



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CHILE

ESCUELA DE INGENIERÍA

**ESTUDIO DE FACTIBILIDAD TÉCNICA DE
MEZCLAS ASFÁLTICAS EN FRÍO CON
EMULSIONES Y CENIZAS FBC PARA LA
FABRICACIÓN DE ADOQUINES:**

«ADOFALTOS»

ÁLVARO SEBASTIÁN NÚÑEZ VILLALÓN

Tesis para optar al grado de Magíster en Ciencias de la Ingeniería

Profesor Supervisor:

GUILLERMO THENOUX ZEBALLOS

Santiago de Chile, Agosto, 2008

A mamá, papá, Pame, abuelita Tere y Toto, gracias por el apoyo y las alegrías de la vida.

En la memoria de María Cecilia.

"La felicidad no es hacer lo que uno quiere sino querer lo que uno hace"

AGRADECIMIENTOS

Primero, quiero agradecer a Dios por todas las oportunidades que ha me dado en la vida.

Quiero agradecer a toda mi familia: padres, hermana, abuelos, tíos y primos por ser mi fuente de motivación y alegría, por ser permanente apoyo en todo momento.

Al profesor Guillermo Thenoux le agradezco todas las posibilidades que me ha otorgado, la confianza depositada durante el desarrollo de esta investigación y durante el periodo de trabajo bajo su alero. También quiero agradecer al Sr. Hernán de Soliminihac, al Sr. Gabriel García y al Sr. Fernando Rodríguez por participar de esta comisión.

El CIIV ha sido donde he crecido profesionalmente, gracias nuevamente al profe, a Felipe Halles y Marcelo González, por enseñarme la perseverancia y rigurosidad en el trabajo, además de compartir su amistad.

Quiero agradecer a FONDEF por los recursos aportados a la realización del proyecto de investigación D06I1016. También a las empresas colaboradoras del proyecto: ENAP, DICTUC y QLA.

A todos mis amigos del departamento de Ingeniería y Gestión de la Construcción, en especial a Lidia, Edith, Mary, Selma, Claudio y William, por todo su apoyo y su sonrisa diaria que ayuda a enfrentar la vida con alegría. A los muchachos del laboratorio ICC (Pato García y Pato Pinilla), RESMAT y del Taller de Mecánica, por su apoyo técnico y material.

Finalmente quiero agradecer a todos mis amigos: Carchenchos, Jarana F.C., amigos de la universidad, del magister. Siempre han sido apoyo en los momentos difíciles y compañía en los buenos, ¡muchas gracias!

Mi agradecimiento es sincero y total para cada una de las personas involucradas en las líneas anteriores.

Resumen

La presente investigación estudia la factibilidad técnica de una nueva alternativa para la construcción de pavimentos articulados. Existen tres pilares que motivan el desarrollo del presente estudio: Primero, presentar una solución para los inconvenientes existentes en el diseño y construcción de pavimentos urbano-sociales, los cuales en ocasiones deben sacrificar su calidad o durabilidad para lograr bajos costos. Segundo, se sabe que las mezclas asfálticas en frío con emulsiones presentan varias ventajas en comparación con técnicas tradicionales de pavimentación. Y por último, la necesidad de reutilizar residuos industriales, que ha sido una tendencia sostenida durante los últimos años.

En el caso de esta investigación el propósito es utilizar la ceniza FBC, producida por la planta Petropower, que contiene cal en proporciones que la convierten en un potencial material para su aplicación en ingeniería.

Estas tres razones han sido la base para el desarrollo de un estudio de mezclas para la fabricación de bloques de asfalto, denominados Adofaltos, que son fabricados a partir de mezclas asfálticas en frío con emulsiones y cenizas FBC. La idea es combinar los beneficios de cada componente para generar pavimentos de bajo costo y de calidad, y la reutilización de residuos.

Este trabajo presenta la investigación bibliográfica, las metodologías utilizadas y los resultados obtenidos durante el desarrollo del estudio. Además, se entregan conclusiones y principalmente recomendaciones para el desarrollo de futuros estudios dentro de esta línea de investigación.

Palabras Claves: adoquín, emulsiones asfálticas, ceniza FBC, pavimentos articulados.

Abstract

This research studies the technical feasibility of a new technology for the construction of block paving. There are 3 main reasons for the development of this research: first, to present a solution for the problems that currently exists in the design and construction of social-urban pavements, which sometimes must sacrifice it's quality or durability to achieve low costs. Second, it's known that the cold mix asphalts with emulsions present several advantages compared with the traditional techniques. Finally, there is a growing tendency for the reutilization of Industrial Wastes, and in this case the objective is to use FBC Ash, produced at the Petropower Plant. The FBC ash contains lime, making it a potential material for its application in road engineering.

These reasons have been the base for the development of a laboratory research for the manufacture of asphalt blocks, called "Adofaltos", using cold mix asphalt with emulsion and FBC ash. The objective of this research was to combine the benefits of each component to create low cost pavements with good quality, and at the same time to reuse an industrial waste.

This work presents the bibliographic research, the used methodology and the results obtained during the development of the study. Also, conclusions and recommendations for upcoming investigations are given.

Keywords: block pavement, emulsions, fly ash.

1. Introducción

1.1 Planteamiento del Problema

1.1.1 Antecedentes Generales

En la VIII Región del Bío-Bío se encuentra ubicada la Planta Cogeneradora Petropower perteneciente a ENAP Refinerías. Esta planta utiliza la tecnología de combustión de lecho fluido (*Fluidized Bed Combustion, FBC*) para la generación de energía eléctrica a partir del 'coke' de petróleo o 'petcoke', subproducto generado del proceso de refinación de petróleo crudo.

Figura 1-1. Planta Petropower, ENAP Refinerías, VIII Región del Bío Bío



La tecnología de combustión de lecho fluido, considera la adición de caliza a la caldera de combustión, con el fin de reducir la emisión de SOx al ambiente. De este proceso se obtiene como subproducto una gran cantidad de cenizas, denominadas según su origen, cenizas FBC. La ceniza FBC contiene altos porcentajes de cal, lo que la convierte en un potencial material para ser utilizado en distintas aplicaciones en ingeniería. La planta mencionada diariamente produce entre 60 y 80 toneladas de ceniza FBC, lo que genera gastos por su traslado y depósito en botaderos autorizados.

Por otra parte, Chile cuenta con un 20% de la red vial nacional pavimentada (MOP, 2004), déficit en infraestructura vial pública, valor que no considera caminos privados ni caminos administrados por entidades urbanas por lo que no reflejan el déficit de pavimentación urbana presente en el país. El MINVU creó en 1995 el Programa de Pavimentación Participativa (PPP), que busca reducir el déficit de calles

y pasajes sin pavimentar en zonas urbanas o semirurales en desarrollo de urbanización. En los primeros seis años de ejecución del programa se redujo el déficit en un 41,3%, restando aproximadamente 3500 km. por pavimentar.

En este contexto, los pavimentos económicos, como su nombre lo indica, permiten mejorar el nivel de las vías a un bajo costo en comparación con la pavimentación tradicional. La pavimentación económica, está sujeta a obtener diseños estructurales muy ajustados o pobres, lo que debe ser compensado con materiales de excelente calidad para poder resistir las sollicitaciones de carga en el tiempo, lo que eleva el costo y deja de ser económico. La pavimentación tradicional requiere del uso de maquinaria, que produce altos costos y gran intervención del medio. En zonas urbanas, este tipo de pavimentación genera una serie de problemas constructivos y de interacción con sus alrededores.

Dentro de las técnicas de construcción de pavimentos se encuentran los pavimentos articulados o de adoquines, los que poseen un método constructivo con baja intervención del medio y la utilización intensiva de mano de obra.

La pavimentación tradicional utiliza como uno de los materiales más comunes las mezclas asfálticas, estas se pueden elaborar en frío o en caliente. Las mezclas en frío entregan ventajas enfocadas en aspectos ambientales, de seguridad y de rendimiento.

Los factores mencionados anteriormente son la base de la investigación que se presenta, combinando las oportunidades que presentan mezclas asfálticas en frío y los pavimentos articulados, con el problema de la pavimentación urbano-social y la necesidad de encontrar nuevos usos a materiales reciclables.

1.1.2 Justificación de la Investigación

Las cenizas FBC contienen una cantidad considerable de cal debido al tipo de proceso del cual se originan. La cal adicionada para el cumplimiento de exigencias ambientales permite obtener como subproducto un material homogéneo, con buenas propiedades cementantes y en grandes cantidades, convirtiéndolo en un material con aptas condiciones para su uso en ingeniería.

En Chile, estudios han demostrado la capacidad de las cenizas FBC para estabilizar suelos para caminos (Vargas, 2006). En Estados Unidos el mayor uso de cenizas FBC se concentra como agregado en prefabricados de hormigón, en la estabilización de suelos, en la estabilización de desechos, el relleno estructural y terraplenes, y aplicaciones mineras, entre otros (Naik et al., 2005).

Por lo tanto, existe un campo de investigación abierto en torno a las cenizas FBC, el cual permitirá obtener ventajas técnicas, económicas y ambientales. La ventaja técnica corresponde al aporte en el comportamiento mecánico que pueden dar las cenizas FBC a una mezcla asfáltica. La ventaja económica radica en el ahorro que se obtiene en la eliminación del proceso de botadero y el ingreso de un nuevo producto, lo que se traduce en un potencial negocio. Finalmente, la ventaja ambiental se basa en la disminución de desechos industriales y su reutilización en

innovadoras aplicaciones, siguiendo una línea de protección ambiental, el reciclaje de materiales.

En el aspecto ambiental, es importante destacar las facilidades que tiene el trabajo con emulsiones asfálticas, entre las que se destacan: el trabajo a temperatura ambiente permite ahorro de energía de producción, menores riesgos de accidentes durante los procesos, menor emisión de gases en comparación con los asfaltos cortados y menores riesgos para la salud, entre otras ventajas.

Los diferentes tipos de pavimentos que existen poseen sus ventajas y desventajas, en esta ocasión se ha enfocado la atención en los pavimentos articulados. Dentro de las principales ventajas está la fabricación de sus componentes, esta es posible realizarla a nivel industrial obteniendo un producto de calidad asegurada o artesanalmente entregando grandes ventajas sociales. También se destacan técnicas propias de la aplicación como la rápida entrega a tránsito, una mantención sencilla, y la amplia gama de colores, formas y aparejos de colocación que es posible utilizar, además estos últimos influyen en su comportamiento en funcionamiento (Panda y Ghosh, 2001). Actualmente, gran parte de los pavimentos articulados son hechos con hormigón (adcretos). Los pavimentos articulados son utilizados principalmente en pavimentos sometidos a cargas leves, zonas urbanas e industriales.

Considerando los factores antes descritos, la investigación desarrollada agrega las cenizas FBC a mezclas asfálticas en frío con emulsiones buscando mejorar su comportamiento mecánico, y utilizar esta mezcla en la fabricación de adoquines, producto denominado "adofalto", que permitan la construcción de pavimentos articulados.

1.2 Hipótesis, Objetivos y Alcance de la Investigación

1.2.1 Hipótesis de Trabajo

La presente investigación considera las siguientes hipótesis:

La adición de cenizas FBC a mezclas asfálticas en frío con emulsiones permite una mejora en sus propiedades mecánicas,

Con las mezclas asfálticas en frío con emulsiones y cenizas FBC es posible fabricar bloques de asfalto o "Adofaltos", aptos para uso en pavimentos peatonales y/o urbanos.

1.2.2 Objetivos de la Investigación

El objetivo general de la investigación es estudiar la factibilidad técnica de utilizar una nueva alternativa para la construcción de pavimentos articulados, esta corresponde a la utilización de mezcla asfáltica en frío con emulsiones y la adición de ceniza FBC para fabricar adoquines, llamados "Adofaltos".

Para lograr el objetivo general, es necesario alcanzar los siguientes objetivos específicos:

Investigar la compatibilidad y calidad de las materias primas a utilizar,

Desarrollar un procedimiento de diseño de mezclas asfálticas en frío con emulsiones y ceniza FBC,

Obtener una dosificación óptima para la mezcla de agregados, emulsión y ceniza FBC,

Estudiar posibles métodos para fabricar adofaltos a partir de la dosificación obtenida,

Buscar los potenciales ámbitos de utilización de los adofaltos en pavimentos articulados.

1.2.3 Alcances del Trabajo

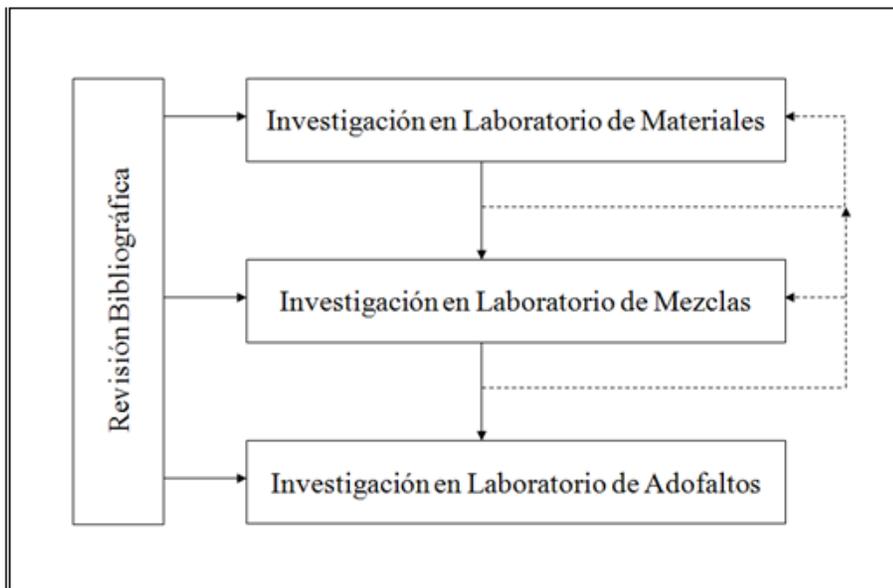
El trabajo que se presenta tiene como alcance la elección de materiales, el diseño de la mezcla, la fabricación de adofaltos y revisión de aspectos constructivos. No se considera como parte de esta investigación la aplicación a escala real de los adofaltos, fase que será verificada en investigaciones posteriores.

No corresponde a esta investigación el desarrollo de modelos de diseño estructural de pavimentos con adofaltos, ni tampoco estudios de mantención y conservación de los mismos.

1.3 Metodología de la Investigación

La metodología de desarrollo de la investigación se dividió en tres grandes etapas, esquematizadas en la Figura 1-2, las que se describen a continuación:

Figura 1-2. Metodología de la investigación



1.3.1 Etapa 1: Revisión Bibliográfica y Estudio de Materiales

El desarrollo de la primera etapa considera la recopilación y estudio de antecedentes de cada uno de los materiales, de las mezclas asfálticas en frío y de los adoquines. Este estudio consiste en la revisión de material bibliográfico nacional e internacional, con el fin de profundizar los conocimientos involucrados en la investigación.

Además, en esta etapa se realiza la selección de los materiales a utilizar en las siguientes etapas de la investigación. La temprana selección de materiales tiene como objetivo disminuir la cantidad de variables independientes a considerar en el diseño experimental de la siguiente etapa, y que se pueden manejar en una investigación de este tipo. De este modo se determinaron como datos de entrada del problema los tipos de emulsión y el agregado pétreo a utilizar.

1.3.2 Etapa 2: Estudio a Nivel de Laboratorio de la Mezcla

La segunda etapa busca una dosificación óptima de la mezcla, que permita obtener los mejores resultados mecánicos, maximizando el contenido de la ceniza y minimizando el contenido de emulsión asfáltica, con el objetivo de minimizar los costos de producción.

En esta etapa se definirá el método de diseño de mezcla que servirá como referencia para la elaboración de un modelo propio para los materiales a considerar. En este diseño las variables independientes serán el contenido de ceniza FBC y, el tipo y contenido de emulsión. Como variable dependiente realizarán ensayos para medir propiedades de compresión y tracción de las mezclas, ensayos que son descritos en los capítulos posteriores.

Al finalizar esta etapa se realizará una verificación de las propiedades de la mezcla para la dosificación óptima, la que posteriormente se utilizará para la confección y nueva verificación de las propiedades de los adofaltos.

Se debe mencionar que la dosificación óptima encontrada se traduce en un punto de partida para las siguientes etapas de la presente investigaciones, y de ninguna manera representa un resultado absoluto y único para la solución de ésta.

1.3.3 Etapa 3: Estudio a Nivel de Laboratorio de Adofaltos

Se diseñará un método de producción en laboratorio de adofaltos. Este debe ser ideado de manera tal que en el futuro permita ser una base para un diseño de producción industrial de adofaltos.

A partir de la dosificación obtenida en la etapa anterior se lleva a cabo una verificación de sus propiedades con ensayos que permitan compararlos con los ensayos realizados a las mezclas. Estos ensayos se describen en el capítulo III Procedimiento de Laboratorio.

Finalmente para completar la investigación se propondrá una metodología constructiva adecuada a la tecnología estudiada.

1.4 Descripción de la Tesis

Este capítulo, correspondiente a la Introducción, es el primero de seis capítulos en los cuales se desarrolla toda la investigación.

El capítulo II corresponde a la Revisión Bibliográfica realizada para llevar a cabo la investigación. Este capítulo se compone de los antecedentes generales de las emulsiones asfálticas, cenizas FBC, mezclas asfálticas en frío y pavimentos articulados.

El tercer capítulo de la tesis describe los Procedimientos de Laboratorio que son la guía para la ejecución de los estudios. Los procedimientos descritos consideran la caracterización de los materiales, los ensayos y criterios de diseño involucrados en las diferentes etapas de la metodología.

En el siguiente capítulo se presentan y analizan los resultados obtenidos en las pruebas de laboratorio.

El capítulo cinco desarrolla la metodología constructiva propuesta y los controles de calidad asociados a la producción y construcción con adofaltos.

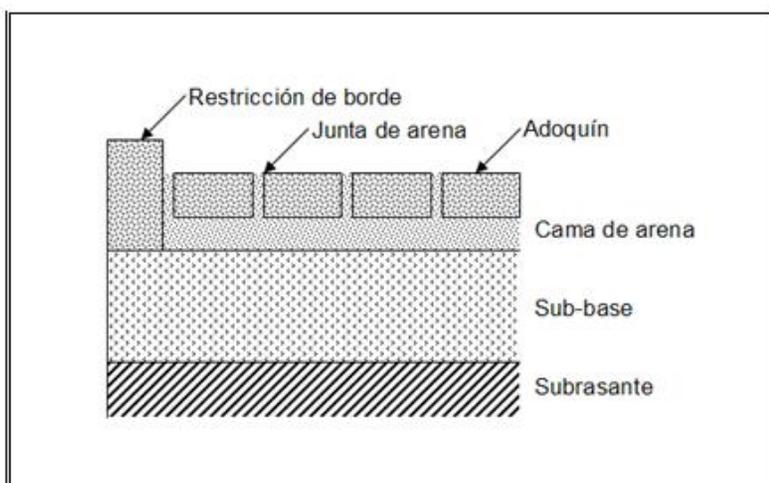
Finalmente, en el capítulo seis se presentan las principales conclusiones obtenidas en la investigación y recomendaciones para futuros estudios.

2. Revisión Bibliográfica

2.1 Antecedentes de los Pavimentos Articulados

El pavimento articulado consiste en un manto flexible, compuesto de elementos uniformes que se colocan en yuxtaposición y que debido a la conformación de caras laterales se consigue una transferencia de cargas desde el elemento que la recibe hacia varios de sus adyacentes, trabajando solidariamente y sin posibilidad de desmontaje individual.

Figura 2-1. Componentes tradicionales de un pavimento articulado (Modificado de Panda y Ghosh, 2002)



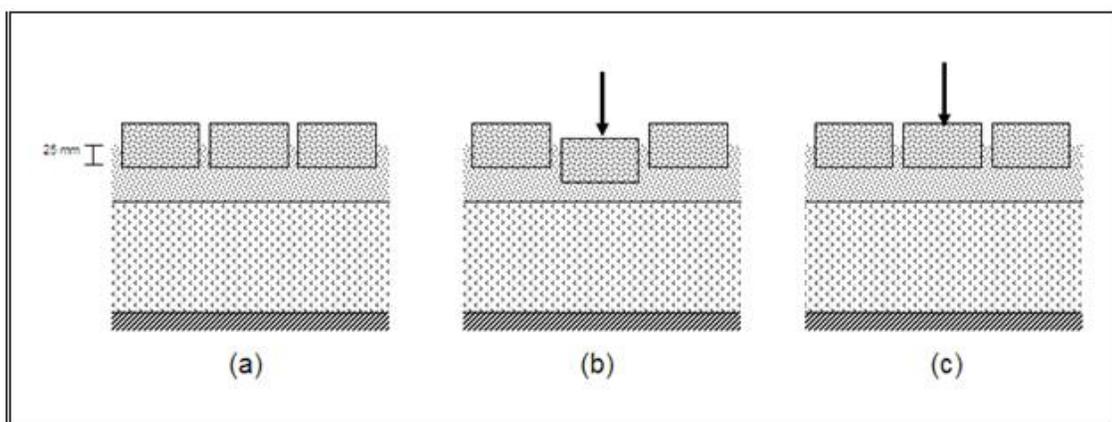
Los elementos que componen un pavimento articulado se pueden apreciar en la Figura 2-1. Tanto la subrasante como la subbase granular deben tener una capacidad de soporte y espesor adecuados las condiciones de tránsito y clima que soliciten el pavimento.

La carpeta de rodado corresponde a los adoquines. El sistema de funcionamiento de estos se basa en la trabazón que se logra entre bloques y con la arena en las juntas. Se distinguen tres tipos de trabazón: trabazón vertical, rotacional y horizontal (ICH, 1991). La trabazón se define como la capacidad de resistir desplazamientos relativos entre elementos adyacentes.

Estos sistemas de trabazón son la base de la capacidad estructural de la superficie de rodado. Knapton (1976) ha demostrado que el efecto de la transmisión de esfuerzos verticales entre adoquines permite reducir hasta en 40% las presiones a nivel de la subrasante.

La trabazón vertical se consigue a través de la arena que rellena las juntas entre adoquines. Este material proviene de la cama de arena desde la cual asciende por el proceso de compactación por vibrado aplicado, llenando el perímetro inferior de los bloques, y se complementa con la arena de sellado aplicado en la etapa final del proceso constructivo, como se aprecia en la Figura 2-2.

Figura 2-2. (a) Ascenso de la arena entre las juntas luego de la compactación; (b) Sin trabazón vertical; (c) Con trabazón vertical.



La trabazón rotacional impide el desplazamiento relativo de rotación entre los bloques debido a la aplicación de cargas asimétricas. La rotación de los bloques se logra con el desplazamiento lateral de los elementos adyacentes. Es posible controlar estos desplazamientos construyendo restricciones en los bordes del pavimento (Ver Figura 2-3).

Figura 2-3. (a) Sin trabazón rotacional; (b) Con trabazón horizontal.

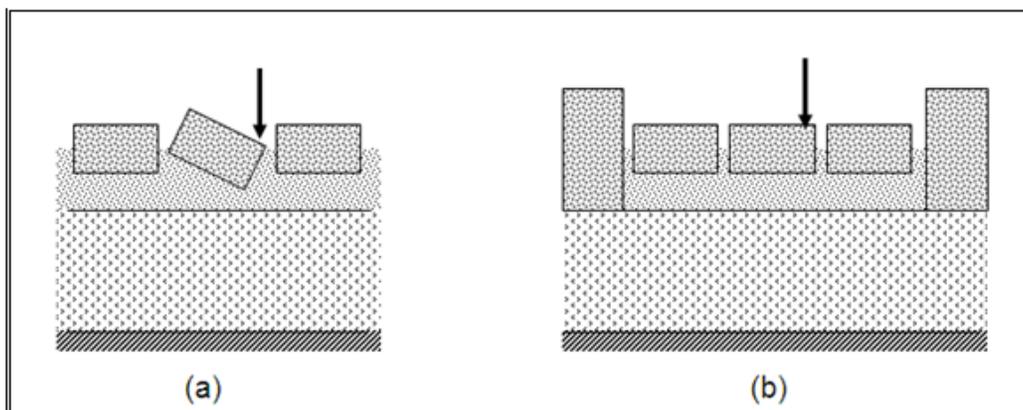
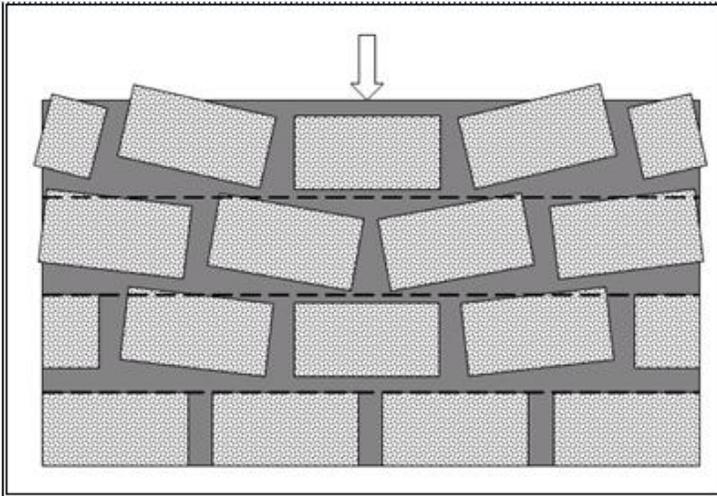


Figura 2-4. Corrimiento de adoquines instalados con aparejos de corredor (Vista de planta)



Por último, las fuerzas horizontales de aceleración o frenaje pueden producir un lento desplazamiento horizontal de los adoquines a lo largo de la huella de la calzada y las presiones generadas pueden llegar a romper las esquinas de los adoquines. Es posible controlar este efecto aparejando los adoquines en "espina de pescado" y usando adoquines con caras dentadas (Ver Figura 2-4).

2.1.1 Adoquines

En el pasado los adoquines que se utilizaban se fabricaban a partir de piedras por lo que no era posible lograr una homogeneidad en su producción, lo que se traducía en superficies irregulares para la circulación. En nuestro país aun es posible encontrar ciertas vías que mantienen su construcción con adoquines de piedra.

En la actualidad el material más común para la confección de adoquines es el concreto, denominado como "adocreto".

Se pueden distinguir tres clases de formas: cuatro caras endentadas y dos caras endentadas y caras rectas, estas se pueden apreciar en la Figura 2-5.

Dependiendo de la formas de los adoquines, estos se pueden disponer de distintas formas en el pavimento. Los aparejos de colocación más tradicionales se presentan en la Figura 2-6.

Los adoquines con cuatro caras dentadas pueden aparejarse en "espina de pescado" y por su geometría plana, al unirse, resisten el desplazamiento relativo en sentido longitudinal y transversal.

Los adoquines con dos caras dentadas se entrelazan solo en dos caras, por lo que no pueden usarse en "espina de pescado". Solo resisten desplazamientos relativos en las caras paralelas a los ejes longitudinales, dependiendo de la precisión dimensional y de la precisión en la colocación.

Adoquines de caras rectas dependen exclusivamente de la precisión dimensional y de colocación para desarrollar alguna trabazón.

Figura 2-5: Clasificación de los adoquines por su forma. (a) Cuatro caras dentadas; (b), Dos caras dentadas; (c) Caras rectas.

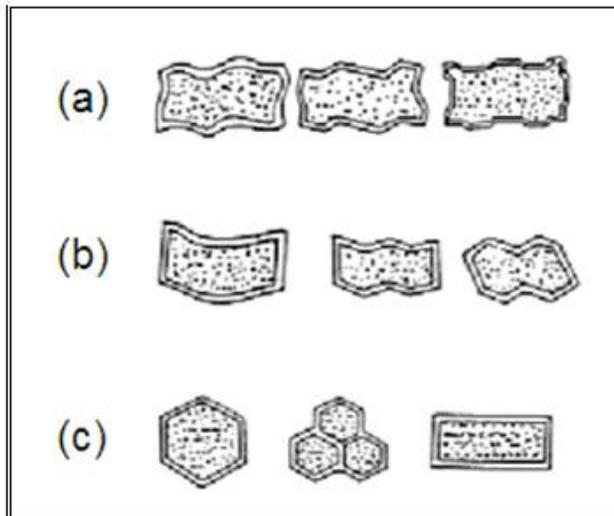
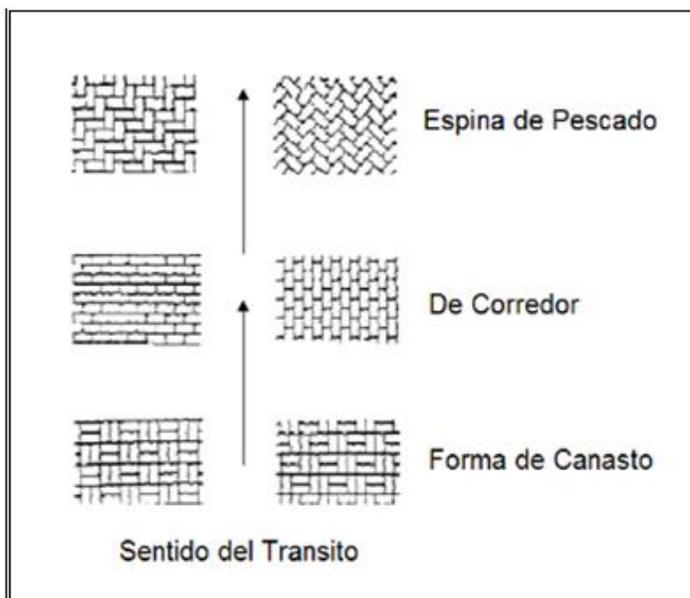


Figura 2-6. Aparejos de colocación de los adoquines



Por otra parte, el comportamiento también dependerá de las propiedades intrínsecas del adoquín. El ICH indica que las resistencias a la compresión de los bloques de concreto varía entre los 35 MPa y 45 MPa, para tránsito ligero e intenso respectivamente.

Panda y Ghosh (2002) realizaron un estudio sobre el comportamiento estructural de los pavimentos de adocretos. Este estudio se hizo en dos partes: la primera enfocada a la influencia y comportamiento de la junta de arena y la cama de arena; y el segundo enfocado el elemento de concreto. La primera parte consideró la variación de los parámetros de la junta y de la cama de arena: tipo de arena, espesor de junta, espesor de la cama de arena, con y sin junta de arena, con y sin restricciones de borde. La segunda parte del estudio se estudiaron los parámetros del bloque de hormigón que influyen en el comportamiento del pavimento: espesor de adoquín, forma del adoquín, aparejo de colocación, resistencia a la compresión y tamaño del adoquín. Estas combinaciones de variables fueron sometidas al ensayo de plato de carga estático modificado como se puede apreciar en la Figura 2-7.

Las principales conclusiones obtenidas de ambas partes del estudio son:

Un ensayo de laboratorio a escala puede ser utilizado para encontrar la arena más adecuada para su uso en juntas y cama de arena en pavimentos de adocretos y para cuantificar las deformaciones dependiendo de forma, espesor, aparejo, etc.,

El ancho y calidad de la junta de arena, espesor y calidad de la cama de arena, área vertical del adoquín, tamaño y espesor del adoquín, y número de repeticiones afectan las deformaciones del pavimento de adoquines,

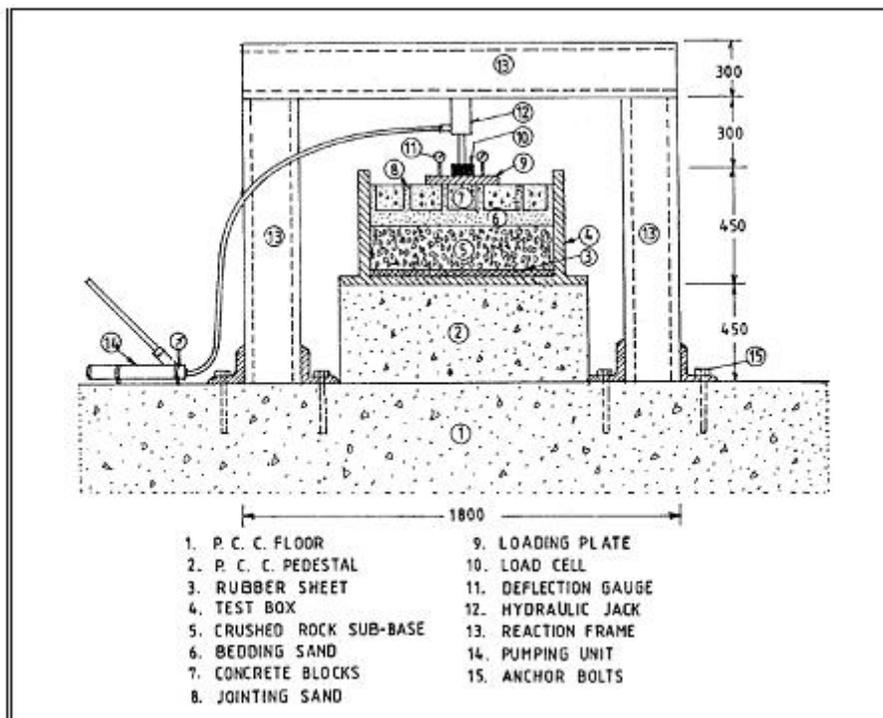
Una junta delgada y debidamente llenada, junto con una buena restricción de borde reduce las deformaciones del pavimento,

La cama de arena debe tener un espesor menor a 50 mm., y la arena debe ser bien graduada, Adoquines dentados presentaron menores deformaciones del pavimento que adoquines rectos,

La resistencia del adoquín y el aparejo de colocación no influyen de manera importante en la deformación del pavimento,

Las deformaciones de los adoquines disminuye si se aumenta el espesor de los adoquines.

Figura 2-7. Configuración del ensayo de plato de carga estático (Panda y Ghosh, 2002)



Este estudio coincidió con investigaciones anteriores realizadas por ICH, J. Knapton, *Concrete Masonry Association of Australia*, ASTM C936-82, entre otros.

2.1.2 Ventajas de los pavimentos articulados

A continuación se describen las principales ventajas de la utilización de pavimentos articulados o de adoquines.

El ensamble y las juntas a corta distancia, evitan que el pavimento se deteriore, fisurándose o quebrándose, por la acción de cargas accidentales y de temperaturas extremas, como así mismo por cambios en la superficie de asiento.

No tiene el inconveniente del deterioro que se produce en las curvas o por efecto del frenado y arranque en los cruces de calles, paradas de colectivos, etc., los que originan en este caso tensiones de corte por la combinación de fuerzas verticales (cargas) y horizontales (frenadas y arranques).

Por estar compuesto de piezas de dimensiones relativamente reducidas, la colocación del pavimento articulado resulta cómoda, práctica y sencilla.

Resulta sencilla la demarcación o el señalamiento vial, mediante la variación de color o de textura superficial de los elementos (Ver Figura 2-8).

Tienen la ventaja de haber eliminado la influencia de factores de perturbación y demora en la construcción y habilitación de las calzadas tales como las interrupciones que se producen durante la construcción.

Por otra parte, los adocretos se fabrican en una planta, lo que hace posible un desarrollo controlado de su producción, mediante la aplicación de técnicas depuradas en la preparación de las mezclas y procesos de elaboración y además, se asegura una producción continuada, al margen de problemas climáticos, especialmente en épocas de temperaturas extremas en ciertas regiones del país.

Es posible la remoción parcial o total del pavimento, rápidamente y sin rotura de los elementos, para permitir el paso de canalizaciones subterráneas, colocación de tanques o depósitos subterráneos, bases de máquinas etc.

Figura 2-8. Demarcación en pavimento de adoquines.



2.1.3 Principales aplicaciones de los pavimentos articulados

Los pavimentos articulados, debido a su composición, se utilizan en pavimentos con una velocidad de circulación baja, inferior a los 65 km/h, pues a mayores velocidades la sensación del usuario o conductor del vehículo se ve afectada.

Entre las principales aplicaciones de los pavimentos articulados se encuentran:

Zonas sometidas a cargas menores: plazas, vías peatonales, terrazas, lugares donde el nivel de carga no es un factor determinante.

Vías urbanas de baja velocidad de circulación.

Zonas industriales: puertos, bodegas.

En las siguientes fotografías se pueden apreciar ejemplos de las diferentes aplicaciones antes mencionadas.

Figura 2-9. Fotografía de aplicación de adoquines en zona de tránsito liviano



Figura 2-10. Fotografía de aplicación de adoquines en pavimento peatonal



Figura 2-11. Fotografía de aplicación de adoquines en pavimento portuario



Figura 2-12. Fotografía de aplicación de adoquines en pavimento de aeropuerto



2.1.4 Aspectos Constructivos

a) Metodología de Construcción

A continuación se describirán brevemente las principales etapas del proceso de colocación de adoquines para la carpeta de rodado de un pavimento articulado.

Preparación de la subrasante

La subrasante debe prepararse de la misma manera y bajo las mismas consideraciones con que se construye un pavimento tradicional.

Se debe tener cuidado en tener un adecuado tratamiento de aguas, capacidad de soporte suficiente de acuerdo al tránsito existente y una apropiada compactación.

Subbase

Se deben seguir las mismas consideraciones que la construcción de pavimentos tradicionales. Es necesario asegurar un porcentaje de compactación mínimo y homogéneo en toda la base.

Restricciones de borde

La restricción de borde es de esencial importancia para prevenir el desplazamiento lateral de los adoquines y la apertura de las juntas, con la consiguiente pérdida de trabazón.

La restricción puede ser una solera tradicional o bloques que deben colocarse posterior a la colocación de la base, de modo que esta le sirva de apoyo.

En ocasiones se recomienda reforzar la solera con una cama de apoyo de hormigón para entregar mayor estabilidad al confinamiento de los bloques.

Capa de arena

ICH recomienda la granulometría indicada en la Tabla 2-1 para la arena. No debe contener más de 5% de limos y arcillas en peso y el contenido de humedad debe ser lo más uniforme posible y cercano al óptimo.

El mismo ICH recomienda un espesor de 30 mm. para la cama de arena. Esta debe ser esparcida y rasada suavemente ocupando niveles de referencia. El rasado no debe evitar cualquier tipo de compactación de la cama de arena, por eso no se recomienda el movimiento zig-zag.

Colocación de adoquines

Los adoquines deben trasladarse y acopiarse con cuidado de no alterar su calidad y estado inicial.

Tabla 2-1. Granulometría de la arena (ICH, 1991)

Tamiz		% Pasa en peso
NCh (mm)	ASTM	
10	¾"	100
5,0	#4	95-100
2,5	#8	80-100
1,25	#16	50-95
0,63	#30	25-60
0,315	#50	10-30
0,160	#100	5-15
0,080	#200	0-10

Dependiendo del aparejo de colocación seleccionado se deben tener ciertas consideraciones para completar la superficie de rodado, esto implica tener que cortar los adoquines con el fin de ocupar los espacios que pudiesen quedar libres.

La colocación de los adoquines es de forma manual, se recomienda el uso de lienzos guía para facilitar su colocación. Existen tecnologías que permiten la colocación automatizada de adoquines, permitiendo un considerable aumento en los rendimientos y en la precisión de la colocación.

Los adoquines se colocan directamente sobre la cama de arena, teniendo cuidado de no pisar esta última durante el proceso. Deberán ser puestos de manera que entre las caras laterales queden juntas de espesor no mayor a 5 mm. No se deben compactar los adoquines durante la colocación, esto se realiza en la siguiente etapa.

Vibrado del pavimento

La compactación de los bloques se lleva a cabo mediante placas vibratoras. Esta etapa debe aplicarse lo más pronto posible a la colocación de los adoquines pero manteniendo un metro de distancia con el borde de colocación.

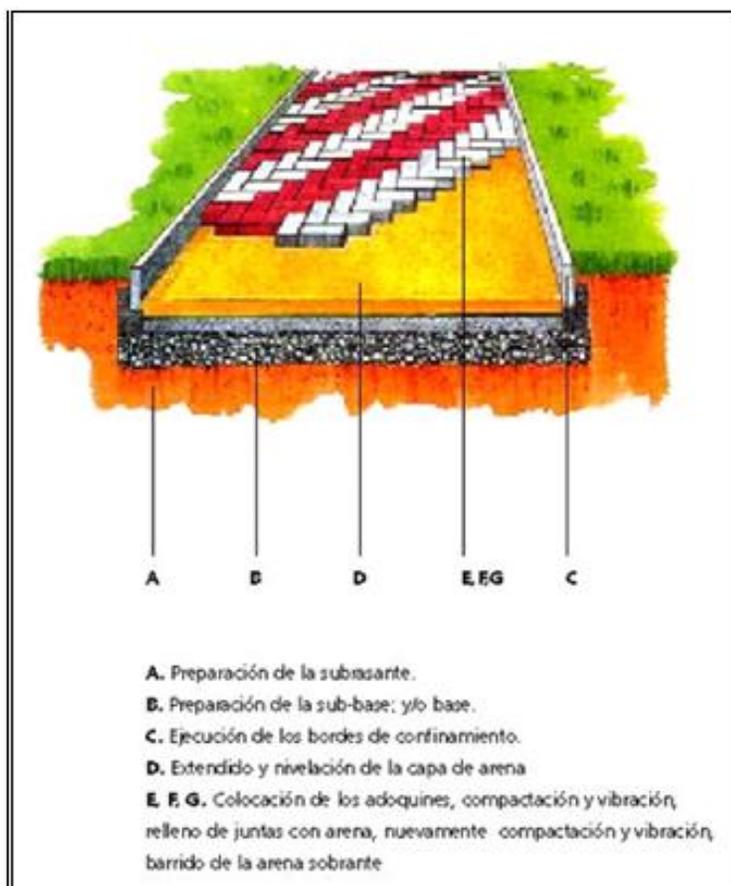
Normalmente se realizan 2 o 3 pasadas desde diferentes direcciones para poder proporcionar una superficie de rodado plana y prevenir posibles asentamientos ante la carga vehicular.

Sellado de arena

Inmediatamente después de la compactación se debe esparcir arena fina sobre la superficie con la ayuda de escobillones. A continuación se aplicarán 2 a 3 pasadas adicionales de compactación procurando llenar las juntas con arena. Posteriormente se retira el exceso de material.

En la Figura 2-13 se muestran las etapas descritas anteriormente para la construcción de un pavimento con adoquines.

Figura 2-13. Construcción de un pavimento de adoquines (www.arcdesign.com.ar)



b) Controles de Calidad

Para asegurar la calidad del producto a utilizar en la construcción y su posterior aplicación es necesario cumplir con los siguientes controles de calidad.

Durante su fabricación:

Control de materiales, según las especificaciones indicadas se deben identificar y caracterizar cada uno de los materiales a utilizar y asegurar su óptima condición para la aplicación.

Controlar de la dosificación utilizada para alcanzar las propiedades evaluadas durante el diseño,

Control de etapa de mezclado y curado, verificar el estricto cumplimiento de las condiciones de ejecución de las actividades involucradas,

Control de la compactación de los elementos con el fin de asegurar una correcta densificación de la mezcla.

Durante la construcción:

Correcto almacenamiento y transporte,

Cumplimiento de las metodologías indicadas en los documentos de proyecto junto con las recomendaciones constructivas.

2.2 Antecedentes Generales de las Cenizas FBC

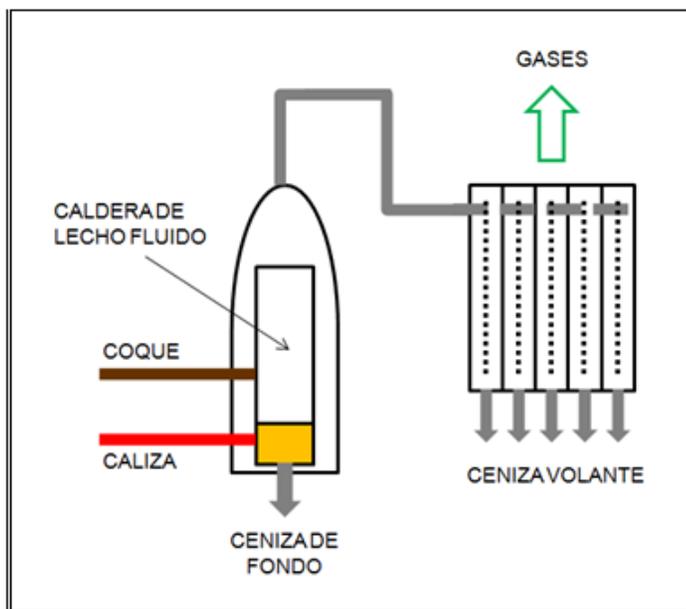
Las cenizas utilizadas en esta investigación se obtienen en la planta cogeneradora Petropower, la cual produce energía eléctrica mediante un proceso conocido como combustión de lecho fluido (*Fluidized Bed Combustion*, FBC).

Previo al desarrollo de los ensayos de laboratorio es necesario conocer las características principales de la ceniza FBC, en particular las características físicas y químicas de éste que puedan estar relacionadas con su comportamiento.

La característica principal de la combustión de lecho fluido es que permite el uso de carbones con altos contenidos de azufre para la producción de energía eléctrica y no produce altas emisiones de SO_x gracias a la adición de un elemento desulfurizador. En este caso, el carbón utilizado es el petcoke y el elemento desulfurizador corresponde a caliza.

La Figura 2-14 muestra un esquema general de la tecnología de combustión de lecho fluido.

Figura 2-14. Esquema del sistema combustión de lecho fluido



Como se observa en la Figura 2-14, las cenizas generadas durante el proceso se pueden dividir en dos tipos, las cenizas de fondo y las cenizas volantes. Se utiliza la siguiente nomenclatura con el fin de identificarlas más fácilmente:

FA.d: Dry Fly Ash, corresponde a la ceniza FBC volante seca. Esta ceniza es muy fina y de color oscuro. La FA.d es transportada por los gases de combustión y atrapada en el recolector de saco de la caldera. Luego esta ceniza es descargada a una bomba, la cual la lleva hasta el silo de almacenamiento.

BA.d: Dry Bottom Ash, corresponde a la ceniza FBC de fondo seca. Esta ceniza está formada por partículas más gruesas y de color negro, café y blanco. Esta ceniza se precipita al fondo de la caldera producto de su propio peso y se descarga en un depósito ubicado justamente bajo ésta. Desde allí es transportada hasta el silo de almacenamiento.

FBA.d: Dry Fly/Bottom Ash, corresponde a la mezcla de cenizas FBC de fondo y volante, secas. La mezcla se produce en el silo de almacenamiento, hasta donde llegan ambos tipos de cenizas. Las cenizas permanecen en este silo hasta que son descargadas en los camiones que posteriormente las llevarán hasta el sitio donde se ubica el relleno.

Las calderas de lecho fluido, utilizan temperaturas de operación menores a las calderas comunes, por lo que el enfriamiento es también menos agresivo.

2.2.1 Composición de las Cenizas Volantes

La norma ASTM C 618-92 clasifica las cenizas volantes en dos: tipo C y tipo F.

Las cenizas tipo C se producen por la calcinación de carbones ligníticos o sub-bituminosos, poseen propiedades cementantes y puzolánicas y tienen un contenido de CaO superior al 10%. Estas cenizas pueden ser consideradas como un material hidráulico (capaz de endurecer por sí sólo al hidratarse), es decir, se consideran como un material autocementante.

Las cenizas tipo F, provienen de la combustión de carbones antracíticos o bituminosos. Poseen poco o nada de valor cementante, pero reaccionan químicamente con el hidróxido de calcio formando compuestos que poseen propiedades puzolánicas. Estas cenizas poseen un bajo contenido de CaO, generalmente inferior al 6%, y se consideran como un material potencialmente hidráulico, es decir, presentan actividad hidráulica como consecuencia de una reacción química con otros compuestos (Martínez, 2003).

En la Tabla 2-2 se presentan los rangos típicos de la composición química de las cenizas volantes tradicionales según la ASTM. Como se puede observar en la tabla ambos tipos de cenizas poseen prácticamente los mismos componentes. Sin embargo, éstas se separan en dos categorías según el contenido de cal que poseen debido a que esta característica es la que define si la ceniza tendrá la capacidad de cementar por si sola o si es necesaria la adición de activadores.

2.2.1 Composición Típica de las Cenizas FBC

Las cenizas de calderas de lecho fluido, o cenizas FBC, se diferencian de las cenizas volantes tradicionales, principalmente por su bajo contenido de compuestos puzolánicos (sílice y alúmina) y su alto contenido de cal y sulfatos. Al igual que cualquier tipo de ceniza, las cenizas FBC están formadas por una parte que corresponde a ceniza de fondo (40%) y una parte correspondiente a ceniza volante (60%).

La Tabla 2-3 muestra la composición química general de las cenizas FBC.

Deschamp y Tishmack (1999) plantearon que los principales componentes de las cenizas FBC son el calcio y sulfuro (>70%) junto con concentraciones más pequeñas de silicio, aluminio y hierro. Las fases cristalinas identificadas incluyen cal (CaO), anhidrita (CaSO₄) y hematina (Fe₂O₃) con contenidos menores de cuarzo (SiO₂). Se observó que la ceniza volante tenía mayores contenidos de cuarzo y hematita, mientras la ceniza de fondo tenía más anhidrita y cal.

Tabla 2-2. Composición química de las cenizas volantes tradicionales

Propiedad o Componente	Clase F	Clase C
Requerimientos químicos		
SiO ₂ + Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃ , % mín.	70	50
SO ₃ , % máx.	5	5
Contenido humedad, % máx.	3	3
Pérdida por ignición, % máx.	6(1)	6
Requerimientos químicos suplementarios opcionales		
Álcalis disponibles, % máx.(2)	1.5	1.5
Requerimientos físicos(5)		

Finura		
- % máx. retenido en tamiz No. 325 por vía húmeda(3)	34	34
Índice de actividad con cemento Portland		
- a 7 días, % mín. de control	75(4)	75(4)
- a 28 días, % mín. de control	75(4)	75(4)
Requerimiento de agua, % máx. de control	105	105
Solidez	0.8	0.8
- expansión/contracción autoclave, % máx.		
Requerimientos de uniformidad, las siguientes propiedades no deben variar del promedio de los 10 ensayos anteriores en más de:		
- masa específica, % máx.	5	5
- porcentaje retenido en tamiz 325, % máx.	5	5

<p>Notas:</p> <p>(1) El uso de ceniza Clase F con hasta un 12 % de pérdida puede ser aprobado por el usuario si existen registros de desempeño aceptable o ensayos de laboratorio aceptables.</p> <p>(2) Aplicable solamente cuando se usará como adición para hormigones que contienen agregado o cemento reactivo.</p> <p>(3) Se debe tener cuidado de evitar la aglomeración de material extremadamente fino.</p> <p>(4) Si cumple uno de los dos requerimientos (7 o 28 días), se cumple con el Índice de Actividad.</p> <p>(5) Existen requerimientos físicos suplementarios opcionales que no se han incluido aquí.</p>

Tabla 2-3. Composición Química de las Cenizas FBC

Componente	Ceniza FBC	
	Volante	Fondo
SiO ₂	1-3 %	10-15 %
CaO	40-50 %	40-50%
SO ₃	30-40%	30-40%

La Tabla 2-4 muestra las propiedades físicas de las Cenizas FBC (Behr-Andres y Hutzler, 1994).

Tabla 2-4. Propiedades Físicas de las Cenizas FBC

Propiedad	Ceniza FBC
Humedad Óptima (%)	32-82
Densidad Máx. Seca (g/cm ³)	0.7-0.9
Superficie Específica (m ² /g)	1.1-2.4
Permeabilidad	10 ⁻⁹ -10 ⁻⁴
Tamaño Promedio de Partículas (mm)	0.01-0.7
LOI (%)	0.09-20.5

2.2.2 Consideraciones Ambientales

Aunque existe una tendencia a buscar usos alternativos para los subproductos de procesos industriales, es importante estudiar los efectos secundarios que se pueden producir a nivel ambiental producto de su utilización.

A partir de la combustión del coke de petróleo se generan cenizas que contienen metales residuales provenientes del crudo original. Las cenizas utilizadas en esta investigación provienen de la combustión de este tipo de carbón, por lo que contiene metales de importancia toxicológica, entre los cuales se encuentra el níquel y el vanadio (Barra, 2005).

El riesgo asociado al uso de cenizas FBC, dependerá del tipo de aplicación que se le dé. Aquellos usos encapsulados tendrán un riesgo mínimo de lixiviado, como es el caso de su uso como aditivo para concreto. Por otra parte, los usos no encapsulados, presentarán más posibilidades de contaminación ambiental, como es el caso de su aplicación en el mejoramiento de suelos.

a) Aspectos toxicológicos de las cenizas de coke de petróleo

Los subproductos de la combustión del coke de petróleo son normalmente ricos en vanadio, níquel y otros metales potencialmente dañinos. Sin embargo, son los primeros dos los que provocan mayor preocupación. A continuación se presentan las principales características de estos componentes y la forma en que afectan a la salud del hombre.

Níquel

El níquel es un compuesto natural que se puede encontrar en variadas formas minerales. Sus aplicaciones son variadas, incluyendo procesos metalúrgicos y componentes eléctricos, como las pilas.

La absorción de níquel es dependiente de la forma química en que se encuentre, las formas solubles en agua son más fácilmente adsorbidas. La mayor parte del níquel entra al organismo a través de alimentos y el consumo de agua.

En grandes dosis (mayores a 5 g), algunas formas de níquel pueden ser tóxicos agudos para el ser humano cuando se toman de manera oral. Los órganos blanco para la toxicidad sistemática del níquel son los pulmones y el tracto respiratorio superior para la exposición por inhalación y los riñones para la exposición oral (Barra, 2005).

Existen dos compuestos en el listado del reglamento de residuos peligrosos: el níquel carbonilo ($\text{Ni}(\text{CO})_4$) que en condiciones normales de presión y temperatura es un gas, por lo cual es difícil que lixivie. La otra forma de níquel que está regulada es el cianuro de níquel ($\text{Ni}(\text{CN})_2$), que es un compuesto insoluble en agua, por lo cual es difícil que se lixivie (DS N°148, MINSAL, 2004).

Vanadio

El vanadio es un elemento metálico que existe en seis estados de oxidación y en forma de numerosos compuestos inorgánicos. El vanadio se utiliza como un agente de aleación en la industria del acero y metales no ferrosos y como catalizador en aplicaciones químicas y cerámicas.

Los compuestos del vanadio son principalmente absorbidos por los pulmones, distribuyéndose en los huesos, riñones e hígado. En California las concentraciones máximas totales en residuos sólidos son de 2400 mg/kg y se permite un máximo de 24 mg/dm³ en el lixiviado.

Un estudio que analizó estos compuestos en una ceniza de características muy similares a aquella estudiada en esta investigación concluyó que no existe la presencia de óxidos de vanadio, de los cuales depende la toxicidad del vanadio. Esto debido a que la condiciones de combustión impiden la producción de dichos óxidos (Barra, 2005).

b) Estudio de Impacto Ambiental Cenizas FBC (Universidad de Concepción)

La empresa ENAP Refinerías Bio-Bio decidió realizar un estudio a través de los servicios de la Unidad de Desarrollo Tecnológico de la Universidad de Concepción, con el fin de determinar la peligrosidad de la ceniza FBC generada en su planta. Para esto se llevó a cabo un análisis químico de las cenizas producidas y de los líquidos lixiviados por éstas.

Los análisis se desarrollaron en laboratorios especializados de Concepción y Santiago (CENMA y laboratorios de la Universidad de Concepción). Se realizaron varios muestreos de cenizas, con el objetivo de realizar los análisis del contenido de níquel, contenido de vanadio y test de lixiviación.

Los análisis químicos entregaron valores para el contenido de níquel entre 1497-2149 ppm para la ceniza FBC. Los valores encontrados para el contenido de vanadio variaron entre 3437-6227 ppm.

La lixiviación se observó mediante el Test de Lixiviación denominado TCLP (*Toxicity Characteristic Leaching Procedure*), método de la EPA. Este test fue realizado por dos laboratorios, el de la Unidad de Desarrollo Técnico de la Universidad de Concepción (UDT) y el del Centro Nacional del Medioambiente (CENMA). La concentración de níquel observada en la muestra de lixiviado fue de 0,02 mg/l según la UDT y de 0,06 mg/l según el CENMA. La concentración de vanadio observada en la muestra de lixiviado fue de 0,45 mg/l según la UDT y 0,34 mg/l según CENMA.

Este estudio concluyó que de acuerdo a la norma nacional de manejo de residuos peligrosos y los parámetros inorgánicos indicados en el estándar EPA 1311 (Environmental Protection Agency) las cenizas producidas por Petropower no son tóxicas por lixiviación, no son corrosivas ni reactivas, cuando se utilizan en proporciones menores a un 15%.

2.2.3 Utilización de productos de origen combustible

Las propiedades de las cenizas FBC descritas anteriormente la convierten en un material con propiedades adecuadas para ser utilizadas en aplicaciones de ingeniería civil.

Según estimaciones de la *American Coal Ash Association* (ACAA) en el 2006 se produjeron 124,8 millones de toneladas de diferentes tipos de productos provenientes de la combustión de carbón, estos son materiales inorgánicos producidos al quemar carbón para generar energía (CCP: *Coal Combustion Products*), valor que ha crecido en un 3% respecto al año anterior. La EPA estima un aumento en la producción del 50% para el año 2011.

Los CCP incluyen ceniza volante (FA: *fly ash*), ceniza de fondo (BA: *Bottom ash*), escoria de horno (BS: *boiler slag*) y el resultado del sistema de control de emisión aire proveniente de la chimenea de desulfurización de gas (FGD: *Flue gas desulfurization*), entre los principales.

La producción de FA en el 2006 aumento en 1,3 millones de toneladas respecto al año anterior, llegando a 72,4 millones de toneladas. Alrededor de un 45% es utilizado en 12-15 aplicaciones validadas por la ACAA. De esta cantidad, aproximadamente un 46% es utilizado en hormigón, productos de hormigón y morteros.

La producción de FGD de yeso fue aproximadamente 12,1 millones de toneladas, de las cuales un 79% fueron utilizadas principalmente en productos de yeso.

La producción de BA fue de 18,6 millones de toneladas de las cuales un 45% fue utilizado. Las principales aplicaciones fueron como relleno estructural y terraplenes. BA y FA son ampliamente utilizadas en varias aplicaciones, principalmente en rellenos estructurales y en la construcción de bases para caminos.

La producción de BS alcanza los 2 millones de toneladas de los cuales son utilizadas un 83% en diversas aplicaciones.

La producción de ceniza FBC, alcanza los 1,6 millones de toneladas de los cuales un 29% en la construcción de bases y subbases para pavimentos, 23% en rellenos estructurales y terraplenes, y 11% en la estabilización de suelos.

En Chile la producción de ceniza FBC supera las 20 mil toneladas anuales y la utilización que se encuentra en proceso de desarrollo es la aplicación como agente estabilizador para la construcción de bases, subbases y suelos.

La estabilización o mejoramiento de suelos es la principal utilización de ceniza FBC, en Chile existen estudios que avalan esta aplicación (Vargas, 2006). El estudio mencionado concluye que las características de la ceniza FBC lo convierten en un estabilizador con alto potencial autocementante. La ceniza FBC es posible adicionarla a un amplio grupo de suelos, en los cuales es posible encontrar un contenido óptimo que maximice su resistencia. A pesar de esto, es posible que se produzcan expansiones al mezclar la ceniza con suelos con alto contenido de finos. Los sulfatos aportados por la ceniza FBC al juntarse con la alumina presente en los suelos con alto contenido de finos dan paso a la generación de compuestos expansivos, como la etringita. Este efecto es posible controlarlo limitando el contenido de ceniza a 5% según recomendación del estudio.

2.3 Antecedentes de las Mezclas Asfálticas en Frío con Emulsiones

Las mezclas asfálticas en frío (MAF) están compuestas por agregados minerales y un agente bituminoso como son las emulsiones o los asfaltos cortados, siendo más tradicional el uso de emulsiones en el último tiempo.

Se pueden identificar aspectos que favorecen el uso de emulsiones asfálticas (Fernández, 1983). Si bien las emulsiones tienen ciertas restricciones climáticas para su correcto uso, es posible adaptarlas para poder ampliar su aplicación a condiciones no tradicionales logrando una versatilidad en su empleo. Por otro lado se produce un ahorro energético importante en comparación con el uso de asfaltos cortados y en comparación con mezclas asfálticas en caliente donde son necesarios procesos de calentamiento para los agregados y para el cemento asfáltico. Dentro del ámbito ecológico las emulsiones asfálticas juegan un papel importante junto al asfalto espumado en el reciclado de pavimentos asfálticos en frío, técnica muy considerada hoy en día por su capacidad de ahorro de energía (Thenoux et al., 2006).

Las MAF se pueden fabricar en plantas de producción o en terreno. Las plantas de producción permiten controlar los procesos de producción como el abastecimiento de materiales y el mezclado. Las mezclas en terreno son producidas por plantas móviles, moto-niveladora o equipos especiales de mezclado en terreno, por lo tanto se dificulta el control de los procesos.

Según el *Asphalt Institute* se pueden identificar tres tipos de MAF con emulsiones: mezclas cerradas o densas, abiertas y de arena. Las mezclas cerradas pueden ser usadas en cualquier tipo de pavimento y permiten el uso de variados tipos de

agregados. Las mezclas abiertas entregan un alto contenido de vacíos que permiten el drenaje del agua, son utilizadas como base o como carpeta superficial. Estas mezclas presentan buena resistencia a la fatiga, reflejo de grietas, ahuellamiento y desprendimiento de material, por estas razones su comportamiento puede compararse con una mezcla asfáltica en caliente.

2.3.1 Ventajas de las MAF

Dentro de las principales ventajas que tiene el uso de MAF, se encuentran:

Versatilidad: En la actualidad, con la tecnología existente es posible formular una amplia variedad de tipos de emulsiones asfálticas que permiten su uso con diversos tipos de agregados pétreos, de distinto origen, además de permitir el trabajo con condiciones climáticas consideradas desfavorables.

Economía: Es posible alcanzar altos rendimientos de producción sin realizar mayores inversiones en equipamiento. Además se pueden utilizar agregados pétreos de la zona producto de la versatilidad de las emulsiones. Por otra parte, para la construcción con MAF no es necesario equipos especiales, se utilizan los mismos que en la pavimentación tradicional con mezclas asfálticas en caliente, su aplicación resulta simple y económica.

Ecológico: Se produce una baja emisión de polvo en la preparación de MAF y un bajo consumo energético pues no es necesario calentar los agregados para la preparación de la mezcla. Si se usan emulsiones asfálticas no se emiten gases ni malos olores, como ocurre con los asfaltos cortados o la manipulación de cemento asfáltico.

Bajo el mismo alero de la ecología es importante destacar la importancia utilización de MAF con emulsiones en el reciclado de pavimentos asfálticos en frío, tecnología que permite optimizar el uso de recursos evitando escasez de estos con miras al futuro.

2.3.2 Limitaciones de las MAF

Clima: La construcción con MAF no debe efectuarse con temperaturas ambientales menores a los 10° C. Bajas temperaturas de los agregados dificultan un correcto mezclado.

Humedad: Es necesario que los agregados tengan cierto contenido de humedad para lograr un mezclado y una compactación adecuados. Una falta o exceso en el contenido de humedad puede causar inconvenientes en el mezclado, compactación y curado de la mezcla.

Aplicación: Las MAF pueden ser utilizadas como carpetas superficiales, bases o subbases en la estructura de un pavimento. Como carpeta de rodado se puede utilizar en pavimentos con tráfico medios o livianos pero con graduación abierta. Como base o subbase puede utilizarse con cualquier tipo de tránsito.

Control de calidad: Es posible obtener buenos pavimentos con MAF fabricadas en terreno, pero es necesario realizar un exhaustivo control para asegurar una homogeneidad de la mezcla. El control en terreno resulta más difícil en comparación con plantas establecidas.

2.3.3 Materiales componentes

Asfalto

En las MAF se pueden utilizar emulsiones asfálticas o asfaltos cortados.

Una emulsión asfáltica es una dispersión glóbulos de asfalto en una fase continua de agua, mantenida gracias a la acción de un agente emulsificante. Existen variados tipos según su polaridad (aniónico o catiónico), velocidad de quiebre (rápido, medio o lento), viscosidad (1 o 2) y dureza (h).

Los asfaltos cortados son diluidos con solventes derivados del petróleo para aumentar su trabajabilidad, y que una vez expuestos al ambiente los solventes se evaporan dejando que el asfalto cumpla su función, este proceso se llama curado. Se clasifican según el tipo y cantidad de solvente utilizados para diluir el asfalto.

Principalmente por motivos ambientales mencionados anteriormente, en los últimos años se ha preferido el uso de emulsiones asfálticas. Sin embargo la elección del tipo de asfalto debe considerar el tipo de pavimento a construir, las condiciones ambientales, ubicación del proyecto, equipos disponibles y proceso constructivo, además de tres aspectos importantes como las propiedades del asfalto residual, consistencia y quiebre o curado. Esta elección se debe complementar con lograr una compatibilidad adecuada entre el ligante asfáltico y el agregado pétreo.

La especificación de las emulsiones asfálticas debe hacerse según se menciona en el Capítulo 2.4.

Agregados Pétreos

Las propiedades del agregado en una mezcla con emulsiones son muy importantes para obtener un buen resultado de la mezcla y su posterior comportamiento. Los agregados representan entre un 90 - 95% del peso de una mezcla fría con emulsiones asfálticas.

Una amplia gama de agregados se pueden utilizar satisfactoriamente con emulsiones. En la Tabla 2-5 se puede apreciar las bandas granulométricas y otros valores recomendados para las mezclas densas. Es necesario controlar ciertos estándares de los materiales agregados, como el porcentaje de finos que pasa la malla #200, el contenido de finos plásticos y la durabilidad.

La compatibilidad entre el agregado y la emulsión es importante y es determinante en el desempeño de la mezcla. Esto hace completamente necesarias las pruebas preliminares en laboratorio para asegurar la compatibilidad de ambos materiales.

2.3.1 Diseño de Mezcla

Las MAF cerradas o densas generalmente se consideran como un material que una vez compactado presenta un bajo contenido de vacíos y que en su resistencia juega un papel fundamental el mortero bituminoso, constituido por la parte fina del agregado, el filler y el ligante asfáltico, en este caso la emulsión.

Para poder caracterizar el endurecimiento o aumento de resistencia de una mezcla es necesario evaluar los siguientes aspectos:

Compatibilidad y adhesividad del agregado con la emulsión,

Homogeneidad en la preparación de la mezcla,

Contenido de agua de la mezcla, considerando la humedad del agregado y el aporte de la emulsión,

Humedad óptima de compactación,

Nivel de compactación logrado,

Propiedades mecánicas: resistencia en estado seco y saturado, estabilidad,

Comportamiento del material en la primera etapa vida útil.

Para poder realizar las actividades mencionadas, es necesario seguir metodologías que aseguren el cumplimiento de cada una de ellas. Actualmente no existe una metodología aceptada universalmente para el diseño de MAF, pero las existentes comprenden partes o modificaciones del Método Marshall (ASTM D1559 o AASHTO T245) o del Método Hveem (ASTM D1560 y D1561 o AASHTO T246 y T247).

Existen dos métodos adaptados para el diseño de MAF con emulsiones, (1) el Método del *Asphalt Institute* basado en una modificación del Método Hveem agregando un ensayo de módulo resiliente; y (2) el método propuesto por SABITA (*Southern Africa Bitumen Association*), *Granular Emulsions Mixes Manual* (GEMS). Se conoce la existencia de otros métodos de diseño pero no fueron cubiertos en la presente investigación.

Tabla 2-5. Recomendaciones para los agregados de mezclas asfálticas en frío densamente graduadas con emulsiones (*Asphalt Institute*)

Tamiz (mm)	Mat. procesado de trituración, cantera o de río	Semi-de de	Granulometrías para mezclas asfálticas Cerradas, porcentaje pasante en peso			
50	-		100	-	-	-
37,5	100		90 100	-	100	-
25	80 - 90			90 100	-	100
19	-	60 - 80			90 100	-
12,5	-		60 - 80			90 100
9,5	-				60 - 80	90 100

4,75	25 - 85	20 - 55	25 - 60	35 - 65	45 - 70	60 - 80
2,46	-	10 - 40	15 - 45	20 - 55	25 - 55	35 - 65
0,30	-	2 - 16	3 - 18	3 - 20	5 - 20	6 - 25
0,15	-	-	-	-	-	-
0,075	3 - 15	0 - 5	1 - 7	2 - 8	2 - 9	2 - 10
Equivalente de arena, %	min. 30	min. 35				
Ensayo Los Angeles, @500 rev	-	máx. 40				
Porcentaje de caras trituradas	-	min. 65				

2.4 Antecedentes Generales de las Emulsiones asfálticas

El asfalto es utilizado como ligante en las mezclas asfálticas. Su comportamiento visco-elástico lo convierte en un material poco trabajable a temperatura ambiente. Las cuatro principales técnicas para alcanzar la trabajabilidad del asfalto son:

Calentar el cemento asfáltico,

Espumar el cemento asfáltico con agua a presión,
Mezclar el asfalto con solventes, asfaltos cortados,
Emulsificar el asfalto en agua, emulsiones asfálticas.

Algunas de las ventajas del uso de emulsiones respecto al cemento asfáltico son:

Ahorro por calefacción, las emulsiones no requieren un calentamiento para ser usadas,

La emulsión posee menores restricciones ambientales para su uso,

Gran versatilidad de las emulsiones.

Dentro de las ventajas respecto al uso de asfaltos cortados están:

Ahorro energético que significa la producción de emulsión en comparación con el asfalto cortado, que requiere el uso de solventes,

Eliminación de la emisión de hidrocarburos volátiles (VOCs) a la atmósfera,

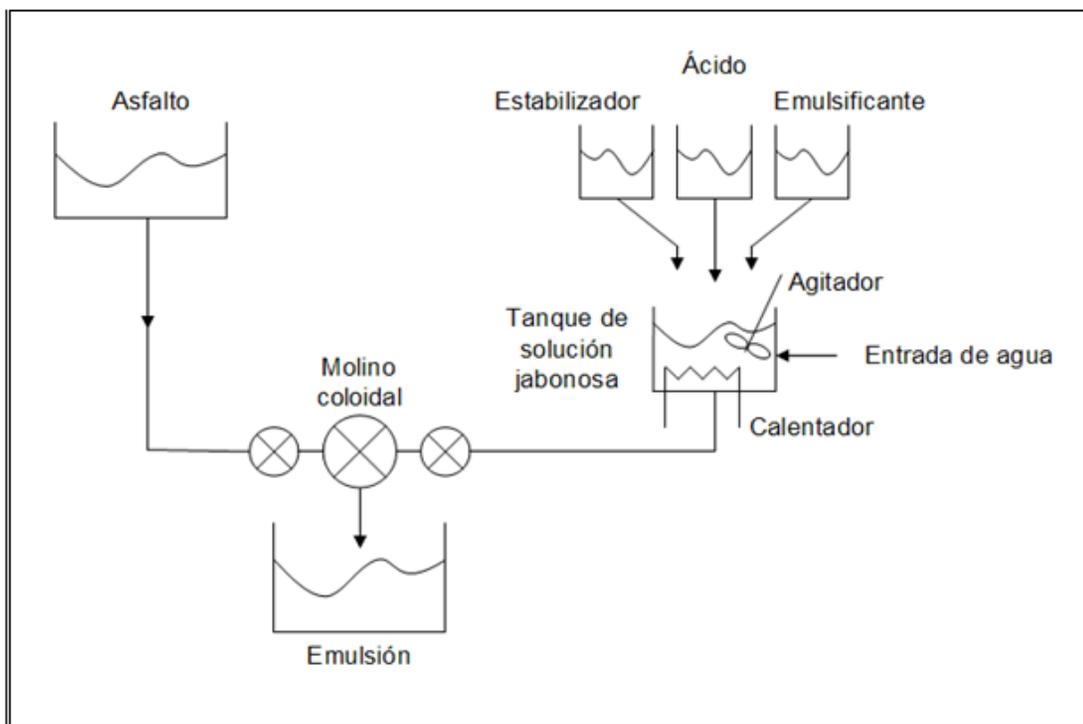
Reducción del riesgo de incendio o explosiones.

2.4.1 Definición, estructura y producción

Una emulsión asfáltica es una dispersión de glóbulos de asfalto en agua, materiales inmiscibles entre sí. Esta mezcla es una dispersión de dos fases, en donde el asfalto es la fase dispersa o discontinua y el agua la fase dispersante o continúa.

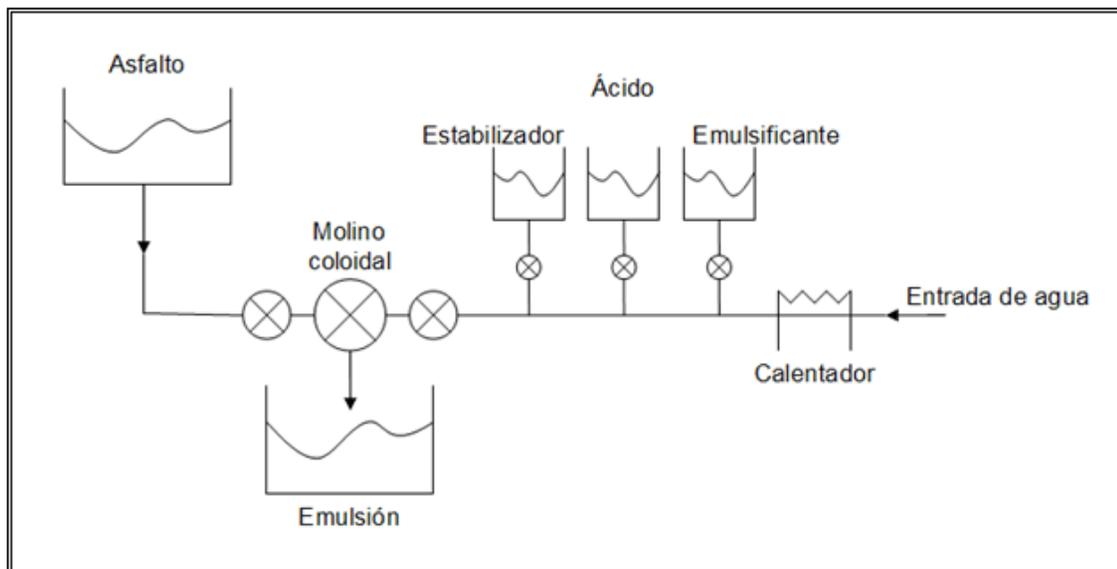
La emulsión se produce con la acción de energía mecánica que dispersa el asfalto y con la adición de un agente emulsificantes que estabiliza la emulsión resultante. El proceso de emulsificación se realiza en un molino coloidal, donde se hace pasar el asfalto y el emulsificante diluido, produciéndose pequeñas partículas de asfalto dispersas en agua.

Figura 2-15. Planta tipo Batch para producción de emulsiones asfálticas



Las emulsiones pueden ser producidas en plantas tipo "batch" (discontinuas) o en procesos en línea (continuos). En una planta tipo batch, la emulsión se prepara por lotes a partir de materias primas preparadas en estanques separados (Figura 2-15). En el caso de las plantas continuas, no hay estanques de preparación, y las materias primas son suministradas directamente al molino coloidal en dos líneas de alimentación (Figura 2-16).

Figura 2-16. Planta continua para la producción de emulsiones asfálticas

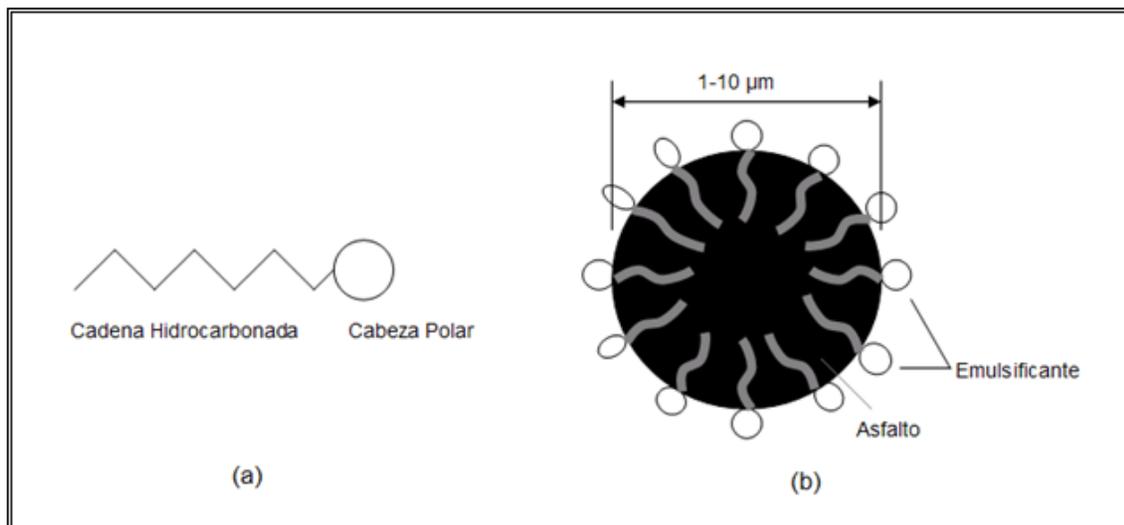


El emulsificante (o emulsificador) es una molécula compuesta de una cabeza polar o iónica químicamente compatible con el agua, y una cadena hidrocarbonada químicamente compatible con el asfalto. Cuando se emulsifica el asfalto, la cadena se embebe en los glóbulos de modo que éstos quedan rodeados de emulsificantes con la cadena hacia adentro y la cabeza hacia fuera (Figura 2-17). Debido a esta disposición del emulsificante en el glóbulo de asfalto, éste adquiere la carga eléctrica de la cabeza polar, la que puede ser positiva o negativa, correspondiendo a emulsiones catiónicas o aniónicas, respectivamente. La repulsión eléctrica entre los glóbulos de igual carga impide su unión, lo que permite estabilizar la emulsión.

2.4.1 Componentes de una emulsión asfáltica

Las emulsiones asfálticas contienen desde un 50% a 70% de asfalto, 0,1% a 2,5% de emulsificante, 30% a 50% de agua, más otros componentes. Los principales componentes pasan a detallarse a continuación.

Figura 2-17. (a) Molécula emulsificante; (b) Disposición del emulsificador en el glóbulo de asfalto



Asfalto

La emulsión asfáltica es el medio que facilita la aplicación del cemento asfáltico, pues reduce su viscosidad y permite su utilización a temperatura ambiente. El asfalto es un compuesto hidrocarbonado obtenido de la refinación del petróleo, su composición química es compleja y depende del tipo de crudo y del proceso de refinación. Las características del asfalto no definen el comportamiento de la emulsión, sin embargo definen las propiedades del asfalto residual.

Agua

Es el medio dispersante de los glóbulos de asfalto. El agua debe ser compatible con los agentes emulsificadores y aditivos utilizados. El agua de origen natural puede resultar inadecuada para emulsificar asfaltos debido a la presencia de impurezas, en solución o en suspensión.

Emulsificantes

Juegan un rol importante en las propiedades y desempeño de las emulsiones en varias aplicaciones. El agente emulsificante actúa como surfactante o tensio-activo, el cual disminuye la tensión superficial entre el asfalto y el agua.

El emulsificante a usar depende del tipo de emulsión que se quiera producir, catiónica o iónica. La velocidad de quiebre de la emulsión también puede definir el tipo de emulsificador o concentración a usar.

Los emulsificadores catiónicos más comunes son las aminas grasas. La mayoría de estos compuestos requiere reaccionar primero con ácido clorhídrico para formar un ión amonio, el cual es soluble en agua, reacción llamada saponificación.

Los emulsificadores aniónicos más comunes son los ácidos grasos, subproductos de la madera como tall oils, resinas y ligninas. Estos emulsificadores son saponificados con hidróxido de sodio o de potasio.

Una vez producida la emulsión, la repulsión eléctrica entre los glóbulos impide un acercamiento íntimo entre ellos, lo que evita que se produzcan los fenómenos de floculación y coagulación. La película de emulsificadores en la interfase también ayuda a prevenir el quiebre de la emulsión.

Generalmente se requiere una mayor dosis de emulsificante para proporcionar una buena estabilidad y mejores propiedades de desempeño, que la necesaria para cubrir la interfase, por lo cual las emulsiones contienen algunos emulsificantes "libres" presentes en la fase acuosa, éstos actúan como una reserva colaborando a prevenir la coagulación durante la emulsificación, almacenamiento y transporte.

Otros

La adición de otros componentes permite modificar algunas de las propiedades de las emulsiones. A continuación se mencionarán estos aditivos y sus funciones.

El cloruro de calcio se utiliza en emulsiones catiónicas para minimizar los cambios de viscosidad, pues reduce la osmosis entre el agua y el asfalto, y reduce el asentamiento de las emulsiones aumentando la densidad de la fase acuosa.

El tripolifosfato de sodio actúa como ablandador de agua, pues las emulsiones aniónicas pueden ser sensibles al agua dura, logrando mejorar la calidad de la emulsión.

Con el objetivo de aumentar la viscosidad de la emulsión sin necesidad de aumentar el contenido de asfalto, se utilizan espesadores. Una mayor viscosidad incrementa la vida de la emulsión pues reduce la colisión de los glóbulos y de ese modo la tasa de coagulación.

Es común el uso de de promotores de adhesión en aquellos agregados con alto contenido de sílice, pues tienden a adquirir carga negativa y así pueden pegarse a los glóbulos de asfalto que esta rodeado de cabezas polares positivas (emulsificantes catiónicos). Esto no ocurre con los emulsificantes aniónicos, para los cuales es necesario un agente de adhesión en la emulsión, que puede adicionarse previamente al asfalto, a la fase acuosa o a la emulsión ya producida.

El uso de agentes peptizadores de asfalto permite obtener tamaños de partículas menores, lo que reduce el asentamiento, aumenta la viscosidad y mejora la adhesividad.

También es posible adicionar solventes a las emulsiones para mejorar la emulsificación, reducir el asentamiento, mejorar velocidad de quiebre a bajas temperaturas o para corregir la viscosidad del asfalto posterior al quiebre de la emulsión.

La adición de polímeros puede mejorar las propiedades del asfalto base en término de propiedades mecánicas y susceptibilidad térmica.

2.4.2 Quiebre y curado

El quiebre o rotura de una emulsión asfáltica corresponde a la separación de las fases que la componen: asfalto y agua. La separación permite obtener como residuo el asfalto residual presente en la emulsión.

a) Mecanismos de quiebre

Al mezclarse con agregados, la emulsión se desestabiliza y quiebra. Al quebrar los glóbulos comienzan a unirse entre ellos o con la superficie del agregado. El quiebre de la emulsión se logra mediante dos mecanismos: evaporación y reacción físico-química.

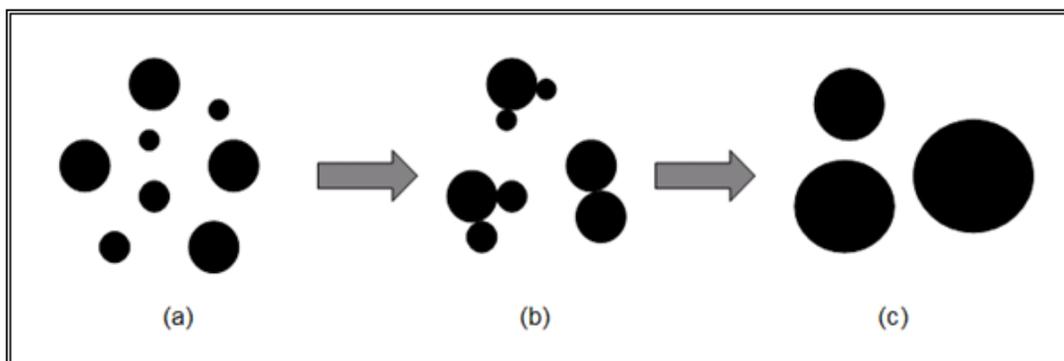
Evaporación

Este mecanismo consiste en la evaporación paulatina del agua y el acercamiento de los glóbulos de asfalto, superando las fuerzas de repulsión. El quiebre se produce en dos fases (Figura 2-18):

Floculación: Se unen los glóbulos unos a otros, formando pequeños grupos (flóculos). Este fenómeno se revierte con la agitación de la emulsión.

Coagulación: Una vez formado los flóculos, las fuerzas de atracción rompen la tensión superficial permitiendo la fusión de los glóbulos. Este es un fenómeno de naturaleza irreversible.

Figura 2-18. Fases del quiebre por evaporación: (a) estado inicial, (b) floculación, (c) coagulación



Reacción físico-química

Este mecanismo involucra una reacción entre el agente emulsificante y la superficie del agregado.

Cuando una emulsión asfáltica se pone en contacto con la superficie de un agregado cargada según su origen (agregado silíceo con carga negativa o agregado calcáreo con carga positiva), ésta absorbe iones emulsificantes presentes en la fase acuosa. Esto genera un desequilibrio en la solución que se compensa con la migración de emulsificante de la fase agua-asfalto a la fase acuosa. La superficie del agregado se tapiza de emulsificantes que se disponen con la cabeza polar hacia el árido y la cadena hidrocarbonada hacia fuera, por lo que el agregado se torna compatible con aceites y se cubre de asfalto.

b) Curado

El curado consiste en el desarrollo de las propiedades mecánicas del cemento asfáltico residual. Como resultado del proceso se obtiene una película continua de asfalto que mantiene los agregados unidos con una fuerte unión adhesiva. Esto se logra con la completa evaporación del agua y la coagulación y adherencia al agregado de los glóbulos. La evaporación de agua puede ser rápida si las condiciones ambientales son favorables, pero humedades altas, bajas temperaturas y lluvia posterior a la aplicación impiden un adecuado curado (AI, 1998).

2.4.3 Propiedades de las emulsiones

Las propiedades de una emulsión se pueden utilizar para caracterizar el comportamiento de ésta. Las propiedades se relacionan a la calidad, trabajabilidad y posterior desempeño de la emulsión asfáltica.

Las propiedades se pueden clasificar en intrínsecas y extrínsecas. Las propiedades intrínsecas no dependen de los agregados que se usen, estas son: estabilidad, viscosidad y propiedades de formulación (polaridad, tipo y contenido de asfalto). Las propiedades extrínsecas dependen de los agregados utilizados y se relaciona con el desempeño de la emulsión, estas son: velocidad de quiebre y adhesividad.

a) Estabilidad

Se define como la capacidad de la emulsión de permanecer como tal durante su almacenamiento y manejo, sin sufrir un deterioro en su calidad. Los factores más relevantes en la estabilidad son el tamaño medio, la distribución y uniformidad de los glóbulos de asfalto.

b) Viscosidad

Las principales aplicaciones con emulsiones se realizan aprovechando la baja viscosidad de estas, como el caso de los riegos. Los factores que afectan la viscosidad de la emulsión son: contenido de asfalto, viscosidad de la fase acuosa, distribución y tamaño de los glóbulos.

c) Propiedades de formulación

Son las propiedades que se definen previo a la elaboración de la emulsión. La polaridad de la emulsión dependerá del tipo de emulsificante que se use, según el tipo de agregados que se dispone.

El tipo de asfalto, blando o duro, se selecciona según las condiciones de clima presentes, y el contenido de asfalto residual define la cantidad de asfalto con el que quedan las aplicaciones.

d) Velocidad de quiebre y curado

Se refiere a la velocidad con que se produce el quiebre y curado de un sistema emulsión-agregado, que dependerá no solo de las características de la emulsión, sino que además de algunas características de los agregados o superficie en contacto con la emulsión.

e) Adhesividad emulsión/agregado

Son numerosos los factores involucrados en esta propiedad: relaciones específicas entre ligante y agregado, temperatura y viscosidad, humedad ambiente, contenido de agua del agregado y la presencia de agentes inhibidores, como el polvo.

f) Ensayos de caracterización de emulsiones

La siguiente tabla resume los ensayos del Manual de Carreteras (MOP, 2003) para medir las propiedades de las emulsiones asfálticas.

g) Clasificación de emulsiones

Las emulsiones se clasifican de acuerdo a su polaridad y velocidad de quiebre. La nomenclatura usada se muestra en la Tabla 2-7.

La designación vigente actualmente en Chile incluye un valor numérico representativo de la viscosidad de la emulsión (1 o 2), se indica si el asfalto base es de consistencia dura (sufijo 'h'), y/o se agrega como sufijo la letra "E" en caso de ser una emulsión modificada.

Tabla 2-6. Ensayos para emulsiones asfálticas.

Propiedad	Ensayo	Norma MCV	Observaciones
Composición	Residuo Destilación por	8.302.5	
	Residuo Evaporación por	8.302.5	
Polaridad	Carga de Partículas	8.302.5	Identifica emulsiones catiónicas
Consistencia	Viscosidad Saybolt-Furol	8.302.5	
Propiedades del Residuo	Penetración	8.302.3	
	Ductilidad	8.302.8	
	Solubilidad TCE	8.302.11	
	Ensayo de la Mancha	8.302.7	

Estabilidad	Demulsibilidad	8.302.5	Aplicable a emulsiones de quiebre rápido
	Sedimentación	8.302.5	
	Mezcla con Cemento	8.302.5	Aplicable a emulsiones de quiebre lento
	Tamizado	8.302.5	
	Estabilidad en Almacenamiento	8.302.5	
Compatibilidad	Placa Vialit	8.302.20	

Tabla 2-7. Nomenclatura de las emulsiones asfálticas.

Velocidad de Quiebre	Polaridad de la Emulsión	
	Catiónica	Aniónica
Rápido	CRS (Cationic Rapid Setting)	RS (Rapid Setting)
Medio	CMS (Cationic Medium Setting)	MS (Medium Setting)
Lento	CSS (Cationic Slow Setting)	SS (Slow Setting)

2.4.4 Emulsiones Asfálticas Modificadas

Las emulsiones asfálticas pueden contener diversos aditivos para mejorar las condiciones de producción, la adhesión con un agregado o la reología del ligante residual. Sin embargo, el término emulsión modificada se utiliza cuando una emulsión contiene aditivos que modifican la reología del residuo asfáltico.

Las emulsiones asfálticas modificadas contienen polímeros de distintos tipos que son incorporados en dosis no menores al 5% en peso del cemento asfáltico, para mejorar las características reológicas del residuo, propiedades mecánicas y/o de susceptibilidad térmica.

Un polímero es una molécula larga formada por varias otras, unidas unas a otras en largas cadenas o racimos. La secuencia y estructura química de los monómeros determina las propiedades físicas del polímero resultante. Los componentes de los polímeros pueden ser tratados ingenierilmente para obtener un amplio rango de propiedades físicas. Dentro de los polímeros se identifican dos categorías principales: elastómeros (gomas) y plastómeros (plásticos).

Los elastómeros resisten cargas aplicadas elongándose y recuperando su forma rápidamente cuando el esfuerzo se retira. Estos polímeros no proporcionan resistencia al asfalto hasta que éste es elongado, ya que su módulo de elasticidad aumenta con la elongación. Algunos elastómeros usados para modificar emulsiones son: cauchos naturales en forma de latex, latex de caucho estireno-butadieno (SBR), y copolímero en bloque estireno-butadieno-estireno (SBS).

Los plastómeros poseen una estructura tridimensional resistente y rígida, que resiste las deformaciones cuando es cargada. Estos polímeros exhiben resistencia rápidamente al ser cargados pero pueden fracturarse bajo deformación. El principal plastómero usado para modificar emulsiones es el etileno-acetato de vinilo (EVA).

El efecto del polímero depende del tipo, dosis, y compatibilidad entre ambos. Dentro de las ventajas producidas por la adición de polímeros en el ligante están:

Menor susceptibilidad térmica,

Mayor adhesividad,

Mayor elasticidad,

Mayor flexibilidad a bajas temperaturas,

Mayor rigidez a altas temperaturas, y

Mayor tenacidad y ductilidad.

Para fabricar una emulsión modificada es posible seguir dos alternativas: fabricar una emulsión con un asfalto base previamente modificado, o añadir el modificador en forma de latex (emulsión en agua) durante el proceso de emulsificación.

La fabricación de emulsiones modificadas a partir de asfaltos modificados es tecnológicamente mas complicada, pues se requiere producir una buena mezcla asfalto-polímero previamente, y mantener un correcto manejo del asfalto modificado para poder emulsificarlo.

La modificación de emulsiones utilizando polímeros en forma de latex es la forma de modificación mas antigua, y en principio, más simple. Existen tres formas de producir una emulsión modificada usando latex: premezcla del latex en la solución emulsificante; adición del latex en la línea de inyección de la solución emulsificante; y agregando el latex post-mezcla.

3. Procedimiento de laboratorio

Para llevar a cabo la investigación es necesario definir y especificar bajo qué criterios y con qué ensayos se diseñará la mezcla de emulsiones asfálticas con ceniza FBC y los adofaltos.

El procedimiento de diseño de las mezclas puede plantearse a partir de los métodos existentes, recordando que ninguno de ellos es universalmente aceptado. Dentro de los métodos estudiados se encuentran el método Marshall modificado y el propuesto en el manual GEMS.

Con respecto al procedimiento de diseño de mezcla y ensayos de adofaltos, no existen métodos validados universalmente.

Para llevar a cabo el procedimiento de diseño en su totalidad, se propone seguir los pasos esquematizados en la Figura 3-1. Las etapas que se describirán a continuación son producto del estudio y comparación de los métodos de diseños antes mencionados.

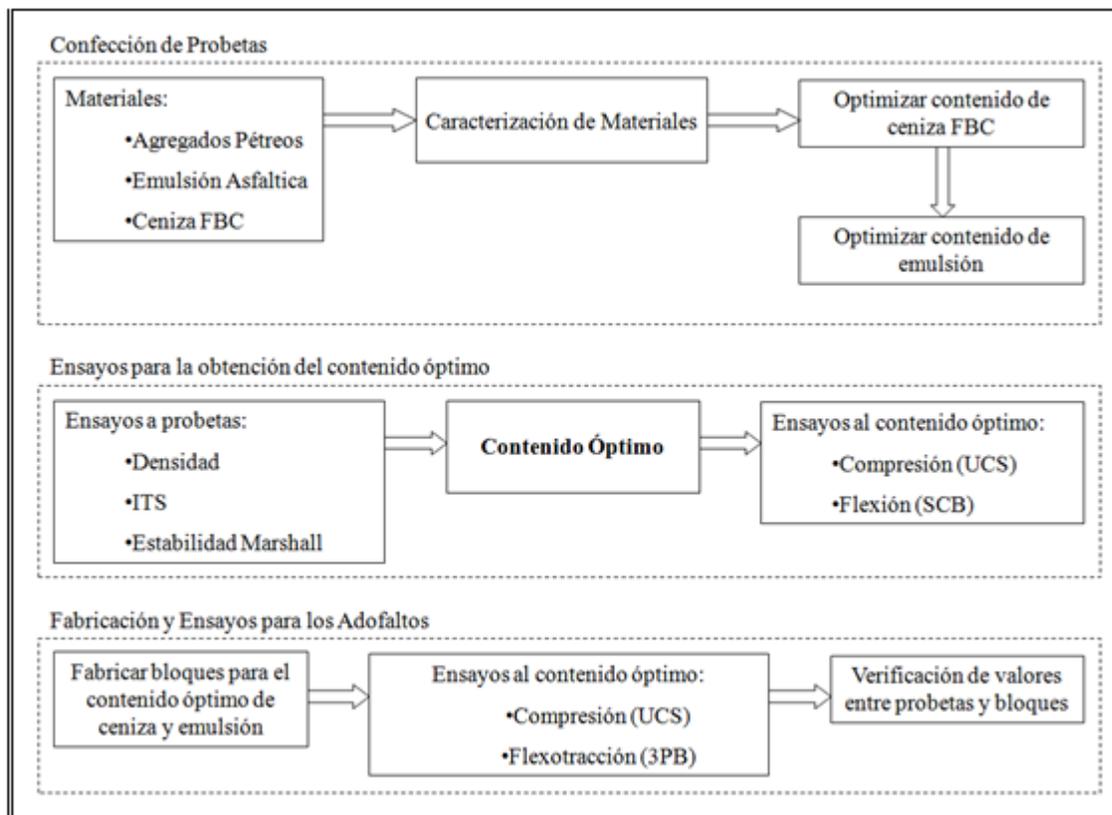
Para realizar la confección de probetas es necesario caracterizar los materiales en base a las especificaciones de la siguiente sección.

Luego, para obtener el óptimo de ceniza FBC, el tipo de emulsión y el óptimo de emulsión se realizan los ensayos ITS (*Indirect Tensile Strength*) y de Estabilidad Marshall, y utilizando los criterios de maximizar la resistencia de la mezcla, minimizar el contenido de emulsión y maximizar el contenido de ceniza FBC se diseña la dosificación óptima. Posteriormente ésta será verificada con los ensayos de compresión no confinada (UCS, *Unconfined Compressive Strength*) y ensayo de flexión a probeta semicircular (SCB, *Semi Circular Bending Test*).

Una vez diseñada y comprobada la dosificación óptima en probetas de 100 mm. y 150 mm. respectivamente, se verifican sus propiedades en bloques con los ensayos de compresión y flexotracción. Estos valores deben compararse con los obtenidos en la verificación de la dosificación óptima de la mezcla y con valores medidos para los adocretos.

Los ensayos mencionados anteriormente serán descritos en una de las siguientes secciones de este capítulo.

Figura 3-1. Etapas para el diseño de mezcla y de adofaltos



3.1 Caracterización de Materiales

3.1.1 Emulsiones Asfálticas

Las emulsiones utilizadas en la investigación fueron aportadas por la empresa Química Latinoamericana S.A. Las emulsiones de curado lento entregan una alta estabilidad a la mezcla y son utilizadas en mezclas con alto contenido de finos (*Asphalt Institute*, 1998); y además permiten una mejor adherencia entre agregados y ligante (Meegoda, 1999). Los tipos de emulsiones utilizados serán: CSS-1h y CSS-1hE. Esto permitirá evaluar el efecto de la utilización de una emulsión modificada en la resistencia mecánica de la mezcla.

a) Ensayos de caracterización

Se realizaron los siguientes ensayos para medir las siguientes propiedades de caracterización para cada una de las emulsiones utilizadas:

Composición,

Polaridad,

Consistencia,

Propiedades del Residuo,

Estabilidad.

b) Resultados de los ensayos de caracterización

Las propiedades de las emulsiones CSS-1h y CSS-1hE se indican en la Tabla 3-1 y Tabla 3-2, respectivamente.

Tabla 3-1. Propiedades de emulsión asfáltica tipo CSS-1h

ANALISIS	RESULTADO	ESPECIFICACION		METODO
		Mín.	Máx.	Manual de Carreteras (MC)
Viscosidad SFs a 25°C, (s)	38	20	100	MC 8.302.12
Estabilidad en Almacenamiento, 24 horas, (%)	0,1		1	MC 8.302.5
Mezcla con Cemento, (%)	0,6		2	MC 8.302.5
Carga de Partícula	Positiva	POSITIVA		MC 8.302.5
Tamizado, (%)	0,01		0,10	MC 8.302.5
DESTILACION				
Residuo, (%)	63,5	57		MC 8.302.5

EN EL RESIDUO				
Penetración a 25°C, 100g, 5s., (1/10 mm.)	60	40	90	MC 8.302.3
Ductilidad a 25°C, 5 cm/min., (cm.)	136	40		MC 8.302.8
Solubilidad en Tricloroetileno, (%)	99,9	97,5		MC 8.302.11
Ensaye de la Mancha, (% Xilol)	-25		25	MC 8.302.7

Tabla 3-2. Propiedades de emulsión asfáltica tipo CSS-1hE

ANALISIS	RESULTADO	ESPECIFICACION		METODO
		Mín.	Máx.	Manual de Carreteras (MC)
Viscosidad SFs a 25°C, (s)	40	20	50	MC 8.302.12
Estabilidad en Almacenamiento, 7 días, (%)	En análisis		5	MC 8.302.5
Carga de Partícula	POSITIVA	POSITIVA		MC 8.302.5
Tamizado, (%)	0,03		0,10	MC 8.302.5
POR EVAPORACION				
Residuo, (%)	69,2	62		MC 8.302.5

EN EL RESIDUO				
Penetración a 25°C, 100g, 5s., (1/10 mm.)	45	40	90	MC 8.302.3
Punto de Ablandamiento, °C	65	Informar		MC 8.302.16
Viscosidad Brookfield, (60°C), Poise	23400	Informar		
Ductilidad a 25°C, 5 cm/min., (cm.)	62	40		MC 8.302.8
Punto de Fragilidad Fraass, (°C)	-18		-17	MC 8.302.17
Recuperación Elástica por Torsión, 25°C, (%)	37	20		NLT 329

3.1.2 Cenizas FBC

Las cenizas FBC utilizadas fueron muestreadas desde la planta Petropower, a cargo de ENAP Refinerías Bio Bio. Estas fueron enviadas a Santiago en tambores para su caracterización y utilización en el proceso de diseño.

La caracterización de las cenizas FBC se presenta en la Tabla 2-3 y Tabla 2-4.

Para complementar la caracterización se presenta en las siguientes tablas el análisis químico de las cenizas y su distribución por tamaños.

Tabla 3-3. Análisis químico de las cenizas FBC

Compuesto	Porcentaje en peso	
	FA	FB
SiO ₂	1,75	12,4
Al ₂ O ₃	0,30	0,38
CaO	43,98	47,31
C	10,63	0,15
SO ₃	36,36	35,41
Cal libre	14,23	21,12

Los estudios de reconocimiento de la ceniza han sido presentado en estudios anteriores, validando su utilización como agente estabilizador (Vargas, 2006).

En la siguiente sección se presenta el análisis de composición de la estructura mineral de la mezcla, que incluye un tanteo en las proporciones de ceniza FBC y agregados pétreos en base a las bandas recomendadas. Estos tanteos definirán los contenidos iniciales de diseño de las cenizas FBC.

Tabla 3-4. Distribución de tamaños de las cenizas FBC

Tamiz (mm)	% Que pasa		
	FA	FB	FBA
3	100	100	100
2	100	99,3	99,7
1	100	94,1	97,6
0,5	100	71,8	88,7
0,25	100	34,3	73,7
0,125	99,7	3,3	61,2
0,063	80,1	0	48,1

3.1.3 Agregados Pétreos

Los agregados pétreos considerados para el estudio provienen de la planta de Pétreos Quilín. El tipo de material corresponde a un 'Integral 1/2"' y a una 'Gravilla 3/4"', con las propiedades que se indican en la Tabla 3-5.

Los agregados minerales deben cumplir con una de las bandas granulométricas recomendadas por el *Asphalt Institute* indicadas en la Tabla 2-5. Este cumplimiento debe realizarse considerando la inclusión de las cenizas. Por lo tanto, a partir de la restricción de porcentaje de finos bajo malla #200 establecido por las recomendaciones se obtienen los contenidos iniciales de ceniza FBC. Se ha seleccionado como referencia la banda granulométrica indicada en la Tabla 3-6, correspondiente a un tamaño máximo de 3/4". La selección de este tamaño máximo se basa en las dimensiones tradicionales de los adoquines utilizados actualmente, 20 cm. x 10 cm. x 7 cm. El tamaño máximo seleccionado permite dar una continuidad a la estructura granulométrica del agregado y no convertirse en un posible punto de falla por un tamaño similar a las dimensiones de los bloques.

Tabla 3-5. Caracterización de los agregados pétreos

Granulometría			
Tamiz NCh (mm)	Tamiz ASTM	Integral ½"	Gravilla ¾"
		% Que Pasa	% Que Pasa
20	¾"		100
12,5	½"	100	68
10	3/8"	98	32
5	#4	74	4
2,5	#8	52	3
0,63	#30	28	1
0,315	#50	19	0
0,16	#100	14	0
0,08	#200	10	0

Constantes físicas e hídricas		
Densidad real seca (kg/m ³)	2.588	2.570
Densidad aparente (kg/m ³)	1.552	1.472
Partículas chancadas (%)	91	90
Partículas lajeadas (%)	2	1

En base a la banda especificada para el tamaño de ¾" para mezclas densamente graduadas, recomendada por el *Asphalt Institute*, se realizó un análisis para definir los contenidos de cada uno de los materiales que conformaran el esqueleto mineral de la mezcla. Dicho análisis busca determinar los contenidos iniciales de ceniza FBC y las proporciones en que cada agregado pétreo se incluirá en la mezcla.

Tabla 3-6. Banda Granulométrica de referencia a utilizar (*Asphalt Institute*)

Tamiz		Banda Recomendada <i>Asphalt Insitote</i>	
NCh (mm)	ASTM (inch)		
20	¾"	100	100
12,5	½"	90	100
4,75	#4	45	70
2,36	#8	25	55
0,3	#50	5	20
0,075	#200	2	9

Tabla 3-7. Composición de estructura mineral de la mezcla

	Integral ½"	Gravilla ¾"	Ceniza FBC
Tanteo 1	80%	20%	0%
Tanteo 2	70%	20%	10%
Tanteo 3	60%	20%	20%
Tanteo 4	50%	20%	30%

Luego de reiteradas iteraciones se definieron tres distribuciones para la composición de la estructura mineral de la mezcla. Estas se definen en la Tabla 3-7 y se grafican en la Figura 3-2, junto con las curvas granulométricas de cada material.

Los porcentajes presentados, definen los tres contenidos iniciales de ceniza FBC con los que se dará inicio al programa de laboratorio. En la Figura 3-3 se presentan las muestras de agregados a estudiar.

Basándose en la muestra sin ceniza FBC, se realizaron los ensayos de caracterización de la granulometría y de las propiedades hídricas y físicas más relevantes para el estudio. Los resultados se presentan en la Tabla 3-8.

Figura 3-2. Curvas granulométricas de los materiales, las mezclas y las bandas recomendadas

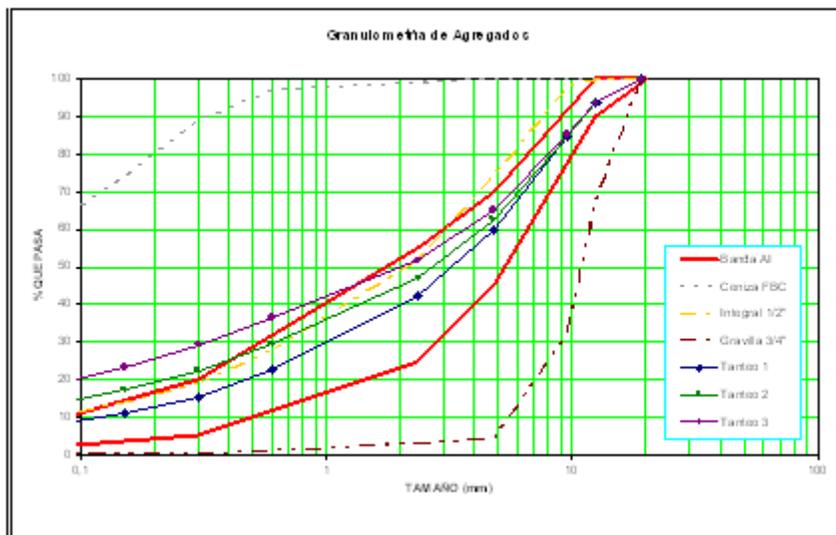


Figura 3-3. A la izquierda, muestra Tanteo 1. Al centro, muestra Tanteo 2. A la derecha, muestra Tanteo 3.



3.2 Dosificación de la mezcla

A partir del análisis de la granulometría del agregado mineral, compuesto de Integral 1/2", Gravel 3/4" y ceniza FBC, se definen los porcentajes de cada uno y una vez conocida la granulometría del material compuesto se estima el contenido inicial de emulsión aplicando la siguiente fórmula empírica (*Asphalt Institute*):

$$E = [0,05 \cdot A + 0,1 \cdot B + 0,5 \cdot C] \cdot 0,7 \quad (3-1)$$

Donde:

E: Porcentaje inicial estimado de emulsión asfáltica, en referencia al peso seco del agregado,

A: Porcentaje del agregado retenido en malla #8 (2,5 mm.),

B: Porcentaje del agregado que pasa el tamiz #8 (2,5 mm.) y retenido en malla #200 (80 μ m),

C: Porcentaje del agregado que pasa el tamiz #200 (80 μ m).

Tabla 3-8. Propiedades mezcla de agregados Tanteo 1

Granulometría			
Tamiz (mm)	NCh	Tamiz ASTM	Muestra: Tanteo 1
			% Que Pasa
20		¾"	100
12,5		½"	94
10		3/8"	85
5		#4	60
2,5		#8	42
0,63		#30	23
0,315		#50	15
0,16		#100	11
0,08		#200	8

Constantes físicas e hídricas	
DMCS (kg/ m ³)	2190
Humedad Óptima (%)	7,0

Con respecto al contenido de agua a adicionar, esta debe estimarse entre un 70% a 80% de la humedad óptima de compactación del agregado mineral, debido a la lubricación que entrega la emulsión asfáltica a los materiales, facilitando su compactación. Debe considerarse además la humedad de la muestra y el aporte de agua de la emulsión asfáltica. De esta manera, si la mezcla presenta un exceso de fluidos, lo cual es posible apreciar al momento de la compactación, es necesario

airear la mezcla, ayudándose de un ventilador y removiéndola ocasionalmente para así reducir el contenido de humedad. En caso contrario, si la mezcla presenta falta de fluidos para una óptima compactación se debe adicionar agua hasta alcanzar dicha condición.

En resumen, la dosificación para cada mezcla debe considerar:

Porcentaje y contenido de humedad de ceniza FBC,

Porcentaje y contenido de humedad de Integral $\frac{1}{2}$ " ,

Porcentaje y contenido de humedad de Gravilla $\frac{3}{4}$ " ,

Porcentaje de emulsión, referido al peso seco de los agregados minerales, contenido de asfalto residual y tipo de emulsión, y

Porcentaje de agua, referido al peso seco de los agregados minerales.

3.3 Fabricación de Probetas

Conocida una dosificación se procede a la fabricación de las probetas, esto considera tres etapas: preparación de materiales, análisis visual, y mezclado y compactación.

En la primera etapa se procede a preparar los materiales para su utilización, los que han sido previamente caracterizados.

La segunda etapa consiste en realizar un control del comportamiento de la dosificación. Para llevar a cabo la verificación se realiza una pequeña muestra de la mezcla, con el fin de revisar la compatibilidad de los materiales y que el contenido de fluidos de la mezcla sea adecuado para llevar a cabo la compactación. Además se define el procedimiento de mezclado a utilizar.

La tercera etapa se inicia con el mezclado de los materiales y finaliza con la compactación de las probetas.

3.3.1 Preparación de materiales

Se debe obtener una muestra representativa y suficiente para la cantidad de mezcla de emulsión asfáltica a utilizar.

Las cenizas FBC no requieren tratamiento previo.

Se seca una cantidad suficiente en peso seco, compuesto por Integral $\frac{1}{2}$ " , Gravilla $\frac{3}{4}$ " y ceniza FBC, según cantidades predefinidas. La muestra obtenida para la mezcla debe ser representativa del lote, para esto se recomienda utilizar métodos de cuarteo de material (MCV8.202.2).

El agua a utilizar debe ser potable y libre de particular solidas e impurezas.

En la Figura 3-4 y Figura 3-5 se muestran los materiales a utilizar.

Figura 3-4. Muestra de agregados pétreos



Figura 3-5. Muestra de emulsión asfáltica y agua



3.3.2 Análisis visual

En esta etapa se verifica la compatibilidad de los materiales, el contenido de fluidos de la mezcla y el procedimiento de mezclado de los materiales.

Con respecto a la compatibilidad de los materiales, esta ha sido comprobada previamente el momento de seleccionar los materiales a utilizar en el estudio. En caso de no contar con esta verificación previa debe realizarse el ensayo de cubrimiento y adherencia (*Asphalt Institute*) que permite evaluar preliminarmente si el tipo de emulsión seleccionado es adecuado para el tipo de agregado mineral que se tiene.

Luego, debe lograr una muestra de agregado mineral de 200 gr. en peso seco. A esta muestra agregar el agua y la emulsión según la dosificación definida, esta mezcla se debe realizar manualmente hasta alcanzar suficiente homogeneidad. Debe evaluarse la adición de los materiales fluidos, emulsión y agua, de las siguientes formas:

Pre-humeder los agregados minerales con agua y posteriormente agregar la emulsión, ambos en las dosis correspondientes, o

Diluir la emulsión con agua en las cantidades correspondientes y luego agregar a los agregados minerales;

Una vez definido el procedimiento de mezclado, se evalúa el contenido de fluidos de la mezcla según la dosificación inicial, pudiendo realizar modificaciones según el aspecto de esta, realizando nuevas mezclas con menor o mayor contenido de agua según sea el caso.

3.3.3 Mezclado y compactación

Confeccionar una mezcla de agregado mineral según cantidades definidas. Para probetas de 101,6 mm. de diámetro debe considerarse un peso de 1.100 gr. por probeta; para probetas de 150 mm. de diámetro debe considerarse un peso de 2.600 y 4.700 gr. por probeta, para ensayos de SCB y UCS, respectivamente..

Preparada la mezcla de agregados minerales, se adiciona las cantidades definidas de emulsión y agua según el procedimiento de mezclado seleccionado en la etapa previa.

El mezclado de los materiales debe realizarse hasta obtener una mezcla homogénea que no presente segregación ni exceso o falta de fluidos. Es recomendable la utilización de equipos mecánicos que faciliten el mezclado y permitan obtener las características adecuadas en la mezcla (Figura 3-6).

Figura 3-6. Mezcladora Hobart, capacidad 20 lt.



Previo a la compactación de las probetas se debe disponer la mezcla en bandejas extendidas durante 45 a 60 minutos para airearla y alcanzar la humedad deseada de compactación.

Para la compactación de probetas de 101,6 mm. de diámetro se debe limpiar el molde y la cara de compactación del martillo Marshall. Colocar un papel circular en la base del molde antes de introducir la mezcla. Ensamblar el molde y colocar la mezcla en él, acomodar el material con una espátula 15 veces a lo largo del perímetro y 10 veces al centro. Suavizar la superficie con la espátula. Colocar el molde en el pedestal de compactación y aplicar 75 golpes por cada lado de la probeta. Mantener en el molde a temperatura ambiente durante 24 horas y luego desmoldar. Al desmoldar medir la altura promedio de la probeta y pesar.

Figura 3-7. Aireación de mezclas previo a la compactación



La compactación de probetas de 150 mm. de diámetro se debe realizar siguiendo el método SUPERPAVE que utiliza el compactador giratorio (GCS: *Giratory Compactor*)

System), a 75 giros. El procedimiento de compactación se describe en la norma AASHTO T312, sección 9.

Una compactación inadecuada en cualquiera de los dos métodos puede ser detectada si hay exudación de líquido o si el martillo Marshall rebota, en el caso que corresponda. Si esto sucede debe colocar la mezcla en una bandeja y ventilar hasta alcanzar la humedad que permita realizar la compactación de forma adecuada. El exceso de contenido de fluidos influirá en la lubricación de las partículas y no permitirá una correcta densificación de la mezcla.

3.4 Fabricación de Bloques

Como se menciono anteriormente, la forma y tamaño del adoquín, junto con el aparejo de colocación utilizado afectan el comportamiento que el pavimento pudiera tener. En la presente investigación se utilizarán adoquines de forma rectangular de dimensiones 20 cm. de largo y 10 cm. de ancho, con un espesor objetivo de 7 cm. Esto debido a la simplicidad constructiva que ello significa, justificado por la baja influencia que tiene las dimensiones del bloque en comparación con la forma y el espesor de este (Panda y Ghosh, 2002).

3.4.1 Preparación de materiales

Se debe obtener una muestra representativa y suficiente para la cantidad de mezcla de emulsión asfáltica a utilizar.

Las cenizas FBC no requieren tratamiento previo.

Se seca una cantidad suficiente en peso seco, compuesto por 'Integral ½"', 'Gravilla ¾"' y ceniza FBC, según cantidades predefinidas. La muestra obtenida para la mezcla debe ser representativa del lote, para esto se recomienda utilizar métodos de cuarteo de material (MCV8.202.2).

El agua a utilizar debe ser potable y libre de particular solidas e impurezas.

3.4.2 Mezclado y compactación

Confeccionar una mezcla de agregado mineral según la dosificación definida. Para bloques de forma rectangular de dimensiones 20 cm. x 10 cm. x 7 cm. deben considerarse un peso de 3.000 gr. por bloque.

Preparada la mezcla de agregados minerales, se adiciona las cantidades definidas de emulsión y agua según el procedimiento de mezclado seleccionado en la etapa previa.

El mezclado de los materiales debe realizarse hasta obtener una mezcla homogénea que no presente segregación ni exceso o falta de fluidos. Es recomendable la utilización de mecanismos que faciliten el mezclado y permitan obtener las características adecuadas en la mezcla.

Previo a la compactación se debe disponer la mezcla en bandejas extendidas durante 45 a 60 minutos para airearla y alcanzar la humedad deseada de compactación.

Estudios indican la necesidad de un alto nivel de compactación en mezclas asfálticas, en especial para la fabricación de bloques (Ebels, 1998), esto pues se recomienda un bajo contenido de vacíos en la mezcla, debido a que altos contenidos de vacíos permiten un mayor ingreso de agua a los bloques lo que se manifiesta en una pérdida de resistencia y en una pérdida en la adherencia del material ligante con el material granular. Otro aspecto que afecta el contenido de vacíos es el envejecimiento del asfalto, este es causa de la exposición al aire de la mezcla. En resumen, el comportamiento y la durabilidad de los adofaltos se verán mejorados si el contenido de vacíos es bajo producto de una adecuada compactación.

Para lograr un bajo contenido de vacíos es necesario entregar una importante energía de compactación a la mezcla. En un principio se pensaron soluciones más artesanales, las que posteriormente permitan desarrollar equipamiento de mayor tecnología.

Aplicando una fuerza de compactación dinámica en la mezcla se logrará alcanzar los niveles deseados de densidad. Esta fuerza es posible entregarla con un martillo rotatorio con percusión que adaptado permitirá realizar la compactación de los bloques.

Para lograr la compactación se utiliza un martillo demoledor marca Makita modelo HM1304, el cual es un equipo eléctrico con una potencia de 1800 W, su capacidad máxima es de 1450 golpes por minuto y energía de impacto de 27 J. Este equipo se adaptará a la placa compactadora y a los moldes que se muestran en la en la Figura 3-8. La placa compactadora y tiene como objetivo compactar de manera uniforme el bloque, entregando una altura uniforme en su estado final. Tanto la placa compactadora como los moldes de compactación se construyen en acero como se aprecia en la figura indicada, diseño modificado del propuesto por Ebels (1997).

El modelo de compactación utilizado ha sido estudiado por Ebels y presenta una serie de ventajas que se proceden a describir:

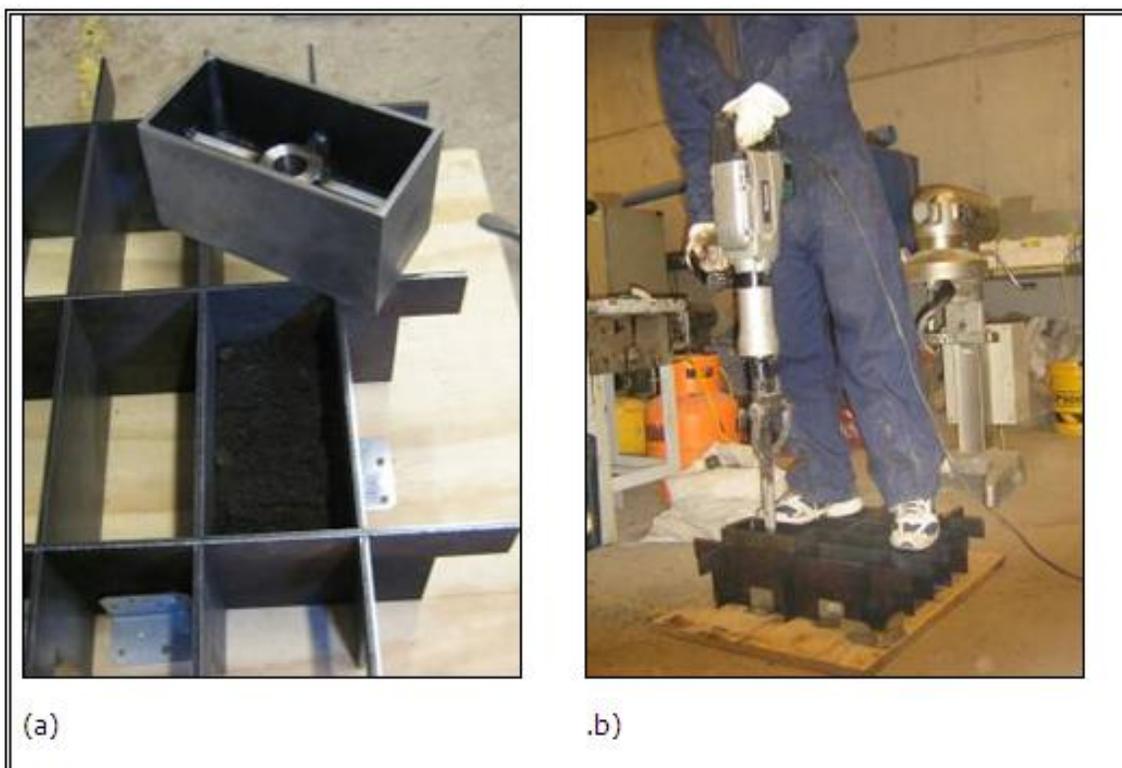
Rápido montaje y desmontaje, el sistema utilizado resulta de fácil manejo e instalación,

Movilidad, las partes que componen el sistema son ligeras y de tamaño adecuado para su fácil transporte,

Producción en lotes, permite fabricar una serie de bloques hermanos de las mismas características,

Compactación simplificada, el equipo de compactación es de fácil utilización, requiere solo electricidad.

Figura 3-8. Compactación de adofaltos en laboratorio, (a) Placa compactador y moldes con mezcla, y (b) Equipo para compactación.



La compactación de bloques de manera industrial puede desarrollarse con equipos especializados de compactación (Ver Figura 3-9 y Figura 3-10), que permiten alcanzar una alta productividad. En caso de no contar con los equipos especializados la compactación debe realizarse con la metodología manual planteada en los párrafos anteriores.

Figura 3-9. Máquina manual para fabricar adoquines



Figura 3-10. Equipo automático para fabricar adoquines



3.5 Ensayos

A continuación se describirán las actividades de curado y de ensayo para las distintas etapas de la investigación.

3.5.1 Densidad

A cada una de las probetas se debe registrar su densidad bruta, que corresponde al peso en el aire de la probeta dividido por su volumen. La densidad bruta se utiliza para validar la compactación y composición de la probeta. Esta se calcula de la siguiente manera (*Asphalt Institute*):

$$Db = Wa / (H \cdot A) \quad (3-2)$$

Donde:

D_b : Densidad bruta, medida de una probeta compactada [kg/m^3]

W_a : Peso, en el aire, de la probeta compactada [kg]

H: Altura de la probeta [m]

A: Área de la sección transversal de la probeta ($\pi \cdot r^2$) [m^2]

Como resultado se grafican los resultados de densidad para cada contenido de ceniza FBC y de emulsión asfáltica.

3.5.2 Indirect Tensile Strenght (ITS)

Posterior al desmolde de las probetas de 101,6 mm. de diámetro, estas deben curarse durante 72 horas a 40°C en horno. De la mezcla correspondiente, tres probetas serán ensayadas en condición seca y tres en condición saturada. Los ensayos en condición seca se realizan luego de una ambientación de 2 horas a temperatura ambiente, después del curado. Para los ensayos en condición saturada se deben dejar las probetas en un baño de agua a 25°C durante 24 horas, posteriormente se disponen a temperatura ambiente por 2 horas y se ensayan.

Figura 3-11. Prensa Marshall para ensayo de Estabilidad e ITS, con cabezal ITS



La ejecución del ensayo se rige por la norma AASHTO T283-89 (*Resistance of compacted bituminous mixture to moisture-induced damage*), en la sección 10

Testing, o Ensayo. En la Figura 3-11 se observa el equipo utilizado para realizar los ensayos. Se deben ensayar 3 probetas en condición seca y 3 en condición saturada.

Como resultado se obtendrá una curva ITS seco y saturado versus el contenido de ceniza FBC y el contenido de emulsión asfáltica. Con ambos resultados es posible obtener el indicador de la influencia del agua en el comportamiento de la mezcla, el *Tensile Strength Ratio* (TSR).

3.5.3 Estabilidad

Con respecto al curado de las probetas de 101,6 mm. de diámetro, estas deben mantenerse en el molde durante 24 horas a temperatura ambiente. Una vez desmoldadas deben curarse en horno a 40°C durante 72 horas.

La estabilidad y fluencia en el ensayo Marshall se determinan siguiendo los procedimientos de la norma ASTM D1559 o MCV 8.302.40. En esta investigación se ha modificado las condiciones de ensayo, como se indico en el párrafo anterior. En la Figura 3-11 se observa el equipo utilizado para realizar los ensayos.

Se deben ensayar 3 probetas de una misma mezcla a temperatura ambiente. El valor obtenido de estabilidad y fluencia corresponderá al promedio de los resultados individuales.

Como resultado se obtendrá un gráfico de estabilidad versus el contenido de ceniza FBC y el contenido de emulsión asfáltica.

3.5.4 Unconfined Compressive Strength (UCS)

El ensayo de compresión no confinada se utilizará en la verificación de la mezcla y del adofalto. Durante la revisión bibliográfica se encontraron dos procedimientos para este ensayo, llevarlo a cabo a una tasa de deformación constante y la otra, a una tasa de carga constante. Debido a que los pavimentos articulados funcionan como un pavimento flexible, es decir, disipando las tensiones de carga mediante la deformación de las capas se ha considerado la realización de dicho ensayo a una tasa de deformación constante.

a) UCS para mezcla

Este ensayo corresponde a una adaptación de la norma ASTM D1074, este ensayo permite medir la resistencia a la compresión de mezclas asfálticas. Para este ensayo se utilizaran probetas de 150 mm. de diámetro y 127 mm. de altura, según recomendaciones Sudafricanas. El ensayo se lleva a cabo, posterior al curado de 72 horas a 40°C en horno, a una tasa de deformación de 25,4 mm/min a una temperatura de 25°C. En la Figura 3-12 se muestra la configuración del ensayo.

Se deben ensayar 3 probetas en condición seca.

La resistencia a la compresión se calcula dividiendo la carga vertical máxima por el área de la sección transversal de la probeta. La unidad de medida del ensayo UCS es MPa.

Figura 3-12. Ensayo UCS.



b) UCS para adofalto

Este ensayo tiene como objetivo comparar la resistencia a la compresión de la mezcla de la probeta y del adofalto. No existen normas para el ensayo a compresión para bloques de asfalto.

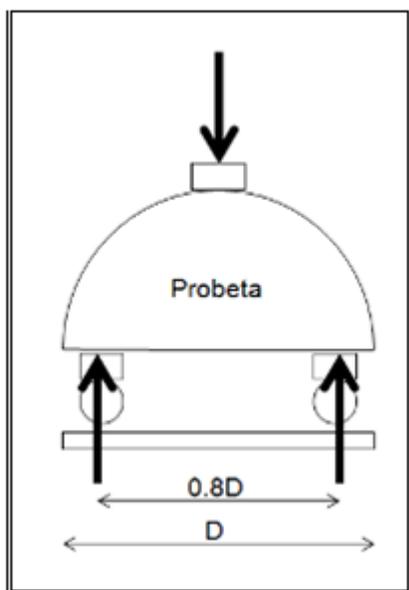
El ensayo se lleva a cabo, posterior al curado de 72 horas a 40°C en horno, a una tasa de deformación de 25,4 mm/min a una temperatura de 25°C. Se deben ensayar 4 probetas en condición seca. Las probetas utilizadas corresponden a medio adofalto, es decir, una probeta de sección cuadrada de 10 cm. de lado y una altura aproximada de 7 cm. El ensayo se realiza en el mismo equipo utilizado en la descripción anterior (Figura 3-12).

La resistencia a la compresión se calcula dividiendo la carga vertical máxima por el área de la sección transversal de la probeta. La unidad de medida del ensayo UCS es MPa.

3.5.5 Semi Circular Bending (SCB)

Con el ensayo SCB es posible obtener un indicador del comportamiento de las mezclas asfálticas como su resistencia y su rigidez. Una ventaja del ensayo SCB es que el valor de la resistencia puede ser obtenida inmediatamente. En la siguiente figura se muestra el esquema del ensayo.

Figura 3-13. Configuración del ensayo SCB



El ensayo se lleva a cabo, posterior al curado de 72 horas a 40°C en horno, a una tasa de deformación de 25,4 mm/min a una temperatura de 25°C. Se deben ensayar 3 probetas semicilíndricas en condición seca y 3 en condición saturada.

Estudios de Smit et al. definieron la siguiente relación entre la carga aplicada y la máxima tensión horizontal:

$$\sigma_x = 4.906 \cdot P/D \quad (3-3)$$

Donde:

σ_x : Máxima tensión horizontal [kPa]

P: Carga aplicada por espesor de la probeta [kN/m]

D: Diámetro del semi-cilindro [m].

El ensayo SCB permite determinar la misma propiedad que el ensayo ITS, sin embargo al momento de comparar ambos resultados es posible encontrar diferencias. Estas diferencias pueden ser causadas por la geometría de la probeta y

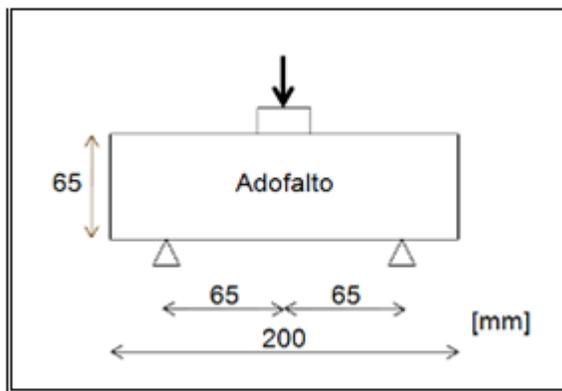
del ensayo que afecta de distintas formas en ambos. Por esta razón se debe tener precaución al comparar los resultados (Ebels, 1998).

3.5.6 3 Point Bending Test (3PB)

Con el ensayo 3PB es posible analizar el comportamiento mecánico individual de los adofaltos. La configuración del ensayo se muestra en la Figura 3-14.

El ensayo se lleva a cabo, posterior al curado de 72 horas a 40°C en horno, a una tasa de deformación de 5,08 mm/min (0,1 veces la tasa de deformación del ensayo Marshall) a una temperatura de 25°C. Se deben ensayar 3 bloques en condición seca y 3 bloques en condición saturada.

Figura 3-14. Configuración ensayo 3PB



La teoría clásica de viga no permite aplicarse para el análisis de este ensayo debido a los efectos que producen las tensiones de corte en el espesor delgado del bloque. Smit et al. en un estudio de elementos finitos define una relación entre la máxima tensión horizontal y la carga aplicada:

$$\sigma_x = 0.3515 \cdot P \quad (3-4)$$

Donde:

σ_x : Máxima tensión horizontal [MPa]

P: Carga aplicada a la probeta [kN]

Estos resultados son comparables con los obtenidos en los ensayos de ITS.

En el Anexo A se muestran fotografías de las distintas etapas del trabajo en laboratorio.

4. Presentación y análisis de resultados de laboratorio

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos de las etapas desarrolladas en laboratorio y se concreta el análisis que posteriormente permitirá obtener las conclusiones de la investigación.

La presentación de los resultados se realizará por etapas:

Diseño de mezcla, como resultado entrega un contenido de ceniza FBC y un tipo y contenido de emulsión asfáltica.

Verificación mezcla, permite revisar las propiedades mecánicas de la dosificación entregada.

Verificación adofalto, entrega la comparación de propiedades entre probetas y bloques, además de comparar estos con adocretos.

4.1 Diseño de Mezcla

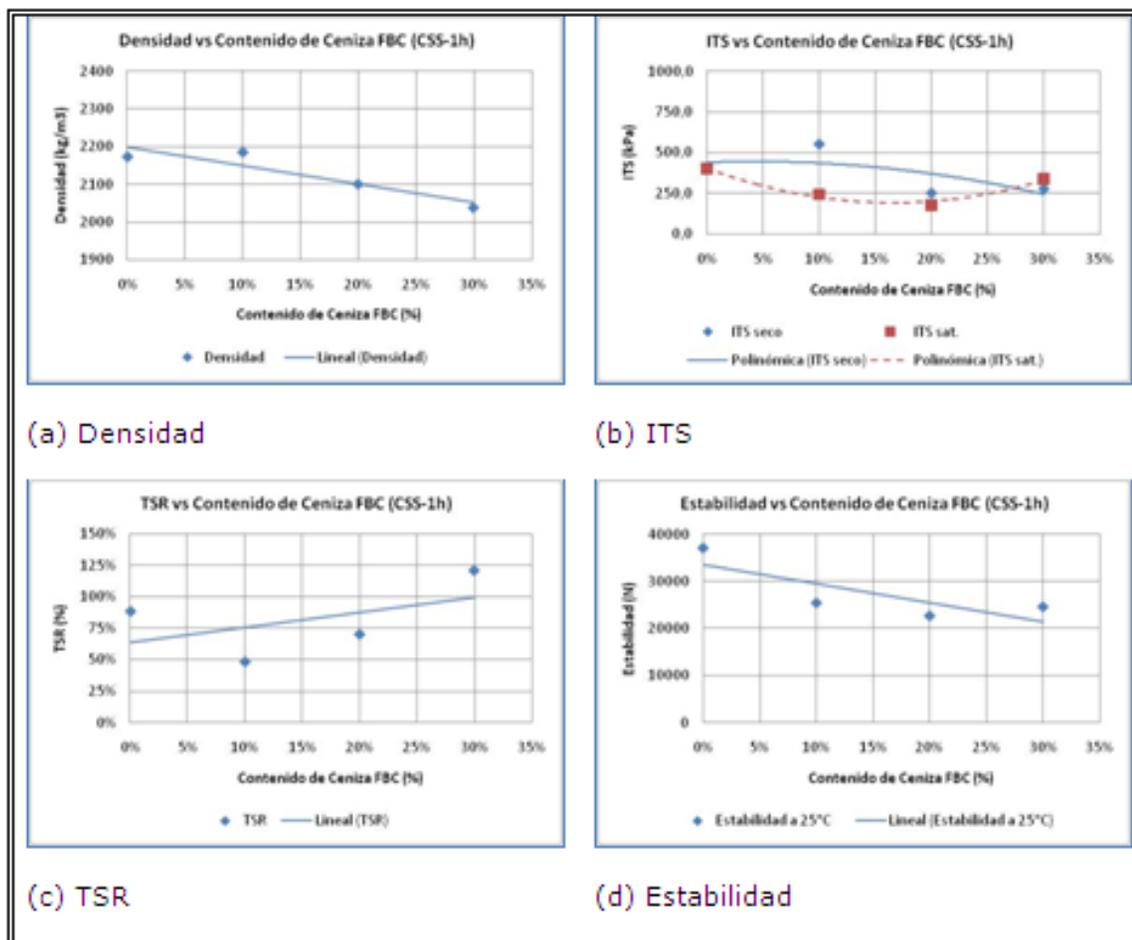
Las dosificaciones de las mezclas realizadas son las indicadas en Tabla 4-1.

Tabla 4-1. Dosificaciones variando contenido de ceniza FBC.

Tipo Emulsión:		CSS-1h / CSS-1hE	
% Integral 1/2"	% Gravilla 3/4"	% Ceniza	%Emulsión
80%	20%	0%	6,6%
70%	20%	10%	8,7%
60%	20%	20%	10,8%
50%	20%	30%	12,9%

A continuación se presentarán los resultados de diseño de mezcla para cada emulsión, estos incluyen gráficas de densidad, ITS, TSR y Estabilidad.

Figura 4-1. Gráficos de emulsión CSS-1h, propiedad vs contenido de ceniza FBC



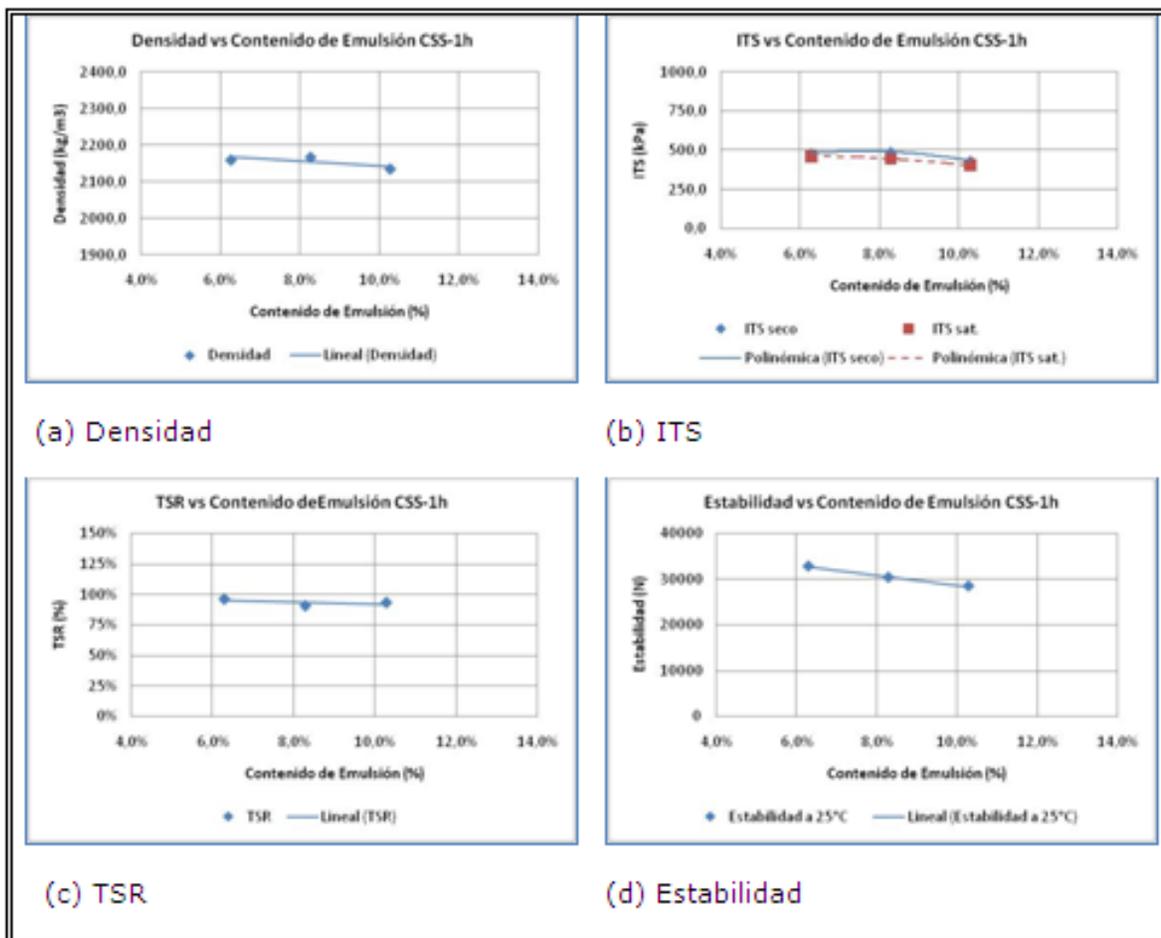
A partir de las dosificaciones obtenidas en la Tabla 4-1, se presentan los gráficos de la Figura 4-1, los que corresponden al diseño de mezcla con emulsión CSS-1h.

Es posible apreciar una disminución en la densidad de las mezclas y en el valor de la estabilidad, conforme aumenta el contenido de ceniza FBC. A diferencia de la TSR, el cual aumenta con el incremento del contenido de ceniza. En cambio, en la tendencia de los valores de ITS permite obtener un contenido de ceniza FBC que maximiza esta propiedad.

Tabla 4-2. Dosificaciones realizadas variando contenido de emulsión CSS-1h.

Tipo Emulsión:		CSS-1h		
% Integral 1/2"	% Gravilla 3/4"	% Ceniza	%Emulsión	
72%	20%	8%	6,28%	
72%	20%	8%	8,28%	
72%	20%	8%	10,28%	

Figura 4-2. Gráficos de emulsión CSS-1h, propiedad vs contenido de emulsión



Para este tipo de emulsión, CSS-1h, este contenido óptimo de ceniza FBC se ha considerado como 8%. A partir de este valor se estima el contenido de emulsión, el cual se varía para buscar una cantidad óptima de este material a partir de las dosificaciones presentadas en la Tabla 4-2.

Los resultados se muestran en la Figura 4-2. Se reiteran las tendencias de disminución de la densidad y la estabilidad según se incrementa el contenido de emulsión, pero en menor proporción respecto a la variación producto del incremento del contenido de ceniza FBC, lo que no ocurre con los valores de TSR. La tendencia de los valores de ITS permite obtener un contenido de emulsión que maximiza esta propiedad, que se ha estimado en 7,5%.

Por otro lado, a partir de las dosificaciones obtenidas en la Tabla 4-1, se presentan los gráficos de la Figura 4-3, los que corresponden al diseño de mezcla con emulsión CSS-1hE.

Es posible apreciar una disminución en la densidad de las mezclas y en el valor de la estabilidad, conforme aumenta el contenido de ceniza FBC. A diferencia de la TSR, el cual aumenta con el incremento del contenido de ceniza. En cambio, en la tendencia de los valores de ITS permite obtener un contenido de ceniza FBC que maximiza esta propiedad.

Para este tipo de emulsión, CSS-1hE, este contenido óptimo de ceniza FBC se ha considerado como 16%. A partir de este valor se estima el contenido de emulsión, el cual se varía para buscar una cantidad óptima de este material a partir de las dosificaciones presentadas en la Tabla 4-3.

Figura 4-3. Gráficos de emulsión CSS-1hE, propiedad vs contenido de ceniza FBC

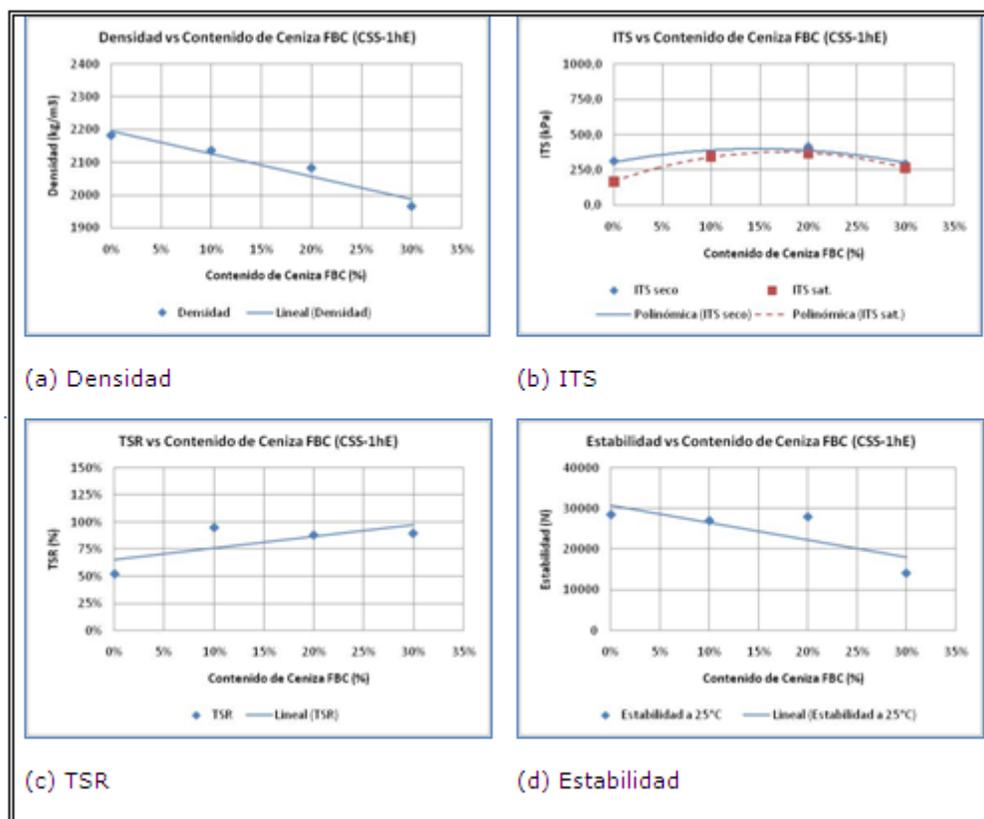
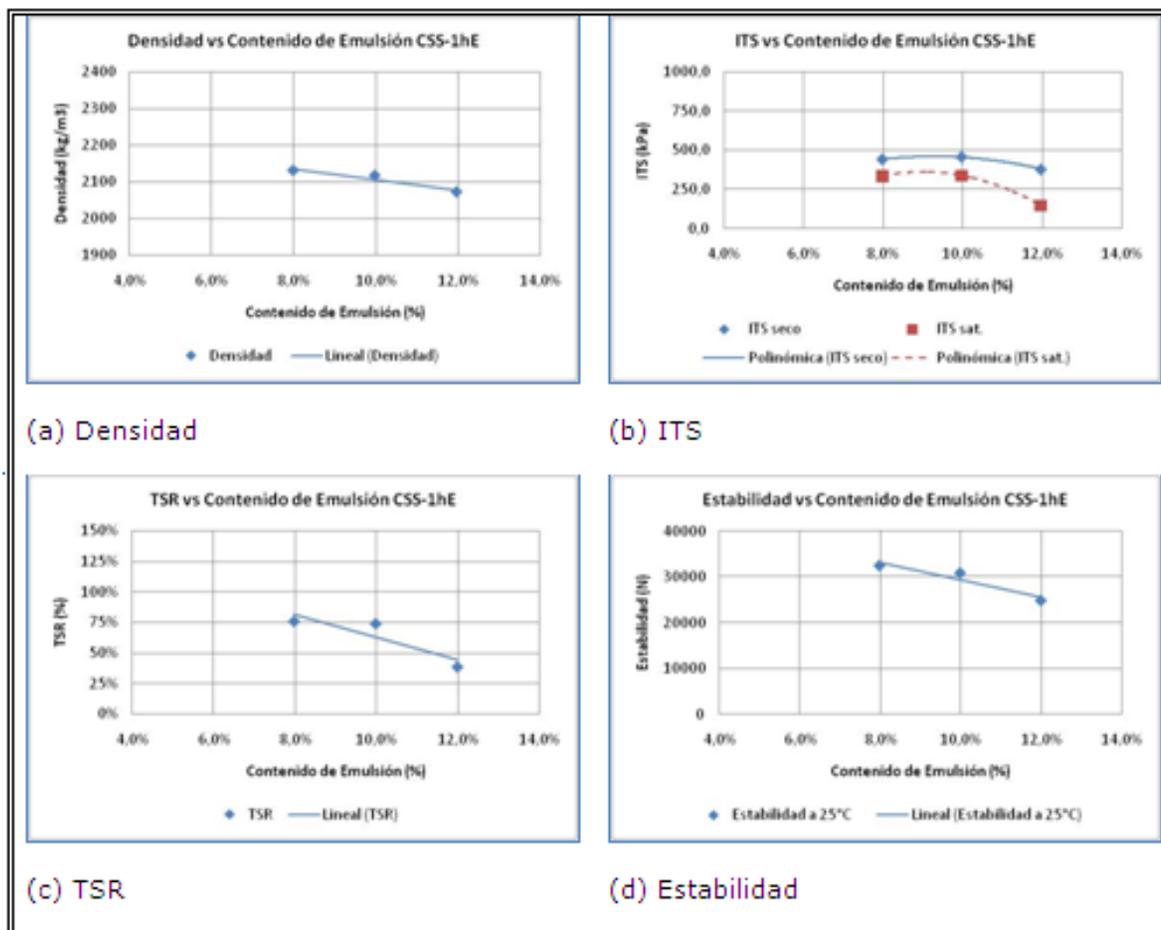


Tabla 4-3. Dosificaciones realizadas variando contenido de emulsión CSS-1hE.

Tipo Emulsión: CSS-1hE			
% Integral 1/2"	% Gravilla 3/4"	% Ceniza	%Emulsión
64%	20%	16%	7,97%
64%	20%	16%	9,97%
64%	20%	16%	11,97%

Los resultados se muestran en la Figura 4-4. Se reiteran las tendencias de disminución de la densidad y la estabilidad según se incrementa el contenido de emulsión, pero en menor proporción respecto a la variación producto del incremento del contenido de ceniza FBC, lo que no ocurre con los valores de TSR los cuales presentan una clara disminución. La tendencia de los valores de ITS permite obtener un contenido de emulsión que maximiza esta propiedad, que se ha estimado en 9,4%.

Figura 4-4. Gráficos de emulsión CSS-1hE, propiedad vs contenido de emulsión



En resumen se obtienen dos dosificaciones que se indican en la Tabla 4-4, de las cuales se seleccionará la correspondiente a la emulsión CSS-1h pues entrega mayores valores de resistencia ITS, indica un buen comportamiento bajo agua (Figura 4-2 (c)) y tiene una mejor trabajabilidad en laboratorio.

Tabla 4-4. Dosificaciones óptimas obtenidas

Contenido Integral ½"	Contenido Gravilla ¾"	Contenido Ceniza FBC	Tipo Emulsión	Contenido Emulsión
72%	20%	8%	CSS-1h	7,5%
64%	20%	16%	CSS-1hE	9,4%

Se descarta la selección de la emulsión CSS-1hE debido a la poca homogeneidad que presentan sus mezclas y probetas durante el desarrollo de las actividades de laboratorio, además de entregar valores considerados bajos los para la condición saturada.

A partir de la dosificación seleccionada se confeccionan las mezclas para los siguientes análisis.

4.2 Verificación Mezcla

Con la dosificación seleccionada en la etapa previa se procedió a confeccionar probetas de 150 mm. de diámetro para realizar los ensayos de UCS y SCB, este último en condición seca y saturada. En la Tabla 4-5 se muestran los resultados obtenidos.

Al comparar los resultados de la mezcla con ceniza FBC con los correspondientes a la dosificación indicada en la etapa anterior (Figura 4-2 (b)) se aprecia similitud en las magnitudes entre los valores de ITS y SCB, los cuales representan la resistencia a la tracción de la mezcla, una generada a partir del hendimiento y la otra a partir de la flexión. La diferencia existente entre estos valores puede ser producto de la diferencia en las dimensiones y formas de compactación de las probetas estudiadas.

Tabla 4-5. Resultados verificación mezcla

Ensayo	Dosificación Mezcla (Φ 150 mm)		Dosificación Mezcla (Φ 150 mm)	
	Tipo Emulsión	CSS-1h	Tipo Emulsión	CSS-1h
	% Emulsión	7,50%	% Emulsión	7,50%
	% Ceniza FBC	8,00%	% Ceniza FBC	0%
Densidad (kg/m ³)	2144		2021	
UCS (Mpa)	4,51		2,71	
SCB seco (kPa)	660,8		484,9	
SCB sat. (kPa)	730,9		280,9	
TSR (%)	111%		58%	

Para analizar el aporte de las cenizas FBC en las mezclas, se omitió su adición a la dosificación óptima seleccionada. Esta mezcla presentó un comportamiento marcado por el contenido de emulsión de 7,5% que resulta alto para esa mezcla de agregados. Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 4-5.

4.3 Verificación Adofalto

Utilizando la misma dosificación que en la verificación de la mezcla, se confeccionaron bloques según lo indicado en el procedimiento de laboratorio, los que se ensayaron a UCS y 3PB. A estos ensayos también fueron sometidos un lote de adocretos comerciales con el fin de compararlos.

Los resultados obtenidos en los ensayos se pueden apreciar en la Tabla 4-6. En los adofaltos se midió una densidad promedio de 2061 kg/m³. Los adocretos ensayados tienen una densidad promedio de 2150 kg/m³.

Ambos bloques, adofaltos y adocretos, poseen propiedades mecánicas diferentes. Por un lado la visco-elasticidad que presentan las mezclas asfálticas y por otro la rigidez del concreto. Sin embargo, ante las solicitaciones de carga ambos materiales tendrán un comportamiento considerado adecuado, si se piensa en la energía de rotura que cada uno es capaz de absorber antes del colapso. La energía de rotura se asocia a la capacidad de un material de resistir a cargas de fatiga. Este análisis se realizará más profundamente en la siguiente sección.

Tabla 4-6. Resultados verificación adofalto y adocreto

Ensayo	Dosificación Adofalto (200x100x70 mm)		Adocreto (200x100x60 mm)
	Tipo Emulsión	CSS-1h	
	% Emulsión	7,50%	
	% Ceniza FBC	8,00%	
UCS (Mpa)	2,60		33,31
SCB seco (MPa)	0,79		3,88
SCB sat. (MPa)	0,72		11,54

De la tabla se puede observar que el agua no tiene ningún efecto negativo en la resistencia de los adocretos, no así en los adofaltos donde se aprecia una reducción aproximada del 9% en su resistencia a la tracción indirecta, evaluada mediante ensayo 3PB. El valor de UCS es considerado bajo debido al poco desarrollo de la metodología de compactación pues fueron pruebas de evaluación y no representan la solución final para la densificación de los bloques, esto se demuestra pues el valor UCS de la mezcla con ceniza FBC, es aproximadamente el doble que el valor UCS de los adofaltos.

4.4 Análisis de resultados

Con los antecedentes presentados anteriormente se realizará el análisis de los distintos factores que influyen en el comportamiento de la mezcla y de los adofaltos.

Análisis cualitativo del comportamiento de la mezcla

La calidad de los materiales tendrá incidencia en los resultados, por esta razón su selección en las etapas iniciales de la investigación se realizó de manera exhaustiva y cuidadosa. Por un lado los agregados pétreos provenientes de plantas de producción para mezclas asfálticas poseen propiedades adecuadas para su utilización según lo indican sus especificaciones. Lo mismo ocurre con las emulsiones asfálticas las cuales fueron seleccionadas para que tengan buena compatibilidad con los agregados disponibles y con las cenizas. Las emulsiones de quiebre lento fueron seleccionadas debido a que aportan estabilidad a la mezcla, además que su uso es recomendado en mezclas con granulometrías cerradas o densas.

La compatibilidad de los materiales fue estudiada previa al inicio de la investigación, con el fin de obtener materiales que en conjunto presentaran un comportamiento adecuado para su utilización en el mezclado.

Durante los procesos de fabricación de las probetas, mezclado y compactación, tiene una gran relevancia el contenido de fluidos de la mezcla pues esta directamente relacionado con la capacidad de densificación que posea la mezcla. De esta manera, el contenido de agua que se agregue a la mezcla para alcanzar su humedad optima de compactación debe ser rigurosamente controlado para evitar posteriores problemas en la compactación de las probetas.

En el proceso de fabricación de probetas se utilizaron dos métodos distintos, método Marshall y método SUPERPAVE. El primero compacta la mezcla por impacto, a diferencia que el segundo lo hace por amasado, logrando obtener densidad levemente mayores que el otro método. La ventaja que tiene este método de amasado es que simula de mejor manera durante el proceso de compactación el tipo de sollicitación al cual estará expuesta la mezcla al momento del tránsito vehicular.

Posteriormente al proceso de fabricación de las probetas están el curado y los ensayos. El curado utilizado corresponde al recomendado por *Asphalt Institute* y se utiliza para representar en el corto plazo el comportamiento que tendría la mezcla a un mediano plazo. Las condiciones de curado que se utilicen afectan los resultados mecánicos que se obtengan. En el caso particular, las condiciones adoptadas permitieron alcanzar un adecuado quiebre de la emulsión y la cementación de la cal presente en las cenizas FBC.

Dentro de las principales variables que afectan el comportamiento de la mezcla está la densidad, propiedad que se asocia al contenido de vacíos de la mezcla. Se sabe que un alto contenido de vacíos de la mezcla, que equivale a una baja densidad, resulta perjudicial para ciertas propiedades de las mezclas pues permite el ingreso

de agua y aire. El agua disminuye la capacidad de adherencia entre las partículas y el agente ligante, por lo tanto su resistencia mecánica. Por otro lado, el aire envejece el asfalto residual lo que afecta a la fatiga de la mezcla.

La densidad de la mezcla dependerá de la humedad que ésta presente al momento de compactar, esta propiedad queda definida por el agua que aporta la emulsión, la humedad de los agregados y el agua libre adicionada para alcanzar la humedad óptima de compactación.

Análisis del resultado del diseño y verificación de la mezcla

En las mediciones de densidad de las mezclas se presento una disminución en ese valor según el aumento del contenido de ceniza FBC y de emulsión, tendencia que se reitero para ambos tipos de emulsiones. Un comportamiento similar se presentó en las mediciones de estabilidad. De este efecto se puede deducir que el aumento en la cantidad de material fino (ceniza FBC) reduce la estabilidad de la mezcla por la falta de material de mayor tamaño en la composición granulométrica y por el aumento de material ligante en la mezcla, que lubrica las partículas presentes.

En cambio los resultados de ITS, seco y saturado, presentan una tendencia que permitió encontrar un valor que maximiza la resistencia mecánica de la mezcla, criterio que prima para la selección de los valores óptimos de ceniza FBC y de emulsión. El tipo de emulsión que se selecciona es la que entrega mayores resultados de resistencia.

Revisando las gráficas y comentarios de la sección anterior la dosificación inicial propuesta es:

Contenido de Ceniza FBC: 8,0%

Tipo de emulsion: CSS-1h

Contenido de emulsión: 7,5% (referido al peso húmedo de los materiales)

Contenido de Gravilla $\frac{3}{4}$ " : 20%

Contenido de Integral $\frac{1}{2}$ " : 72%

Esta dosificación se convierte en el punto de partida para las siguientes etapas de estudio y en ningún caso representa valores absolutos o definitivos, pues el contexto de la investigación involucra un análisis más profundo de muchas de las variables que han sido asumidas para efectos de ésta tesis.

Los ensayos utilizados para evaluar la tracción indirecta y la flexotracción, ITS y SCB, permite obtener un valor que indique la cohesión de la mezcla, aportada principalmente por el efecto de la cal presente en las cenizas. Si bien los ensayos miden una misma propiedad de manera indirecta, estos pueden ser comparados entre si pero considerando las diferencias en los tamaños y formas de las probeta que afectarán los resultados finales.

Algunos de los resultados obtenidos han mostrado resistencias mayores en condición saturada que en condición seca, esta tendencia se ha presentado en algunos ensayos de tracción indirecta (ITS o SCB), pues ésta viene dada principalmente por la cohesión de las partículas y por el grado de cementación que pueda alcanzar la cal aportada por la ceniza FBC, a diferencia de los ensayos de compresión donde la resistencia es aportada principalmente por la trabazón de sus partículas.

Análisis de la verificación del adofalto

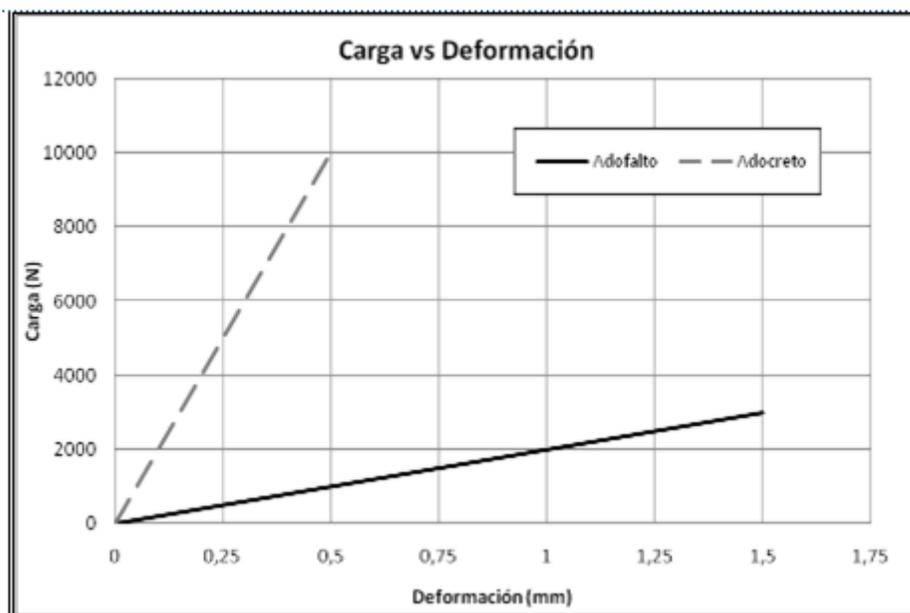
Los ensayos utilizados para evaluar la tracción indirecta y la flexotracción, ITS, SCB y 3PB, permite obtener un valor que indique la cohesión de la mezcla en probetas y en bloques. Si bien los ensayos miden una misma propiedad de manera indirecta, estos pueden ser comparados entre si pero considerando las diferencias en los tamaños y formas de las probeta que afectarán los resultados finales. Esta comparación permite verificar la congruencia en los resultados obtenidos en los tres ensayos, obteniendo valores de tracción indirecta del orden de 750 kPa.

Otro aspecto es el comportamiento del concreto y las mezclas asfálticas, el cual es diferente. Para analizar este aspecto se presenta en la Figura 4-5 un gráfico simplificado de carga - deformación para los elementos estudiados: adocretos y adofaltos. En dicho gráfico se presentan los resultados del ensayo de resistencia a la flexo tracción (3PB).

Si se realiza una comparación mecánica entre un adocreto y un adofalto, claramente se aprecian que sus comportamientos son rígidos y flexibles, respectivamente. Los adocretos puestos en pavimentos articulados tienen un funcionamiento flexible debido a su composición, por otro lado el uso de adofaltos permitirá un funcionamiento más flexible del pavimento, aliviando la acción de sollicitaciones de carga. En el Figura 4-5 podemos apreciar la energía absorbida por ambos elementos en el ensayo 3PB (adocretos y adofaltos), la cual corresponde al área bajo la curva. Esto indica que si bien ambos materiales tienen diferentes comportamientos, módulos elásticos y resistencias de rotura, ambos son capaces de soportar similares niveles de energía antes de alcanzar la rotura.

Otro aspecto que menciona Jenkins (1999) es que el comportamiento visco-elástico de la mezcla asfáltica influirá en el desempeño de la matriz conformada por los bloques, específicamente debido al alto modulo de Poisson de las mezclas asfálticas (0,35) y baja elasticidad permitirán la deformación lateral de los bloques ante permanentes cargas verticales de transito, lo que se traducirá en una mayor trabazón entre los bloques, aumentando la transferencia de carga en las juntas. Este aspecto se deberá corroborar en posteriores etapas de la investigación, con la construcción, seguimiento y evaluación de un tramo de prueba a escala real.

Figura 4-5. Análisis de carga – deformación ensayo 3PB, adofaltos y adocretos.



Análisis de la compactación de los adofalartos

Un aspecto que debe seguir en estudiar es la compactación de los adofalartos. En este estudio se utilizó una modificación del método diseñado por Ebels (1997) para fabricar bloques para el estudio de laboratorio. En adelante se deberá diseñar un método de compactación que permita un mejor rendimiento en la producción de bloques.

En la fabricación de adofalartos es importante asegurar una determinada cantidad de energía de compactación. Se probaron tres equipos de distintas características, buscando optimizar la compactación de los bloques. En la Tabla 4-7 se presentan los equipos testeados. Los resultados más satisfactorios se obtuvieron con el equipo MAKITA HM1304, que con un tiempo de compactación de 30 segundos permite entregar una cantidad de energía equivalente al método Marshall, aproximadamente 3000 J.

El equipo BOSCH GBH4DFE no es capaz de entregar la energía suficiente para la compactación de los bloques, a diferencia del modelo MAKITA HM1810 que producto de su elevada potencia descompacta los bloques adyacentes al momento de compactar un bloque, convirtiéndose en una alternativa para la compactación en el caso de utilizar moldes individuales, que no es el caso de esta investigación.

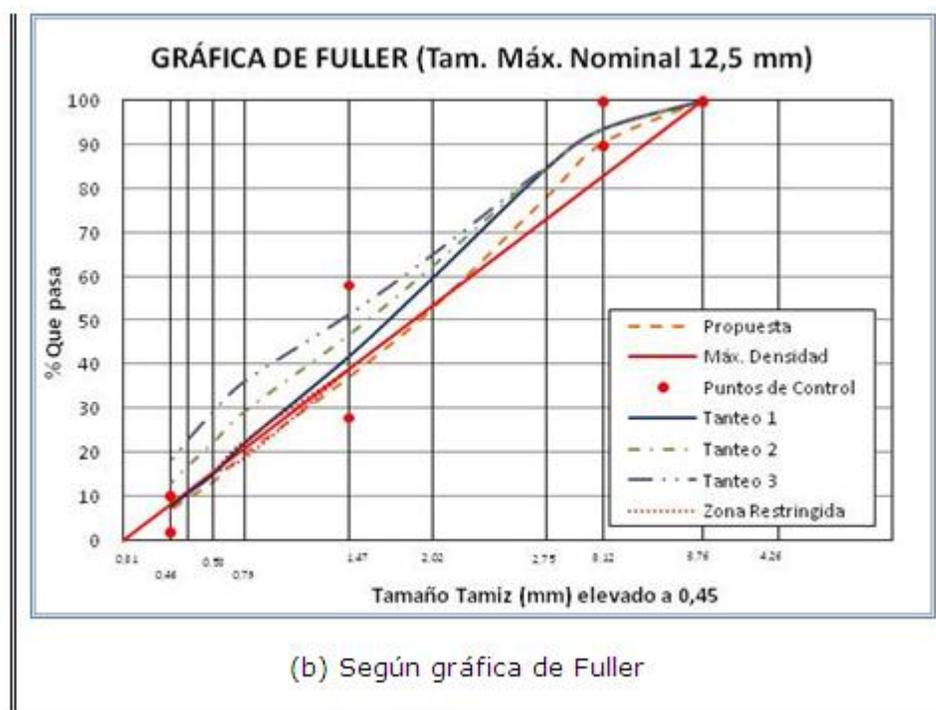
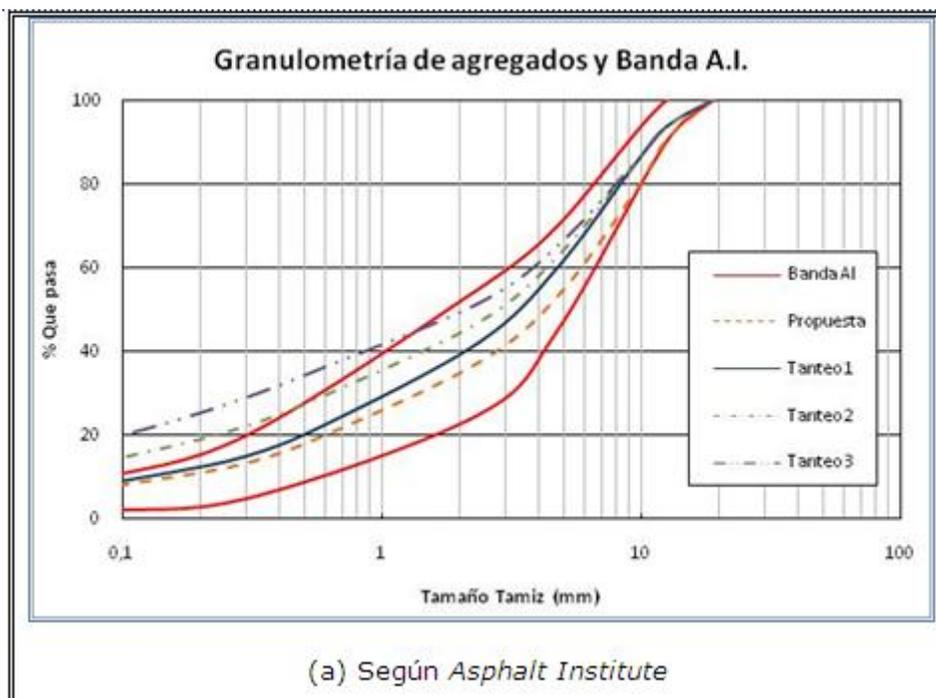
Tabla 4-7. Comparación equipos para compactación de adofalartos.

Marca	Bosch	Makita	Makita
Modelo	GBH 4 DFE	HM1304	HM1810
Golpes por minuto	3900	1450	1100
Energía (J)	3,5	27,5	63
Peso (kg)	4	15	30
Imagen			

Análisis de composición granulométrica

El análisis granulométrico realizado inicialmente en la investigación correspondió a las recomendaciones del *Asphalt Institute*, las cuales consisten en ajustar la granulometría de los agregados a una banda según el tipo de mezcla y el tamaño máximo a utilizar. Se utilizó la banda para tamaño máximo de $\frac{3}{4}$ " para mezclas asfálticas en frío cerradas (Tabla 3-6).

Figura 4-6. Granulometrías de trabajo



Durante el desarrollo de los estudios se incorporó como complemento el análisis granulométrico según la Curva de Fuller, este consiste en ajustar la granulometría de los agregados a una curva que representa la máxima densidad que una mezcla puede alcanzar.

A partir del primer análisis se utilizó como base de la mezcla de agregados un 20% de gravilla, valor que se aumentó a 30% con el análisis complementario. Este aumento permitió obtener mezclas de mayor densidad y mejor comportamiento mecánico. En la Figura 4-6 se pueden observar los criterios de selección de granulometrías y las curvas utilizadas en el estudio.

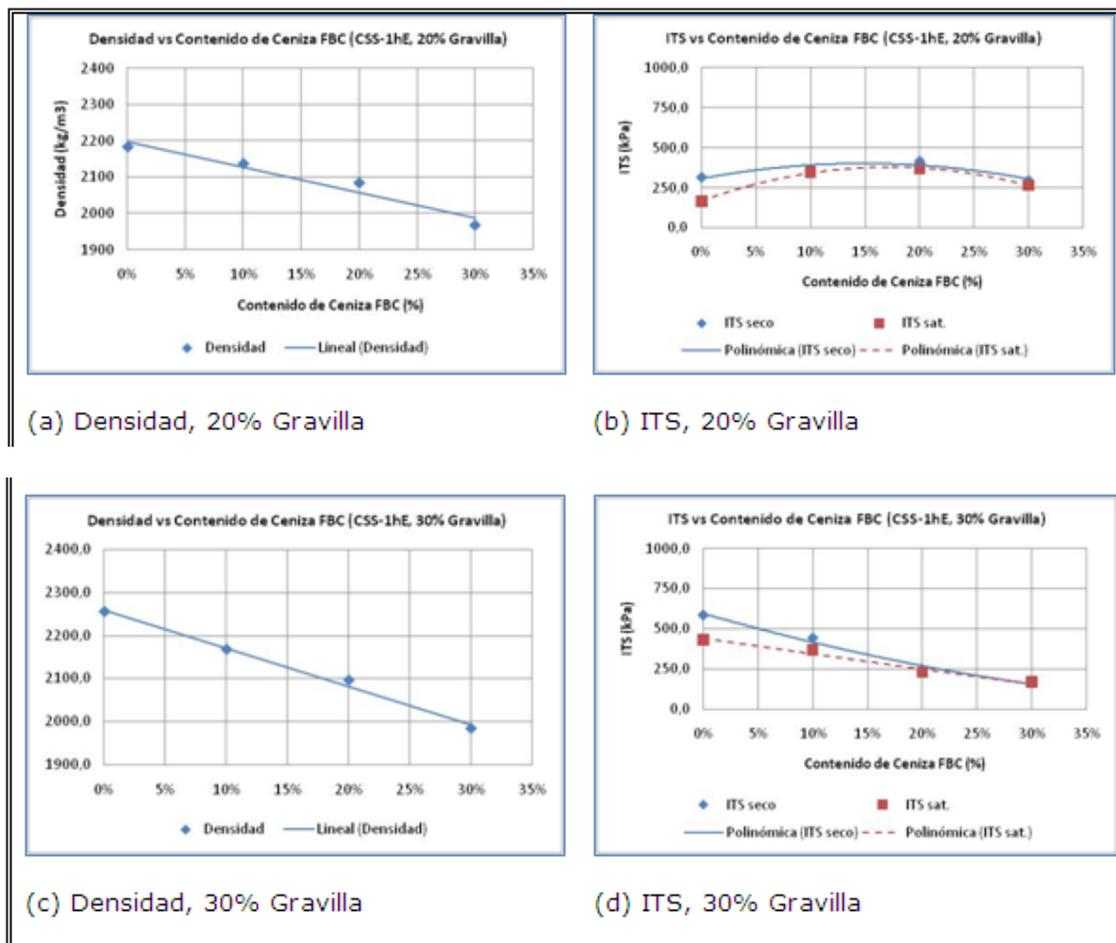
Luego, se realizó el proceso de diseño de mezcla para 30% de gravilla y distintos contenidos de ceniza FBC que se muestran en la Tabla 3-8, para los dos tipos de emulsiones utilizadas en la investigación.

Tabla 4-8. Composición de estructura mineral de la mezcla propuesta

	Integral ½"	Gravilla ¾"	Ceniza FBC
Propuesta 1	70%	30%	0%
Propuesta 2	60%	30%	10%
Propuesta 3	50%	30%	20%
Propuesta 4	40%	30%	30%

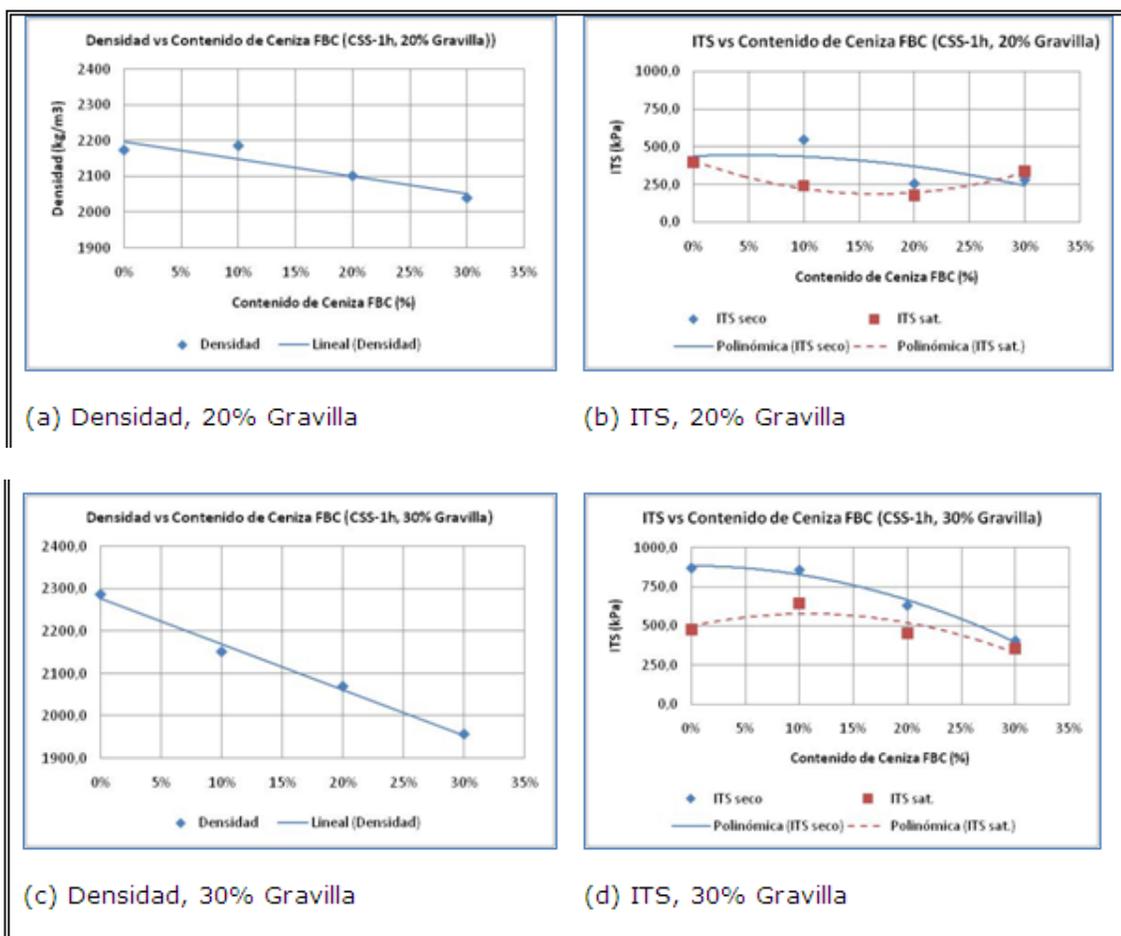
En la Figura 4-7 se muestran los resultados de densidad e ITS del uso de la emulsión CSS-1hE para los diferentes contenidos de ceniza y la comparación entre los contenidos de gravilla. El valor máximo con un 30% de gravilla es superior que el diseño inicial, sin embargo no se presenta una tendencia que demuestre un beneficio en el uso de la ceniza FBC (Figura 4-7, d).

Figura 4-7. Gráficos de emulsión CSS-1hE, propiedad vs contenido de ceniza FBC según granulometría



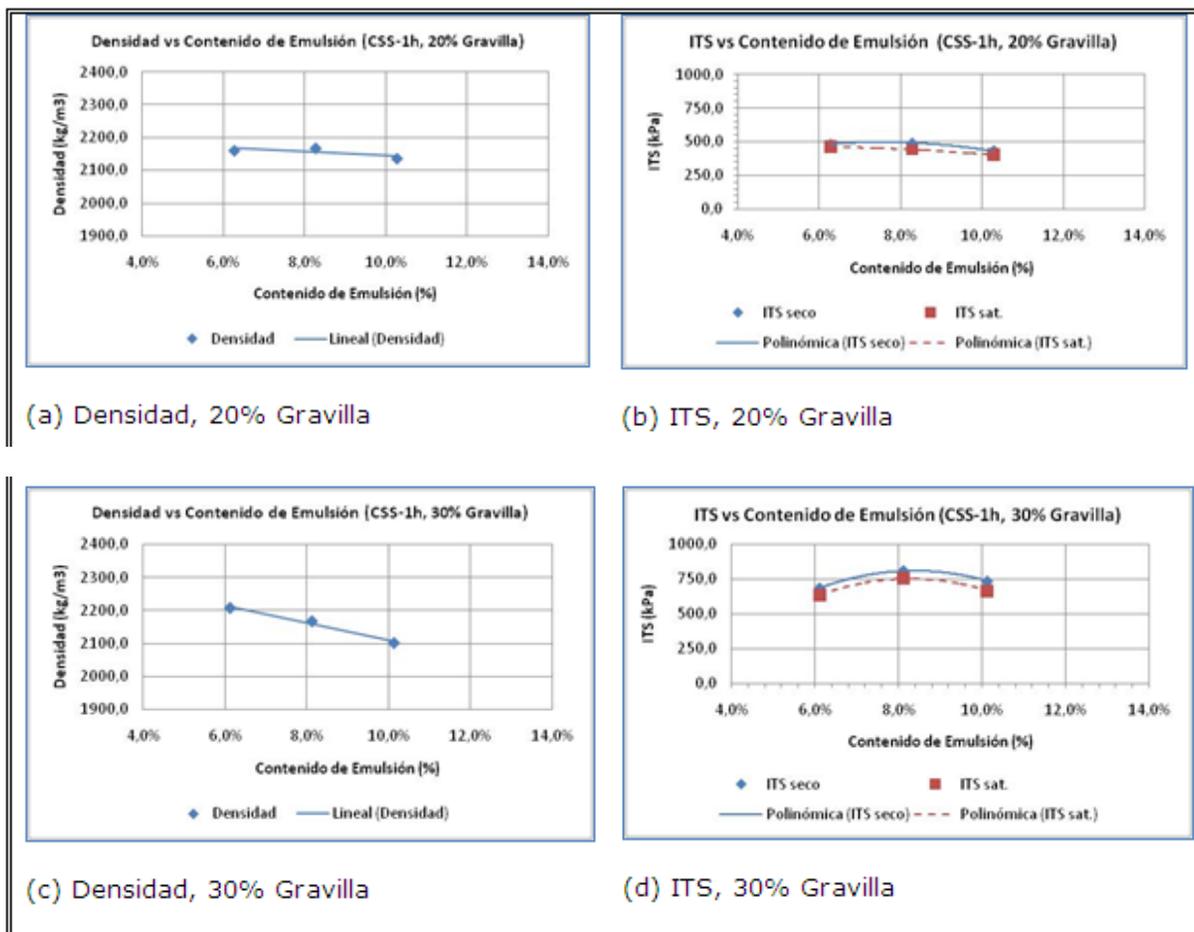
En la Figura 4-8 se muestran los resultados densidad e ITS del uso de la emulsión CSS-1h para los diferentes contenidos de ceniza y la comparación entre los contenidos de gravilla. El valor máximo con un 30% de gravilla se estima con un contenido de ceniza FBC del 11%, a partir de este valor se procede con el diseño de mezcla. En la Figura 4-9 se observa que el contenido de emulsión de 8,4% maximiza la resistencia mecánica de la mezcla entregando valores mayores en un 50% con respecto a la mezcla con 20% de gravilla.

Figura 4-8. Gráficos de emulsión CSS-1h, propiedad vs contenido de ceniza FBC según granulometría



El cambio en la composición granulométrica de la mezcla produjo un aumento en los valores de la resistencia mecánica de la mezcla, pero no significó un aumento significativo en el valor de la densidad.

Figura 4-9. Gráficos de emulsión CSS-1h, propiedad vs contenido de emulsión según granulometría



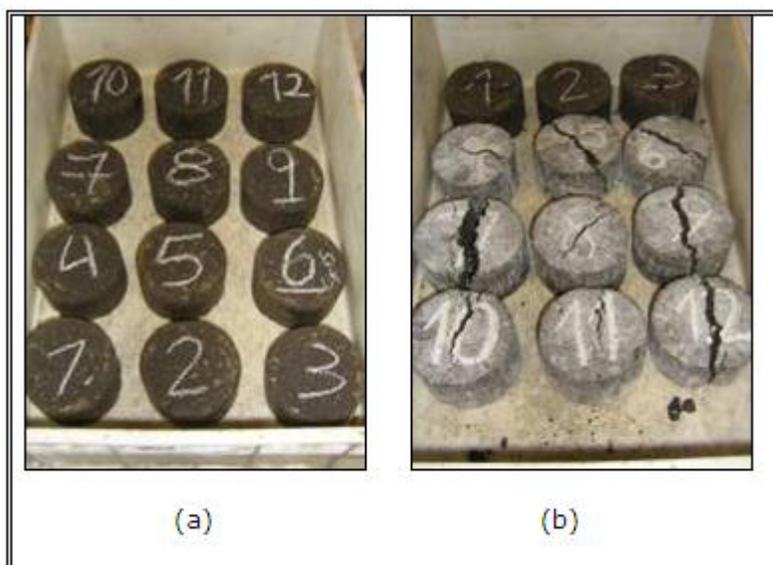
Análisis del proceso de curado

Para evaluar diferentes condiciones y tiempos de curado, como horno de aire o baño de agua, temperatura y cantidad de horas, se evaluó la resistencia a la tracción indirecta (ITS) de un set de probetas fabricadas con la dosificación óptima (Figura 4-10). Las condiciones de ensayo y resultados obtenidos se presentan en la Tabla 4-9, la gráfica de estos resultados se aprecia en la Figura 4-11.

Tabla 4-9. Resultados de evaluación de la evolución de resistencia

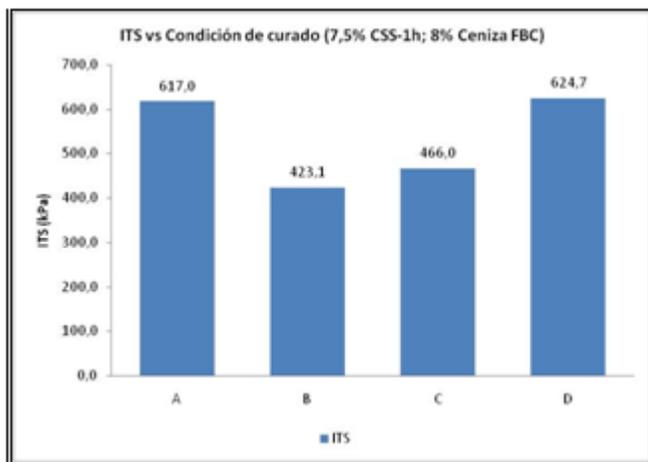
Condición de curado	Densidad promedio (kg/m ³)	ITS (kPa)
A: 72 hrs. a 40°C en horno	2121,4	617,0
B: 72 hrs. a 40°C en horno + 72 hrs. a 25°C en baño de agua	2142,3	423,1
C: 72 hrs. a 40°C en horno + 168 hrs. a 25°C en baño de agua	2129,4	466,0
D: 72 hrs. a 40°C en horno + 168 hrs. a 25°C en baño de agua + 24 hrs. a 40°C en horno	2135,2	627,5

Figura 4-10. Prueba de evaluación de curado (a) Probetas después del desmolde, (b) Probetas después del periodo de curado



Los resultados de ITS de las probetas ensayadas en estado seco (condición A y D) presentan una leve diferencia. En cambio, los resultados en estado saturado (condición B y C) presentan una reducción en el valor ITS en comparación con el ensayo en estado seco, pero no una diferencia mayor entre ellos. Estos resultados indican que el agua provoca una reducción en la resistencia (aproximadamente 30%) debido a la penetración en la mezcla y la lubricación de las partículas.

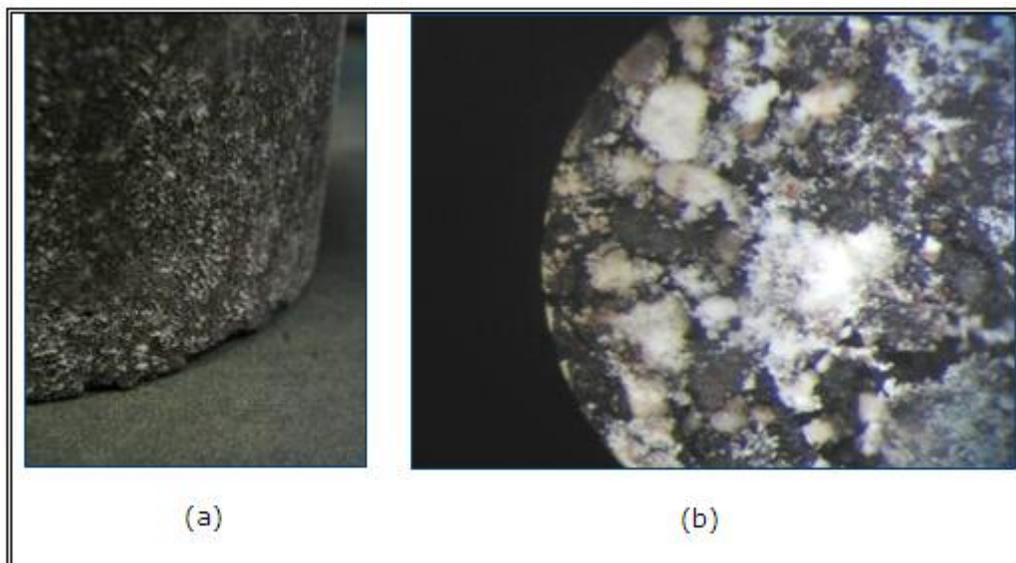
Figura 4-11. Resultados de resistencia ITS en prueba de curado



Análisis de la reacción química

Posterior al curado de las probetas se apreció una tonalidad diferente en la superficie de éstas. Se analizó fotográficamente (Figura 4-12) la superficie para encontrar la causa de este efecto.

Figura 4-12. (a) Probeta posterior al curado; (b) Acercamiento al microscopio de superficie de probeta



Preliminarmente y basado en la composición química de las cenizas FBC se plantea que este efecto se debe a la formación de cristales durante la saturación de las probetas, pues en este periodo se solubilizan las sales presentes en la mezcla, que

son aportadas por las cenizas. Esta reacción genera la expansión de probetas con altos contenidos de ceniza FBC, como se puede apreciar en la Figura 4-13.

Figura 4-13. Probetas expandidas posterior a curado



Esta reacción química debe ser estudiada con mayor detalle, en futuras investigaciones para poder controlar su efecto y de esta manera evitar que afecte el comportamiento mecánico de las mezclas. En un principio se plantean como medidas de control realizar un tratamiento previo de las cenizas para reducir su contenido de sulfatos, o restringir el contenido máximo de ceniza a agregar.

La variabilidad presentada en los resultados puede deberse a diferentes causas. Existen dos tipos de variabilidad que afectarán la investigación. Por un lado está la variabilidad intrínseca, dentro de las cuales la principal corresponde a la variabilidad de los materiales en sus propiedades, produciendo diferentes resultados para un mismo material. Por otro lado se encuentra la variabilidad externa que corresponde a factores que son controlables como las condiciones ambientales de laboratorio, la experiencia de los operarios, estrictos procedimientos de laboratorio, equipos, entre otros.

Aspectos referidos a la resistencia mecánica

En los resultados obtenidos de la variación del contenido de ceniza FBC y de contenido de emulsión no se aprecia una marcada tendencia de los resultados mecánicos en función de éstas variables.

5. Conclusiones y Recomendaciones

5.1 Conclusiones

Como principal conclusión de la presente investigación podemos afirmar que el uso de ceniza FBC en mezclas asfálticas en frío con emulsiones genera un aumento en las propiedades mecánicas de compresión y tracción indirecta de las mezclas. La adición de ceniza FBC además implica una reducción en la densidad de la mezcla.

Existen métodos de compactación que entregan energía suficiente para la densificación de las mezclas asfálticas en frío con emulsiones y ceniza FBC, en especial para la compactación de adofaltos que se realizó en la presente investigación, lo que permite validar su fabricación.

De un análisis granulométrico compuesto por dos metodologías, método del *Asphalt Institute* y método de Fuller, se obtuvieron mejores resultados mecánicos de la mezcla y valores de densidad levemente mayores, en comparación con los resultados asociados a la primera metodología utilizada de manera exclusiva.

La emulsión modificada no presentó concretas ventajas frente a la emulsión normal, inclusive se observó cierta dificultad en la compatibilidad de la mezcla para contenidos de ceniza FBC mayores.

Como resultado de la investigación se propone un procedimiento de laboratorio que permita diseñar una mezcla asfáltica en frío con emulsiones y ceniza FBC, priorizando criterios de resistencia y contenido de las materias primas. El procedimiento recomendado corresponde a una recopilación de los métodos propuestos por el *Asphalt Institute* y el manual GEMS, complementado con un estudio realizado por Ebels.

Los resultados del diseño de mezcla no marcan una clara tendencia como lo hacen las tradicionales curvas del diseño de mezclas según el método Marshall. Tampoco se observaron las mismas tendencias entre los tipos de emulsiones utilizados.

Los resultados mecánicos obtenidos permiten predecir inicialmente como aplicación de los adofaltos en pavimentos peatonales y/o arquitectónicos, donde no estén sometidos a altas cargas. Con el fin de ampliar las aplicaciones de los adofaltos se deben evaluar una serie de consideraciones que permitan mejorar su resistencia mecánica, entre las cuales: granulometría agregados, condiciones de curado, evaluación del modulo resiliente, utilización de otros aditivos.

5.2 Recomendaciones y Futuras Investigaciones

Para alcanzar resultados confiables es necesario cumplir estrictamente los procedimientos de laboratorio asociados a la tecnología a utilizar.

En nuestro país se produce una importante cantidad de ceniza FBC diariamente, que como se sabe contiene cal. En otros países o lugares es válido evaluar otros aditivos como pueden ser el cemento portland, cal u otro material, permitiendo aprovechar las ventajas que presenta esta investigación. Esto es posible de realizar con la metodología propuesta.

Desde el punto de vista químico, se presentó una reacción que se llamó secundaria y que no afectó el comportamiento de la mezcla. Sin embargo en futuras investigaciones es posible evaluar las reacciones químicas que se presenten entre los emulsificantes, los componentes de la ceniza FBC y los agregados pétreos, pues este aspecto puede convertirse en una posible mejora del comportamiento de las mezclas.

Una propiedad representativa de los materiales compuestos, como el caso de las mezclas asfálticas es el modulo resiliente, que permite estimar la aporte estructural que los materiales entregarán a una estructura de pavimentos. Se recomienda incluir en los criterios de diseño a esta propiedad como otra característica del comportamiento mecánico de los adofaltos.

Con el fin de mejorar el comportamiento de un pavimento de adofaltos se deberán construir tramos de pruebas para validar su aplicación. Paralelo a esto, es posible estudiar métodos constructivos innovadores que permitan mejorar el comportamiento del pavimento, o reducir costos, o mejorar procesos y rendimientos.

Alcanzando las propiedades adecuadas de las mezclas para su utilización en un amplio tipo de pavimentos se debe estudiar y diseñar un procedimiento de fabricación de adofaltos de manera industrial que se componga de procesos simples pero cumpliendo los requisitos de fabricación de éstos.

Bibliografía

- American Association Of State Highway And Transportation Officials. (2001). Standard specifications for transportation materials and methods of sampling and testing. part 2 - tests (21st ed.). Washington, D.C.: AASHTO.
- Asphalt Insititute. A basic asphalt emulsion manual, MS-19 (3° ed.)
- Asphalt Insititute. (1990). Asphalt cold mix manual MS-14 (3° ed.)

- Barra, R. (2005). Características toxicológicas e implicancias ambientales del uso de cenizas de coke de petróleo. In G. Vidal (Ed.), *Gestión integral de las cenizas generadas por la utilización del coke petróleo*. (pp. 11-18). Chile.: Centro de Ciencias Ambientales EULA.
- Behr-Andres, C.B., Hutzler, N.J. (1994). Characterization and use of fluidized bed combustion coal ash. *ASCE Journal of Environmental Engineering.*, 120(6), 1488-1506.
- Clark, A. J. (1981). Further investigations into the load - spreading of concrete block paving. technical report.
- Deschamps, R.J., Tishmack, J.K. (1999). Use of fluized bed combustion ash in structural fill: Chemical, mineralogical and engineering properties.
- Ebels, L. J. (1997). Bitumen stabilized paving blocks. Delft University of Technology).
- Fernández, J. A. (1983). In Editores Técnicos Asociados (Ed.), *Pavimentos bituminosos en frío*. Barcelona, España.
- Harrington, D., Thomas, Z., White, J.D. (2005). Fly ash soil stabilization for non-uniform subgrade soils, volume I: Engineering properties and construction guidelines.
- Instituto Chileno Del Cemento Y Del Hormigón. (1991). *Pavimentos de adoquines. manual de diseño y construcción*. Chile.
- Jenkins, K. (1997). Bitumen emulsion stabilized paving block. development of labour intensive manufacture and road construction techniques. World Congress Emulsion.
- Jenkins, K. J. (1999). Mix design considerations for cold and half-warm bituminous mixes with emphasis on foamed bitumen. Unpublished University of Stellenbosch.
- Jenkins, K. J., Van De Ven, M.F.C., & Bredenhann, S. J. (1999). Possibilities for cold mix bituminous paving blocks. 7th Conference on Asphalt Pavements for Southern Africa.
- Knapton, J. (1976). The design of concrete block roads. No. Technical Report 42.515). UK: Cement and Concrete Association.

- Martínez, P. (2003). Desarrollo de áridos livianos de cenizas volantes para hormigones estructurales. Disertación doctoral no publicada, Pontificia Universidad Católica de Chile.
- Meegoda, J. N. (1999, 1999). Stabilization/solidification of petroleum-contaminated soils with asphalt emulsions. *Practice Periodical of Hazardous, Toxic, and Radioactive Waste Management*, 3, 46-55.
- Ministerio De Obras Publicas. (2000). Manual de carreteras volumen 8. Chile.
- Ministerio De Salud. (2004). D.S.N°594/99 reglamento sobre condiciones sanitarias y ambientales básicas en los lugares de trabajo. Chile: MINSAL.
- Ministerio De Vivienda Y Urbanismo (1995). Programa de Pavimentación Participativa.
- Miura, Y., Takura, M., Tsuda, T. (1984). Structural of concrete block pavements by CBR method and its evaluation. *Concrete Block Paving. Second International Conference, Delft*.
- Naik, T. R., Kraus, R. N., Chun, Y., & Botha, F. D. (2005, Diciembre 1). Cast-concrete products made with FBC ash and wet-collected coal ash. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 17, 659-663.
- Panda, B. C., & Ghosh, A. K. (2002, Marzo 1). Structural behavior of concrete BLock paving. I: Sand in bed and joints. *Journal of Transportation Engineering*, 128, 123-129.
- Panda, B. C., & Ghosh, A. K. (2002, Marzo 1). Structural behavior of concrete BLock paving. II: Concrete block. *Journal of Transportation Engineering*, 128, 130-135.
- Ryntathiang, T. L., Mazumdar, M., & Pandey, B. B. (2005, Septiembre 1). Structural behavior of cast in situ concrete block pavement. *Journal of Transportation Engineering*, 131, 662-668.
- Southern Africa Bitumen Association*. (1993). In SABITA (Ed.), *GEMS - the design and use of granular emulsion mixes*. manual 14.
- Shackel, B. (1984). The analysis and design of concrete block paving subject to road traffic and heavy industrial loadings. *Concrete Block Paving. Second International Conference, Delft*.

Smit, A., Van De Ven, M., & Fletcher, E. (1997). Towards the use of semi-circular bending test as a performance related specification test. Proceedings SATC Conference on Transport Infrastructure II. 3A (Paper N°6).

Subdirección De Desarrollo, Departamento De Gestión Vial, MOP. (2005). Red vial nacional, dimensionamiento y características (Informativo)

Thenoux, G., & Carrillo, H. (2000). Guía para la selección y construcción de sellos asfálticos de conservación. Chile.

Thenoux, G., González, A., & Dowling, R. (2007). Energy consumption comparison for different asphalt pavements rehabilitation techniques used in chile. Resources, Conservation and Recycling., 49(4), 325-339.

Vargas, M. A. (2006). Estudio para la utilización de cenizas FBC en la estabilización de suelos para caminos. Pontificia Universidad Católica de Chile).

Anexos

Anexo A: imágenes de laboratorio

En esta sección se presentará el registro fotográfico de las distintas etapas desarrolladas en laboratorio para alcanzar los objetivos de la investigación.

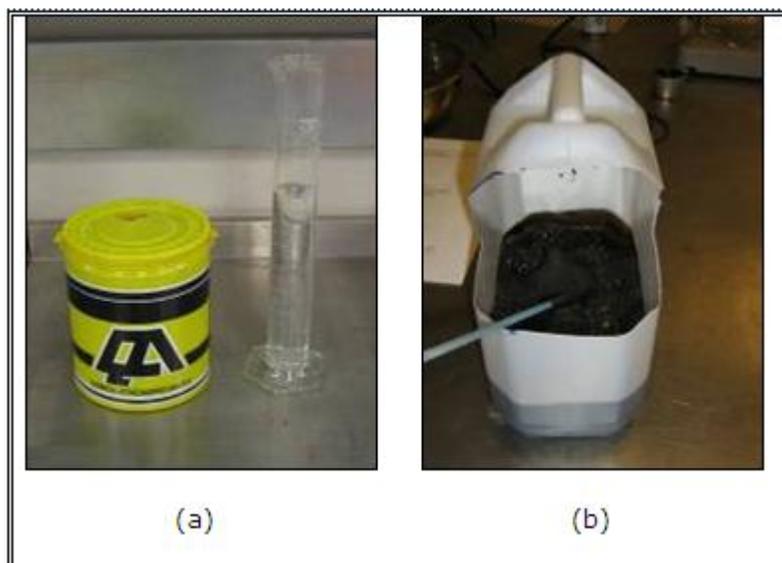
A.1 Materiales

Las siguientes imágenes presentan los materiales utilizados en el estudio: ceniza FBC, agregados pétreos y emulsión asfáltica.

Figura A-1. (a) Muestra de ceniza FBC, (b) Muestra de agregados pétreos



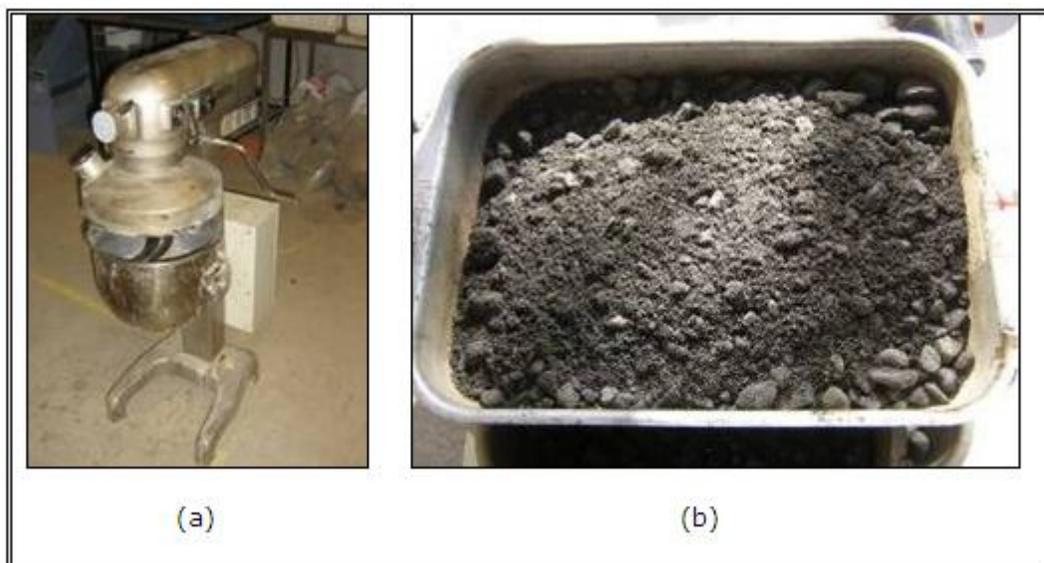
Figura A-2. (a) Emulsión asfáltica y agua, (b) emulsión asfáltica diluida en agua



A.2 Mezclado

Para realizar el mezclado de la mezcla se utilizó el equipo Hobart con una capacidad de 20 lt. Para homogeneizar la mezcla se utilizó como accesorio un batidor helicoidal.

Figura A-3. (a) Mezcladora Hobart, (b) Muestra de mezcla asfáltica en frío



A.3 Compactación

En el desarrollo de las actividades laboratorio se utilizan 3 tipos de compactación, con sus respectivos moldes y probetas: para probetas de diámetro 100 mm se utiliza el método Marshall (Figura A-5 (a), A-6), para probetas de diámetro 150 mm. se utiliza el SGC (Figura A-5 (b), A-7) y para bloques la metodología descrita en el capítulo 3, Procedimiento de laboratorio (Figura A-8, A-9 y A-10).

Figura A-4. Muestras de mezcla para fabricación de probetas Marshall



Figura A-5. (a) Compactador Marshall, (b) Compactador giratorio (SGC)

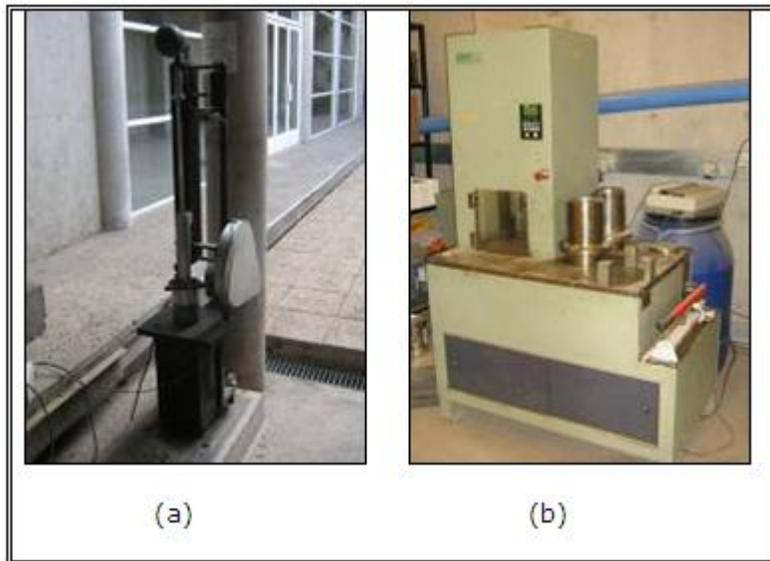


Figura A-6. (a) Probetas Marshall en molde, (b) Probetas Marshall desmoldadas.



Figura A-7. (a) Molde compactador giratorio, (b) Probeta de compactador giratorio.



Figura A-8. (a) Moldes adofaltos, (b) Moldes y placa compactadora.



Figura A-9. Equipo para la compactación de adofaltos.



Figura A-10. (a) Adofaltos en molde, (b) Adofaltos desmoldados.



A.4 Curado

El curado en horno de las probetas se hizo a 40°C en el equipo que se muestra en la Figura A-11 (a). El curado en agua de las probetas se hizo a 25°C en el equipo que se muestra en la Figura A-11 (b).

Figura A-11. (a) Horno para curado, (b) Baño de agua para curado.

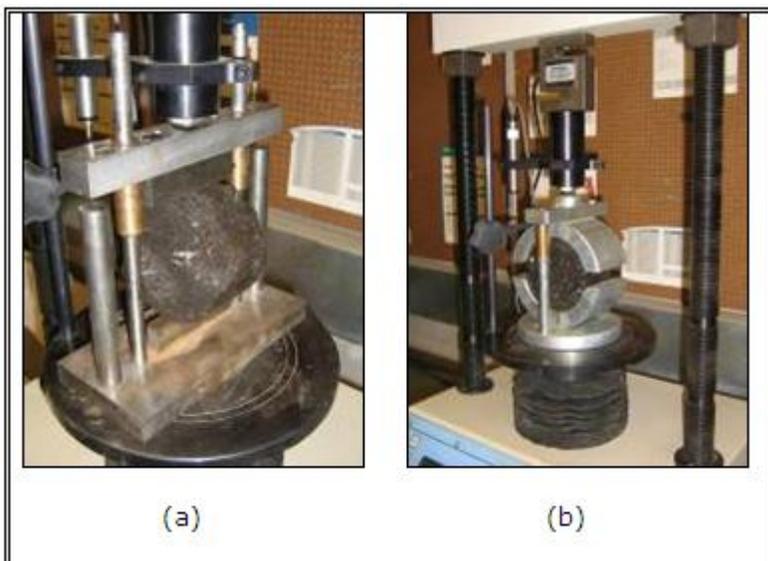


A.5 Ensayos

Las siguientes imágenes presentan los ensayos realizados para evaluar las mezclas.

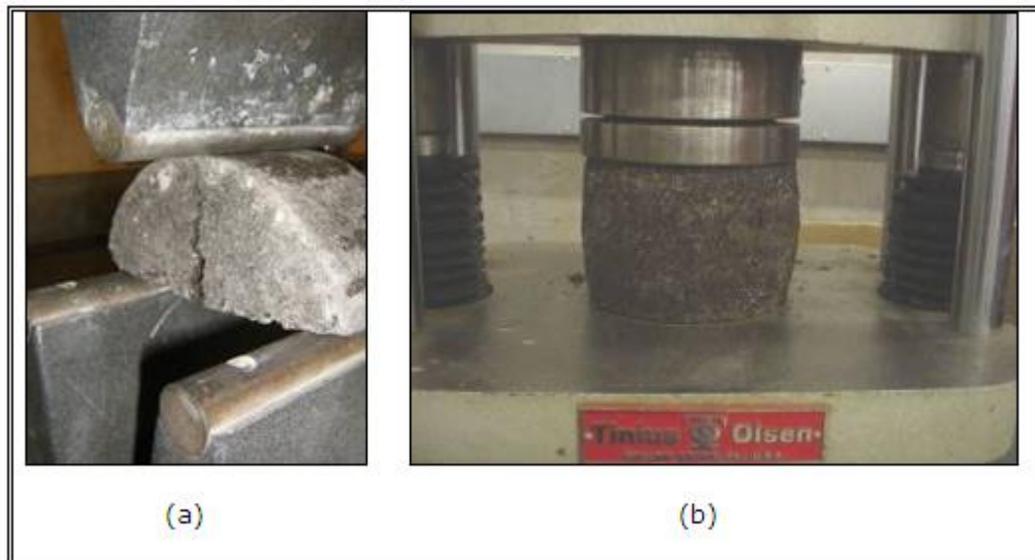
Las probetas de diámetro 100 mm. son sometidas a ensayos ITS (Figura A-12 (a)) y Estabilidad (Figura A-12 (b)).

Figura A-12. (a) Ensayo ITS, (b) Estabilidad Marshall.



Las probetas de diámetro 150 mm. son sometidas a ensayos SCB (Figura A-13 (a)) y UCS (Figura A-13 (b)).

Figura A-13. (a) Ensayo SCB, (b) Ensayo UCS.



Los bloques son sometidas a ensayos 3PB (Figura A-14 (a)) y UCS (Figura A-14 (b)).

Figura A-14. (a) Ensayo 3PB, (b) Ensayo UCS.



Anexo B: Resultado de laboratorio

En este anexo se presentan los resultados obtenidos en laboratorio en las distintas etapas de la investigación y que no han sido incluidos en el cuerpo de esta tesis.

B.1 Resultado Etapa 1 – Primera parte

Los resultados que se muestran a continuación corresponden a las mezclas que se hicieron para analizar el contenido de ceniza FBC. Se presentan los resultados de ensayos ITS y Estabilidad para ambos tipos de emulsión utilizados, CSS-1h (Figura B-1) y CSS-1hE (Figura B-2), en función de la densidad de la mezcla.

Figura B-1. Resultados ITS y Estabilidad para CSS-1h, primera parte.

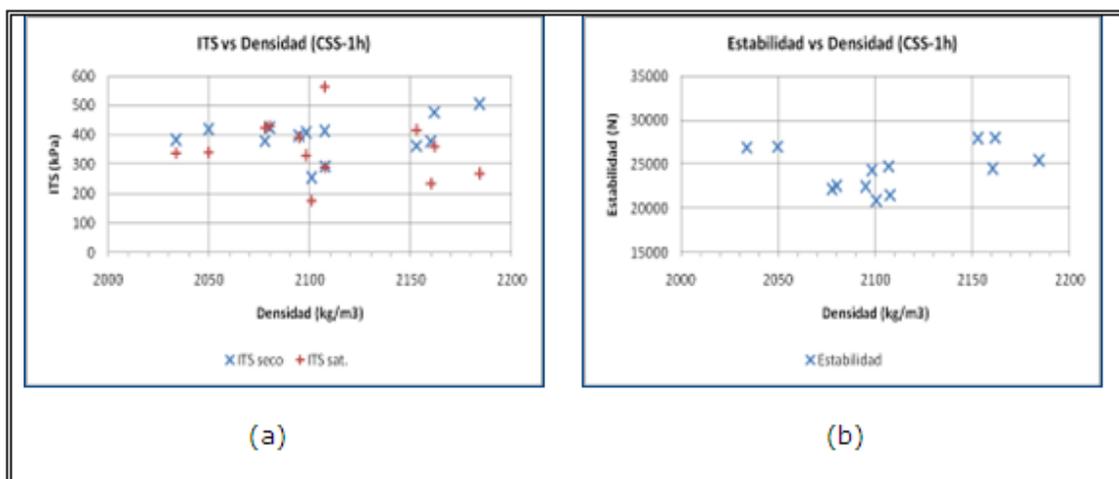
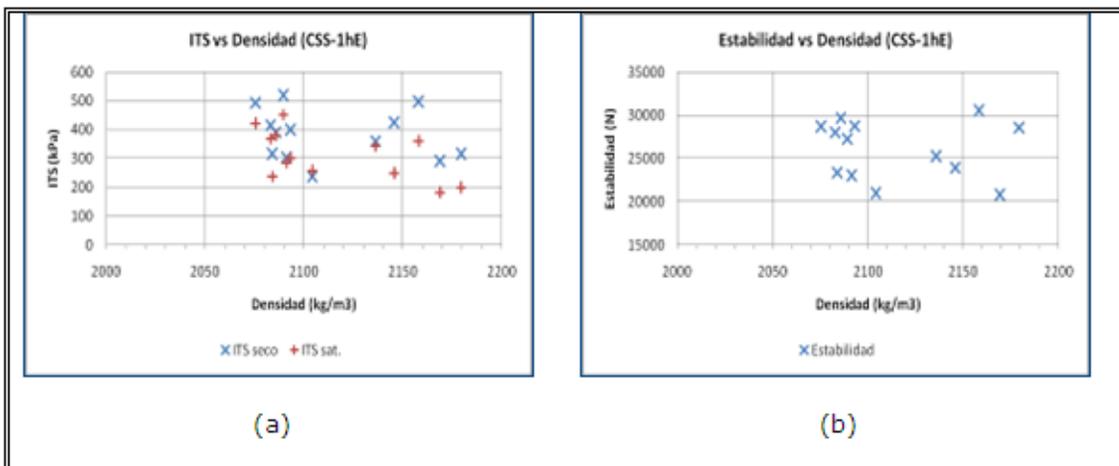


Figura B-2. Resultados ITS y Estabilidad para CSS-1hE, primera parte.



B.2 Resultado Etapa 1 – Segunda parte

Los resultados que se muestran a continuación corresponden a las mezclas que se hicieron para analizar el contenido y tipo de emulsión. Se presentan los resultados de ensayos ITS y Estabilidad para ambos tipos de emulsión utilizados, CSS-1h (Figura B-3) y CSS-1hE (Figura B-4), en función de la densidad de la mezcla.

Figura B-3. Resultados ITS y Estabilidad para CSS-1h, segunda parte

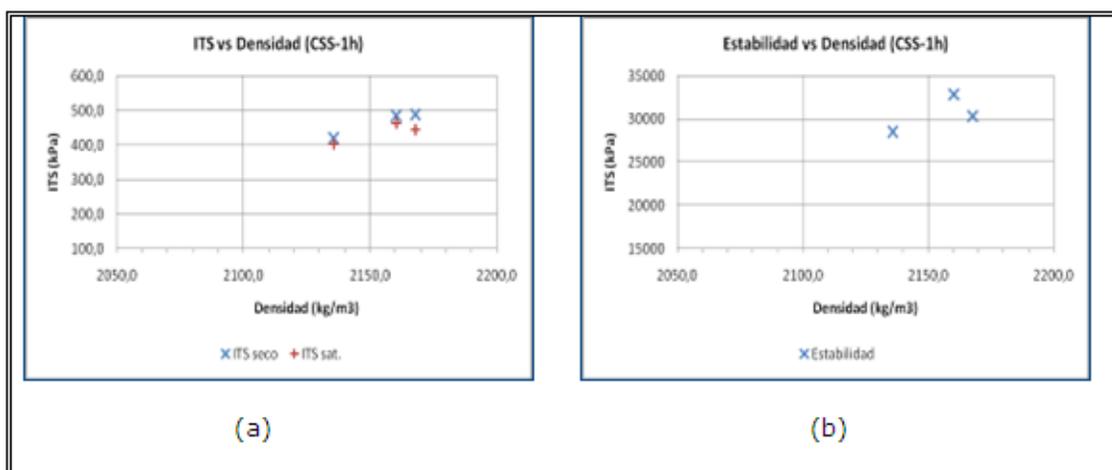


Figura B-4. Resultados ITS y Estabilidad para CSS-1hE, segunda parte.

