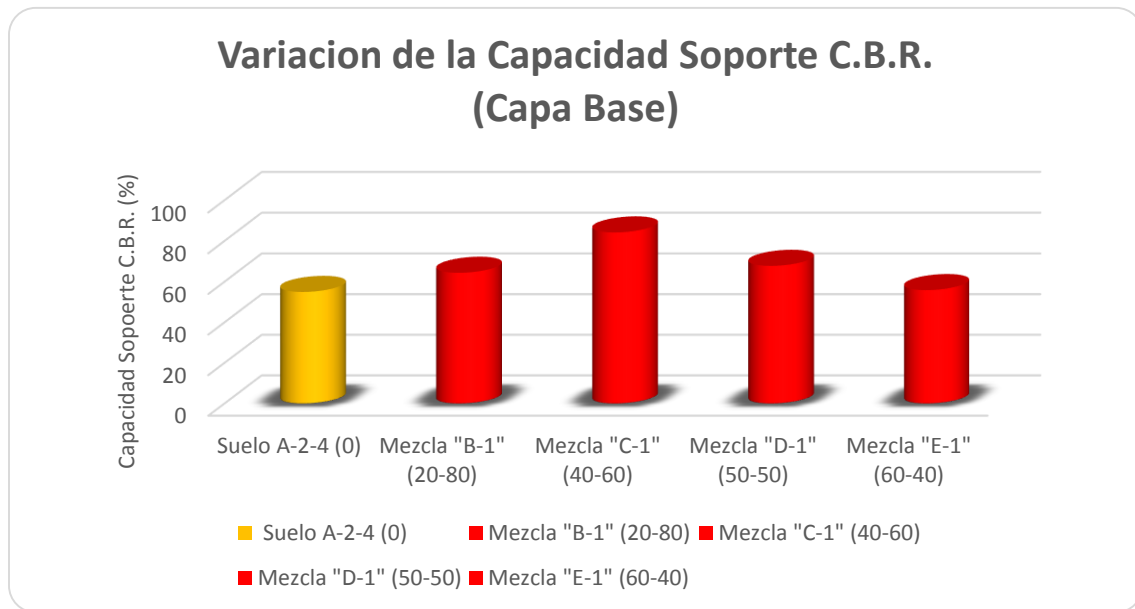
En la tabla 4.39 se observa los resultados del desgaste de los ángulos, en los cuales el desgaste del suelo natural A-2-4(0) tiene un desgaste de 40.26% y con las mezclas con pavimento reciclado C-1, D-1 y E-1 se llega a cumplir con las especificaciones de desgaste de no más de 35% para una capa base, obteniendo de esta manera un incremento en la resistencia al desgaste con estabilización de pavimento reciclado.

Así mismo, existe una variación de la densidad seca con adición de pavimento reciclado para diferentes tipos de mezcla obteniendo un crecimiento a medida que se va disminuyendo la cantidad de suelo A-2-4(0) como se observa en la gráfica 4.34. Además se puede notar que en las mezclas B-1, C-1, D-1 y E-1 la densidad es mayor con respecto al suelo A-2-4(0), a causa del peso del agregado que contiene el pavimento reciclado, que se va añadiendo en diferentes proporciones.



Grafica 4. 34 Comparación Densidad máxima vs Tipo de mezcla capa base
Fuente: Elaboración propia

En la gráfica 4.35 se observa la variación de C.B.R. de las mezclas con respecto al suelo A-2-4(0), donde la mezcla C-1 se establece como la cantidad optima de mezcla para cumplir con las características mecánicas de capacidad soporte mayor a 80% de una capa base, obteniendo una estabilización mecánica de un material que no cumplía los requerimientos de capa base.

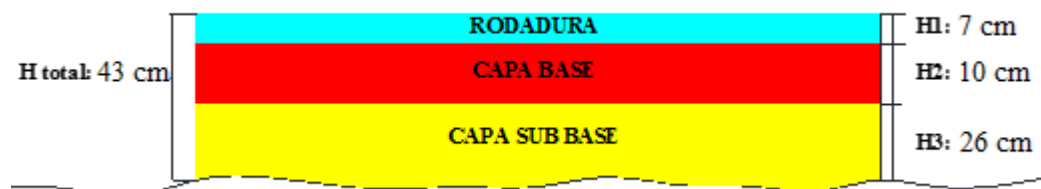


Grafica 4. 35 Comparación C.B.R. vs Tipo de mezcla capa base

Fuente: Elaboración propia

4.5.3 Incidencia Estructural

4.5.3.1 Primer Análisis (Suelo Natural)



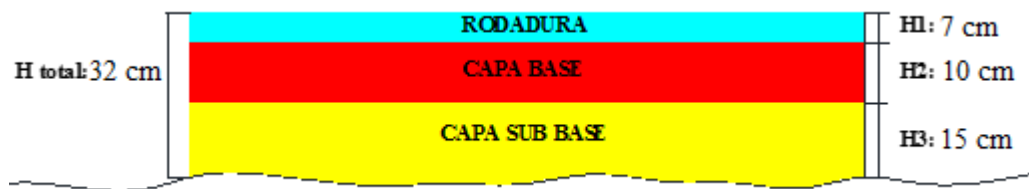
Grafica 4. 36 Comparación C.B.R. vs Tipo de mezcla suelo natural

De la observación de los gráfico 4.36 se puede mencionar:

El suelo analizado en primera instancia, fue ensayado y se lo identifico como un suelo A-4(7), con una expansión de 3,9 %, y un valor soporte de 4,5 %, por lo que al presentar

dicha característica se puede determinar que el espesor del paquete estructural que se construirá tendrá una altura de 43 cm. Posteriormente para capa sub base se utilizó un suelo A-2-4(0) cuyo C.B.R. es de 55%, además presenta un desgaste de 40,26% cumpliendo así las especificaciones técnicas para capa sub base, y por ultimo para el análisis de capa base se utilizó características de un suelo que esté acorde a lo mencionado a las especificaciones para una capa base es decir; con un valor de C.B.R. mínimo del 80% (debido a que el material ensayado no tenía las características necesarias para su ejecución como capa base). Como resultados se tiene que el espesor de capa sub base $h_3 = 26$ cm, capa base $h_2 = 10$ cm y capa de rodadura $h_1 = 7$ cm.

4.5.3.2 Segundo Análisis (Suelo Natural + Pavimento Reciclado)



Grafica 4. 37 Comparación C.B.R. vs Tipo de mezcla suelo natural + pavimento reciclado

El segundo análisis fue realizado en base al suelo descrito en el primer ensayo, a diferencia de que el mismo fue modificado en función a mezclas con pavimento reciclado, por lo que se observa claramente que el mismo presentó las siguientes mejoras:

La capa sub rasante denominada mezcla "F" presenta un porcentaje de mezcla de 30% de pavimento reciclado y un 70% de suelo A-4(7), lo que produce una elevación de su valor CBR de 4,5% a 14,6%, esto debido a que el pavimento reciclado actúa como material granular complementando las características del suelo natural.

La capa sub base presenta una mezcla porcentual de 60% de pavimento reciclado y 40% de suelo A-4(7), los resultados obtenidos son óptimos debido a que el valor CBR se incrementa hasta llegar al valor de 40,6% y un valor de desgaste de 16,3 %.

La capa base fue ensayada con una mezcla denominada "C-1" cuyo porcentaje de mezcla es de 40% pavimento reciclado y 60% suelo A-2-4(0) (sub rasante natural), llegando a obtener un valor de CBR de 84,2%.

En función a las características mencionadas se realiza el dimensionamiento del paquete estructural determinando así que para esos valores se tiene un: espesor de rodadura $h_1 = 7\text{cm}$, un espesor de capa base $h_2 = 10\text{cm}$ y un espesor de capa sub base $h_3 = 15\text{cm}$. Teniendo así un espesor total del paquete estructural de $h = 32\text{ cm}$.

Como se puede observar si empleamos el suelo natural para el diseño estructural se obtienen espesores de paquete mayores, pero con la estabilización de estos suelos con pavimento reciclado disminuye el espesor del paquete siendo esta la influencia estructural del reciclado de pavimentos flexibles.

El método de diseño del C.B.R. nos recomendaba valores menores a los definidos, pero se utilizó los espesores mostrados ya que el proyectista tiene la facultad de emplear valores constructivos y especificados en la normativa del país.

4.5.4 Comparación de costos

Primer Análisis (Suelo Natural)

Precios Unitarios

Sub base = 180.35 Bs/m³

Base = 199.14 Bs/m³

Rodadura = 1879.54 Bs/m³

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

ancho de calzada =	7	m	Sub base =	26	cm
longitud =	1	m	Base =	10	cm
			Rodadura =	7	cm

Sub base = 328.237 Bs

Base = 139.398 Bs

Rodadura = 920.975 Bs

Costo total por metro 1388.61 Bs

Segundo Análisis (Suelo Natural + Pavimento Reciclado)}

Precios Unitarios

Sub rasante mejorada 67.11 Bs/m³

sub base 143.59 Bs/m³

base 191.16 Bs/m³

rodadura 1879.54 Bs/m³

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

ancho de calzada =	7	m	Sub rasante =	15	cm
longitud =	1	m	Sub base =	15	cm
			Base =	10	cm
			Rodadura =	7	cm

Sub rasante = 70.47 Bs

Sub base = 150.77 Bs

Base = 133.812 Bs

Rodadura = 920.975 Bs

Costo total por metro 1276.02 Bs

Diferencia económica entre estructura de pavimento (material natural) y estructura de pavimento (suelo natural + pavimento reciclado)

Diferencia por m = 112.588 Bs

Diferencia por km = 112558 Bs

Como se puede apreciar en el resumen mostrado se determina que el precio de la construcción de una estructura de pavimento flexible con material de un suelo natural tiene un costo de 1388.61 Bs/m, que comparado con el costo de 1276.02 Bs/m del pavimento con material reciclado nos muestra una ventaja económica a favor del reciclado. Obteniendo una diferencia de 112.588 Bs/m, y por km es de 112588 Bs/km, que se ahorraría si se ocuparía la estabilización de un suelo natural tipo A-4(7) y A-2-4(0) con el pavimento reciclado, para la conformación de una estructura de pavimento.

5.1 Conclusiones

En este capítulo se presentan las conclusiones obtenidas a partir de los estudios realizados a lo largo de la investigación, de la siguiente manera:

Las conclusiones específicas obedecen a distintos aspectos concretos, referentes a los estudios que se han realizado, enfocados a conseguir los objetivos propuestos.

Utilizando el pavimento reciclado en mezcla con suelos naturales de características mecánicas bajas, mejora las propiedades del suelo natural, adquiriendo características acordes a las especificaciones para una capa sub base y base, empleados en la construcción de la estructura de un pavimento flexible.

- En nuestro medio la técnica de reutilización de pavimentos flexibles reciclados no se aplica, proporcionando de esta manera una iniciativa para empezar a investigar más acerca del tema de reciclaje, con pavimentos flexibles que son desechados y pueden servir como materia prima en la construcción.
- La técnica aplicada para la investigación fue el reciclado en planta, el cual se realiza como un mantenimiento rutinario de las calles en la ciudad de Tarija, este proceso se lo efectúa constantemente, llegando a juntar bastante material de pavimento que es retirado de las calles por envejecimiento, desprendimiento de los agregados, deformaciones, fisuras, grietas, etc., dando lugar a grandes acopios de este material contaminante del medio ambiente, el cual puede ser reutilizado como materia prima en la construcción.
- Los suelos A-4(7) y A-2-4(0), son suelos que no cumplen las especificaciones tanto para capa sub base y capa base de un pavimento flexible, debido a que sus propiedades mecánicas como el C.B.R. es 4.6% y 55% respectivamente, además el suelo A-4(7), no posee material granular, por lo tanto no se realiza el desgaste de los ángulos y el suelo A-2-4(0) tiene un desgaste de 40.26% menor a la especificación para capa base de un pavimento flexible.

- A continuación se muestran las características mecánicas obtenidas de los diferentes porcentajes de mezcla de suelo natural con pavimento reciclado.

Descripción	Mezcla "F" (30% reciclado – 70% suelo A-2- 4(0)) SUB RASANTE MEJORADA	Especificación para sub rasante	Mezcla "C" (60% reciclado - 40% suelo A- 4(7)) CAPA SUB BASE	Especificación para capa sub base	Mezcla "C-1" (40% reciclado – 60% suelo A- 2-4(0)) CAPA BASE	Especificación para capa base
Máxima Densidad Seca (gr/cm ³)	2.142	-	2.148	-	2.197	-
Valor de Soporte CBR (%) al 100% MDS	14.6	> 10	40.6	> 40	84.2	> 80
Desgaste de los Ángeles (%)	16.3	-	16.3	< 40	34.88	< 35

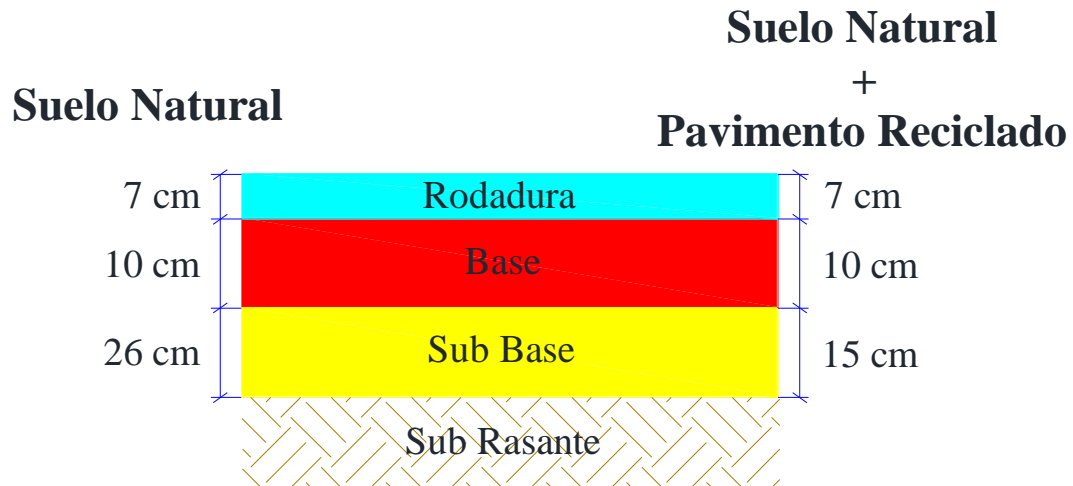
Tabla 5. 1 Mezclas óptimas

Fuente: Elaboración propia

- Los C.B.R. de la mezcla “C” y “C-1” utilizados para el diseño de los espesores, corresponden a los valores óptimos o más elevados de la combinación del pavimento reciclado con suelo A-4(7) y A-2-4(0) utilizados para capa sub base y base en la estructura de un pavimento.
- El C.B.R. de la mezcla “F” fue elegido como valor de una sub rasante mejorada, debido a que esta mezcla utiliza menos material reciclado y mayor cantidad de suelo natural (suelo A-4(7)), el cual puede existir en mayor cantidad donde se requiera emplear este tipo de estabilización.
- De forma general los resultados obtenidos a partir de la mezclas B, C, D, E y F manifestaron una gran mejora de un suelo de clasificación A-4(7) que tenía características mecánicas que no cumplían las especificaciones de la norma para capa sub base, originando que este tipo de suelo se estabilice y sea utilizado ya sea como una capa sub base o como una sub rasante mejorada.
- En las mezclas B-1, C-1, D-1 y E-1 el reciclado incrementó las propiedades mecánicas de un suelo A-2-4(0), que no cumplía con las características de una capa base, produciendo una estabilización del suelo, para que este sea utilizado

como material en la conformación de capa base de la estructura de un pavimento flexible.

- Por último se expresa los resultados de diseño estructural, en los cuales se demuestra la incidencia o influencia estructural del pavimento reciclado con relación a un suelo natural.



Grafica 5. 1 Comparación de espesores
Fuente: Elaboración propia

Los ensayos nos demuestran que tanto el pavimento reciclado como el material de cantera mantienen similares características. La ventaja de emplear el pavimento es que ofrece la posibilidad de reciclar un residuo que ocupa un espacio importante; se reduce la explotación de canteras que perjudican al medio ambiente.

El beneficio ambiental logrado con el reciclado es disminuir el impacto ambiental, debido a la reducción de los desechos producidos, como también la disminución de la energía utilizada en la explotación de canteras para proceso de extracción de áridos.

El presupuesto de la construcción de una estructura de pavimento con material reciclado es menor al obtenido con materiales convencionales, demostrando de esta manera la ventaja económica del reciclado.

5.2 Recomendaciones

Es recomendable incluir al 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.

En algunas situaciones puede resultar un mayor costo el reciclar, que usar áridos de las canteras, ya sea por las distancias de transporte o por que los costos de colocado del material, entonces se recomienda realizar un análisis a fondo de los diferentes aspectos indicados anteriormente, que serían los que definan si es factible el reciclado o es mejor utilizar materiales de bancos o canteras.

A continuación se exponen las siguientes recomendaciones específicas, en relación con la investigación:

Se recomienda utilizar el pavimento reciclado en la estabilización de sub rasantes con características de suelos finos. Como también se puede utilizar el reciclado en mezcla con un suelo A-4 para la conformación de capa sub base en la estructura de un pavimento.

También es recomendable utilizar el pavimento reciclado para la estabilización de un suelo tipo A-2-4, ya que las características mecánicas que alcanza esta estabilización cumplen las especificaciones para una capa base en la estructura de un pavimento.

En la etapa del triturado del pavimento reciclado, se debe tener el cuidado necesario para la obtención de tamaños apropiados del mismo, para cumplir con las especificaciones granulométricas requeridas.

Para obtener resultados adecuados de mezcla con este tipo de reciclado es importante la etapa de muestreo y cuarteo del material, para que este obtenga características mecánicas necesarias o requeridas para la obra.

Así mismo, para el proceso de reciclado de pavimentos flexibles es necesario contar con equipos necesarios para retirar el pavimento (fresadora, martillo rompe pavimento, cortadora de pavimento con disco abrasivo, etc), como también para el transporte a lugares de acopio y una máquina para el chancado o triturado del pavimento reciclado, siendo este uno de las cuestiones de costo necesario para el reciclado.

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.

Realizar pruebas para determinar la influencia de reciclado mezclado con otros tipos de suelos para llegar a tener un conocimiento más amplio del reciclado de pavimentos flexibles en nuestro medio.