



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CHILE
ESCUELA DE INGENIERÍA

**ESTUDIO DEL DISEÑO ESTRUCTURAL
Y CONSTRUCTIVO DE PAVIMENTOS
ARTICULADOS EN BASE A BLOQUES
DE ASFALTO**

VICTOR FABIAN ARMIJOS CUENCA

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

Profesor Supervisor:
GUILLERMO THENOUX ZEBALLOS

Santiago de Chile, Marzo, 2011

© 2011, Victor Fabian Armijos Cuenca



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CHILE
ESCUELA DE INGENIERÍA

ESTUDIO DEL DISEÑO ESTRUCTURAL Y CONSTRUCTIVO DE PAVIMENTOS ARTICULADOS EN BASE A BLOQUES DE ASFALTO

VICTOR FABIAN ARMIJOS CUENCA

Tesis presentada a la Comisión integrada por los profesores:

GUILLERMO THENOUX ZEBALLOS

SERGIO EDUARDO VERA ARAYA

ALVARO GONZALEZ VACCAREZZA

JOSÉ MIGUEL CEMBRANO

Para completar las exigencias del grado de
Magister en Ciencias de la Ingeniería

Santiago de Chile, Marzo, 2011

A toda mi familia, especialmente a mi esposa Diana y mi hijo Emilio; a mis Padres Martha y Victor, y a través de ellos a Dios, por estar a mi lado en todas las batallas que he tenido en mi vida. (*Dedicatoria*)

AGRADECIMIENTOS

A la Pontificia Universidad Católica de Chile, específicamente al Departamento de Ingeniería y Gestión de la Construcción por haberme brindado los conocimientos necesarios para mi posterior desarrollo profesional.

Al gobierno de Ecuador que a través de la Secretaria Nacional de Educación Superior, Ciencia, Tecnología e Innovación “SENESCYT”; me brindaron el apoyo económico para obtener mi programa de estudios de postgrado en Chile.

Al Señor Guillermo Thenoux Zeballos Ph.D., por haberme compartido sus conocimientos, brindado su confianza y apoyo incondicional para el desarrollo de esta investigación durante toda la etapa de mis estudios.

A las personas que integran el Centro de Ingeniería e Investigación Vial “CIIV”, por haberme permitido participar en diferentes proyectos que han llevado a cabo durante mi período de estudios, y principalmente por su apoyo y confianza en la formación tanto personal como profesional dentro de la universidad.

Al personal administrativo del Departamento de Ingeniería y Gestión de la Construcción de la PUC, por haberme brindado su amistad y cariño durante todos los días que permanecí en las distintas salas de este departamento.

A mis amigos y compañeros del departamento, por haber participado o compartido la formación académica tanto fuera como dentro de las aulas de esta universidad.

A todas las personas e instituciones que de una y otra manera colaboraron en el desarrollo y culminación de esta investigación.

INDICE GENERAL

	Pág.
DEDICATORIA.....	ii
AGRADECIMIENTOS	iii
INDICE DE TABLAS	vii
INDICE DE FIGURAS.....	ix
RESUMEN.....	xi
ABSTRACT	xii
1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Antecedentes Generales	1
1.2 Planteamiento del Problema.....	2
1.3 Hipótesis y Objetivos del Proyecto	3
1.3.1 Objetivo General y Específicos	3
1.3.2 Hipótesis	3
1.4 Metodología del Proyecto	4
2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	6
2.1. Adoquines o Adocretos	6
2.2. Pavimento Articulado.....	7
2.2.1. Introducción	7
2.2.2. Subrasante	10
2.2.3. Base y Sub-base Granular.....	11
2.2.4. Colchón de Arena	12
2.2.5. Juntas de Arena.....	13
2.2.6. Bloques de Concreto.....	14
2.2.7. Borde de Confinamiento.....	15
2.2.8. Consideraciones de Drenaje.....	15
2.3. Ventajas de los Pavimentos Articulado.....	16
2.4. Aspectos Constructivos	18
2.4.1. Construcción	18

2.4.2. Control de Calidad	20
2.5. Principales Aplicaciones sobre Distintas Capas de Fundación	21
2.5.1. Pavimento Articulado sobre Base Tratada con Cemento.	21
2.5.2. Pavimento Articulado Adheridos Sobre Base de Concreto	22
2.5.3. Bloques de Concreto sobre Pavimentos Existentes	24
2.6. Mezclas Asfálticas con Emulsiones y Cenizas	27
3. DISEÑO DE MEZCLA	29
3.1. Introducción	29
3.2. Materiales	29
3.2.1 Agregados	29
3.2.2 Ceniza FBC (Combustión de Lecho Fluido)	30
3.2.3 Emulsión Asfáltica.....	31
3.3. Criterios de Diseño	31
3.4. Compactación	34
3.5. Dosificación	35
3.6. Propiedades	36
4. DISEÑO ESTRUCTURAL DE PAVIMENTO	39
4.1. Introducción	39
4.2. Pavimento Flexible.....	39
4.3. Pavimento Articulado.....	43
4.3.1. Bloque Asfáltico	52
4.3.2. Base/Sub-base Granular.....	54
4.3.3. Subrasante	55
5. PRUEBAS DE TERRENO Y LABORATORIO	64
5.1. Construcción de Tramo de Prueba	64
5.2. Etapa Experimental (Ensayos de Laboratorio y Terreno)	66
5.2.1. Capas Granulares	67
5.2.2. Elaboración de Mezcla Asfáltica en Terreno.....	72
5.2.3. Pavimento Asfáltico.....	77
5.2.4. Bloque Asfáltico (Adofalto)	82
6. ANÁLISIS DE RESULTADOS	86
6.1. Propiedades Mecánicas de la Mezcla Asfáltica.	86

6.2. Propiedades Mecánicas del Pavimento Asfáltico.....	91
6.3. Propiedades Mecánicas del Bloque Asfáltico (Adofalto)	95
7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	99
7.1. Conclusiones	99
7.2. Recomendaciones.....	101
BIBLIOGRAFIA.....	104
A N E X O S.....	107
ANEXO A: ENSAYOS DE LABORATORIO PARA DISEÑO Y FABRICACIÓN DE MEZCLAS ASFÁLTICAS	108
ANEXO B: PROGRAMAS COMPUTACIONALES UTILIZADOS EN EL DISEÑO ESTRUCTURAL DE PAVIMENTO	120
ANEXO C: ENSAYOS EN TERRENO SOBRE TRAMO DE PRUEBA	127
ANEXO D: REGISTRO FOTOGRÁFICO DURANTE LAS DIFERENTES ETAPAS DE LA INVESTIGACIÓN.....	150
ANEXO E: PROCEDIMIENTO DE ENSAYO PARA DETERMINAR EL MÓDULO DE RIGIDEZ EN PROBETAS CILÍNDRICAS DE VARIOS DIÁMETROS Y ESPESORES.	160

INDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 2-1:	Requerimientos Granulométricos para Arena utilizada en Colchón de Arena. 12
Tabla 2-2:	Requerimientos Granulométricos para la Arena de Juntas..... 13
Tabla 2-3:	Requerimientos Granulométricos (modificado) para Colchón de Arena. 23
Tabla 2-4:	Requisitos de Granulometría para determinar Dureza en Arenas. 25
Tabla 3-1:	Granulometría de Agregados..... 30
Tabla 3-2:	Análisis Granulométrico de Cenizas FBC..... 30
Tabla 3-3:	Propiedades de Emulsión Asfáltica Tipo CSS-1h. 31
Tabla 3-4:	Granulometría para Combinación 35/35/20/10 (Gravilla/Polvo piedra Maipú/Polvo piedra Antuco/ceniza FBC). 33
Tabla 3-5:	Dosificación de Mezcla de Emulsión Asfáltica para 6 Probetas Marshall.. 36
Tabla 4-1:	Resultados de Diseño Estructural de Pavimento Flexible Utilizando Método AASHTO. 40
Tabla 4-2:	Resultados de Diseño Estructural de Pavimento Asfáltico Usando Método Mecanicista (programa mePADS)..... 42
Tabla 4-3:	Resultados de Módulo Utilizando Deflectometría de Impacto sobre Pavimento Articulado de Bloques de Asfalto mediante Análisis de Retrocálculo con Programa EVERCALC. 48
Tabla 4-4:	Resultados de Diseño Estructural de Pavimento Articulado de Bloques de Asfalto Utilizando Programa mePADS..... 49
Tabla 4-5:	CBR y Espesores Mínimos para Capas Granulares de Base y Sub-base. 54
Tabla 4-6:	Tensiones Admisibles del Suelo en Función de CBR%..... 55
Tabla 4-7:	Tensiones Existentes en Subrasante en Función de CBR, Bajo Estructura de Pavimento con 20 cm de Base. 57
Tabla 4-8:	Tensiones Existentes en Subrasante en Función de CBR, bajo una Estructura de Pavimento igual a 20 cm de Base, considerando Shell para Módulo de Base..... 57
Tabla 4-9:	Tensiones Existentes en Subrasante en Función de CBR bajo una Estructura de Pavimento de 15 cm de Base y 15 cm de Subbase..... 58
Tabla 4-10:	Tensiones Existentes en Subrasante en Función de CBR, bajo Pavimento de 15 cm de Base y 15 cm de Subbase, considerando Shell para Cálculo de Módulo..... 58
Tabla 4-11:	Tensiones Existentes en Subrasante en Función de CBR%, bajo Pavimento 30 cm de Base..... 59
Tabla 4-12:	Tensiones Existentes en Subrasante en Función de CBR%, bajo Pavimento 30 cm de Base, considerando Shell para Cálculo de Módulo. 59
Tabla 4-13:	Resultados de Diseño de Pavimento Articulado de Bloques de Concreto por Método AASHTO. 63

Tabla 5-1:	Valores de Coeficiente de Poisson para Diferentes Componentes de Estructura de Pavimento.....	68
Tabla 5-2:	Valores Recomendados de Módulo para Diferentes Capas de Estructura de Pavimento.	68
Tabla 5-3:	Rango de Módulo de Deformación E Dinámico para Diferentes Tipos de Superficie de Pavimento Utilizando el Equipo Prima 100.....	69
Tabla 5-4:	Resultado Obtenido de Un Punto de Ensayo LFWD Utilizando Equipo Prima 100 sobre Subrasante.	70
Tabla 5-5:	Densidad, ITS, Mr en Probetas SUPERPAVE para Mezcla de Emulsión Asfáltica.....	74
Tabla 5-6:	Densidad, ITS, Mr en Probetas Marshall para Mezcla de Emulsión Asfáltica.....	75
Tabla 5-7:	Resultados de Ensayo Deflectometría de Impacto FWD sobre Capa de Bloques de Asfalto.	81
Tabla 6-1:	Número de Giros en Compactador Giratorio SUPERPAVE en Función de Ejes Admisibles para 20 años.....	87

INDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1-1: Diagrama de Flujo sobre Metodología Utilizada para Investigación.	5
Figura 2-1: Clasificación de Aduquines por su Forma. (a) Cuatro Caras Dentadas, (b) Dos Caras Dentadas, (c) Caras Rectas.	6
Figura 2-2: Aparejos de Colocación de Aduquines.....	7
Figura 2-3: Componentes Tradicionales de un Pavimento Articulado de Concreto.	9
Figura 2-4: Límite de Granulometría para Agregados Utilizados en Mezcla de Emulsión Asfáltica, Colchón de Arena y Juntas de Bloques de Concreto.	14
Figura 2-5: Consideraciones de Drenaje en Pavimentos Articulados.	16
Figura 2-6: Sección Transversal de Pavimento Articulado sobre Base Tratada con Cemento.....	22
Figura 2-7: Sección Transversal de Pavimento Articulado sobre Pavimento Existente	27
Figura 3-1: Combinaciones Granulométricas Gravilla; Polvo Roca Maipú; Polvo Roca Antuco; Ceniza FBC; para Diseño de Mezcla de Emulsión Asfáltica.....	32
Figura 3-2: Determinación de % Óptimo de Humedad en Función de la Densidad Seca y Húmeda del Material.....	35
Figura 3-3: Densidad de Mezcla de AE para Distintos % de Emulsión.....	38
Figura 3-4: Resistencia Tracción Indirecta de Mezcla de AE para Distintos % de Emulsión.....	38
Figura 4-1: Sección Transversal Típica de Pavimento Asfáltico para Vías de Bajo Volumen de Tránsito.	41
Figura 4-2: Sección Transversal Propuesta de Pavimento Articulado para Vías de Bajo Volumen de Tránsito.....	44
Figura 4-3: Esquema de Ensayo de Deflectometría de Impacto FWD sobre Estructura de Pavimento.	45
Figura 4-4: Resultado de Deflexión en Ensayo de Deflectometría de Impacto FWD en un Punto sobre Estructura de Pavimento Articulado.	45
Figura 4-5: Tensiones y Deformaciones en Pavimento Asfáltico bajo Cargas de Tráfico.	51
Figura 4-6: Posibles Tensiones y Deformaciones en Pavimento Articulado bajo Condiciones de Carga.....	51
Figura 4-7: Cálculo de Impronta Circular.	53
Figura 4-8: Dimensionamiento del Bloque Asfáltico.....	54
Figura 4-9: Alternativa 1 Pavimento Articulado con Bloques de Asfalto	61
Figura 4-10: Alternativa 2 Pavimento Articulado con Bloques de Asfalto	62
Figura 5-1: Ubicación de Tramo de Prueba en Campus San Joaquín.	64
Figura 5-2: Sección Transversal y Planimetría de Tramo de Prueba.	65
Figura 5-3: Cortado Longitudinal y Transversal sobre Carpeta Asfáltica para Obtención de Bloques de Asfalto.	66

Figura 5-4:	Ensayos de Laboratorio y Terreno sobre Tramo de Prueba.	66
Figura 5-5:	Determinación de Módulo de Deformación Dinámico (E) para Subrasante Utilizando Ensayo de Deflectometría de Impacto Liviano (LFWD).	70
Figura 5-6:	Módulo de Deformación Dinámico (E) para Base Capa 1 Utilizando Ensayo de Deflectometría de Impacto Liviano (LFWD).	71
Figura 5-7:	Módulo de Deformación Dinámico (E) para Base Capa 2 Utilizando Ensayo de Deflectometría de Impacto Liviano (LFWD).	72
Figura 5-8:	Resistencia Tracción Indirecta en Función de Temperatura de Agua Durante Proceso de Curado.	76
Figura 5-9:	Módulo de Rigidez sobre Testigos de Bloques de Asfalto.	77
Figura 5-10:	Variación de Módulo Deformación Dinámico (E) para Carpeta de Asfalto en Caliente y Emulsión Asfáltica.	78
Figura 5-11:	Posición de Ensayo LFWD Sobre Bloques de Emulsión Asfáltica.	79
Figura 5-12:	Módulo de Deformación Dinámico (E) para Capa de Pavimento Articulado de Bloques de Asfalto.	80
Figura 5-13:	Ensayo de Deflectometría de Impacto FWD sobre Pavimento de Bloques de Asfalto.	81
Figura 5-14:	Resistencia a Compresión sobre Testigos de Asfalto de 15x5x5 cm.	82
Figura 5-15:	Resistencia a Flexión de Bloques de Asfalto en Función de Profundidad de Ranura.	83
Figura 5-16:	Resistencia a Flexión en Función de Forma del Bloque Asfáltico.	84
Figura 5-17:	Desgaste Superficial de Bloques de Asfalto en Función de Tipo de Mezcla.	85
Figura 6-1:	Número de Giros vs Densidad de Mezcla en Probetas SUPERPAVE.	86
Figura 6-2:	ITS para Mezclas de Emulsión Asfáltica Elaboradas en Laboratorio, Terreno y sobre Testigos.	88
Figura 6-3:	ITS para Mezclas de Emulsión Asfáltica Ensayadas en Probetas Marshall	89
Figura 6-4:	Módulo Resiliente para Mezclas de Emulsión Asfáltica en Condición Saturada Ensayadas en Probetas Marshall y SUPERPAVE.	90
Figura 6-5:	Módulo de Rigidez en Mezclas de Emulsión Asfáltica Fabricadas en Terreno sobre Probeta y Testigo en Condición Seca.	91
Figura 6-6:	Módulo Deformación Dinámico Mediante Ensayo LFWD para Diferentes Capas Estructurales del Pavimento sobre Tramo de Prueba.	92
Figura 6-7:	Módulo Deformación Dinámico Mediante Ensayo LFWD para Diferentes Tipos de Pavimento (Flexible y Articulado) de Mezcla de Emulsión Asfáltica.	93
Figura 6-8:	Módulo Dinámico y Resiliente de Capas Estructurales de Pavimento Determinadas Mediante Ensayo LFWD y FWD.	95
Figura 6-9:	Punto de Falla a Flexión Bajo Ranura en Superficie del Bloque Asfáltico.	96

RESUMEN

Este documento presenta un resumen del estudio y diseño de bloques de asfalto para ser utilizados como elemento estructural en pavimentos articulados para zonas de bajo volumen de tránsito. Además se construyó un tramo de prueba en un área aproximada de 200 m², en donde se implementó esta alternativa de pavimentación. Para el diseño de mezcla de emulsión asfáltica (AE) en terreno y en laboratorio se utilizó áridos de la zona (gravilla y polvo de piedra), ceniza volante FBC (Combustión de Lecho Fluido) y emulsión asfáltica tipo CSS-1h (Catiónica de Quiebre Lento). Para la obtención de bloques de asfalto se realizó cortes longitudinales y transversales sobre el pavimento, para posteriormente analizar: forma y tamaño del elemento, espesor, textura, profundidad de ranura; propiedades mecánicas en el elemento como: densidad, resistencia a compresión, resistencia a flexión, desgaste superficial; y propiedades mecánicas de mezcla como: resistencia a tracción indirecta (ITS), porcentaje de resistencia retenida (TSR) y módulo resiliente (Mr). Además se realizó un estudio comparativo entre bloques de mezcla de asfalto en caliente (HMA) y mezcla de emulsión asfáltica (AE), determinando que bloques de HMA presentan mejores características por una mayor resistencia a la flexión, mayor ITS y menor desgaste superficial. Sin embargo, bloques AE y adición de ceniza FBC presenta un comportamiento rígido, con similar resistencia a compresión y mayor módulo resiliente que bloques de HMA. Finalmente se presenta dos alternativas de diseño para la construcción de pavimentos de bloques de asfalto.

Palabras Claves: Emulsión asfáltica, Resistencia Tracción Indirecta, Resistencia Retenida, Módulo Resiliente, bloque de asfalto, pavimento articulado.

ABSTRACT

This document presents a summary of the study and design of asphalt blocks to be used as a structural element in articulated pavements for low traffic roads. Also was constructed a test section with a surface area of approximately 200 m² in which blocks pavement were considered. Obtained results are related to the production of asphalt emulsion (AE) mix in field and laboratory. For AE mix design was used local aggregates (gravel and rock dust), FBC (Fluidized Bed Combustion) fly ash and CSS-1h (Cationic Slow Setting) asphalt emulsion. To obtain asphalt blocks, longitudinal and transverse pavement cuts were made. After that, different analysis was made on blocks pavement how: element shape and size, thickness, texture and crack depth; also, mechanical properties of blocks such as: density, compressive strength, bending strength and surface wear; and mechanical properties of mix such as: Indirect Tensile Strength (ITS), Tensile Strength Ratio (TSR) and modulus (Mr). Hot mix asphalt (HMA) blocks and asphalt emulsion (AE) mix blocks comparative study determined that HMA blocks have better flexural strength, greater ITS and less surface wear. However, AE blocks with added FBC ash have a stiffer behavior, with similar compressive strength and a greater resilient modulus than HMA blocks. Finally, this document presents two design alternatives for the construction of asphalt block pavement.

Keywords: Asphalt Emulsion, Indirect Tensile Strength, Tensile Strength Ratio, Resilient Modulus, asphalt block, interblock pavement.

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes Generales

Durante los últimos años se ha desarrollado investigaciones de gran importancia para el estudio de pavimentos. En 1987, el congreso de los EEUU designó USD 150 millones de dólares a Strategic Highway Research Program (SHRP) para la investigación al mejoramiento del estudio de carreteras, reforzando principalmente las áreas de asfalto, concreto, operación de caminos y comportamiento de los pavimentos en el tiempo.

Entre los principales materiales utilizados en la construcción de pavimentos son las mezclas asfálticas, existiendo en la actualidad diversas alternativas para su fabricación, en frío o caliente; como la reutilización o reciclado de pavimentos (Labuz, 2007), utilización de materiales reciclados en procesos industriales (Reyes et al., 2006); las mismas que son importantes para un adecuado control ambiental y que contribuyen al desarrollo económico del país, convirtiéndose en un proceso de comercialización de materiales reciclables dentro del área de la construcción.

Dentro de las mezclas convencionales de asfalto en caliente (HMA), se determinó que la utilización de filler mineral en ciertos porcentajes dentro de mezclas permite obtener una mayor resistencia a tracción indirecta (ITS), menor cantidad de asfalto, y aumenta la fragilidad en mezcla endurecida (Baoshan et al., 2006); así como también permite el incremento de resistencia como densidad, estabilidad, y mejora propiedades funcionales de ahuellamiento (Reyes et al., 2006). Otra de las alternativas que se presentan en el proceso de pavimentación es la utilización de emulsión asfáltica, ya sea aniónica o catiónica, siendo sus principales características la viscosidad, estabilidad y velocidad de quiebre (Nicholls, 1998).

A través del Fondo de Fomento al Desarrollo Científico y Tecnológico “Fondef” en Chile, se desarrollo un proyecto el cual propone utilizar ceniza FBC (Combustión de

Lecho Fluido) como materia prima para la fabricación de bloques de asfalto (pavimentos articulados), utilizando (o reciclando) la ceniza y a su vez produciendo un ahorro directo en los costos asociados a su depósito en botaderos autorizados, buscando principalmente resolver un problema ambiental (Núñez et al., 2008).

1.2 Planteamiento del Problema

La necesidad de contar con soluciones de pavimentos económicos es una constante en países en vías de desarrollo. Entre los demandantes más importantes de pavimentos económicos están los organismos estatales los cuales cuentan con diversas estrategias y programas de subsidio para la pavimentación de calles y pasajes en áreas de escasos recursos. Las construcciones de pavimentos económicos tienen como objetivo principal resolver un problema social y técnico (pavimentos sociales), ya que en la actualidad se realizan con alto grado de artesanía poco especializada, obteniéndose como resultado pavimentos poco durables y de baja calidad.

Otro aspecto importante de analizar dentro de la fabricación de mezclas asfálticas en caliente, son los porcentajes de material perdido o mal usado en los procesos de producción y colocación, esto debido a distintas circunstancias como los extensos tramos entre los puntos de abastecimiento y colocación, menor número de vehículos abastecedores, condiciones ambientales adversas, condiciones de preparación y almacenamiento de materiales, entre otros.

Conociendo la problemática actual en la carencia y calidad de caminos pavimentados, y por otro lado el desarrollo de investigaciones realizadas en esta área; nace la idea de validar y aplicar los resultados obtenidos en investigaciones anteriores para el caso de mezclas asfálticas en la fabricación de bloques de asfalto (adofaltos); y además, determinar procesos de fabricación de mezcla que permita optimizar su uso, disminuyendo porcentajes de desperdicio de material y los costos de producción.

1.3 Hipótesis y Objetivos del Proyecto

1.3.1 Objetivo General y Específicos

El objetivo general de esta tesis consiste en: Evaluar propiedades mecánicas y estructurales de bloques de asfalto utilizados en un pavimento de tipo articulado.

Para obtener el objetivo general en esta investigación, se desarrollaron los siguientes objetivos específicos:

- 1) Estudiar y diseñar una mezcla de emulsión asfáltica específica en laboratorio para la fabricación de bloques de asfalto y comparar con mezclas convencionales en caliente,
- 2) Estudiar un método de diseño estructural para aplicar en el diseño de pavimento articulado con bloques de asfalto,
- 3) Construir un tramo de prueba a escala real con pavimento articulado de adofaltos, para analizar en terreno propiedades funcionales y estructurales del mismo como: resistencia a compresión, flexión, desgaste superficial, módulo, resistencia a tracción indirecta, resistencia retenida, etc.,
- 4) Analizar y comparar los resultados obtenidos en terreno y laboratorio para validar las alternativas de diseño estructural del pavimento articulado con adofaltos.

1.3.2 Hipótesis

La hipótesis planteada se resume: “Un bloque de asfalto puede ser utilizado como capa de rodado en un pavimento de tipo articulado”.

En resumen, esta investigación propone la manufactura de pavimentos prefabricados de calidad controlada y a su vez económicos, los cuales pueden ser colocados artesanal o industrialmente, logrando una pavimentación de calidad; así como también, introducir al mercado una solución alternativa de pavimentación, la que se espera presente importantes ventajas económicas y técnicas para aplicaciones de pavimentos sociales y a su vez hacer extensivo su comercialización a pavimentos privados de bajo tránsito o pavimentos ornamentales, procurando desarrollar una oportunidad de negocio.

1.4 Metodología del Proyecto

La metodología utilizada para esta investigación fue inicialmente identificar los problemas a resolver dentro del área de la construcción de pavimentos, tanto en el área social, técnica y ambiental, logrando definir los objetivos y alcances de la investigación.

Luego se realizó una revisión bibliográfica sobre pavimentos articulados y bloques asfálticos utilizados en la actualidad, y sus ventajas frente a otro tipo de pavimentación para bajo volumen de tráfico.

En la siguiente etapa se desarrolló procedimientos de laboratorio para el diseño de mezcla de emulsión asfáltica como; caracterización de materiales, propiedades, procesos de elaboración de mezcla, etc. Durante esta etapa además se analizó el diseño estructural de pavimento, tanto flexible como articulado con elementos de asfalto, en función de ciertas propiedades de los mismos, como su forma, tamaño, etc.

La siguiente etapa fue desarrollada en terreno donde se construyó un tramo de prueba real de pavimento asfáltico compuesto por capa de subrasante, base y capa de rodado de bloques de asfalto; llevando a cabo al mismo tiempo la etapa correspondiente a distintos ensayos tanto en terreno como en laboratorio de las distintas capas de la estructura del pavimento como Deflectometría de Impacto FWD, Deflectometría de Impacto Liviano LFWD, densidad, resistencia a flexión, resistencia a tracción indirecta ITS, resistencia retenida TSR, entre otros.

Posteriormente se realizó el análisis e interpretación de resultados obtenidos tanto en terreno como en laboratorio, para finalmente resumir las conclusiones y recomendaciones encontradas. La Figura 1-1 presenta un diagrama de flujo sobre el procedimiento utilizado durante el desarrollo de esta investigación.

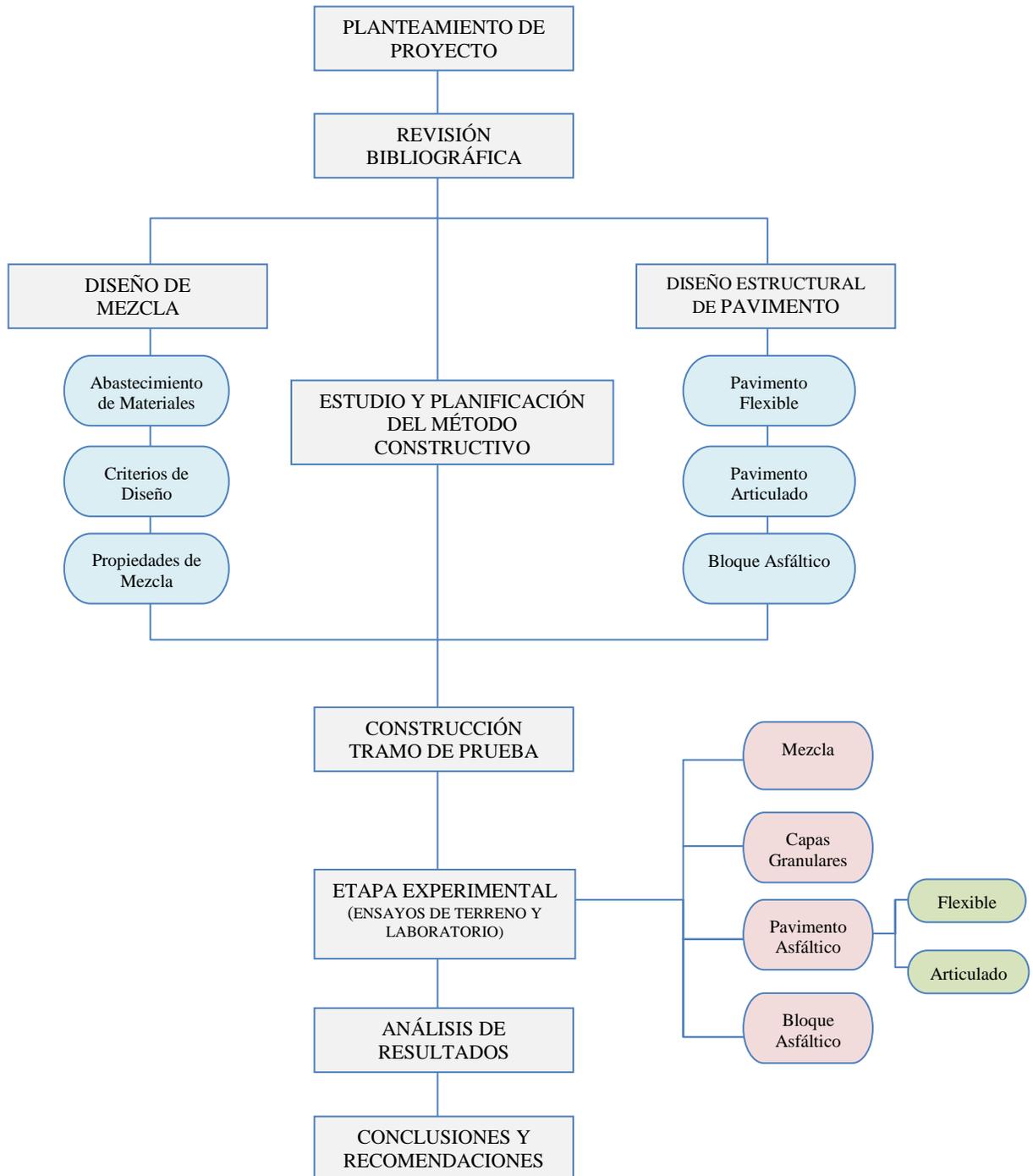


Figura 1-1: Diagrama de Flujo sobre Metodología Utilizada para Investigación.

Fuete: Elaboración Propia.

2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

2.1. Adoquines o Adocretos

Dependiendo de las formas de los adoquines, estos se pueden disponer de distintas maneras en el pavimento, tal como se muestra en la Figura 2-1 y Figura 2-2 . Los adoquines con cuatro caras dentadas según figura 2-1(a), pueden aparejarse o colocarse en “espina de pescado” y por su trabazón en las cuatro caras, al unirse, resisten el desplazamiento relativo en sentido longitudinal y transversal. Los adoquines con dos caras dentadas según figura 2-1 (b), se entrelazan sólo en dos caras, por lo que no pueden usarse en “espina de pescado”; y sólo 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 según figura 2-1 (c) depende exclusivamente de la precisión dimensional y de colocación para desarrollar alguna trabazón. (Núñez et al., 2008). Otra propiedad requerida en el proceso de colocación de bloques de concreto es la planeidad, que consiste en el desnivel que existe entre bloques contiguos, recomendado una diferencia de desnivel no mayor a 3 mm; y no deberá existir una deflexión mayor a 10 mm en una longitud de 3 m (Uni-Group USA, 2010).

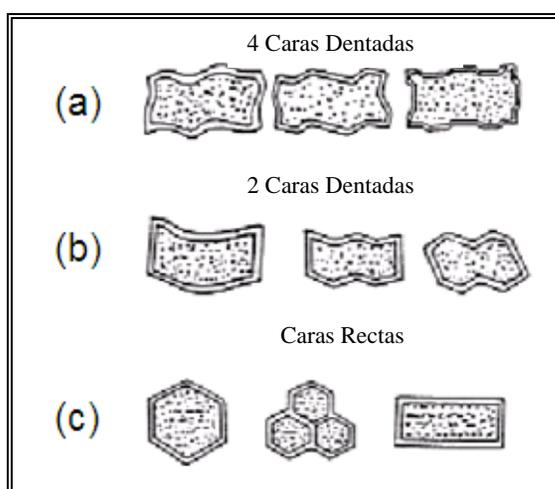


Figura 2-1: Clasificación de Adoquines por su Forma. (a) Cuatro Caras Dentadas, (b) Dos Caras Dentadas, (c) Caras Rectas.

Fuente: (Núñez et al., 2008)

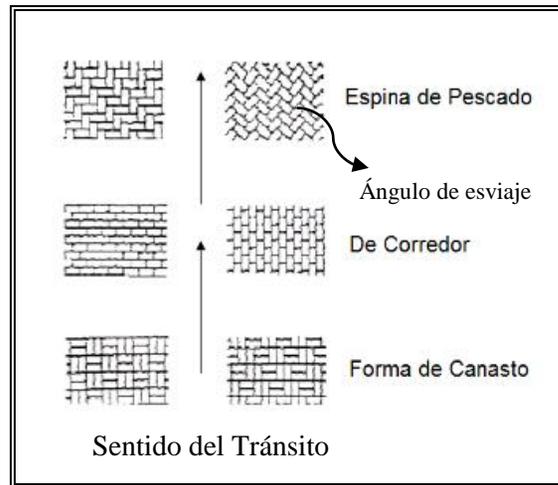


Figura 2-2. Aparejos de Colocación de Adoquines.

Fuente: (Núñez et al., 2008)

Por otra parte, el comportamiento también dependerá de las propiedades intrínsecas del adoquín, como resistencia a la abrasión, resistencia a la compresión, etc. Según la ASTM C 140 (American Society for Testing and Materials (ASTM)), el promedio de resistencia a compresión de bloques de concreto debe ser igual a 55 MPa., y ningún resultado individual deberá ser menor a 50 MPa.; el promedio de absorción de agua deberá estar en 5 % y ningún resultado individual mayor a 7%. Según ASTM C 67 (American Society for Testing and Materials (ASTM)), el requisito de resistencia después de 50 ciclos de hielo y deshielo no deberá presentar una pérdida de material mayor al 1%.

2.2. Pavimento Articulado

2.2.1. Introducción

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.

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 (Instituto del Cemento y del Hormigón, 2011). 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. Se 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 (Knapton, 1976). La trabazón vertical se consigue a través de la arena que rellena las juntas entre adoquines. Este material proviene del colchón 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. 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. 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.

Según investigaciones realizadas en pavimentos articulados de bloques de concreto, se presentan seis tipos principales de fallas (Songlin et al., 2009):

- Pérdida y separación de bloques, producidos especialmente en tramos con pendiente, ya que por la vibración de vehículos permite que se deslicen a lo largo de la pendiente, aumentando la separación de juntas y eliminando la trabazón entre los bloques de concreto.
- Desprendimiento o desmoronamiento en bordes de bloques, debido principalmente al movimiento rotacional bajo carga vehicular. Para evitar esto se debe fabricar bloques con bordes chaflanados en la superficie de los mismos.

- Rompimiento o desgaste abrasivo de bloques, debido a efecto de cavitación o efecto erosivo en la base, o por baja resistencia de la base del pavimento. El efecto abrasivo se debe a baja resistencia de los agregados de mezcla o baja dosis de cemento.
- Deformación permanente y pandeo del pavimento, debido a filtraciones de agua en la base del pavimento disminuyendo la capacidad de soporte del mismo, o por compactación insuficiente de las capas inferiores de base o sub-base.
- Falla por corte, debido principalmente por la combinación de baja capacidad de soporte con altas solicitaciones de carga.
- Agrietamiento por fatiga de base, originados principalmente en base de agregados semirígidos bajo cargas repetidas.

Un pavimento articulado de concreto generalmente consiste de suelo de subrasante, subbase granular (opcional), base granular, colchón de arena, el pavimento de bloques de concreto y el borde de confinamiento. El diseño y construcción de pavimento articulado varía con el clima, condiciones de disponibilidad de materiales, métodos de diseño, condiciones de suelo y cargas de tráfico. La colocación de los elementos puede ser manual o mecánica. La Figura 2-3 presenta los elementos que componen un pavimento articulado.

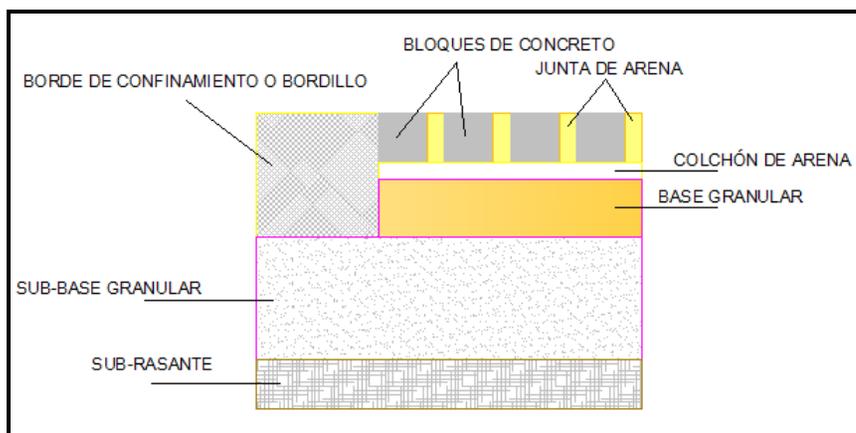


Figura 2-3. Componentes Tradicionales de un Pavimento Articulado de Concreto.

Fuente: Elaboración Propia.

Las ventajas que brinda cada uno de los componentes de la estructura del pavimento articulado se determinaron en 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 al colchón de arena; y el segundo enfocado en el elemento de concreto, llegando principalmente a los siguientes resultados (Panda et al., 2002):

- El ancho y calidad de la junta de arena, espesor y calidad del colchón 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 o bordillo, reduce las deformaciones del pavimento;
- El colchón de arena debe tener un espesor menor a 50 mm., y la arena debe ser bien gradada;
- 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.

A continuación se detallarán las principales características de los elementos que componen una estructura de pavimento articulado.

2.2.2. Subrasante

Esta capa debe ser excavada o repuesta según las condiciones del suelo natural, para posteriormente ser compactada. Se recomienda un porcentaje de compactación del 95% de Densidad Proctor Normal para el caso de áreas peatonales o residenciales, y ASTM D 1557 (American Society for Testing and Materials (ASTM)) recomienda el 95% de Densidad de Proctor Modificado para áreas bajo cargas vehiculares (Uni-Group USA,

2010). Suelos saturados o de baja capacidad de soporte podrán ser estabilizados o de ser necesario requerir drenaje para remover exceso de agua.

2.2.3. Base y Subbase Granular

Este tipo de material es usado tanto para pavimentos de concreto como pavimentos asfálticos. Para el caso de subbase granular generalmente se recomienda cumpla requisitos mínimos indicado en la Tabla 4-5. Para capa de Base Granular, el espesor de la capa generalmente es determinada con la guía para diseño estructural de pavimento recomendado por AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials, 1993); por otro lado la ASTM D 2940 (American Society for Testing and Materials (ASTM)) presenta recomendaciones para material de bases granulares. El espesor de la capa de base deberá ser determinada en función de la carga de tráfico, tipo de suelo, condiciones de clima y drenaje. El espesor de capa de base para pavimentos asfálticos puede ser utilizado para pavimentos de bloques de concreto. La compactación de la base granular es tan importante como la de subrasante, para evitar posteriores asentamientos en la superficie del pavimento, y especialmente a las áreas cercanas al borde de confinamiento (ver Figura 2-3), en estructuras de soporte de pavimento, etc. Una vez compactada la capa de base, deberá presentar un asentamiento dentro de 4-6 pulgadas. La densidad requerida para superficies peatonales será de al menos 95% de la densidad Proctor Normal según ASTM D 698 (American Society for Testing and Materials (ASTM)), mientras que para tráfico vehicular la base deberá presentar al menos el 98% de la densidad Proctor Modificado según ASTM D 1557 (American Society for Testing and Materials (ASTM)). La superficie compactada deberá estar en condición húmeda dentro de una tolerancia de planeidad de ± 10 mm en 3 m (Uni-Group USA, 2010). Bases estabilizadas podrían ser usadas para pavimentos de servicio industrial con cargas de tráfico pesado o sobre subrasantes de baja capacidad de soporte.

2.2.4. Colchón de Arena

Los requisitos de granulometría para este tipo de arena están dados en ASTM C 33 (American Society for Testing and Materials (ASTM)) según Tabla 2-1, donde se recomienda no usar arena de cantera o albañilería, debido a la presencia de partículas menores a la malla No. 200. El tamaño máximo de partículas para este tipo de arena está entre 2.5 a 4.0 mm. No se permitirá usar esta arena para rellenar fallas o depresiones en la capa de base de la estructura, ya que estas podrán reflejarse en la superficie del pavimento. En ciertos lugares como cerca de bordillo, drenaje y estructuras complementarias al pavimento, o incluso en bases estabilizadas, puede ser necesario el uso de geotextiles para evitar la pérdida de capa de arena, extremos que serán colocados contra las superficies verticales (bordes de confinamiento) para evitar el lavado o pérdida de la arena (Uni-Group USA, 2010).

Tabla 2-1: Requerimientos Granulométricos para Arena utilizada en Colchón de Arena.

Tamaño de Tamiz	Porcentaje que Pasa	
	ICH , 1991	ASTM C 33
3/8 pulgada (9.5 mm)	100	100
No 4 (4.75 mm)	95-100	95 a 100
No 8 (2.36 mm)	80-100	85 a 100
No 16 (1.18 mm)	50-95	50 a 85
No 30 (0.600 mm)	25-60	25 a 60
No 50 (0.300 mm)	10-30	10 a 30
No 100 (0.150 mm)	5-15	2 a 10
No 200 (0.075 mm)	0-10	-----

Fuente: (Uni-Group USA, 2010; Instituto del Cemento y del Hormigón en Chile, 2011)

2.2.5. Juntas de Arena

La misma arena utilizada como colchón puede ser utilizada para rellenar las juntas entre los bloques de concreto durante el proceso de barrido y compactación. La ASTM C 144 (American Society for Testing and Materials (ASTM)) recomienda el uso de arena seca fina. El ancho de la junta deberá estar en un rango de 2 a 5 mm, y no más del 5% de la junta deberá exceder 6 mm. La alineación del aparejo de colocación de juntas no deberá tener una desviación mayor de ± 1.5 mm en 15 m de la guía de alineación. Además se deberá rellenar los espacios entre los bordes de confinamiento y el pavimento articulado, con bloques cortados o unidades de confinamiento (Uni-Group USA, 2010). La Tabla 2-2 presenta los requerimientos granulométricos para dos tipos de arena (natural y fabricada) utilizada en juntas entre bloques de concreto.

Tabla 2-2: Requerimientos Granulométricos para la Arena de Juntas.

Tamaño Tamiz	Porcentaje que Pasa	
	Arena Natural	Arena Fabricada
No 4 (4.75 mm)	100	100
No 8 (2.36 mm)	95 a 100	95 a 100
No 16 (1.18 mm)	70 a 100	70 a 100
No 30 (0.600 mm)	40 a 75	40 a 100
No 50 (0.300 mm)	10 a 35	20 a 40
No 100 (0.150 mm)	2 a 15	10 a 25
No 200 (0.075 mm)	0	0 a 10

Fuente: (Uni-Group USA, 2010)

Tanto la arena para juntas como para colchón de arena debe ser lavada, limpia, no plástica, libre de materiales deletéreos y extraños, de forma simétrica, natural o fabricada de la trituración de roca. Se recomienda no utilizar arena con presencia de cal, polvo de piedra o arena de albañilería o de mampostería. La Figura 2-4 presenta los requisitos de granulometría para las arenas utilizadas tanto en juntas como colchón de arena según

ASTM C144 como ASTM C33 (American Society for Testing and Materials (ASTM)) respectivamente; y se compara con requisitos de granulometría para agregados utilizados en mezclas de emulsión asfáltica empleadas en obras de pavimentación (Ministerio de Obras Públicas MC.V-5, 2008).

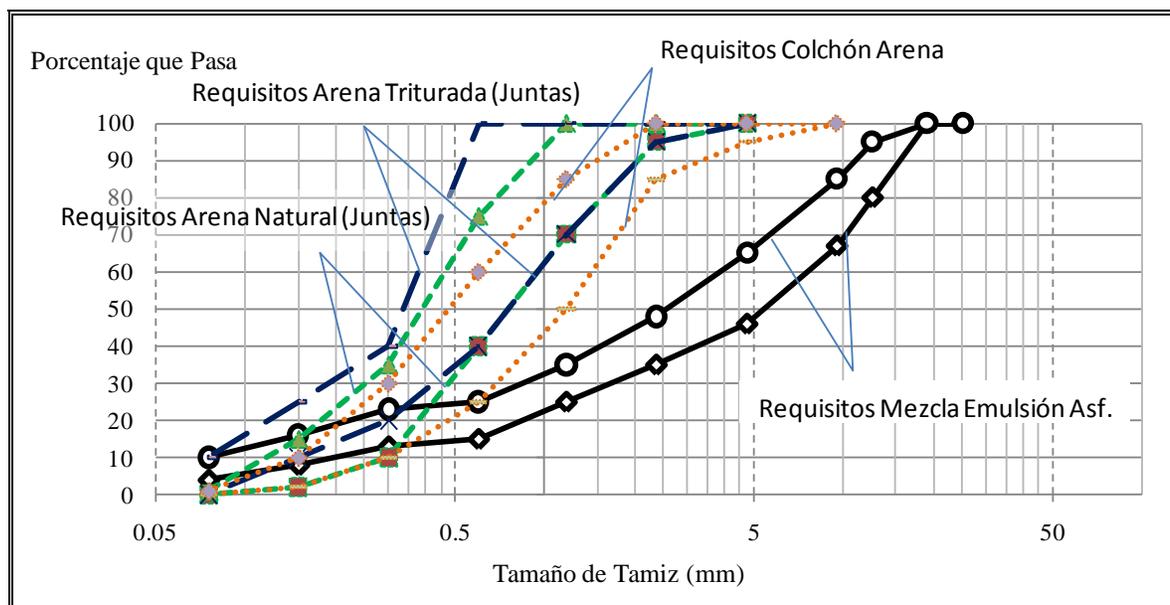


Figura 2-4: Límite de Granulometría para Agregados Utilizados en Mezcla de Emulsión Asfáltica, Colchón de Arena y Juntas de Bloques de Concreto.

Fuente: Elaboración Propia.

2.2.6. Bloques de Concreto

La forma de los bloques de concreto determina el modelo y manera de su colocación. Para pavimentos sujetos a carga vehicular se recomienda colocar los bloques de concreto en forma de espina de pescado con un ángulo de esviaje de 45° o 90° (ver Figura 2-2) para lograr un mejor comportamiento estructural y máxima trabazón entre los elementos. Además se requerirá cortar algunos elementos que deberán estar colocados contra los bordes de confinamiento para lo cual su tamaño no deberá ser menor a $1/3$ del tamaño total del elemento. Una vez colocados estos deberán ser compactados dentro de colchón de arena mediante un plato compactador capaz de transmitir una fuerza mínima de 22

kN y frecuencia de 75-100 Hz (Uni-Group USA, 2010). Posteriormente la arena es utilizada en un barrido para rellenar completamente las juntas y volviendo a compactar de dos a tres veces, hasta lograr el relleno total.

2.2.7. Borde de Confinamiento

Los bordes de confinamiento o bordillos son esenciales para el desempeño en un pavimento de bloques de concreto. El borde de confinamiento sostiene el pavimento y la arena de juntas, permitiendo que el pavimento se encuentre intertrabado o con trabazón entre sus elementos. Generalmente se colocan antes del colchón de arena y bloques de concreto, no obstante bordes de confinamiento de plástico, acero, aluminio y paletas de concreto pueden ser colocadas después de colocar los bloques de concreto. El uso de estos últimos materiales es recomendable para patios, áreas residenciales; así como paneles de hormigón o bordillo sumergidos (para climas sin existencia de heladas). Bordillos de concreto prefabricado o de piedra cortada son requeridos para superficie de caminos de entrada y áreas de estacionamiento. Bordillo de concreto para confinamiento son recomendados para caminos de mayor importancia como calles, pasos de peatones, patios industriales, etc.

Pavimentos vehiculares con pendientes (ver Figura 2-5) del orden de 8 a 12 % puede requerir la construcción de vigas de concreto (concrete header beams) como elementos de encabezado; para pendientes de 12 a 15 %, el espacio máximo recomendado entre elementos de encabezado de vigas es de 30 m.; pendientes entre 15 a 20 % espaciamiento de 20 m; y para pendientes de 20 a 25 % un espaciamiento no mayor que 15 m. (Uni-Group USA, 2010)

2.2.8. Consideraciones de Drenaje

Todas las obras de drenaje deberán estar construidas con las mismas recomendaciones para uso en pavimentos flexibles. Drenajes abiertos deberán ser cubiertos de geotextil para prevenir la pérdida de la arena en colchón. En caso de un recubrimiento o

incrustación con pavimento articulado sobre pavimento existente, las fisuras de 10 mm de largo o mayores deberán ser cubiertas previo a la colocación de geotextil, colchón de arena y pavimento nuevo. La Figura 2-5 presenta un detalle de los elementos necesarios para construcción de drenaje en un pavimento de tipo articulado en pendiente.

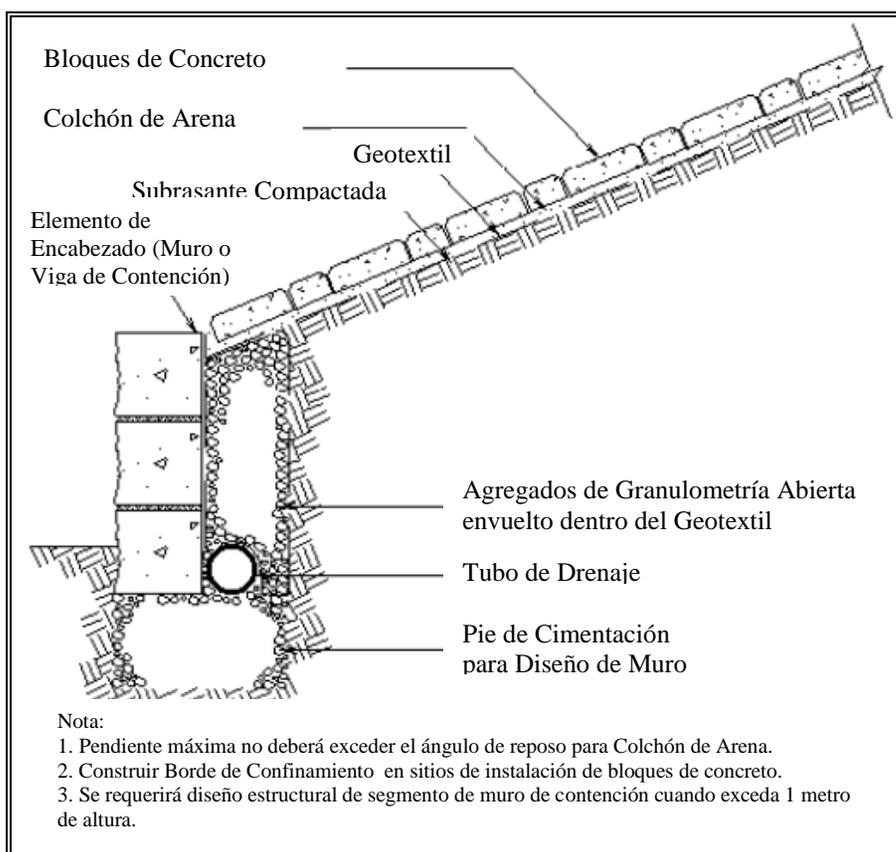


Figura 2-5: Consideraciones de Drenaje en Pavimentos Articulado.

Fuente: (Uni-Group USA, 2010)

2.3. Ventajas de los Pavimentos Articulado

A continuación se describen las principales ventajas de la utilización de pavimentos articulados frente a otro tipo de pavimentación (Núñez et al., 2008):

- 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 por asentamientos en capas inferiores.
- 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 la señalética vial, mediante la variación de color o de textura superficial de los elementos.
- Elimina 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, principalmente en zonas urbanas debido a la existencia de un gran flujo vehicular.
- Los adoquines 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.

Además se presenta como posibles desventajas en este tipo de pavimentación los siguientes aspectos: menor sensación de comodidad dentro del vehículo a altas velocidades de desplazamiento; necesidad de excelentes condiciones de drenaje bajo la capa de rodado ya que esta no presenta características de impermeabilidad; entre otras.

2.4. Aspectos Constructivos

Este tipo de pavimentos requiere cumplir con requisitos y procedimientos que permitan brindar un pavimento de calidad, durante todo el proceso constructivo. A continuación se presentan detalles constructivos para cada elemento de la estructura del pavimento.

2.4.1. Construcción

a) Preparación de Subrasante

Primero se prepara la capa de subrasante de la misma manera y bajo las mismas consideraciones con que se construye un pavimento tradicional. Se debe procurar tener un adecuado tratamiento de aguas, capacidad de soporte suficiente de acuerdo al tránsito existente y una apropiada compactación. Todos estos procedimientos constructivos se encuentran detallados en la sección 2.2.2 y en la Manual de Carreteras (Ministerio de Obras Públicas MC.V-5, 2008).

b) Preparación de Base

Para la capa de base 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. Todos estos procedimientos constructivos se encuentran detallados en la sección 2.2.3 y en el Manual de Carreteras (Ministerio de Obras Públicas MC.V-5, 2008).

c) Preparación de Borde de Confinamiento

Para las restricciones de borde o los bordillos, es importante 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 un colchón de apoyo de hormigón para entregar mayor estabilidad al confinamiento de los bloques.

d) *Preparación de Colchón de Arena*

Para la capa o colchón de arena se recomienda no 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. Además se recomienda un espesor de 25 a 38 mm para el colchón de arena (Uni-Group USA, 2010). Esta debe ser esparcida y enrasada suavemente ocupando niveles de referencia. Un inadecuado enrasado puede evitar cualquier tipo de compactación del colchón de arena, por lo cual no es recomendable el movimiento en zig-zag.

e) *Preparación de Bloques de Concreto*

En la colocación de los bloques de concreto se deben trasladar y acopiar con cuidado de no alterar su calidad y estado inicial. 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. Para pavimentos sujetos a tráfico vehicular, se recomienda un ángulo de desviación entre 45° a 90° para lograr un máximo trabazón y desempeño estructural en el pavimento (Uni-Group USA, 2010). La colocación de los adoquines es de forma manual o mecánica, se recomienda el uso de lienzos guía para facilitar su colocación y aparejo. Existen tecnologías que permiten la colocación automatizada de adoquines, permitiendo un considerable aumento en los rendimientos y en la precisión de su colocación. Los adoquines se colocan directamente sobre el colchón de arena, teniendo cuidado de no pisar esta última durante el proceso; y deberán ser colocados de manera que entre las caras laterales queden juntas con un espesor no mayor a 5 mm.

No se deben compactar los adoquines durante la colocación, esto se realiza en la siguiente etapa. Durante el proceso de vibrado del pavimento, la compactación de los bloques se lleva a cabo mediante placas vibratoras. En esta etapa se debe aplicar lo más pronto posible la colocación de los adoquines, pero manteniendo dos metros de distancia con el borde de colocación para evitar así posibles desplazamientos de los bordes del pavimento sin confinamiento. Normalmente se realizan de 2 a 3 pasadas desde diferentes

direcciones para poder proporcionar una superficie de rodado plana y prevenir posibles asentamientos ante la carga vehicular. Se recomienda usar un plato compactador de baja amplitud capaz de transmitir al menos una fuerza de 18 kN con una frecuencia de 75 a 100 Hz para el proceso de vibrado de los bloques dentro del colchón de arena.

f) Preparación de Juntas de Arena

Inmediatamente después de la compactación, se deberá esparcir arena fina sobre la superficie con la ayuda de escobillones, para posteriormente aplicar de 4 a 6 pasadas adicionales con el compactador, procurando llenar las juntas con arena, retirando el exceso de material sobrante de la superficie.

2.4.2. Control de Calidad

Para el control final de construcción se deberá chequear que posterior a la compactación de los materiales de base granular y de suelo de subrasante, la superficie final del pavimento deberá estar sobre los 3 a 6 mm del nivel final después de la compactación; esto para efectos de compensación por posibles y normales asentamientos de las capas del pavimento durante la construcción. Además el nivel final del pavimento deberá estar dentro de 3 a 6 mm por encima del nivel de entradas de drenaje, canales, etc. Así mismo, no deberá existir una diferencia mayor de 3 mm entre los bordes de bloques contiguos tal como se indico en la sección 2.1.

Respecto a los requerimientos ambientales, se recomienda no colocar la arena o el pavimento durante una fuerte lluvia o nevada; no instalar arena o pavimentos sobre material de base congelada; no utilizar arena saturada o congelada; y no instalar el pavimento sobre arena congelada o saturada.

Finalmente, para la etapa de control de calidad y para asegurar la calidad del producto a utilizar en la construcción y su posterior aplicación, es necesario cumplir con los siguientes requisitos: durante su fabricación se debe controlar los materiales, según las especificaciones indicadas, identificando y caracterizando cada uno de los materiales a

utilizar y asegurar su óptima condición para su aplicación; controlar la dosificación utilizada para alcanzar las propiedades evaluadas durante el diseño; controlar la etapa de mezclado y curado, verificar el estricto cumplimiento de las condiciones de ejecución de las actividades involucradas; y controlar la compactación de los elementos con el fin de asegurar una correcta densificación de la mezcla.

Durante la construcción se debe controlar el correcto almacenamiento y transporte, cumplimiento de las metodologías indicadas en los documentos de proyecto junto con las recomendaciones constructivas. Este procedimiento podría ser aplicado a cualquier tipo de pavimento articulado con algún otro tipo de bloque como capa de rodado.

2.5. Principales Aplicaciones sobre Distintas Capas de Fundación

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 (Rada et al., 1990). Entre las principales aplicaciones de los pavimentos articulados se encuentran: zonas sometidas a cargas menores como plazas, vías peatonales, terrazas, lugares donde el nivel de carga no es un factor determinante, vías urbanas de baja velocidad de circulación; zonas industriales como puertos, bodegas, etc. Para las aplicaciones indicadas existen ciertos requisitos establecidos para obtener un mejor desempeño y comportamiento de los pavimentos articulados.

2.5.1. Pavimento Articulado sobre Base Tratada con Cemento.

Esta aplicación establece la construcción de pavimento de bloques de concreto sobre un colchón de arena previamente colocado un geotextil sobre la base tratada con cemento. Este tipo es aplicado a pavimentos bajo carga vehicular, como estaciones de gasolina, puertos y aeropuertos. Los requisitos granulométricos para colchón de arena y juntas se presentan en la Tabla 2-1 y Tabla 2-2. Las unidades de bloques de concreto deberán cumplir con los requisitos de pruebas de resistencia según la norma ASTM C 936 (American Society for Testing and Materials (ASTM)). En caso necesario, se deberá

cubrir el colchón y juntas de arena a prueba de agua. Los requisitos de resistencia, absorción, desgaste a ciclos de hielo/deshielo, planeidad y aparejo son igual que los indicados para adocretos en la sección 2.1. La Figura 2-6 presenta una sección típica de un pavimento articulado sobre una base tratada con cemento.

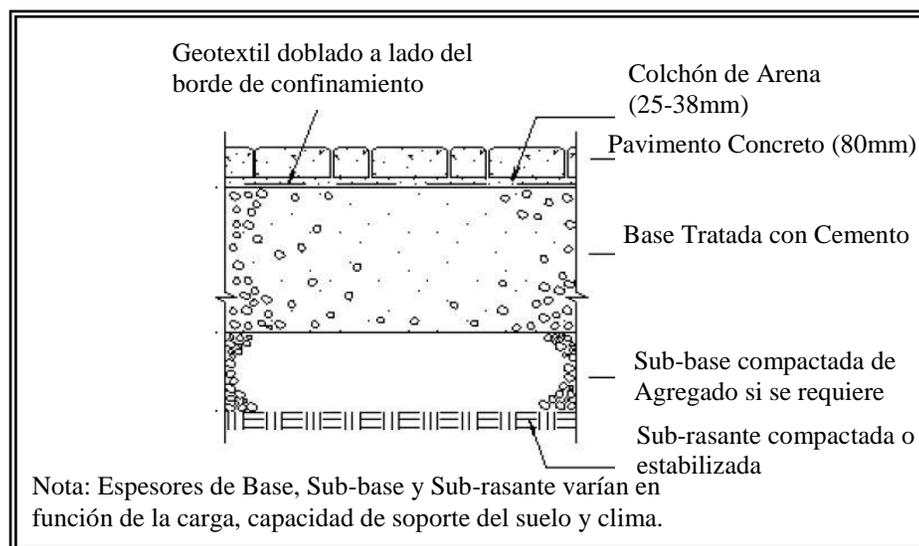


Figura 2-6: Sección Transversal de Pavimento Articulado sobre Base Tratada con Cemento.

Fuente: (Uni-Group USA, 2010)

2.5.2. Pavimento Articulado Adheridos Sobre Base de Concreto

Esta aplicación es válida para pavimentos con elementos de concreto según ASTM C 936 (American Society for Testing and Materials (ASTM)). La arena utilizada tanto para colchón y juntas deberá cumplir los requerimientos según ASTM C 136 (American Society for Testing and Materials (ASTM)), con ciertas variantes como se demuestra en la Tabla 2-3. El diseño de mezcla asfáltica para colchón de arena se realizará en base a Norma ASTM D 3381 (American Society for Testing and Materials (ASTM)). Los requisitos de resistencia, absorción, desgaste a ciclos de hielo/deshielo, planeidad y aparejo son igual que los indicados en la sección 2.1 para adocretos. Posteriormente se

requiere un riego sobre la base de concreto con emulsión asfáltica aniónica tipo SS-1h; para luego colocar el cemento asfáltico a una temperatura de 150°C, y compuesta por 7% de contenido asfáltico y 93% arena. Adicionalmente se usa una masilla de neopreno adhesivo con asfalto modificado para bloques de pavimento. Posteriormente se recomienda usar un sellador y terminador de juntas. Los orificios de drenaje serán de 50 mm de diámetro y de ser necesario cubrirlos para evitar ingreso de arena con asfalto o neopreno adhesivo durante la construcción, verificando el correcto funcionamiento con agua y gravilla al final del proceso constructivo, quitando inicialmente los protectores de orificios para iniciar el funcionamiento de drenaje. Eliminar cualquier material extraño en la superficie de concreto que obstruya la adherencia; además, rellene cualquier grieta mayor a 5 mm de ancho con mortero, verificando que la superficie de concreto se encuentre curada, libre de presión hidrostática y con un contenido de humedad menor a 5%. Finalmente, verifique la localización, el tipo y elevación de bordillos e ingreso de drenajes. Posteriormente, aplique la razón requerido de asfalto en litros/m² sobre la base de concreto. (Uni-Group USA, 2010).

Tabla 2-3: Requerimientos Granulométricos (modificado) para Colchón de Arena.

Tamaño Tamiz	Porcentaje que Pasa
No 4 (4.75 mm)	100
No 8 (2.36 mm)	85 a 100
No 16 (1.18 mm)	50 a 85
No 30 (0.600 mm)	25 a 60
No 50 (0.300 mm)	10 a 30
No 100 (0.150 mm)	2 a 10
No 200 (0.075 mm)	2 a 10

Fuente: (Uni-Group USA., 2010)

Dentro del proceso constructivo se recomienda usar rieles guías para lograr niveles y pendientes precisos sobre el pavimento. Estos rieles guías podrán ser de 20 mm de altura espaciados aproximadamente 4 m; durante este procedimiento se puede comprobar y corregir posibles depresiones sobre la base de concreto. La temperatura de compactación del colchón de arena deberá ser de al menos 130°C, a través de un rodillo compactador, para lograr una superficie nivelada con espesor nominal de 20 mm después del proceso de compactación. Las irregularidades o desniveles sobre la base de concreto solo podrán corregirse con material de colchón de arena. Luego se coloca el adhesivo de neopreno con asfalto modificado en frío con una llana dentada que no exceda con estrías de 2 mm. No colocar los bloques de concreto hasta que la superficie se encuentre seca y adhesiva, y revisar que se encuentren limpios, no agrietados o quebrados. Finalmente, colocar los bloques sobre el adhesivo con juntas que no excedan los 3 mm; acomodando firmemente los bloques de borde (cortados) sobre el adhesivo, evitando que estos no sean menores a 1/3 de su superficie total; para lo cual se recomienda utilizar una cortadora de mampostería. Luego se construye y rellena las juntas sobre toda la profundidad del bloque de concreto, no extendiendo la junta a través del colchón de arena asfáltica o desde las juntas pre-existentes de la base de concreto para evitar agrietamiento. Instalar juntas en todas las fachadas de construcción o superficies verticales, manteniendo unos 10 mm por debajo de la superficie del bloque para la colocación del sellante. Luego que los bloques, juntas de finos y sellante son instalados, desparramar arena seca para juntas, hasta rellenar las juntas entre bloques; y finalmente limpiar la superficie. Las tolerancias de planeidad, espacio entre juntas y desnivel entre bloques es el mismo a considerar para el proceso constructivo de control de calidad final (Uni-Group USA, 2010).

2.5.3. Bloques de Concreto sobre Pavimentos Existentes

Esta aplicación contempla una nueva incrustación o rehabilitación de capa de pavimento de bloques de concreto y colchón de arena sobre una base existente de asfalto, concreto o de agregados, la misma que puede ser aplicada a áreas peatonales y vehiculares. Los requisitos para bloques de concreto serán los mismos indicados en la sección 2.1

respecto a resistencia, resistencia a ciclos de hielo/deshielo y absorción. La arena tanto para colchón como para juntas deberá estar limpia, libre de materiales extraños, con granulometría según Tabla 2-1 y Tabla 2-2 respectivamente; y se recomienda no utilizar arena de mampostería.

Un análisis importante en este tipo de aplicación es la calidad de la arena. Existe un método para evaluar la dureza de arena a ser utilizada en mezclas de concreto o asfalto, y sujetas a altas sollicitaciones de tráfico (sobre 1.5 millones de ejes equivalentes (EEq)). Una muestra aproximada de 1.4 Kg debe ser secada al horno a una temperatura de 115°C a 121°C. Posteriormente se deberán separar tres muestras de aproximadamente 0.2 Kg cada una mediante proceso de cuarteo. Desarrollar el ensayo de granulometría según ASTM C 136 (American Society for Testing and Materials (ASTM)). Remezclar cada sub-muestra y colocar dentro de un recipiente de porcelana con dos esferas de acero de 25 mm de diámetro y peso de 75±5 gr cada una. Rotar el recipiente de porcelana a 50 revoluciones por minuto (rpm) durante 6 horas y repetir el análisis de granulometría. Para cada muestra de ensayo, deberá estar dentro de los rangos indicados en la Tabla 2-4 respecto al máximo incremento en porcentaje y máximo porcentaje que pasa en función del tamiz indicado (Uni-Group USA, 2010). Los requisitos de granulometría de la arena tanto para colchón de arena como juntas está indicado en la Tabla 2-1 y Tabla 2-2, respectivamente.

Tabla 2-4: Requisitos de Granulometría para determinar Dureza en Arenas.

Tamaño de Tamiz	Máx. Incremento	Máx. Porcentaje que Pasa
No 50 (0.300 mm)	2 %	2 %
No 100 (0.150 mm)	5 %	15 %
No 200 (0.075 mm)	5 %	35 %

Fuente: (Uni-Group USA, 2010)

Respecto a los bordes de confinamiento o bordillos, se recomienda colocar sobre la base terminada y no sobre el colchón de arena. La distancia entre el borde exterior del bordillo y el borde externo de la base deberá ser igual al espesor de la base. Colocar el colchón de arena con un espesor de 25 mm y asentar los bloques de concreto golpeando ligeramente con un martillo contra el colchón de arena. Procurar formar juntas entre bloques de 2 a 5 mm de ancho; no más del 5% de la junta deberá exceder 6 mm de ancho para lograr un alineamiento recto; y la alineación de las juntas no deberá desviarse por más de ± 1.5 mm en 15 m desde la alineación recta. Los espacios vacíos entre bordillos y bloques deberán rellenarse con bloques cortados o unidades de confinamiento; en caso de ser cortados, usar una cortadora de mampostería. Respecto a bloques cortados de hormigón, se recomienda que bloques expuestos a tráfico vehicular, estos no deberán ser menores a 1/3 de bloque de concreto. Mantener sistemas deslizantes o equipos de elevación sobre la capa nueva de pavimento para no recibir una compactación inicial y juntas de arena. Usar una baja amplitud de compactación de al menos 18 kN con una frecuencia desde 75 a 100 Hz para efecto de vibración dentro de colchón de arena, y remover o reemplazar los bloques dañados o agrietados. Simultáneamente, colocar y compactar la arena seca para juntas dentro de las mismas hasta rellenar completamente; este proceso requerirá aproximadamente de 4 a 6 pasados con el plato compactador; sin compactar dentro de los 2 m finales de pavimento sin borde de confinamiento. Remover exceso de arena de la superficie del pavimento terminado. La planeidad deberá estar dentro de un rango de ± 10 mm en 3 m. La cota final del pavimento cuando se construye sobre suelos de subrasante o base de agregados, deberá estar dentro de 3 a 6 mm sobre la cota final de proyecto luego de la compactación, ya que esto ayuda a compensar posibles asentamientos normales dentro del pavimento. La superficie del pavimento deberá estar dentro de 3 a 6 mm sobre puntos de ingreso de drenaje, canales, entre otros. El desnivel entre bloques de concreto no deberá ser mayor a ± 3 mm (Uni-Group USA, 2010). La Figura 2-7 presenta una sección transversal de un pavimento articulado sobre un pavimento existente de asfalto o concreto.

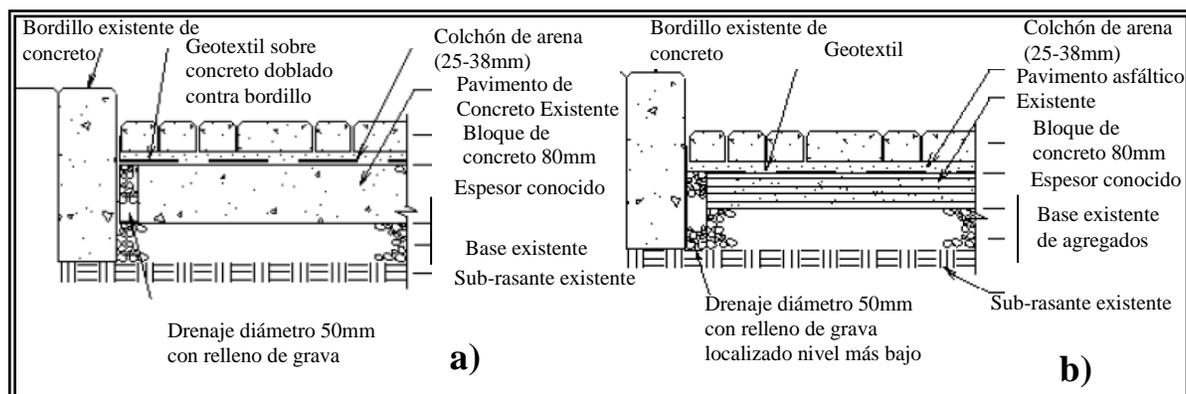


Figura 2-7: Sección Transversal de Pavimento Articulado sobre Pavimento Existente

a) Sobre Pavimento Rígido; b) Sobre Pavimento Asfáltico.

Fuente: (Uni-Group USA, 2010)

2.6. Mezclas Asfálticas con Emulsiones y Cenizas

Existen diversos tipos de mezclas asfálticas que se pueden diseñar para la utilización como material de superficie de rodado en pavimentos. Entre las mezclas utilizadas para estos propósitos están las mezclas de asfalto en Caliente (HMA) y mezclas de asfalto en frío como emulsiones asfálticas (AE). Así también existen materiales adicionales que pueden ser utilizados dentro de una mezcla asfáltica, con el objetivo de mejorar propiedades mecánicas en su composición interna, como por ejemplo cenizas volantes, escorias de alto horno, etc.

La emulsión asfáltica es una mezcla de cemento asfáltico, agua y un agente emulsificante. El asfalto emulsificado es fabricado para reducir la viscosidad del asfalto en bajas temperaturas y además para producir mezclas de asfalto en frío (Meegoda, 1999). La emulsión se produce con la acción de energía mecánica que dispersa el asfalto y con la adición de un agente emulsificante quien estabiliza la emulsión resultante. Generalmente una emulsión está compuesta principalmente de un 50% a 70% de asfalto; 0.1% a 2.5% de emulsificante; 30% a 50% de agua. El principal proceso dentro de una emulsión asfáltica es el quiebre o curado, que corresponde a la separación del agua y asfalto, obteniendo un residuo de asfalto presente en la emulsión, originado por dos

mecanismos tanto de evaporación del agua y la reacción físico química existente entre el agente emulsificante y la superficie del agregado (Núñez et al., 2008).

Como material adicional en mezclas asfálticas tenemos la utilización de cenizas, producidas mediante proceso conocido como combustión de lecho fluido (Fluidized Bed Combustion, FBC), que tienen características cementantes, compuestas principalmente por 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 otra correspondiente a ceniza volante (60%) (Núñez et al., 2008). Estas cenizas volantes producidas en centrales termoeléctricas se han empleado principalmente como adición en mezclas de concreto y en estabilización de bases granulares, pero no se ha profundizado su aplicación dentro de la dosificación en mezclas asfálticas, siendo esta una alternativa para mejorar la capacidad estructural y mitigar problemas ambientales en su reutilización (Reyes et al., 2006).

3. DISEÑO DE MEZCLA

3.1. Introducción

En el diseño y fabricación de mezclas asfálticas se utilizaron dos tipos: mezcla de asfalto en caliente (HMA) y mezcla de emulsión asfáltica (EA). La mezcla HMA fue fabricada y entregada en obra por una empresa particular, junto con los reportes técnicos de sus características y propiedades (ver Anexo A: Tabla A-1); mientras que para la mezcla AE se empleó los mismos agregados utilizados para la mezcla de asfalto en caliente, más la adición de un porcentaje de ceniza volante y emulsión.

3.2. Materiales

Para el diseño de mezcla HMA se utilizó polvo de roca procedentes del sector Maipú y Antuco, gravilla de ½ pulgada, concreto asfáltico CA 24. Para el diseño de mezcla AE se utilizó los mismos agregados indicados anteriormente, más ceniza FBC y emulsión de quiebre lento CSS-1h. Los materiales y proceso de diseño de mezcla de emulsión asfáltica (AE) se presenta a continuación.

3.2.1 Agregados

Para el diseño de mezcla de AE se utilizó: gravilla con tamaño máximo ½ pulgada, polvo de roca proveniente de Maipú y Antuco con tamaño máximo de 3/8 pulgada. Los ensayos granulométricos se desarrollaron según procedimiento indicado en el Manual de Carretera Vol.8-8.202.3 (Ministerio de Obras Públicas MC.V-8, 2003). La Tabla 3-1 presenta un resumen de las propiedades granulométricas de los agregados utilizados según el tamaño del tamiz especificado por ASTM (American Society of Testing and Materials); y cuyos ensayos granulométricos se encuentran detallados en el Anexo A: Tabla A-3 y Tabla A-4.

Tabla 3-1: Granulometría de Agregados.

Tamiz		% que Pasa		
ASTM	mm.	Gravilla 1/2	Polvo Roca Maipú	Polvo Roca Antuco
1/2"	12.5	100	100	100
3/8"	9.5	62	100	100
N° 4	4.75	1	94	97
N° 8	2.36	1	69	75
N° 16	1.18	-	48	57
N° 30	0.600	-	33	38
N° 50	0.300	-	15	15
N° 100	0.150	-	5	4
N° 200	0.075	-	1	1

Fuente: Elaboración Propia.

3.2.2 Ceniza FBC (Combustión de Lecho Fluido)

La ceniza utilizada proviene de la planta térmica generadora de electricidad Petropower (Concepción) siendo la única planta en su género que utiliza tecnología de Combustión de Lecho Fluido (FBC), las cuales están compuestas principalmente por Calcio (CaO: 30% aprox.) y Azufre (SO₃:45% aprox.). El porcentaje de adición de ceniza FBC igual a 10% fue determinada en base a una investigación desarrollada anteriormente (Núñez et al., 2008). La Tabla 3-2 presenta la distribución de tamaño de partículas de la ceniza FBC y cuyos análisis físicos y químicos fueron realizados por laboratorios Cesmec (Anexo A: Tabla A-2).

Tabla 3-2: Análisis Granulométrico de Cenizas FBC.

Abertura de Malla (mm)	% que Pasa
0.420	79
0.147	41
0.074	31
0.043	23

Fuente: Laboratorios Cesmec S.A.

3.2.3 Emulsión Asfáltica

La emulsión utilizada fue tipo CSS-1h, catiónica de curado lento con 63% de asfalto residual. Este tipo de emulsión entrega ventajas favorables a la mezcla de AE como mayor estabilidad y durabilidad, y son utilizadas en mezclas con alto contenido de finos (Meegoda, 1999). Las propiedades de emulsión CSS-1h se presentan en la Tabla 3-3 y fueron determinadas en investigación anterior (Núñez et al., 2008).

Tabla 3-3: Propiedades de Emulsión Asfáltica Tipo CSS-1h.

Análisis	Resultado	Especificación		Método
		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
Destilación				
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

Fuente: (Núñez et al., 2008)

3.3. Criterios de Diseño

Conocidas las propiedades granulométricas de los agregados se procedió a desarrollar una combinación en porcentaje hasta obtener una granulometría que cumpla con los requisitos para mezclas de asfalto en frío según clasificación IV-12 del Manual de

Carreteras (Ministerio de Obras Públicas MC.V-5, 2008). La Figura 3-1 presenta la curva granulométrica de 4 combinaciones para el análisis del diseño final de mezcla de emulsión asfáltica en el orden gravilla $\frac{1}{2}$ pulgada, polvo de piedra Maipú, polvo de piedra Antuco y ceniza FBC, respectivamente (ver Anexo A: Tabla A-5).

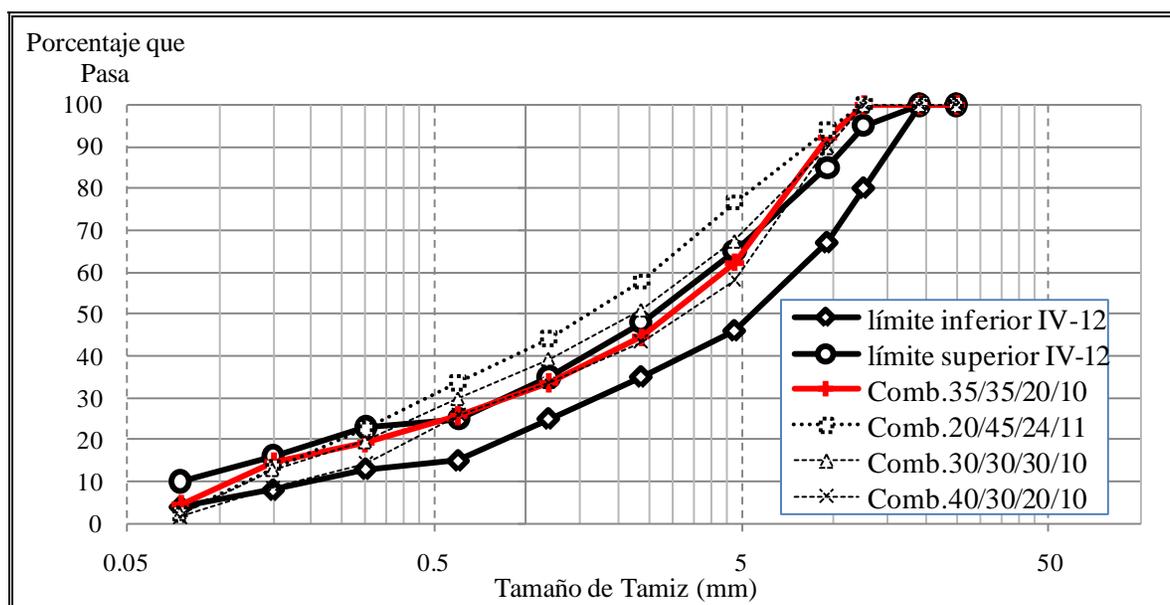


Figura 3-1: Combinaciones Granulométricas Gravilla; Polvo Roca Maipú; Polvo Roca Antuco; Ceniza FBC; para Diseño de Mezcla de Emulsión Asfáltica.

Fuente: Elaboración Propia.

De las curvas granulométricas obtenidas se puede apreciar que la combinación 40/30/20/10 presenta la curva más próxima a estar dentro de los requisitos de granulometría establecida; sin embargo esta combinación presentó una granulometría gruesa de aspecto áspero y baja cohesión por la ausencia de granos de tamaño medio. Finalmente se escogió como granulometría definitiva la combinación 35/35/20/10, sin embargo, la ausencia de partículas de tamaño medio en casi todas las combinaciones realizadas, no permitió obtener una granulometría completamente satisfactoria, resultado que se puede observar en la parte superior de esta curva granulométrica que se encuentra

fuera de la franja requerida. La Tabla 3-4 presenta los resultados granulométricos para la combinación de agregados escogida.

Tabla 3-4: Granulometría para Combinación 35/35/20/10 (Gravilla/Polvo piedra Maipú/Polvo piedra Antuco/ceniza FBC).

Tamiz		Peso Retenido (gr)	% Retenido	% Retenido Acumulado	% que Pasa	Especificación MC.V-5	
ASTM	mm					inferior	superior
3/4"	19	-	-	-	-	100	100
1/2"	12.5	-	-	-	100.00	80	95
3/8"	9.5	76.9	7.70	7.70	92.30	67	85
N° 4	4.75	299.65	29.99	37.68	62.32	46	65
N° 8	2.36	178.4	17.85	55.54	44.46	35	48
N° 16	1.18	109.15	10.92	66.46	33.54	-	-
N° 30	0.600	78.39	7.85	74.31	25.69	15	25
N° 50	0.300	66.49	6.65	80.96	19.04	13	23
N° 100	0.150	41.99	4.20	85.16	14.84	8	16
N° 200	0.075	102.39	10.25	95.41	4.59	4	10
fondo	0	45.87	4.59	100.00	0.00		

Fuente: Elaboración Propia.

Como se puede apreciar en la Tabla 3-4, los valores superiores se encuentran fuera de los rangos establecidos por MC.V-5, lo que origina una granulometría de aspecto ligeramente áspero y de granulometría abierta, lo que provoca una baja retención de humedad, cuyos resultados se verán en la sección 3.4. Para el diseño de mezcla de emulsión fue necesario obtener en primera instancia un porcentaje óptimo teórico de asfalto en función de las propiedades granulométricas del material y del tipo de material pétreo y su absorción. Para tal propósito se utilizó el método del Instituto del Asfalto, que se presenta a continuación.

a) Método del Instituto del Asfalto

Para determinar el porcentaje óptimo de asfalto en la mezcla se utilizó la ecuación 3.1 (Asphalt Institute).

$$\%E = \frac{0.032a + 0.045b + kc + K}{\%residuoemulsión} \quad (3.1)$$

donde: % E, porcentaje óptimo teórico de emulsión; a, % retenido acumulado en malla 2 mm; b, % pasa malla 2 mm y retiene en 0.075 mm; c, % pasa malla 0.74 mm (k= 0.20 si el valor c está entre 11 – 15%; 0.18 si el valor c está entre 6 – 10%; 0.15 si el valor c es menor de 5%); K, varía entre 0.0 a 2.0 (0.7 común) según el tipo de material pétreo y absorción. De acuerdo a la ecuación 3.1 y según los datos de granulometría de la Tabla 3-4 se determina un porcentaje óptimo teórico de emulsión igual a 8.0 %.

3.4. Compactación

Posteriormente se procede a determinar el porcentaje óptimo de humedad en función de la densidad seca del material granular mediante el ensayo Proctor Modificado según el MCV8 – 8.102 (MOP Ministerio de Obras Públicas MC.V-8, 2003). La Figura 3-2 presenta los resultados del ensayo de compactación para el material a utilizar para el diseño de emulsión asfáltica (ver Anexo A: Tabla A-6).

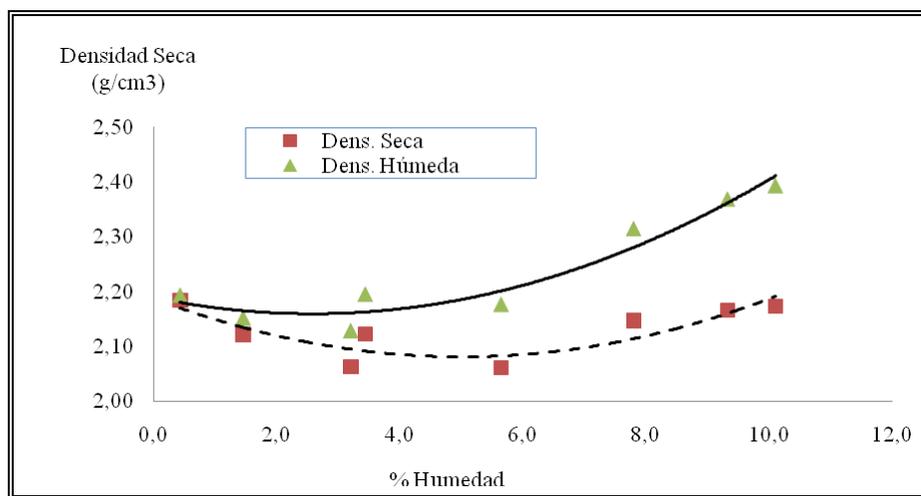


Figura 3-2: Determinación de % Óptimo de Humedad en Función de la Densidad Seca y Húmeda del Material.

Fuente: Elaboración Propia.

De la Figura 3-2 se determinó un porcentaje óptimo de humedad igual a 10% para una densidad en estado seca y húmeda de 2.17 y 2.38 respectivamente. La determinación de porcentaje óptimo de humedad presentó una curva sin una densidad máxima bien definida, debido a las características de los agregados y de la adición de ceniza dentro de la mezcla, observando la pérdida de humedad retenida en el material durante el proceso de compactación, para un porcentaje mayor a 10%.

3.5. Dosificación

Se determina el porcentaje de agua de mezclado que está en función de la humedad óptima de compactación, absorción de los agregados, % en emulsión; el cual permite obtener la mejor trabajabilidad y mejor recubrimiento de partículas (Rivera, 1998). Una vez obtenido el porcentaje óptimo de humedad del material se reduce por un factor 0.8 debido al efecto de fluidez que brinda la emulsión sobre la mezcla (Núñez et al., 2008); y además se disminuye el porcentaje de agua aportado por el tipo de emulsión en

función de su porcentaje residual de emulsión y considerando el porcentaje de absorción de los diferentes componentes granulares de la mezcla.

La Tabla 3-5 resume los resultados de dosificación para la elaboración de mezcla considerando materiales en estado seco y con un porcentaje de desperdicio de 4%, utilizadas para la elaboración de 6 probetas Marshall, variando el porcentaje de emulsión.

Tabla 3-5: Dosificación de Mezcla de Emulsión Asfáltica para 6 Probetas Marshall con Diferentes % de Emulsión Asfáltica.

Emulsión Asfáltica (6 probetas)				
% Emulsión	7.5	8.0	8.5	9.0
% Humedad Optima	10.0	10.0	10.0	10.0
Componentes	Peso de material (gr)			
Gravilla 1/2"	2512	2512	2512	2512
Polvo Roca Maipú	2512	2512	2512	2512
Polvo Roca Antuco	1435	1435	1435	1435
Ceniza FBC	718	718	718	718
Emulsión	538	574	610	646
Agua	375	362	348	335

Fuente: Elaboración Propia.

3.6. Propiedades

Posteriormente se elaboró probetas para determinar las propiedades de densidad, resistencia a tracción indirecta y resistencia retenida, las mismas que serán fundamentales para el criterio final de porcentaje óptimo de emulsión asfáltica. Se elaboraron probetas Marshall con mezcla de emulsión asfáltica tanto para condiciones en estado seco como saturado según el procedimiento indicado en la norma AASHTO T283-89 (AASHTO, 2001).

La resistencia a tracción indirecta se determina para dos condiciones de curado de las probetas, tanto en seco como en saturado. Para determinar la resistencia a tracción indirecta (ITS) se utiliza la ecuación 3.2, y para determinar la Resistencia Retenida (TSR) se presenta la ecuación 3.3.

$$ITS = \frac{2P}{\pi Dh} \quad (3.2)$$

donde: ITS, Resistencia a Tracción Indirecta, kPa; P, Carga máxima, kN; D, Diámetro de probeta, m; h, Altura de probeta, m.

$$TSR = \frac{ITS(saturado)}{ITS(seco)} \quad (3.3)$$

donde: TSR, Resistencia a Tracción Retenida; ITS (saturado), Resistencia tracción Indirecta en estado saturado, kPa ; ITS (seco), Resistencia tracción Indirecta en estado seco, kPa.

La Figura 3-3 y Figura 3-4 presenta los resultados de porcentaje óptimo de emulsión igual a 8% en base a la densidad y resistencia a tracción indirecta obtenida en laboratorio. Sin embargo, mediante el parámetro de TSR se determina la influencia del agua en la mezcla, considerando conveniente adoptar la resistencia ITS para un 8.5% de emulsión asfáltica, para el diseño de mezcla final (ver Anexo A: Tabla A-7).

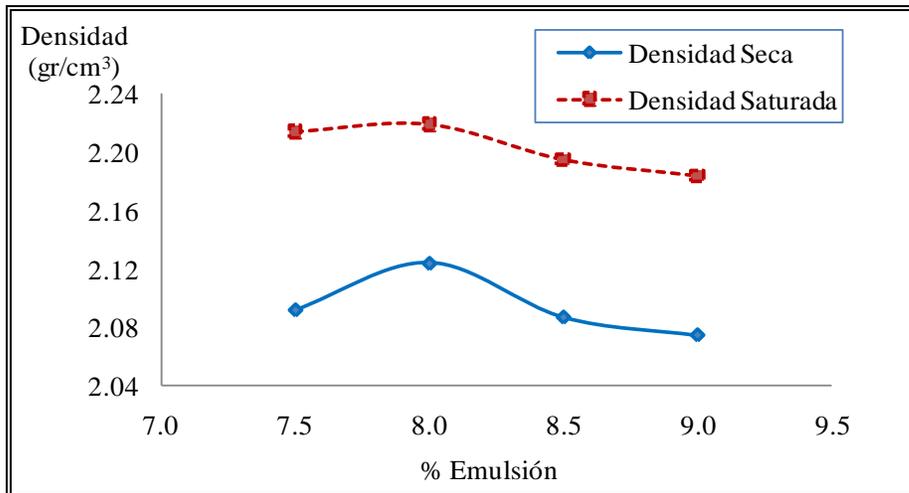


Figura 3-3: Densidad de Mezcla de AE para Distintos % de Emulsión.

Fuente: Elaboración Propia.

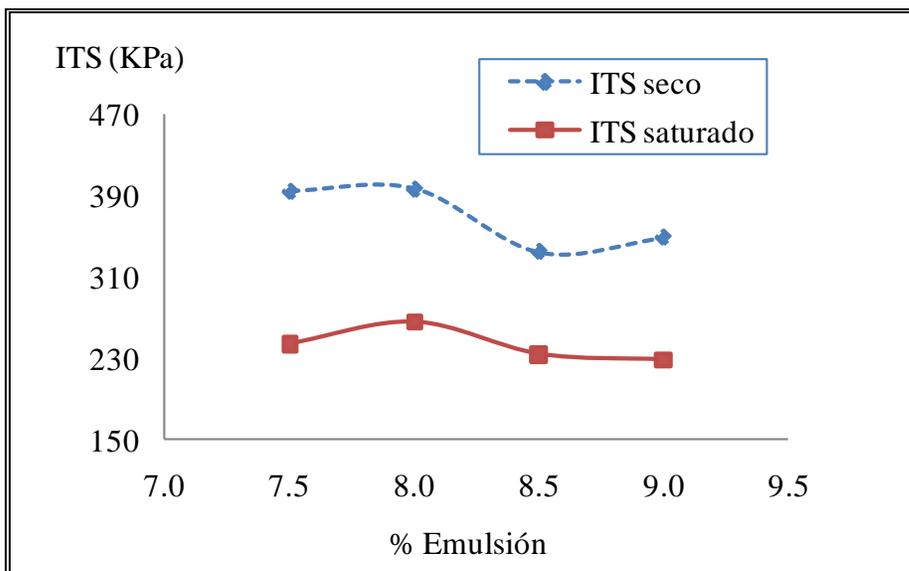


Figura 3-4: Resistencia Tracción Indirecta de Mezcla de AE para Distintos % de Emulsión.

Fuente: Elaboración Propia.

4. DISEÑO ESTRUCTURAL DE PAVIMENTO

4.1. Introducción

La capacidad estructural determina la durabilidad y desempeño de un pavimento durante su vida útil. Las variables requeridas para el diseño estructural son: el clima, tráfico, suelo de subrasante y condiciones de drenaje; y los parámetros para el diseño estructural son las propiedades de los materiales que conformarán su estructura (AASHTO, 1993).

Existen varias alternativas que son empleadas para el análisis estructural del pavimento, las mismas que pueden ser analíticas, empíricas, mecanicistas y una combinación de las anteriores (Huang, 2004). Para esta investigación se utilizó un método mecanicista donde es necesario determinar la relación que existen entre las fuerzas aplicadas al pavimento y las deformaciones y tensiones que ocurren por tales efectos. En función de esto es importante conocer las tensiones admisibles que pueden existir en los suelos granulares en función de su CBR% (ver Tabla 4-6).

Para determinar los módulos de cada capa se utilizó la ecuación 4.1 que permite conocer la relación que existe entre CBR% y su módulo (Thenoux, 2009).

$$\begin{aligned} Mr &= 17.6 * CBR^{0.64} && \text{_____} && 2 < CBR < 12 \\ Mr &= 22.1 * CBR^{0.55} && \text{_____} && 12 < CBR < 80 \end{aligned} \quad (4.1)$$

donde: Mr, módulo resiliente, MPa; CBR, capacidad de soporte, %.

4.2. Pavimento Flexible

Inicialmente para efectos comparativos entre métodos de diseño se utilizó un método empírico presentado por AASHTO (AASHTO, 1993). Como parámetro inicial de diseño se consideró un volumen de tránsito igual o menor a 1,000,000 de ejes equivalentes (EEq), valor correspondiente para vías de bajo volumen de tránsito (Rada et al., 1990). La Tabla 4-1 presenta un resumen de las variables y parámetros utilizados para el diseño

del pavimento flexible, así como los resultados obtenidos, expresados en espesores de las capas estructurales del pavimento, utilizando método AASHTO según la ecuación 4.2.

$$\log_{10}(W_{18}) = Z_R S_o + 9.36 \log_{10}(SN + 1) - 0.20 + \frac{\log_{10} \left[\frac{p_i - p_f}{4.2 - 1.5} \right]}{0.40 + \frac{1094}{(SN + 1)^{5.19}}} + 2.32 \log_{10}(M_R) - 8.07 \quad (4.2)$$

donde: W_{18} representa los Ejes Equivalentes de diseño, Z_R , nivel de confiabilidad; S_o , Desviación Estándar Combinada; SN, número estructural; p_i , índice de serviciabilidad inicial; p_f , índice de serviciabilidad final; M_R , Módulo Resiliente.

Tabla 4-1: Resultados de Diseño Estructural de Pavimento Flexible Utilizando Método AASHTO.

Pavimento Flexible		
VARIABLES Y PARÁMETROS DE DISEÑO:	Simbología	Valor
Ejes Equivalentes Diseño:	EEq	$\leq 1,000,000$
Índice de Serviciabilidad Inicial:	p_i	4.2
Índice de Serviciabilidad Final:	p_f	2.5
Capacidad de Soporte de Suelo:	CBR	17 %
Nivel de Confiabilidad (75%):	Z_r	-0.674
Desviación Estándar Combinada:	S_o	0.45
Calidad de Drenaje:		Buena
Tiempo de Saturación:		1-5 %
Resultados de Diseño:		
Número Estructural	SN	6.1
Espesor Concreto Asfáltico Superficie	D1	5.0 cm
Espesor Base Granular	D2	24.0 cm

Fuente: Elaboración Propia.

Posteriormente se analizó el pavimento mediante método mecanicista. Entre los parámetros requeridos como datos de entrada para el análisis estructural está los tipos y clasificación de capas del pavimento, espesores, su módulo y relación de Poisson. Información complementaria es requerida en relación al tipo de clima e importancia de la vía a diseñar. La Figura 4-1 presenta el esquema de pavimento asfáltico comúnmente utilizado en vías de bajo volumen de tránsito (residenciales) el cual fue considerado para el diseño estructural.

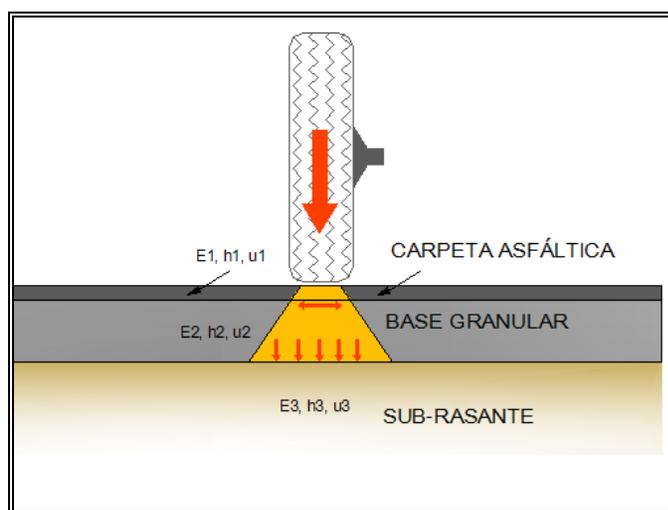


Figura 4-1: Sección Transversal Típica de Pavimento Asfáltico para Vías de Bajo Volumen de Tránsito.

Fuente: Elaboración Propia.

Para el cálculo estructural se utilizó el software sudafricano mePADS, el cual utiliza el procedimiento mecanicista para diseño estructural de pavimentos (Theyse, 1996). La interface del programa se presenta en el Anexo B: Tabla B-1 y Tabla B-2. La Tabla 4-2 resume los resultados obtenidos del análisis estructural del pavimento asfáltico considerando parámetros de diseño analizados mediante método mecanicista para pavimentos de bajo volumen de tránsito.

Tabla 4-2: Resultados de Diseño Estructural de Pavimento Asfáltico Usando Método Mecanicista (programa mePADS).

Capa Estructural	espesor (mm)	CBR (%)	Módulo (MPa)	Coefficiente Poisson	Carga/neumático (kN)	Presión (kPa)	Deformación (μ s)	Ejes Admisibles
Carpeta Asfáltica	50	-----	4,000.00	0.40	20	600	272	203,600
Base Granular	240	100	278.22	0.35			-----	-----
sub-rasante	-----	17	104.99	0.35			-518	1,425,000

Fuente: Elaboración Propia.

Para el diseño estructural del pavimento asfáltico se consideró espesores obtenidos del diseño estructural del pavimento mediante método AASHTO (ver Tabla 4:2), igual a 50 mm para capa asfáltica y 240 mm para espesor de base; un CBR de subrasante igual a 17%, considerándose un valor conservador para los tipos de suelo existentes en la zona; y para base un CBR de 100% mayor a los requerimientos mínimos (ver Tabla 4-5). El valor de CBR de subrasante fue comparado posteriormente por los resultados de mecánica de suelos presentados por DICTUC (ver Anexo C: Tabla C-1). La carga de 20 kN representa la fuerza ejercida por un neumático de eje standard según AASHTO (peso total 80 kN), con una presión de neumático de 600 kPa (AASHTO, 1993).

Entre los resultados obtenidos en el diseño, está la deformación unitaria originada tanto en la capa asfáltica como en la subrasante, expresada en microstrain, considerando signo positivo cuando las deformaciones son debido a esfuerzos de tensión, y negativo cuando las deformaciones son debido a esfuerzos de compresión. Con esto se determinó la tensión provocada en el suelo de subrasante igual a 68 kPa, y se comparó con la tensión admisible para un CBR 17%, igual a 190 kPa (ver Tabla 4-6), cumpliendo con la capacidad de soporte del suelo.

De los resultados obtenidos mediante ambos métodos y considerando las mismas dimensiones de espesores y propiedades para ambos casos; se puede apreciar que existe

una diferencia entre los resultados analizados y/o entregados, siendo el parámetro comparativo los Ejes Equivalente Admisibles, donde se considera una vía de bajo volumen de tránsito cuando el tránsito estimado es menor a 1,000,000 EEq; donde el método AASHTO cumple con los requisitos admisibles, mientras que para el método mecanicista no cumpliría para la superficie de rodado. Sin embargo, los parámetros considerados por método AASHTO son de carácter empírico y no reflejan fielmente el comportamiento en terreno de los materiales, por lo cual, dichos resultados son considerados en esta investigación como valores referenciales de diseño.

4.3. Pavimento Articulado

Existen diversos métodos de diseño estructural para pavimentos articulados construidos con bloques de concreto (adocretos), presentado diversas limitaciones debido a una inadecuada caracterización de suelo de subrasante y materiales del pavimento, baja confiabilidad en la predicción de su desempeño e inexistencia de fallas específicas en el diseño de pavimento y niveles de confiabilidad (Rada et al., 1990).

Para el análisis estructural del pavimento articulado es indispensable determinar ciertas características y propiedades mecánicas de cada uno de los elementos que lo conforman; para lo cual se usó el mismo método mecanicista utilizado para pavimento flexible. Entre los parámetros necesarios a determinar está: tipo de capa estructural, espesores, coeficiente de Poisson y su módulo. La Figura 4-2 detalla los parámetros necesarios a determinar para el análisis estructural de un pavimento articulado.

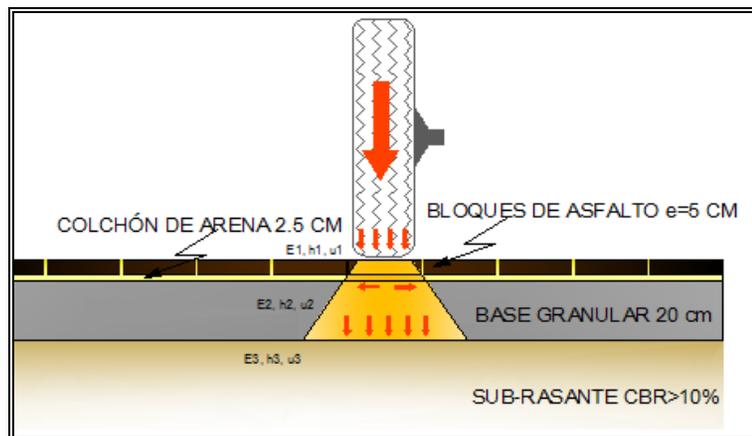


Figura 4-2: Sección Transversal Propuesta de Pavimento Articulado para Vías de Bajo Volumen de Tránsito.

Fuente: Elaboración Propia.

Uno de los parámetros más importantes de determinar era el módulo de la capa estructural de capa de rodado con bloques de asfalto, para lo cual se utilizó el ensayo de deflectometría de impacto (FWD) sobre un pavimento a escala real; el cual permite evaluar la capacidad estructural del pavimento mediante el uso de método de ensayo no destructivo, que consiste en aplicar una carga bajo condiciones dinámicas, estáticas, por impacto, cuyos resultados ayudan a determinar en cada estructura del pavimento, las deformaciones o deflexiones asociadas a la sollicitación inducida (cargas), y así poder definir su capacidad para soportar las cargas vehiculares (Pérez et al., 2004). La Figura 4-3 presenta un esquema del ensayo FWD sobre una estructura de pavimento, y la Figura 4-4 presenta una gráfica de los resultados obtenidos de deflexión de un solo punto de ensayo, según la distancia de cada transductor (geófonos) de deflexión, con respecto al plato de carga central del equipo; y cada curva representa la envolvente de esfuerzos y deflexión para cada magnitud de carga aplicada en el mismo punto de ensayo, la misma que está en función de la altura de caída del plato de carga al momento del ensayo.

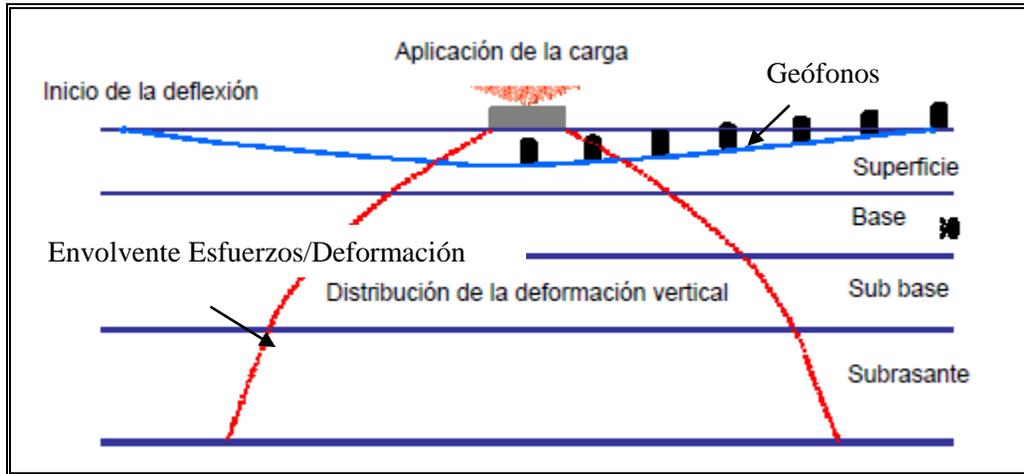


Figura 4-3: Esquema de Ensayo de Deflectometría de Impacto FWD sobre Estructura de Pavimento.

Fuente: (Pérez et al., 2004)

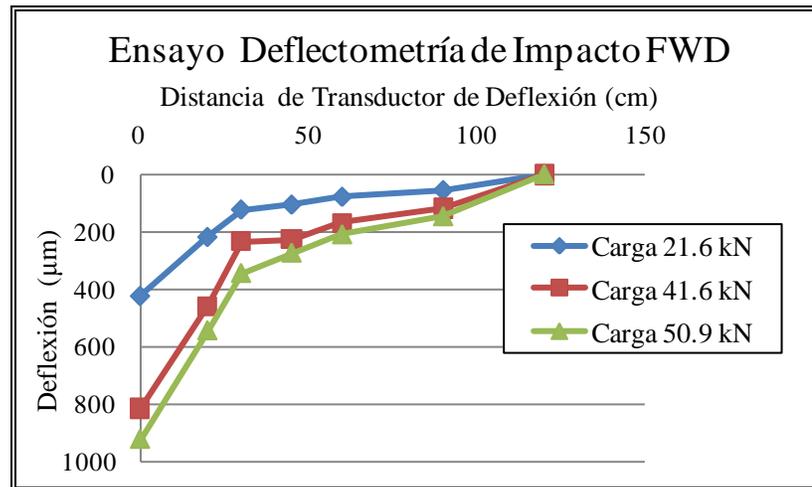


Figura 4-4: Resultado de Deflexión en Ensayo de Deflectometría de Impacto FWD en un Punto sobre Estructura de Pavimento Articulado.

Fuente: Archivo Personal.

Para la obtención del módulo de cada capa del pavimento se analizó mediante el método de retrocálculo especificado por AASHTO (AASHTO, 1993) el cual consiste en un mecanismo de evaluación, usualmente análisis elástico de los cuencos de deflexión de una superficie de pavimento, generado por varios dispositivos de deflexión. Este procedimiento es iterativo y normalmente hecho con software que pueda procesar sobre microcomputadores. Esta técnica tiene como finalidad determinar los módulos de las capas que componen el pavimento; que de acuerdo al análisis estructural de multicapas, existe un conjunto de módulos tal, que la deflexión teórica calculada es equivalente a la deflexión medida en el pavimento. Entre los parámetros que requieren ser conocidos está los espesores de las capas y el coeficiente de Poisson, el mismo que está en función del tipo de material. Las ecuaciones utilizadas para proceso de retrocálculo se presentan a continuación:

$$M_R = \frac{0.24P}{d_r r} \quad (4.3)$$

donde: M_R , módulo de subrasante retrocalculado, psi; P , carga aplicada, libras; d_r , deflexión a la distancia r desde el centro de plato de carga, pulgadas; r , distancia desde el centro de plato de carga, pulgadas. Además se debe cumplir la igualdad:

$$r \geq 0.7a_e \quad (4.4)$$

donde:

$$a_e = \sqrt{\left[a^2 + \left(D^3 \sqrt{\frac{E_p}{M_R}} \right)^2 \right]} \quad (4.5)$$

donde: a_e , radio del bulbo de tensiones sobre la interface subrasante/pavimento, pulgadas; a , radio de plato de carga, pulgadas; D , espesor total de las capas del pavimento que están sobre la subrasante, pulgadas; E_p , módulo efectivo de todas las capas del pavimento que están sobre la subrasante, psi.

Además, si se conoce o se asume el módulo resiliente de la subrasante y espesor total de las capas del pavimento que se encuentran sobre la subrasante; es posible determinar el módulo efectivo de toda la estructura del pavimento (todas las capas sobre la subrasante), mediante la determinación de la medida de deflexión en el centro del plato de carga, usando la ecuación 4.6:

$$d_0 = 1.5pa \left\{ \frac{1}{M_R \sqrt{1 + \left(\frac{D}{a} \sqrt{\frac{E_p}{M_R}} \right)^2}} + \frac{\left[1 - \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{D}{a} \right)^2}} \right]}{E_p} \right\} \quad (4.6)$$

donde: d_0 , medida de deflexión en el centro del plato de carga, pulgadas; p , presión de plato de carga, psi; a , radio de plato de carga, pulgadas; D , espesor total de las capas del pavimento sobre la subrasante, pulgadas; M_R , módulo resiliente de la subrasante, psi; E_p , módulo efectivo de todas las capas del pavimento sobre la subrasante, psi.

Para el proceso de retrocálculo iterativo se utilizó el programa EVERCAL, cuyos resultados obtenidos no son únicos ni exactos, y que requiere una serie de reiteraciones y condiciones para ajustar la solución. En resumen, este programa calcula las deflexiones teóricas y las va comparando con las deflexiones medidas, ajustando por iteración los valores de los módulos hasta obtener una diferencia entre las deflexiones calculadas y las deflexiones medidas que se considera adecuada. Esta diferencia de resultados es medida mediante el criterio de Error Cuadrático Medio (RMS), que se encuentra representado por la ecuación 4.7 (Washington State Department of Transportation, 2005).

$$RMS(\%) = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{d_{ci} - d_{mi}}{d_{mi}} \right)^2} \times 100 \quad (4.7)$$

donde: RMS, error cuadrático medio; d_{ci} , deflexión calculada en la superficie del pavimento en sensor i ; d_{mi} , deflexión medida en la superficie del pavimento en sensor i ; n , número de sensores usados en el proceso de retrocálculo.

Los resultados obtenidos del ensayo de deflectometría de impacto FWD y analizados mediante retrocálculo para la capa de bloques de asfalto se presentan en la Tabla 4-3 y se detallan en el Anexo B: Tablas: B-7, B-8, B-9 y B-10; y Anexo C; Tabla C-7. El promedio Normalizado tiene relación con el diseño de carga estándar utilizado por Sudáfrica igual a 40 kN correspondiente a un eje simple de rueda doble (basado en la carga de eje legal de 80 kN permitido para vías de servicio público), con una separación entre el centro de las llantas de 350 mm y una presión uniforme de contacto de 520 kPa (Theyse, 1996).

Tabla 4-3: Resultados de Módulo Utilizando Deflectometría de Impacto sobre Pavimento Articulado de Bloques de Asfalto mediante Análisis de Retrocálculo con Programa EVERCALC.

Descripción de Resultados	Módulo Carpeta Adofaltos E(1)(MPa)	Desviación Standard (MPa)	Coef.Variación (%)
Promedio General	2930	1103	38
Promedio Normalizado	2494	1107	44

Fuente: Elaboración Propia.

Los resultados obtenidos de módulo para la capa de bloques asfálticos más colchón de arena fue obtenido de una muestra total de 57 puntos de ensayo (3 cargas por punto de ensayo); los mismos que presentan una alta desviación estándar y coeficiente de variación, esto debido a la alta variabilidad que existe tanto en la elaboración del ensayo mismo en terreno por factores como magnitud y duración de la carga, propiedades no

lineales de los materiales que conforman el pavimento, temperatura y humedad, condiciones que se encuentra el pavimento, etc.; así como en el método utilizado y sus consideraciones para el análisis, especialmente con mayor atención para carpetas asfálticas (Pérez et al., 2004). Considerando el módulo obtenido del promedio normalizado de resultados, se obtuvo un rango aproximado del valor de módulo de capa de bloques asfáltico más colchón de arena entre [1400 MPa – 3600 MPa]. Una vez determinado el módulo de la capa de bloques de asfalto se procedió a modelar en el programa mecanicista utilizado para pavimentos asfálticos (mePADS) con los mismos parámetros indicados en la Tabla 4-4, y presentando en detalle en Anexo B: Tabla: B-3, B-4, B-5 y B-6. Así mismo, se calculó la tensión máxima soportada por la subrasante igual a 55 KPa, siendo menor a la tensión admisible de 190 KPa según Anexo B: Tabla B-6 y Tabla 4-6, respectivamente. Para el análisis mecanicista de la estructura del pavimento se determinó inicialmente un módulo para la capa de rodado compuesta por bloques de asfalto igual a 2500 MPa; sin embargo se recomienda considerar un módulo entre 700 MPa – 1400 MPa, según el manual de usuario del programa de análisis de retrocálculo EVERSERIES, para rangos iniciales tentativos de módulo para un pavimento de mezcla asfáltica en caliente con presencia menor a 10% de grietas sobre la huella de rodado del pavimento (Washington State Department of Transportation, 2005); y un rango entre 350 MPa – 3100 MPa para un módulo compuesto de pavimento articulado de bloques de concreto (Rada et al., 1990).

Tabla 4-4: Resultados de Diseño Estructural de Pavimento Articulado de Bloques de Asfalto Utilizando Programa mePADS.

Capa Estructural	espesor (mm)	CBR (%)	Módulo (MPa)	Coef. Poisson	Carga/neumát (kN)	Presión (kPa)	Def.Unit. (μs)	Ejes Admisible
Capa Bloque de Asfalto	50	-----	2500	0.40	20	600	309	105,300
Base Granular	240	100	278.22	0.35			-----	-----
sub-rasante	-----	17	104.99	0.35			-551	770,400

Fuente: Elaboración Propia.

De los resultados obtenidos y comparados con la Tabla 4-1, se puede apreciar que al tener un menor módulo la capa de rodado de bloques de asfalto, origina mayores deformaciones horizontales y verticales sobre las capas de rodado y de subrasante, respectivamente.

Sin embargo, es importante tener precaución al analizar los resultados obtenidos mediante el uso de método mecanicista, en función de las variables y propiedades de ingreso para cada capa analizada. Entre estas observaciones se encuentra el tipo de capa ingresada para el análisis de la superficie de rodado, ya que no existe una nomenclatura exacta para un tipo de pavimento asfáltico articulado, asignándole un tipo de capa asfáltica continua AC (ver Anexo B: Tabla B-3), donde el método utilizado considera un pavimento como un medio multicapas de ancho infinito y espesor definido, y en donde el comportamiento de los materiales se basa en la teoría de la elasticidad. De la misma manera, las tensiones y deformaciones entregadas por mePADS son el resultado de un análisis mecanicista sobre una capa continua de asfalto como capa de rodado bajo las condiciones de carga dada. Además, la vida útil de la capa asfáltica representada en millones de ejes equivalente, es determinada en base a modelos analizados previamente en función del agrietamiento por fatiga bajo cargas repetitivas de tránsito y en función de la categoría del camino (Theyse, 1996); estudios que aún no se han desarrollando para este tipo de pavimento articulado con bloques asfálticos. En la Figura 4-5 y Figura 4-6 se representan estas particularidades del análisis estructural para un mejor entendimiento comparativo entre estos dos tipos de pavimentos asfálticos.

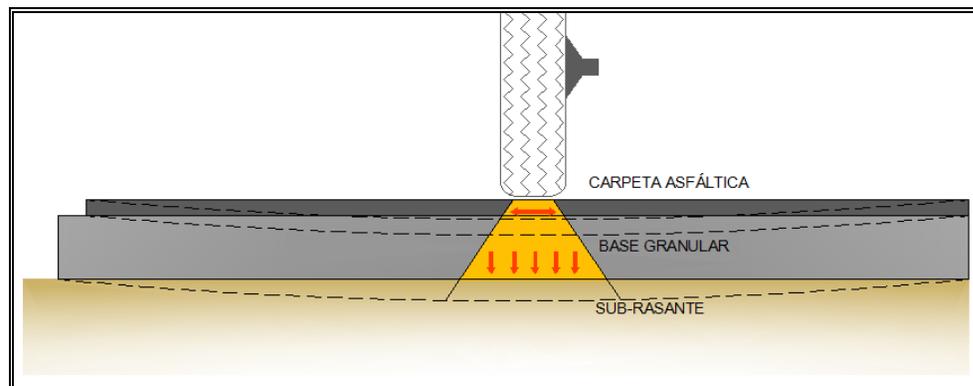


Figura 4-5: Tensiones y Deformaciones en Pavimento Asfáltico bajo Cargas de Tráfico.

Fuente: Elaboración Propia.

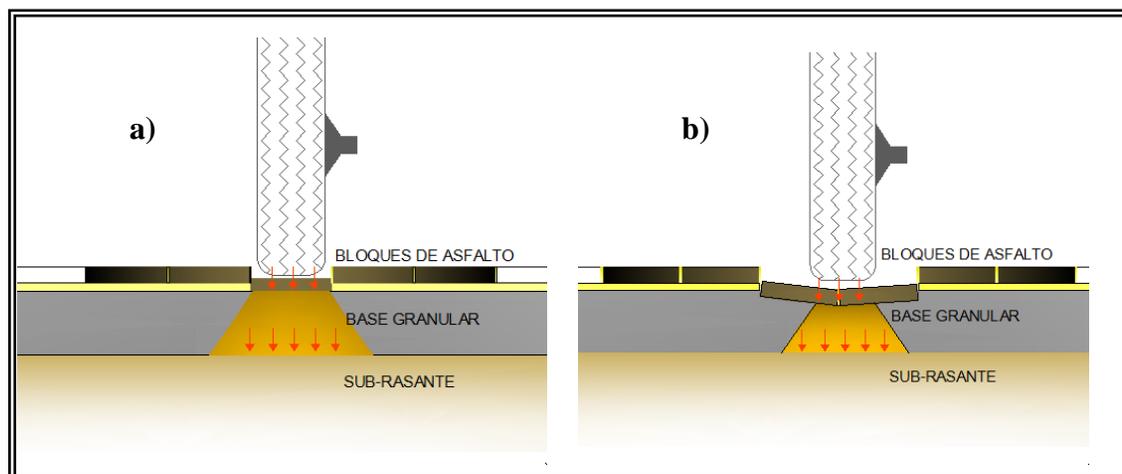


Figura 4-6: Posibles Tensiones y Deformaciones en Pavimento Articulado bajo Condiciones de Carga: a) Bajo un Bloque Asfáltico, b) En Medio de Dos Bloques Asfálticos.

Fuente: Elaboración Propia.

Una vez representadas las posibles tensiones y deformaciones dadas en un pavimento articulado de bloques de asfalto, es necesario analizar las propiedades y características de los elementos estructurales que componen esta estructura del pavimento.

4.3.1. Bloque Asfáltico

Como se mencionó anteriormente, el desempeño de un pavimento de bloques de concreto depende de la trabazón ejercida entre estos, y en menor grado, de su forma y espesor. Además, esta trabazón depende de la forma de colocación patrón, así como del espesor de colchón de arena. La forma de los bloques tiene más un efecto sobre su comportamiento mecánico, considerando que en una sección transversal uniforme no presentaría agrietamiento tan fácilmente como una de sección transversal de espesor variable. El espesor de bloque afecta primordialmente el comportamiento mecánico, sin embargo un aumento de este representa un incremento en la capacidad estructural del pavimento.

En función de esto, es importante determinar las dimensiones y forma del bloque a utilizar como superficie de rodado. Para ello se determinó la impronta circular en función del análisis de carga de rueda doble y presión de neumático sobre el pavimento, y se detalla en la ecuación 4.8

$$a = \sqrt{\frac{P}{\pi \cdot q}} \quad (4.8)$$

donde a , representa radio de impronta circular, m; P es Carga de Rueda, kN; q es Presión de neumático, kPa. Para el cálculo de impronta circular se utilizó una carga de rueda de 20 kN para un eje simple rueda doble (ESRD), presión de neumático de 600 kPa obteniendo un radio de 10.3 cm lo que equivale a una superficie de 333.3 cm²; donde la superficie obtenida es dada para una impronta de forma circular sobre el pavimento bajo ciertas condiciones de carga.

Para comprobar y obtener la superficie de contacto entre la rueda y el pavimento, se utilizó además el método presentado en la Figura 4-7, que fue empleado por Portland Cement Association (PCA) en 1966 (Huang, 2004), cuya ecuación se presenta a continuación.

$$L = \sqrt{\frac{Ac}{0.5227}} \quad (4.9)$$

donde L, longitud total de contacto para cada rueda en m; Ac, área de contacto la misma que es obtenida por la división de la carga de cada rueda por la presión de la misma, en m². De esta forma se determinó para los valores dados de carga de rueda y presión del neumático, un área de contacto de 0.0330 m². Actualmente la PCA (1984) considera una superficie de impronta con longitud de 0.8712 L y ancho 0.6 L, lo que representa a la misma superficie de contacto sugerida por la ecuación 4.8 y 4.9. Las dimensiones calculadas se representan en la Figura 4-7.

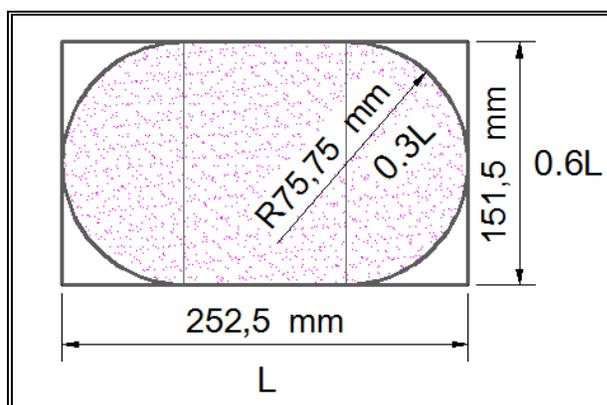


Figura 4-7: Cálculo de Impronta Circular.

Fuente: Elaboración Propia.

En función de los resultados obtenidos, se decidió proponer una forma rectangular para el bloque asfáltico con dimensión de 15 cm x 25 cm de lado. Con esta nueva dimensión se calcula el área del bloque igual a 375 cm², que para resistir una presión de neumático igual a 600 kPa, se determina la carga máxima que puede soportar el bloque mediante la igualdad de $P=F/A$ dando una fuerza máxima igual a 22.5 kN, siendo este valor mayor al de diseño, cumpliendo con las condiciones de carga requeridas.

De los resultados obtenidos se puede asumir que el bloque de asfalto estará trabajando a compresión sobre la superficie de la calzada cuando este directamente bajo una carga de

una rueda, e incluso cuando el neumático se coloque bajo dos bloques de asfalto, tal como se presentó en la Figura 4-6. La Figura 4-8 presenta un detalle de las dimensiones adoptadas para la fabricación de bloque de asfalto.

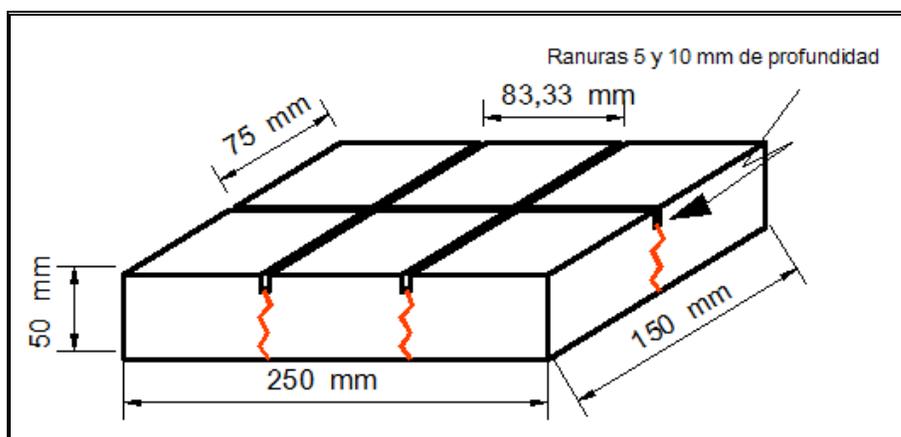


Figura 4-8: Dimensionamiento del Bloque Asfáltico.

Fuente: Elaboración Propia.

4.3.2. Base/Sub-base Granular

Para este tipo de pavimento de bajo volumen de tránsito es común utilizar capa de base y subbase granular. Para el análisis de diseño se empleó valores mínimos recomendados de CBR igual a 80% y 40% para bases y subbases granulares, respectivamente; así como los espesores mínimos recomendados por el MOP; y que se presentan en la Tabla 4-5.

Tabla 4-5: CBR y Espesores Mínimos para Capas Granulares de Base y Sub-base.

Tipo de Capa Estructural	CBR % (mín)	Espesor mm. (mín)
Base Granular	80	150
Sub-base Granular	40	150

Fuente: (Ministerio de Obras Públicas: MC.V-3 2005; MC.V-5 2008)

4.3.3. Subrasante

Para el análisis de subrasante es importante determinar las condiciones de tensiones y deformaciones que existirán bajo ciertas condiciones de carga. Para ello se utilizará el método mecanicista sudafricano indicado anteriormente para análisis estructural de pavimentos, sin considerar el aporte estructural de la capa de bloques de asfalto, y sí el de las capas granulares que componen el pavimento. Según las propiedades y espesores de las capas granulares indicadas anteriormente, se determina las tensiones originadas en la superficie de la subrasante, las cuales serán comparadas con las tensiones admisibles del suelo de fundación en función de su CBR, las mismas que se presentan en la Tabla 4-6.

Tabla 4-6: Tensiones Admisibles del Suelo en Función de CBR%.

CBR (%)	Mr (MPa)	Tensión admisible del suelo		
		psi	kg/cm ²	kPa
4	42.7	10	0.7	69
5	49.3	11	0.77	76
6	55.4	12	0.84	83
7	61.1	14	0.98	97
8	66.6	16	1.13	110
9	71.8	18	1.27	124
10	76.8	20	1.41	138
14	94.3	24	1.69	165
15	98.0	26	1.83	179
20	114.8	30	2.11	207
24	126.9	34	2.39	234
25	129.8	35	2.46	241
35	156.2	40	2.81	276
50	190.0	50	3.52	345
100	278.2	-----	-----	900

Fuente: (Thenoux, 2009)

El objetivo es determinar la capacidad mínima de soporte que debe tener un suelo de subrasante para resistir condiciones de carga bajo ciertos dimensionamientos de estructura de pavimento. Se analizó para la situación más crítica, donde se asume que existe una transferencia de carga directa a través de la capa de bloques de asfalto, no considerando su aporte estructural en el pavimento.

Además se utilizó el método propuesto por SHELL para evaluar el módulo elástico de un sistema de pavimento compuesto por capas granulares, cuya ecuación se detalla a continuación (Shell International Petroleum Company Limited, 1978).

$$E_i = kE_{i+1} \quad (4.10)$$

$$k = 0.2h_j^{0.45} \quad \text{donde } 2 < k < 4$$

donde: E_i , módulo elástico de capa i ; E_{i+1} , módulo elástico de capa inferior $i+1$; h_j , espesor capa i en mm. El análisis estructural se analizó para tres diseños comúnmente utilizados para este tipo de pavimentos de bajo volumen de tránsito con dimensiones de espesor de capa de base 20 y 30 cm; base y subbase con 15 cm cada una. En cada caso se consideró CBR de 80% y 40% para base y sub-base, relación de Poisson 0.35 para suelos granulares, carga de neumático de 20 kN y una presión de inflado de 600 kPa.

La Tabla 4-7 presenta los resultados obtenidos de tensiones de subrasante considerando una base de 20 cm, y la Tabla 4-8 presenta los resultados para el mismo caso, pero evaluando el módulo de las capas granulares mediante método Shell, según ecuación 4.10.

Tabla 4-7: Tensiones Existentes en Subrasante en Función de CBR, Bajo Estructura de Pavimento con 20 cm de Base.

CBR (%)	Módulo Subrasante (MPa)	Tensión (kPa)	Tens.Adm (kPa)	Deformación Unitaria ($\mu\epsilon$)
20	114.80	140	207	1225
15	98.00	133	179	1339
14	94.35	129	165	1391
10	76.83	119	138	1566
8	66.60	112	110	1695
7	61.15	108	97	1784
6	55.40	103	83	1885
4	42.74	91	69	2135

Fuente: Elaboración Propia.

Tabla 4-8: Tensiones Existentes en Subrasante en Función de CBR, bajo una Estructura de Pavimento igual a 20 cm de Base, considerando Shell para Módulo de Base.

CBR %	Módulo Subrasante (MPa)	Módulo Base (SHELL) (MPa)	Tensión (kPa)	Tensión Adm. (kPa)	Deformación ($\mu\epsilon$)
20	114.80	249.0	139.8	207	1227
15	98.00	213.0	139.6	179	1438
14	94.35	205.0	139.5	165	1497
11	81.66	177.0	140.0	145	1723
10	76.83	167.0	139.8	138	1831
9	71.82	156.0	139.9	124	1959
8	66.60	145.0	139.9	110	2106
7	61.15	133.0	139.5	97	2308

Fuente: Elaboración Propia.

La Tabla 4-9 presenta los resultados obtenidos de tensiones de subrasante considerando una base y subbase de 15 cm de espesor, y la Tabla 4-10 presenta los resultados para el mismo caso pero evaluando el módulo de las capas granulares mediante método Shell según ecuación 4.10, considerando una sola capa de materiales granulares de 30 cm de espesor.

Tabla 4-9: Tensiones Existentes en Subrasante en Función de CBR bajo una Estructura de Pavimento de 15 cm de Base y 15 cm de Subbase.

CBR %	Módulo Subrasante (MPa)	Tensión (kPa)	Tensión Adm. (kPa)	Deformación (μ s)
20	114.80	76	207	678
15	98.00	72	179	754
10	76.83	65	138	878
9	71.82	63	124	914
5	49.30	54	76	1134
3	35.55	46	62	1324

Fuente: Elaboración Propia.

Tabla 4-10: Tensiones Existentes en Subrasante en Función de CBR, bajo Pavimento de 15 cm de Base y 15 cm de Subbase, considerando Shell para Cálculo de Módulo.

CBR %	Módulo Subrasante (MPa)	Módulo Subbase SHELL (MPa)	Módulo Base SHELL (MPa)	Tensión (kPa)	Tensión Adm. (kPa)	Deformación (μ s)
20	114.80	219.00	417.00	64	207	581
15	98.00	187.00	356.00	64	179	681
10	76.83	146.00	279.00	65	138	868
9	71.82	137.00	261.00	65	124	928
3	35.55	68.00	129.00	65	62	1863

Fuente: Elaboración Propia.

La Tabla 4-11 presenta los resultados obtenidos de tensiones de subrasante considerando una base de 30 cm de espesor. Los resultados analizados para el mismo caso pero evaluando el módulo de las capas granulares mediante método Shell, según ecuación 4.10, se presentan en la Tabla 4-12.

Tabla 4-11: Tensiones Existentes en Subrasante en Función de CBR%, bajo Pavimento 30 cm de Base.

CBR %	Mód. Subrasante (MPa)	Tensión (kPa)	Tensión Adm. (kPa)	Deformación (μ s)
20	114.80	72	207	641
15	98.00	67	179	706
10	76.83	60	138	811
8	66.60	57	110	881
3	35.55	41	62	1191

Fuente: Elaboración Propia.

Tabla 4-12: Tensiones Existentes en Subrasante en Función de CBR%, bajo Pavimento 30 cm de Base, considerando Shell para Cálculo de Módulo.

CBR %	Módulo Subrasante (MPa)	Módulo Base SHELL (MPa)	Tensión (kPa)	Tensión Adm. (kPa)	Deformación (μ s)
20	114.80	219.00	75	207	673
15	98.00	187.00	75	179	789
13	90.59	173.00	75	158	851
12	86.68	165.00	75	152	890
10	76.83	146.00	75	138	1006
5	49.30	94.00	75	76	1575

Fuente: Elaboración Propia.

De los resultados obtenidos de tensiones originadas en la subrasante para las tres alternativas de diseño de capas granulares presentadas para un pavimento articulado con bloques de asfalto, se puede apreciar que para el primer caso con una base de 20 cm de espesor, el método Shell es más conservador al no permitir suelos con CBR% menor al 10%. Para la segunda alternativa de capa de 15 cm de base y 15 cm de subbase, el análisis de Shell sigue siendo más conservador al no permitir suelos con CBR% menor al 4%. Y para la última alternativa con una base de 30 cm de espesor se puede observar que el método Shell sería el más conservador al no permitir un suelo con CBR% menor al 5%.

Sin embargo, existe un parámetro importante dentro de todo el análisis estructural de los pavimentos con las distintas alternativas presentadas, como es la deformación unitaria máxima originada sobre el suelo de subrasante. En función de esto, y conociendo la relevancia de dicho parámetro en el comportamiento estructural y funcional de un pavimento, se presenta la ecuación 4.11 propuesta por Edwards y Valkering para determinar los ejes Equivalente (EEq) admisibles del suelo en función de la deformación unitaria vertical máxima (Thenoux, 2009), la cual permitirá obtener un segundo parámetro para criterio de diseño de la estructura del pavimento articulado.

$$N_{adm.suelo} = 6.146 \times 10^{-7} \cdot \varepsilon_z^{-4} \quad (4.11)$$

donde: $N_{adm.suelo}$, capacidad máxima de tránsito en millones de EEq; y, ε_z , deformación unitaria vertical máxima del suelo. En base a esto, se determinó la deformación máxima del suelo que puede existir para un $N_{adm.suelo}$ menor o igual a 1,000.000 de EEq, que corresponde a un promedio del tránsito para una vía de bajo volumen, obteniendo que un suelo de subrasante podrá tener un valor máximo de 885 $\mu\varepsilon$.

Como resultado de este análisis podemos determinar que las alternativas que cumplen con los requisitos de tensiones admisibles y deformaciones máximas del suelo de subrasante son la estructura compuesta por base y subbase de 15 cm de espesor cada una

para un CBR de subrasante no menor a 10%; y para una estructura compuesta por una base de 30 cm con un CBR de subrasante no menor a 12%.

Mediante el análisis estructural realizado sobre el pavimento de tipo articulado construido con bloques de asfalto, se determinó dos alternativas de diseño, utilizando parámetros conocidos y determinados, mediante método mecanicista mePADS. Una primera alternativa es la construcción de un pavimento articulado compuesto por un suelo de subrasante con CBR no menor a 10%, una capa de subbase con 15 cm de espesor y con CBR 40% mínimo; una capa de base de 15 cm de espesor con un CBR 80% mínimo y finalmente una capa de bloques asfálticos de 5 cm de espesor con una sección de 15 x 25 cm y apoyados sobre un colchón de arena de 1 cm de espesor. Los detalles de la sección transversal se presentan en la Figura 4-9.

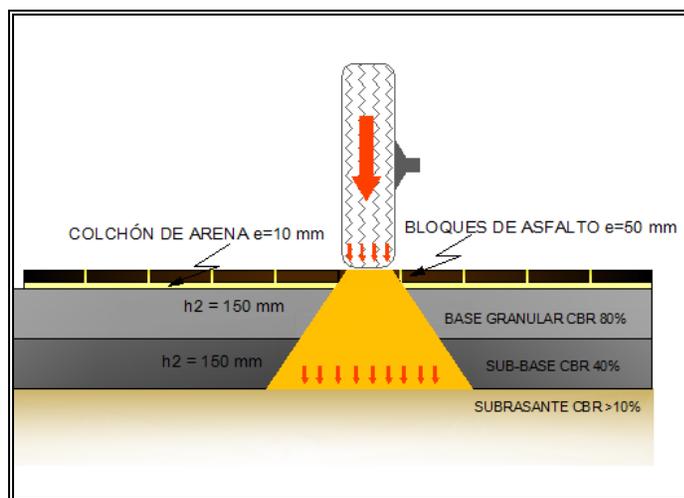


Figura 4-9: Alternativa 1 Pavimento Articulado con Bloques de Asfalto

Fuente: Elaboración Propia.

La segunda alternativa es la construcción de un pavimento articulado compuesto por un suelo de subrasante con CBR no menor a 12%, una capa de base con 30 cm de espesor y con CBR 80% mínimo; y finalmente una capa de bloques asfálticos de 5 cm de espesor

con una sección de 15 x 25 cm y apoyados sobre un colchón de arena de 1 cm de espesor aproximado. Los detalles de la sección transversal se presentan en la Figura 4-10.

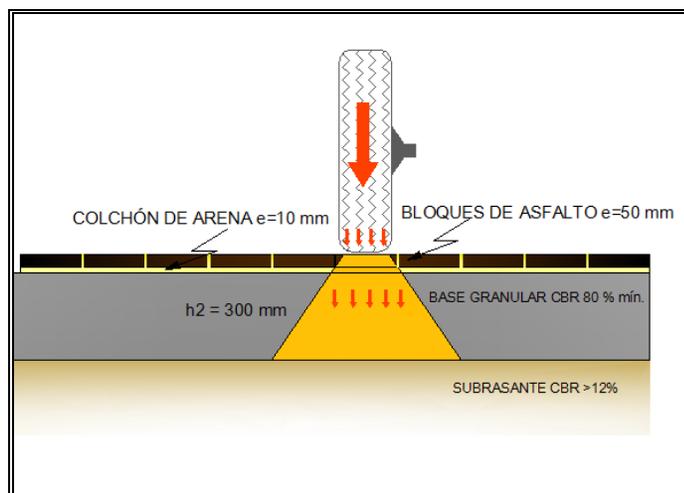


Figura 4-10: Alternativa 2 Pavimento Articulado con Bloques de Asfalto

Fuente: Elaboración Propia.

Además, para fines comparativos se realizó un diseño de pavimento articulado de bloques de concreto mediante método AASHTO (Rada, 1990). La Tabla 4-13 presenta los resultados de diseño en función de las variables y parámetros de diseño para pavimento articulado de bloques de concreto.

Tabla 4-13: Resultados de Diseño de Pavimento Articulado de Bloques de Concreto por Método AASHTO.

Pavimento Articulado de Bloque de Concreto		
Variables y Parámetros de Diseño:	Simb.	Valor
Ejes Equivalentes Diseño EEq:	EEq	$\leq 1,000,000$
Clasificación de Suelo:	-----	GC
Capacidad de Soporte de Suelo:	CBR	17 %
Capacidad de Soporte de Base	CBR	80 %
Nivel de Confiabilidad (75%):	Fr	2.010
Calidad de Drenaje:		Buena
Tiempo de Saturación:		1-5 %
Resultados de Diseño:		
Espesor Bloque de Concreto	D1	80.0 mm
Espesor Base Granular	D2	18.0 cm

Fuente: Elaboración Propia.

5. PRUEBAS DE TERRENO Y LABORATORIO

Para la ejecución de ensayos de laboratorio en terreno se construyó un tramo de prueba con una superficie aproximada de 200 m², ubicada en el campus San Joaquín de la Universidad Católica; donde se implementó una estructura de pavimento asfáltico con características de pavimento de bajo volumen de tráfico, tal como se muestra en la Figura 5-1, en donde se puede apreciar la ubicación y estructura del pavimento asfáltico junto con la bodega para resguardo de equipos y herramientas necesarias para el proceso constructivo y letrero identificativo del proyecto.



Figura 5-1: Ubicación de Tramo de Prueba en Campus San Joaquín.

Fuente: www.Google Earth; Archivo Personal.

5.1. Construcción de Tramo de Prueba

La composición estructural del pavimento estuvo conformada por capa de subrasante, base y capa de rodadura, composición estructural generalmente utilizada para pavimentos de tipo articulado. Entre los objetivos planteados fue evaluar las propiedades mecánicas de cada una de las capas estructurales, y principalmente la capa de rodadura conformada por mezcla de asfalto en caliente como emulsión asfáltica. Como una alternativa de comparación de resultados, se construyó el tramo de prueba en dos partes, una con emulsión asfáltica (EA) y otra con mezcla de asfalto en caliente (HMA);

manteniendo la misma supra-estructura de capas granulares; tal como se detalla en la Figura 5-2.

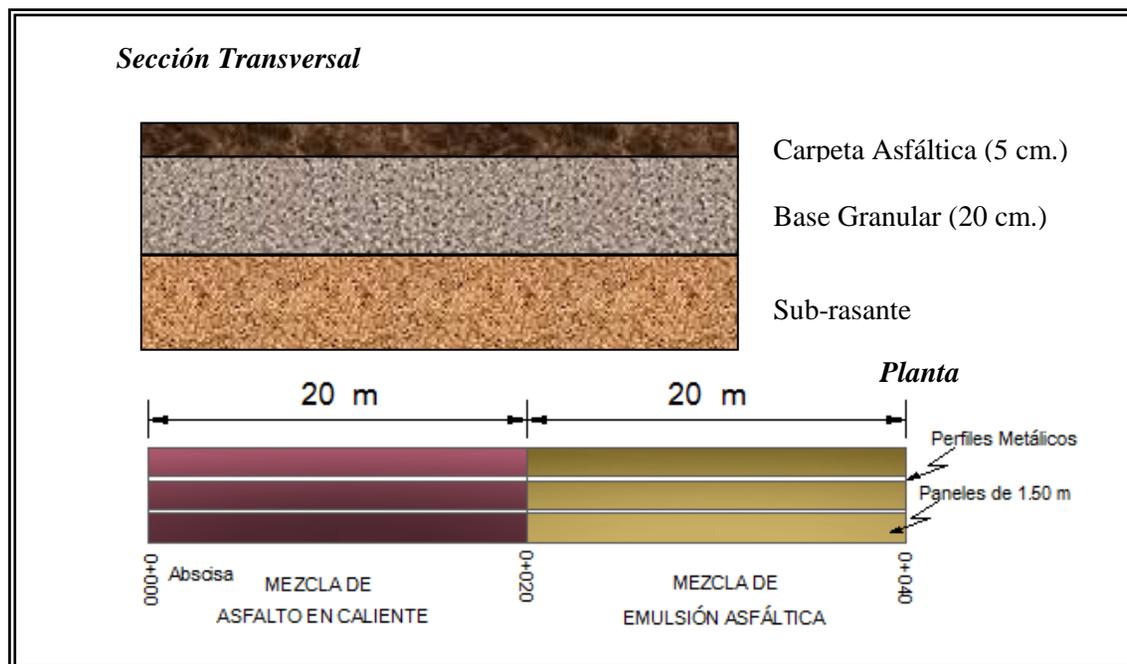


Figura 5-2: Sección Transversal y Planimetría de Tramo de Prueba.

Fuente: Elaboración Propia.

Luego de la pavimentación de tramo de prueba con asfalto en caliente como emulsión asfáltica, se fabricó bloques de asfalto en terreno para cada tipo de mezcla, a través de proceso de cortado de pavimento (cortes longitudinales y transversales) mediante cortadora de pavimento asfáltico, tal como se aprecia en la Figura 5-3. Las formas y dimensiones analizadas en los bloques asfálticos dentro de esta investigación fueron: según la forma del elemento de 15x25 cm y 20x30 cm (forma rectangular); 25x25 cm (forma cuadrada); según la profundidad de ranura entre: 0 mm, 5mm y 10 mm. El proceso constructivo en terreno se detalla en Anexo D.



Figura 5-3: Cortado Longitudinal y Transversal sobre Carpeta Asfáltica para Obtención de Bloques de Asfalto.

Fuente: Archivo Personal.

5.2. Etapa Experimental (Ensayos de Laboratorio y Terreno)

La etapa experimental de ensayos en laboratorio y terreno se realizó en función del avance del proceso constructivo del tramo de prueba (ver Anexo D). En función de esto, el resumen de los ensayos realizados se presenta en la Figura 5-4.

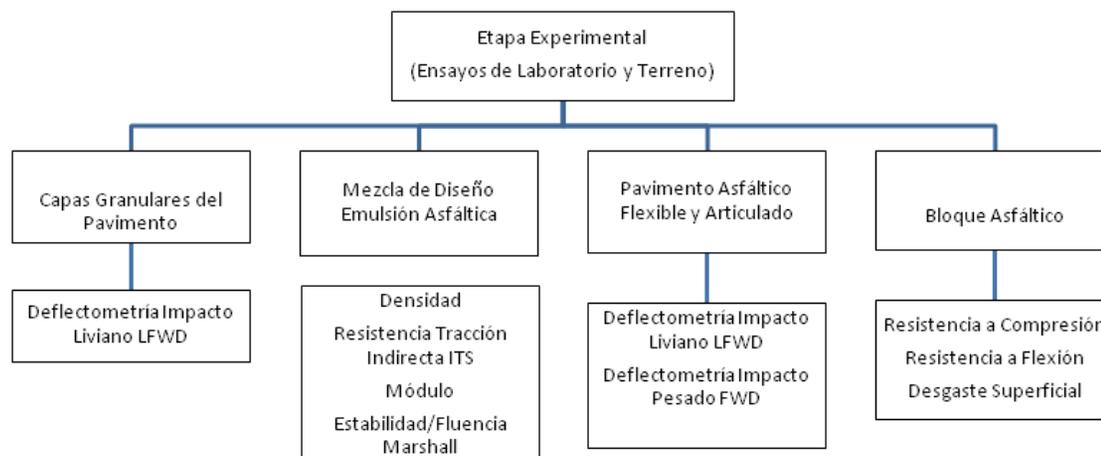


Figura 5-4: Ensayos de Laboratorio y Terreno sobre Tramo de Prueba.

Fuente: Elaboración Propia.

5.2.1. Capas Granulares

a) *Capacidad de Soporte de Subrasante.*

En el Manual del MOP se presenta diversos métodos para la ejecución de trabajos de auscultación de suelos en un estudio vial (Ministerio de Obras Públicas MC.V-8, 2003). Para el proceso de auscultación y prospección del suelo en el tramo de prueba se realizó la excavación de calicata con el apoyo de laboratorios de la Dirección de Investigaciones Científicas y Tecnológicas de la Pontificia Universidad Católica de Chile (DICTUC); y para la determinación de capacidad de soporte de la subrasante se utilizó el equipo de deflectometría liviano de impacto (LFWD) Prima100, el cual nos permite determinar tanto la fuerza transmitida y la deformación producida en la superficie de un suelo. Para la determinación de la presión de contacto se utiliza la ecuación 5.1, que está en función de la fuerza transmitida y la superficie de contacto entre el equipo y el suelo. Para el ensayo se utilizó un anillo de diámetro 200 mm.

$$P = \frac{F}{A} \quad (5.1)$$

donde: P, presión de contacto, kPa.; F, fuerza transmitida por equipo, kN.; A, superficie de contacto (πr^2), m².; r, radio de anillo de contacto equipo Prima100, m. Para la determinación del módulo de deformación dinámico (E) se utilizó la ecuación 5.2, que se detalla a continuación:

$$E = \frac{2 \times P \times r (1 - \nu^2)}{D_1} \quad (5.2)$$

donde: E, Módulo de deformación Dinámico, MPa; P, presión de contacto, Pa; r, radio de anillo de contacto equipo Prima100, m; ν , coeficiente de Poisson; D1, deformación de suelo, μ m. La Tabla 5-1 resume valores de coeficiente de Poisson para el análisis de las diferentes capas de la estructura del pavimento.

Tabla 5-1: Valores de Coeficiente de Poisson para Diferentes Componentes de Estructura de Pavimento.

Material	Relación de Poisson
Concreto asfáltico	0.30 a 0.40
Concreto hidráulico	0.10 a 0.20
Bases granulares	0.20 a 0.40
Suelos cohesivos	0.25 a 0.45
Suelos estabilizados con cemento	0.10 a 0.30
Suelos estabilizados con cal	0.10 a 0.30

Fuente: (Pérez et al., 2004)

La Tabla 5-2 presenta valores recomendados de módulo para diferentes tipos de capas que componen una estructura de pavimento, para el caso de no disponer de valores conocidos de módulo, con el fin de ser utilizados en un análisis de retrocálculo.

Tabla 5-2: Valores Recomendados de Módulo para Diferentes Capas de Estructura de Pavimento.

Material	Módulo Elástico (MPa)
Concreto asfáltico	3500
Concreto hidráulico	35000
Bases tratadas con cemento	4100
Suelos estabilizados con cemento	350
Bases granulares	200
Suelos estabilizados con cal	140
Sub bases granulares	100
Suelos cohesivos	50

Fuente: (Pérez et al., 2004)

La Tabla 5-3 permite conocer los rangos de valores del módulo de deformación E dinámico determinado a través del ensayo de Deflectometría de Impacto Liviano con equipo Prima 100 utilizado en este proyecto.

Tabla 5-3: Rango de Módulo de Deformación E Dinámico para Diferentes Tipos de Superficie de Pavimento Utilizando el Equipo Prima 100.

Material	Rango de Medida Esperado
Subrasante	6 – 60 MPa
Subbase	25 – 75 MPa
Base no consolidada	40 – 125 MPa
Base no consolidada (piedra)	60 – 150 MPa
Asfalto	100 – 300 MPa

Fuente: (Carl Bro Pavement Consultants, 2005)

Para localizar cada punto de ensayo se procedió a la colocación de abscisas en tramo de prueba en su eje central cada 5 m. Luego se ejecutó el ensayo LFWD aproximadamente a cada 2.5 m de la longitud total de tramo de prueba en su eje central, derecha e izquierda del mismo; obteniendo 3 puntos por cada abscisa. Por cada punto se realizó un promedio aproximado de 6 lecturas de ensayo en función de la homogeneidad de los resultados y de las condiciones de la superficie de ensayo, y de estos se escogió las tres lecturas con los resultados más homogéneos, en función de la presión aplicada y el módulo obtenido. La Tabla 5-4 presenta los resultados presentados por equipo Prima 100 luego del ensayo sobre subrasante para un solo punto de ensayo en la abscisa 0+002.5 y a 1.5 m hacia la derecha de esta, escogiendo las tres últimas lecturas debido a que presentan homogeneidad en sus resultados de presión y módulo. Posteriormente, estos resultados de módulo se corrigen a través de la ecuación 5.2, considerando una relación de Poisson 0.35 para suelos granulares y diámetro del anillo de contacto de carga igual a 200 mm, obteniendo un promedio de módulo igual a 90 MPa. En el Anexo C: Tabla C-2 se presenta un resumen de los resultados obtenidos de ensayo Prima 100 sobre suelo de subrasante.

Tabla 5-4: Resultado Obtenido de Un Punto de Ensayo LFWD Utilizando Equipo Prima 100 sobre Subrasante.

Location	Setup number	Time	Force(kN)	Press(kPa)	Pulse Time(ms)	D1(μm)	E1(MPa)
2.5d1.5	3	00:06:03	1.1	15	59.8	270	12
2.5d1.5	3	00:07:53	7.4	105	17.5	470	50
2.5d1.5	3	00:08:23	8.2	116	16.8	500	52
2.5d1.5	3	00:10:11	7.0	100	17.5	439	51
2.5d1.5	3	00:10:36	7.1	100	17.5	444	51
2.5d1.5	3	00:10:58	7.0	99	17.5	432	51

Fuente: Archivo Personal.

Para el análisis final de todos los resultados se utilizó el principio de promedio acumulado de entre 5 resultados consecutivos de ensayo, obteniendo un Módulo de deformación Dinámica para la subrasante de 141 MPa con una desviación estándar de 4.4 MPa y un coeficiente de variación de 3.1%. La Figura 5-5 presenta los resultados obtenidos del ensayo LFWD sobre la sub-rasante.

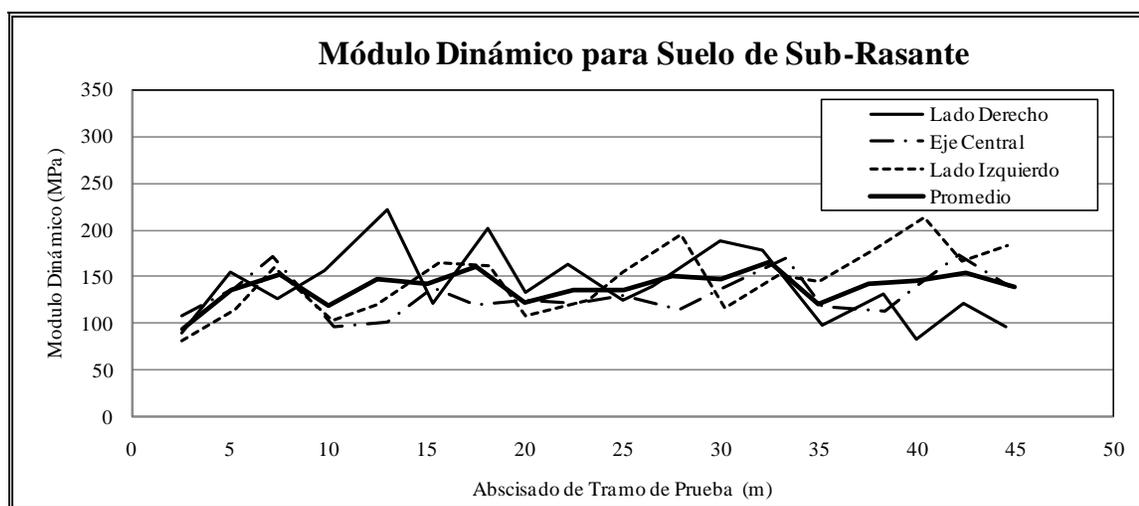


Figura 5-5: Determinación de Módulo de Deformación Dinámico (E) para Subrasante Utilizando Ensayo de Deflectometría de Impacto Liviano (LFWD).

Fuente: Elaboración Propia.

b) *Capacidad de Soporte de Base Capa 1 y 2.*

Para la construcción de la base de la estructura del pavimento se la realizó en dos capas de 10 cm cada una, para fines de una adecuada compactación. La determinación de la capacidad de soporte se determinó utilizando el equipo Prima 100 con el mismo procedimiento de ensayo resumido para subrasante. Los resultados del ensayo para la primera capa de base de 10 cm de espesor se presentan en Anexo C: Tabla C-3. Durante el ensayo se aplicó dos alturas de caída de la carga de equipo Prima100 para un valor de 100 kPa y 130 kPa a partir de la abscisa 0+017.5 aproximadamente, observando una variación en el resultado del módulo de deformación dinámico en función de la presión de caída del equipo. De los resultados obtenidos se determinó un módulo de deformación dinámico para base capa 1 de 114 MPa con una desviación estándar de 6 MPa y un coeficiente de variación de 5.4%. La Figura 5-6 resume los resultados obtenidos para la base capa 1 (e=10 cm).

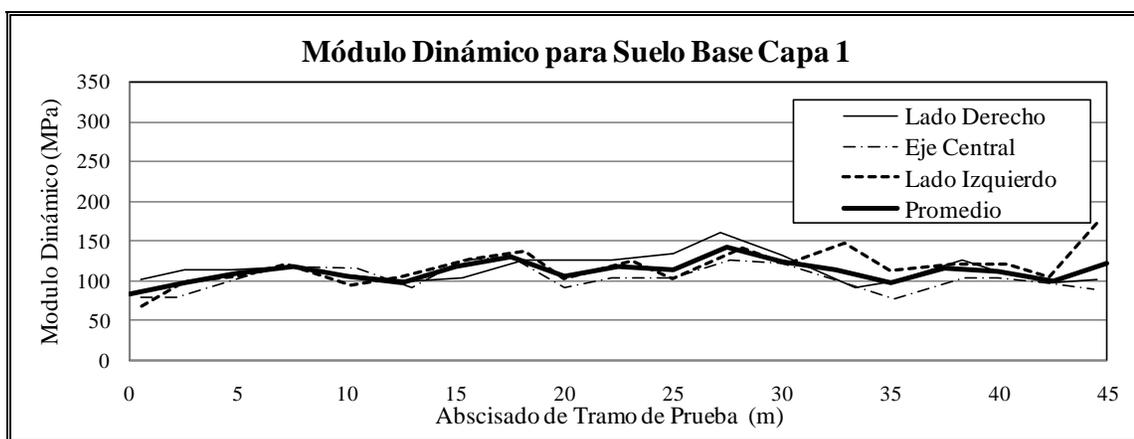


Figura 5-6: Módulo de Deformación Dinámico (E) para Base Capa 1 Utilizando Ensayo de Deflectometría de Impacto Liviano (LFW).

Fuente: Elaboración Propia.

Para determinar las propiedades de soporte de la segunda capa de base con espesor de 10 cm se procedió de la misma manera indicada para subrasante y base capa 1. El Anexo C: Tabla C-4 resume los resultados obtenidos de ensayo con equipo de Prima100 para base

capa 2. Se obtuvo como resultado un módulo de deformación dinámico de 128 MPa con una desviación estándar de 4 MPa y un coeficiente de variación de 3%. La Figura 5-7 presenta los resultados del ensayo para base capa 2.

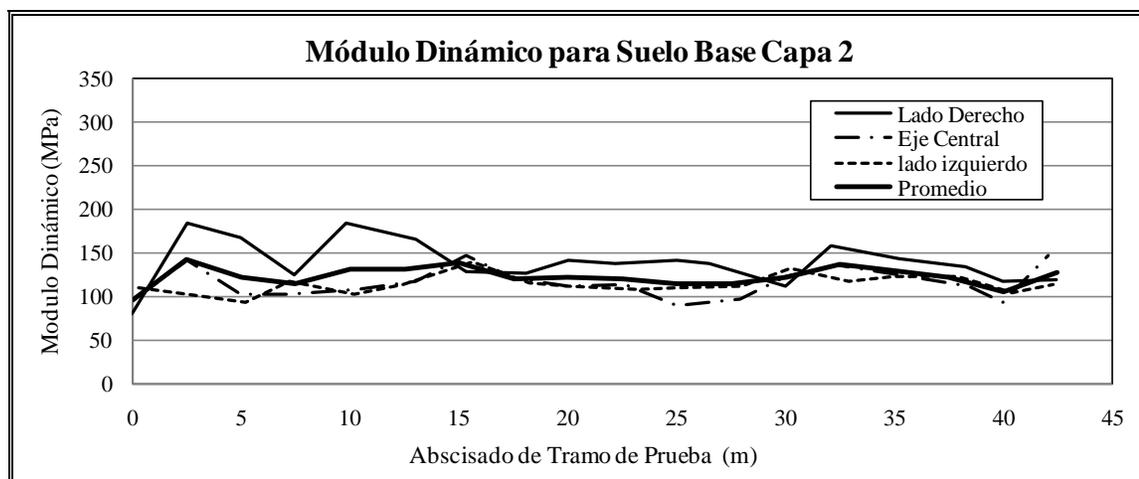


Figura 5-7: Módulo de Deformación Dinámico (E) para Base Capa 2 Utilizando Ensayo de Deflectometría de Impacto Liviano (LFWD).

Fuente: Elaboración Propia.

De los resultados obtenidos se puede observar que la capa de subrasante presentó un valor de módulo mayor al obtenido para ambas capas de base, debido a que al momento de auscultar y analizar el suelo de subrasante, esta presentaba un tipo de suelo de buenas características granulométricas y densidad, con cierto grado de consolidación, propiedades que fueron afirmadas posteriormente por el informe de mecánica de suelos emitido por DICTUC (ver Anexo C: Tabla C-1); mientras que para las capas de base 1 y 2, a pesar de cumplir con requisitos granulométricos y densidades, estas fueron construidas y niveladas mediante proceso de compactación.

5.2.2. Elaboración de Mezcla Asfáltica en Terreno

La mezcla de asfalto en caliente fue proporcionada y entregada en terreno por empresa particular, luego de su análisis de diseño respectivo en laboratorio (ver Anexo A: Tabla A-1). Para la mezcla de emulsión asfáltica diseñada en laboratorio, se procedió a la

fabricación de mezcla en terreno, a través del cual se extrajo testigos como muestras para la comprobación de diseño. Para este propósito se obtuvo probetas Marshall según procedimiento de MCV-8 (Ministerio de Obras Públicas MC.V-8, 2003), y probetas SUPERPAVE según AASHTO T 312 (AASHTO, 2001); para determinar las diferentes propiedades de la mezcla como densidad, ITS, TSR, estabilidad Marshall, fluencia Marshall y módulo de deformación dinámico.

Además se determinó el Módulo de Rigidez de las mezclas asfálticas mediante pruebas de ensayo a tensión indirecta sobre especímenes cilíndricos. Este procedimiento de ensayo consiste en aplicar pulsos de carga repetitiva bajo el diámetro vertical de un espécimen cilíndrico, la misma que es controlada y obtenida mediante sensores LVDT (British Standards BSi, 2004). Para determinar el módulo de rigidez de una probeta cilíndrica, luego de usar 5 pulsos de carga, se utiliza la ecuación 5.3

$$S_m = \frac{F(\nu + 0.27)}{z \cdot h} \quad (5.3)$$

donde: S_m , Módulo de Rigidez, MPa; F , carga máxima vertical aplicada, N; z , amplitud de la deformación horizontal obtenida durante los ciclos de carga, mm; h , espesor de la probeta, mm; ν , coeficiente de Poisson. Una vez determinado el módulo de rigidez, este deberá ser ajustado por un factor área de carga de 0.60, usando la ecuación 5.4. Este factor de área de carga representa la relación entre el tiempo de duración transcurrido hasta llegar a la máxima carga y esta (British Standards BSi, 2004).

$$S'_m = S_m [1 - 0.322(\log(S_m) - 1.82)(0.60 - k)] \quad (5.4)$$

donde: S'_m , Módulo de Rigidez ajustado por factor área de carga de 0.60, MPa; k , factor área de carga; S_m , Módulo de Rigidez calculado inicialmente, MPa.

Los resultados obtenidos de ensayos de densidad, ITS y módulo de rigidez sobre probetas SUPERPAVE se resumen en la Tabla 5-5 y detallan en Anexo C: Tabla C-8. Además se presenta un resumen en Anexo E del procedimiento de ensayo para determinar módulo de rigidez en probetas cilíndricas.

Tabla 5-5: Densidad, ITS, Mr en Probetas SUPERPAVE para Mezcla de Emulsión Asfáltica.

COMPROBACIÓN DE DISEÑO DE MEZCLA EN TERRENO - TRAMO DE PRUEBA				
Condición Ensayo	Densidad	Resistencia Tracción Indirecta		Modulo Elástico
	gr/cm ³	kPa	TSR %	MPa
saturado	2.20	302	0.78	1421
seco	2.14	386		2055

Fuente: Elaboración Propia.

Estos resultados fueron obtenidos de 6 probetas de diámetro 150 mm, 3 probetas para cada condición de ensayo, presentando una mayor variabilidad de resultados para condiciones en estado seco; obteniendo un coeficiente de variación (CV) en ensayos de ITS igual de 0.2% y 7% para condición saturada y seca, respectivamente; y CV igual a 2% y 6% en ensayo de módulo para condición saturada y seca, respectivamente.

Para los ensayos de densidad, ITS, Estabilidad / Fluencia Marshall y Módulo en probetas Marshall, se obtuvieron testigos extraídos de bloques de asfalto y que se resume en la Tabla 5-6 y detallan en Anexo C: Tabla C-9.

Tabla 5-6: Densidad, ITS, Mr en Probetas Marshall para Mezcla de Emulsión Asfáltica.

COMPROBACIÓN DE DISEÑO DE MEZCLA EN TERRENO - TRAMO DE PRUEBA						
Condición de Ensayo	Densidad	Resistencia Tracción Indirecta		Modulo Resiliente	Estabilidad kN	Fluencia μm
	gr/cm^3	kPa	TSR	MPa		
saturado	2.25	311	0.9	1633	13.86	3.17
Seco	2.16	344		-		

Fuente: Elaboración Propia.

Los resultados de ITS fueron obtenidos de una muestra de 6 probetas de 100 mm de diámetro, 3 unidades para cada condición de ensayo, eliminando un resultado en función de la variabilidad respecto a los otros resultados dentro de la muestra, obteniendo un CV de 1% y 4% para condición en estado saturado y seco, respectivamente. El resultado de módulo se realizó sobre 3 probetas en condición saturada obteniendo un CV de 5%. Para el ensayo de estabilidad y fluencia Marshall, se realizó sobre 3 probetas sumergidas previamente a 60° por 30 minutos según procedimiento de ensayo del Manual de Carreteras (Ministerio de Obras Públicas MC.V-8, 2003), obteniendo un CV de 7% y 21%, respectivamente. Todos estos resultados son analizados y discutidos posteriormente en la sección 6.1.

Además se realizó el ensayo de resistencia a tracción indirecta ITS sobre los testigos extraídos tanto de elementos de asfalto en caliente como emulsión asfáltica, en función de condiciones de curado sumergidas bajo agua a diferentes temperaturas (25°C, 20°C, 10°C, 0°C), y la resistencia retenida para cada temperatura. La Figura 5-8 y Anexo C: Tabla C-10 resumen los resultados obtenidos del ensayo ITS sobre testigos extraídos de bloques de asfalto.

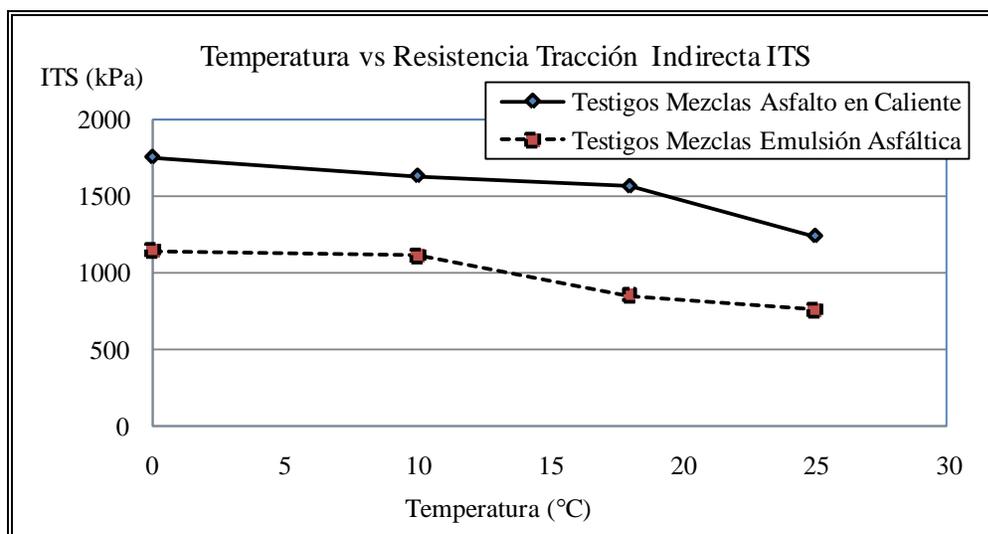


Figura 5-8: Resistencia Tracción Indirecta en Función de Temperatura de Agua Durante Proceso de Curado.

Fuente: Elaboración Propia.

De la misma forma, para la determinación de módulo de rigidez se realizó la extracción de 11 testigos en el tramo de prueba para los dos tipos de mezcla y para dos diámetros diferentes de 100 y 150 mm. El ensayo se realizó según el procedimiento descrito en el reporte técnico de la British Standards BSi (British Standards BSi, 2004) para condición seca con una temperatura de ensayo de 25°C mediante Equipo de Carga COOPER HYD25. La Figura 5-9 y Anexo C: Tabla C-11 presentan los resultados del ensayo de módulo en testigos de probetas asfálticas. El procedimiento de ensayo se presenta en Anexo E; y los archivos digitales obtenidos del equipo de ensayo se encuentran en el CD adjunto de esta investigación.

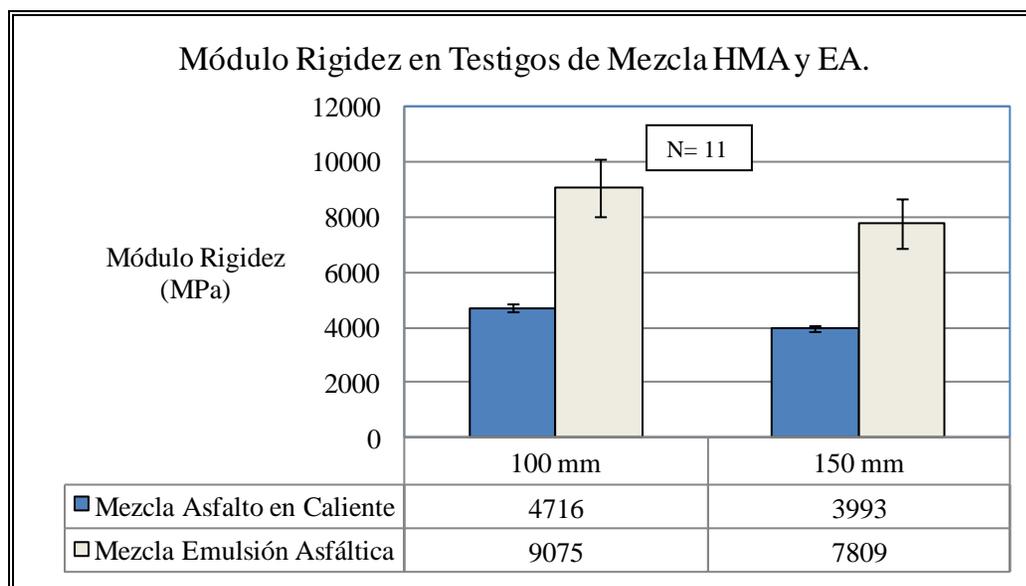


Figura 5-9: Módulo de Rigidez sobre Testigos de Bloques de Asfalto.

Fuente: Elaboración Propia.

5.2.3. Pavimento Asfáltico

a) Pavimento Flexible

Para la determinación del módulo de deformación dinámico E de la capa de rodadura se utilizó el equipo Prima100 con el mismo procedimiento descrito para subrasante. Es importante indicar que el tramo de prueba se divide en dos subtramos en función del tipo de mezcla utilizada para la capa de rodadura como se puede apreciar en la Figura 5-2.

Entre la abscisa 0+000 a 0+022.5 se construyó con capa de rodadura de mezcla asfáltica en caliente; y para el tramo entre la abscisa 0+022.5 a 0+042.5 se construyó la capa de rodado con emulsión asfáltica. La Figura 5-10 presenta los resultados del ensayo LFWF sobre la capa de rodadura tanto para tramo de asfalto en caliente como para el tramo de emulsión asfáltica y los resultados de ensayo se detallan en Anexo C: Tabla C-5. De los resultados de ensayo analizados mediante promedio acumulados de tres ensayos consecutivos se determinó un módulo de deformación dinámico promedio de 269 MPa

con una desviación estándar de 5 MPa y un coeficiente de variación de 2%; y 245 MPa con desviación estándar de 9 MPa y coeficiente de variación de 4%, para el tramo de mezcla con asfalto en caliente y emulsión asfáltica respectivamente.

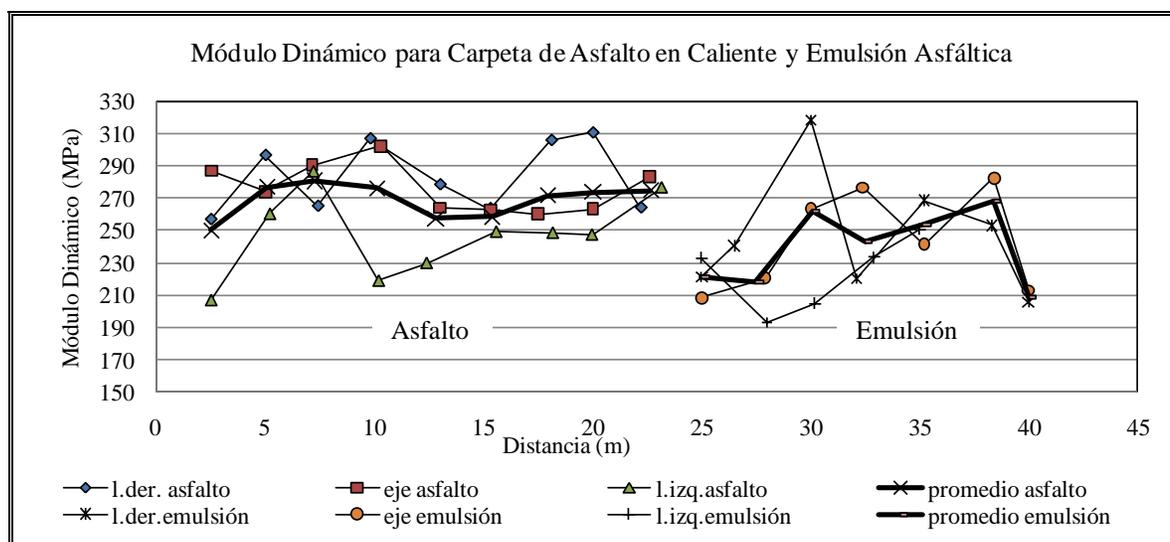


Figura 5-10: Variación de Módulo Deformación Dinámico (E) para Carpeta de Asfalto en Caliente y Emulsión Asfáltica.

Fuente: Elaboración Propia.

b) *Pavimento Articulado de Bloques de Asfalto*

Una vez obtenido los resultados de ensayo de deflectometría de impacto liviano LFWD con equipo Prima 100 sobre la capa de rodadura (asfalto caliente y emulsión asfáltica), el siguiente paso fue evaluar y comparar los resultados de un pavimento flexible de asfalto con un pavimento articulado construido con bloques de asfalto (adofaltos de emulsión y asfalto en caliente). Para esto fue necesaria la obtención de bloques de asfalto mediante el corte del pavimento antes construido, procedimiento que se realizó en el mismo terreno, mediante una cortadora asfáltica utilizada principalmente para procesos de bacheo tal como se presenta en la Figura 5-3 (ver Anexo D). Mediante este procedimiento se obtuvieron bloques de asfalto compuestos por asfalto en caliente como emulsión asfáltica, los mismos que sirvieron tanto para el análisis de ensayos tanto en terreno como en laboratorio. En algunos sectores del tramo de prueba, los bloques de

asfalto fueron recolocados mediante el principio de construcción de un pavimento articulado según indicado en la sección 2.4.1, utilizando arena tanto para la conformación de cama de arena como para el proceso de sellado de juntas entre bloques; y por otro lado el pavimento fue únicamente cortado en bloques, ubicados sobre una cama de arena que se colocó en un inicio para evitar una adherencia entre la base granular y la capa de rodado, con el objeto de lograr una recolocación de los adofaltos sobre el pavimento.

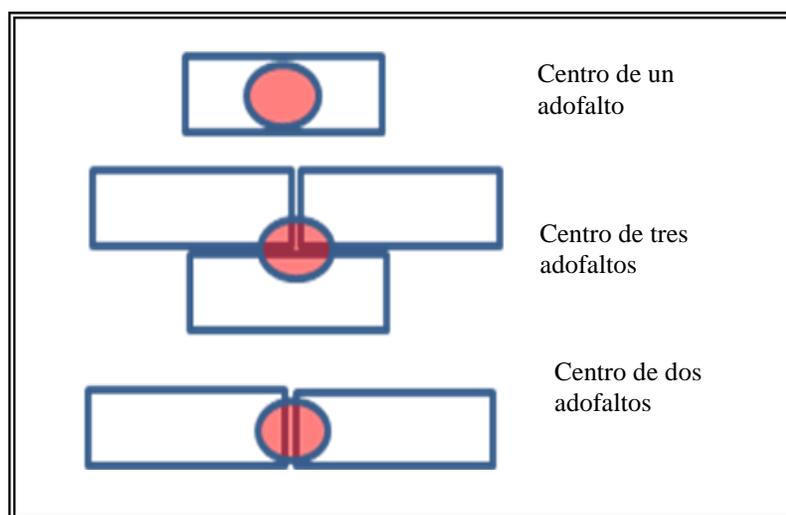


Figura 5-11: Posición de Ensayo LFWD Sobre Bloques de Emulsión Asfáltica.

Fuente: Elaboración Propia.

Una vez reconstruida la capa de rodadura mediante pavimento articulado con bloques AE se realizó el ensayo de deflectometría de impacto liviano con equipo Prima 100, para 3 diferentes posiciones de bloques como se aprecia en la Figura 5-11, con la finalidad de determinar si existe una variación considerable del módulo de deformación dinámico en función de la posición del equipo, el mismo que representa las posibles posiciones de carga de neumáticos sobre un pavimento articulado de bloques de asfalto. El resultado del módulo de deformación dinámico promedio fue 214 MPa, y se presentan en la Figura 5-12 y Anexo C: Tabla C-6.

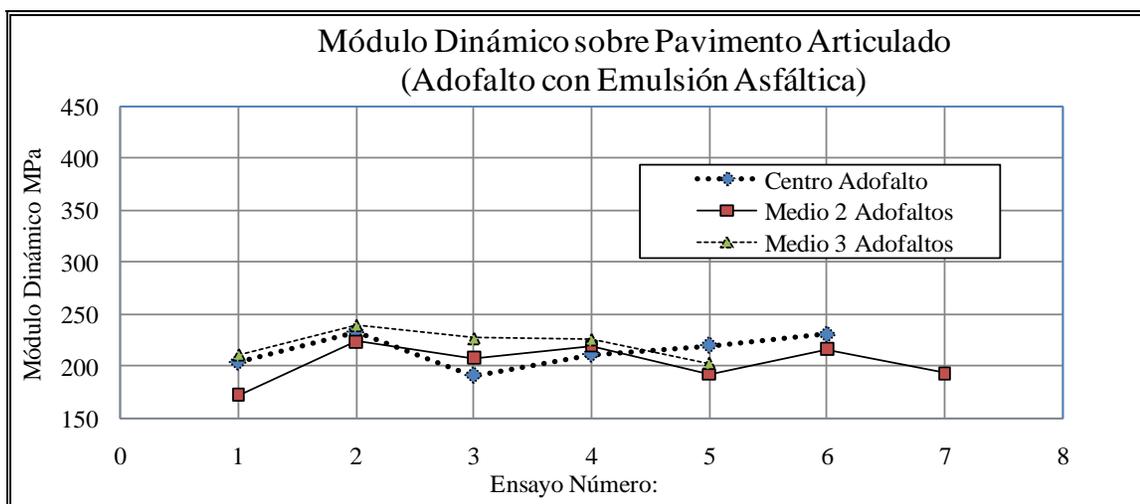


Figura 5-12: Módulo de Deformación Dinámico (E) para Capa de Pavimento Articulado de Bloques de Asfalto.

Fuente: Elaboración Propia.

Además, sobre la capa de bloques de asfalto se realizó ensayos de deflectometría de impacto FWD con equipo de Dirección de Vialidad tal como se aprecia en la Figura 5-13. El propósito era determinar el módulo estructural que presenta una capa de bloques de asfalto para efectos de proceso de diseño estructural con este tipo de capa de rodado. Para el análisis de resultados se utilizó el programa computacional para proceso de retrocálculo EVERCALC (ver Anexo B: Tablas: B-8, B-9, B-10). Estos procedimientos se presentaron en detalle en el capítulo 4, y los resultados finales se resumen en la Tabla 5-7 y detallan en Anexo C: Tabla C-7.

Tabla 5-7: Resultados de Ensayo Deflectometría de Impacto FWD sobre Capa de Bloques de Asfalto.

Descripción de Resultados	Carpeta Adofaltos E(1)(MPa)	Base Granular E(2)(MPa)	Subrasante E(3)(MPa)	Error % RMS Error
Promedio General	2930	145	149	8
Promedio Normalizado	2494	156	133	9

Fuente: Elaboración Propia.



Figura 5-13: Ensayo de Deflectometría de Impacto FWD sobre Pavimento de Bloques de Asfalto.

Fuente: Archivo Personal.

5.2.4. Bloque Asfáltico (Adofalto)

a) Resistencia a Compresión

Considerando la forma, tamaño y espesor de los elementos de bloques de asfalto (adofaltos), es importante considerar que este tipo de pavimento articulado para ciertas condiciones de carga, estará expuesto a esfuerzos de compresión, siendo importante determinar la resistencia a compresión de dichos elementos. Para la ejecución de este ensayo se elaboró 12 testigos (6 por cada tipo de mezcla) de 5x5x15 cm de arista mediante proceso de cortado desde un bloque de asfalto procurando mantener una relación aceptable de esbeltez de la probeta entre la relación sección-altura. La Figura 5-14 presenta los resultados de compresión de paralelepípedos elaborados de asfalto. Para mezcla de asfalto en caliente se obtuvo un promedio de resistencia a compresión igual a 21 Kg/cm² y para mezcla de emulsión asfáltica se obtuvo un promedio de 19 Kg/cm². El Anexo C: Tabla C-12 presenta resultados parciales del ensayo a compresión de testigos de asfalto.

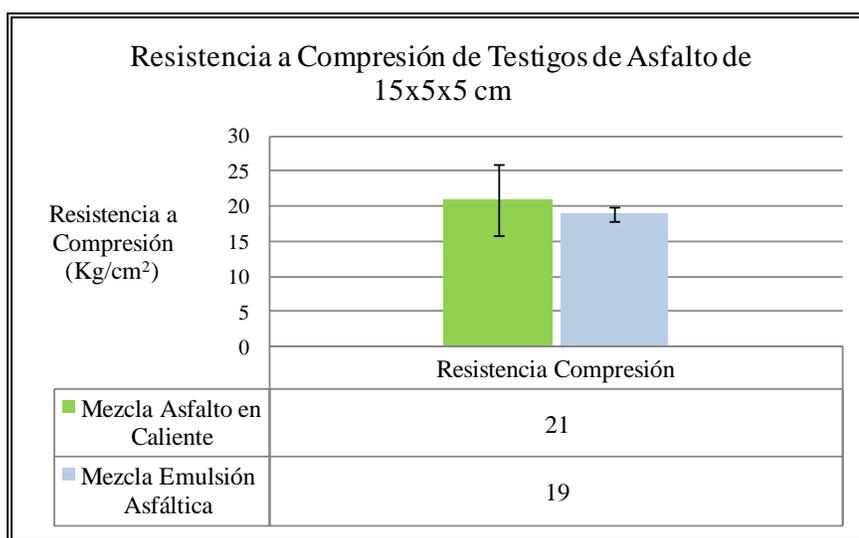


Figura 5-14: Resistencia a Compresión sobre Testigos de Asfalto de 15x5x5 cm.

Fuente: Elaboración Propia.

b) Resistencia a Flexión

Para el ensayo a flexión se determinó un procedimiento igual al ensayo de flexión de viga apoyada en 3 puntos; donde sus apoyos inferiores se encuentran a no menos de 1 pulgada del extremo de la probeta y cuya distancia entre apoyos determina la luz o longitud de ensayo; y el apoyo superior localizado en la parte central de la probeta. Dentro de las variantes para el ensayo fueron: la dimensión de la probeta, tipo de material (asfalto en caliente y emulsión asfáltica), posición del elemento (cara superior hacia arriba y cara superior hacia abajo) y profundidad de la ranura (0, 5, 10 mm).

La Figura 5-15 presenta un resumen de los resultados obtenidos del ensayo de resistencia a flexión sobre bloques de asfalto de 25 x 15 x 5 cm, para 3 medidas de profundidad de ranura, con una cantidad aproximada de 10 unidades por cada profundidad de ranura y tipo de mezcla (total de 58 unidades) y que se detallan en el Anexo C: Tabla C-13.

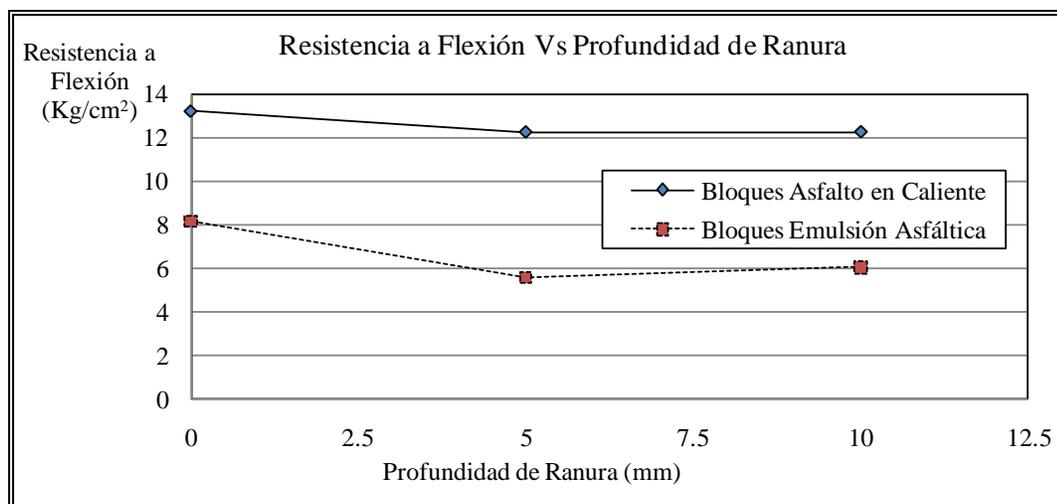


Figura 5-15: Resistencia a Flexión de Bloques de Asfalto en Función de Profundidad de Ranura.

Fuente: Elaboración Propia.

También se realizó ensayo de flexión sobre muestras rectangulares de 30x20 cm y 25x15 cm; cuadradas de 25x25 cm para los dos tipos de mezcla asfalto en caliente y emulsión asfáltica, 8 unidades por cada forma y tipo de mezcla (total de 55 unidades). Cabe indicar que este ensayo se realizó para dos posiciones distintas, con cara superior hacia arriba y cara superior hacia abajo, existiendo una variabilidad mínima entre sus resultados por lo cual no fueron considerados. Todos estos resultados se presentan en la Figura 5-16 y se detallan en Anexo C: Tabla C-14.

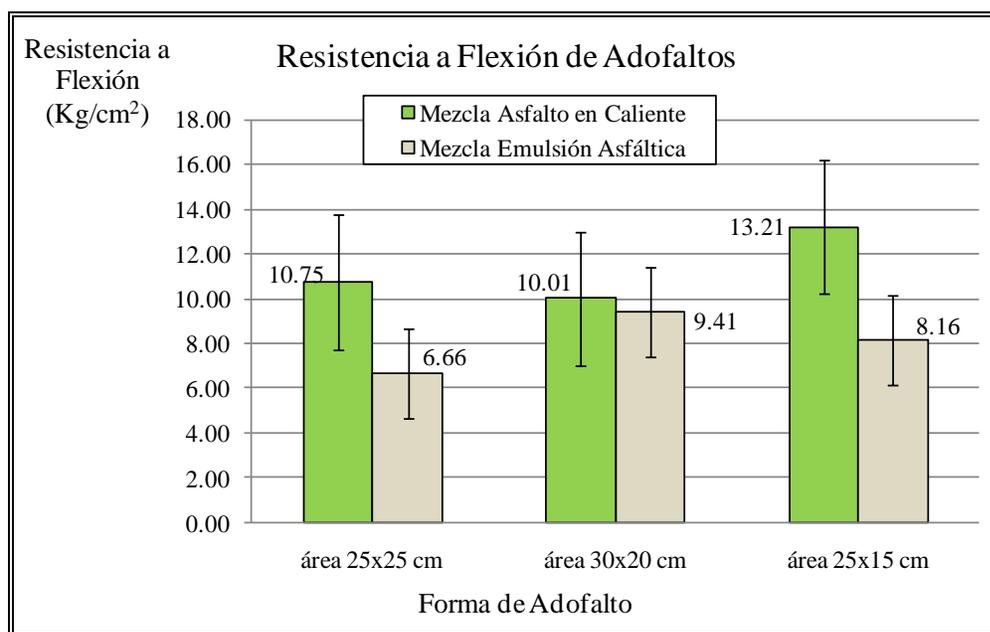


Figura 5-16: Resistencia a Flexión en Función de Forma del Bloque Asfáltico.

Fuente: Elaboración Propia.

c) Resistencia a Desgaste Superficial

El desgaste superficial en bloques de asfalto se determinó mediante un equipo montado en laboratorio con ayuda de una mezcladora de mezclas de concreto fresco, la cual provista de una superficie abrasiva, con presión de contacto por gravedad y velocidad constante, permitió un desgaste superficial por efecto abrasivo sobre la superficie del bloque de ensayo, en un tiempo de 5 minutos. Se utilizaron 6 probetas, 3 unidades para

cada tipo de mezcla. El desgaste superficial fue determinado mediante la diferencia en peso de las probetas al inicio y fin del ensayo, dividido para la superficie de ensayo. Este peso en algunas muestras fue determinado a distintos tiempos, con el fin de determinar la tasa de desgaste superficial del bloque en función del tiempo, y según los resultados obtenidos se pudo apreciar que no existe una tasa de desgaste constante en función del tiempo, debido principalmente a no existir una presión constante de la superficie abrasiva sobre el bloque asfáltico durante todo tiempo de ensayo. Sin embargo, se determinó que existe una tasa de desgaste mayor para muestras elaboradas con emulsión asfáltica. Los resultados se presentan en la Figura 5-17 y se detallan en Anexo C: Tabla C-15 y Anexo D.

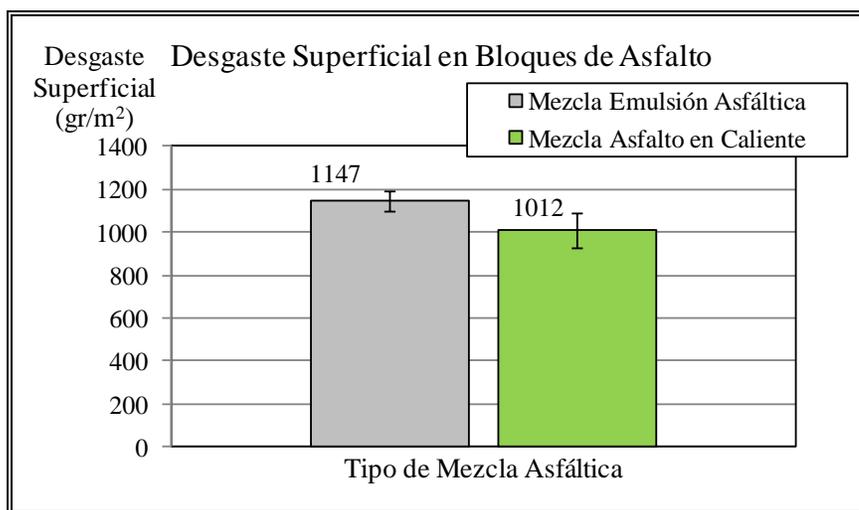


Figura 5-17: Desgaste Superficial de Bloques de Asfalto en Función de Tipo de Mezcla.

Fuente: Elaboración Propia.

6. ANÁLISIS DE RESULTADOS

6.1. Propiedades Mecánicas de la Mezcla Asfáltica.

Durante la elaboración de probetas SUPERPAVE con el principio de compactación por amasado se determinó la influencia que tiene el número de vueltas de giro en la densidad de la mezcla, la misma que se presenta en la Figura 6-1 y que se detalla en el Anexo A: Tabla A-8. De los resultados obtenidos se determinó que la densidad de diseño en estado seco para mezcla de emulsión asfáltica es de aproximadamente 2.15 gr/cm^3 , logrando aproximadamente a las 100 vueltas de compactación mediante el equipo indicado, ajustando dicho valor a la máquina de compactación para las posteriores preparaciones de probetas, y comprobando así las recomendaciones del equipo para la fabricación de probetas en función del número de ejes equivalentes admisibles, tal como se presenta en la Tabla 6-1. Estos valores de densidad en función del número de vueltas como proceso de compactación, deberá ser considerado a futuro para procesos de fabricación de mezclas asfálticas durante el proceso de producción de bloques de asfalto.

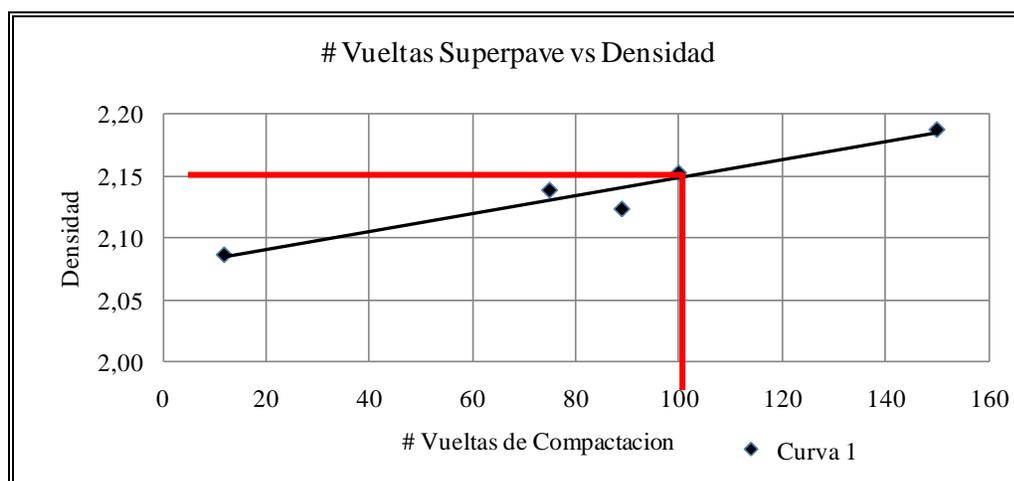


Figura 6-1: Número de Giros vs Densidad de Mezcla en Probetas SUPERPAVE.

Fuente: Elaboración Propia.

Tabla 6-1: Número de Giros en Compactador Giratorio SUPERPAVE en Función de Ejes Admisibles para 20 años.

20 años ESALs (millones)	Número de Giros		
	N.inicial	N.diseño	N.maximo
< 0.3	6	50	75
0.3 hasta < 3	7	75	115
3 hasta < 30	8	100	160
≥ 30	9	125	205

Fuente: (NAPA, 2005)

Posteriormente se determinó la variabilidad que existe entre los resultados obtenidos de mezclas de emulsión asfáltica elaboradas en laboratorio y terreno, determinando una mayor variación para ITS en condición saturada de 33%, mientras que para condición seca, una variación de 3%. Así mismo se determinó el TSR en porcentaje (%) de 0.7 y 0.9 para la mezcla de laboratorio y terreno respectivamente, presentado mejor comportamiento la mezcla de terreno. Mediante resultados obtenidos de ITS a través de testigos extraídos de bloques de emulsión asfáltica fabricados aproximadamente hace unos 3 meses anteriores a la fecha de ensayo, y comparados con los resultados de terreno y laboratorio, se observó que el parámetro de tiempo de fabricación de mezcla influye en la variabilidad de los resultados de ITS. La Figura 6-2 presenta los resultados obtenidos de ITS sobre mezclas en laboratorio, en terreno y sobre testigos de bloques de EA.

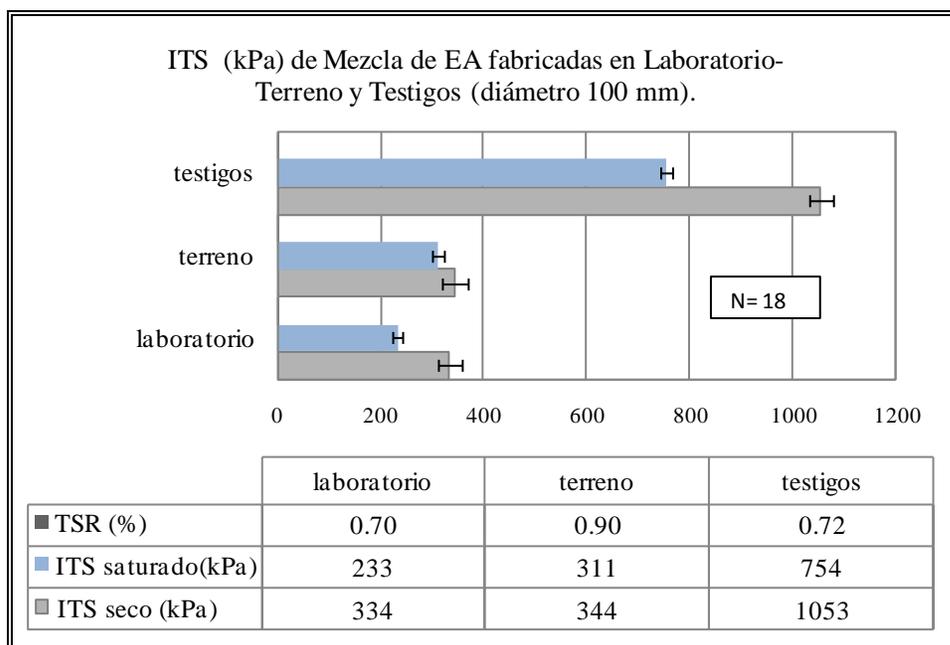


Figura 6-2: ITS para Mezclas de Emulsión Asfáltica Elaboradas en Laboratorio, Terreno y sobre Testigos.

Fuente: Elaboración Propia.

De los resultados obtenidos de la Figura 6-2 se puede ver que existe una tendencia a incrementar el valor de resistencia a tracción indirecta ITS en función del tiempo de fabricación de la mezcla. Así mismo, se puede observar que la presencia de agua en la mezcla tiene una influencia sobre la resistencia ITS, disminuyendo el valor de esta. Estos resultados concuerdan con los estudios realizados en investigaciones anteriores sobre el comportamiento de mezclas asfálticas (Baoshan, 2006).

Así mismo, se determinó la variabilidad que existe entre los resultados de ITS en función del tipo de probeta según su diámetro (100 y 150 mm), determinando una variabilidad en el rango entre 13% y 15%; para un TSR% de 0.9 y 0.8 para probetas Marshall y SUPERPAVE de mezclas de emulsión asfáltica, respectivamente. La Figura 6-3 presenta los resultados de ITS en función del tipo de probeta. De igual forma, estos resultados presentan valores similares a los obtenidos en estudios anteriores para mezclas de emulsión asfáltica (Niazi, 2008).

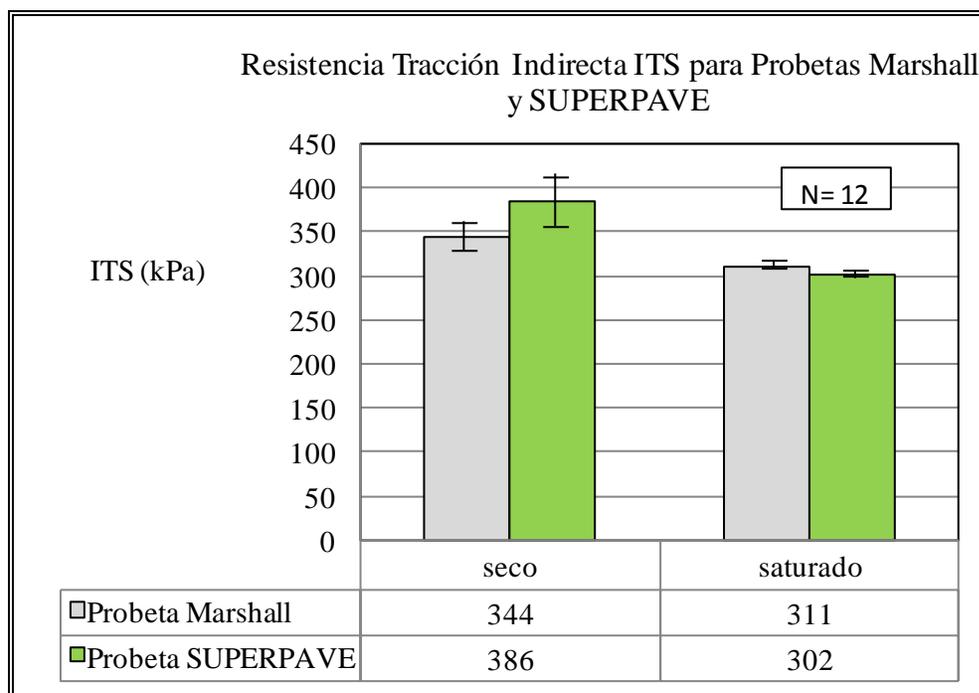


Figura 6-3: ITS para Mezclas de Emulsión Asfáltica Ensayadas en Probetas Marshall (100 mm) y SUPERPAVE (150 mm)

Fuente: Elaboración Propia

Además se determinó la variabilidad de resultados obtenidos en el ensayo del módulo de la mezcla de emulsión asfáltica en probetas de 100 y 150 mm para condición saturada, presentando un rango de variación entre 13% - 15%. La Figura 6-4 presenta los resultados de variación de módulo determinado en probetas Marshall y SUPERPAVE. Estos valores presentan un resultado de módulo similar al recomendado para pavimentos flexibles con un porcentaje aproximado de 10% de grietas sobre el pavimento (Washington State Department of Transportation, 2005), cuyo valor es recomendado en esta investigación para considerar en este tipo de pavimento articulado con fines de diseños estructurales mediante métodos mecanicistas, considerando que representaría un valor asumido para las condiciones más críticas de diseño, debido a la influencia de agua en la mezcla.

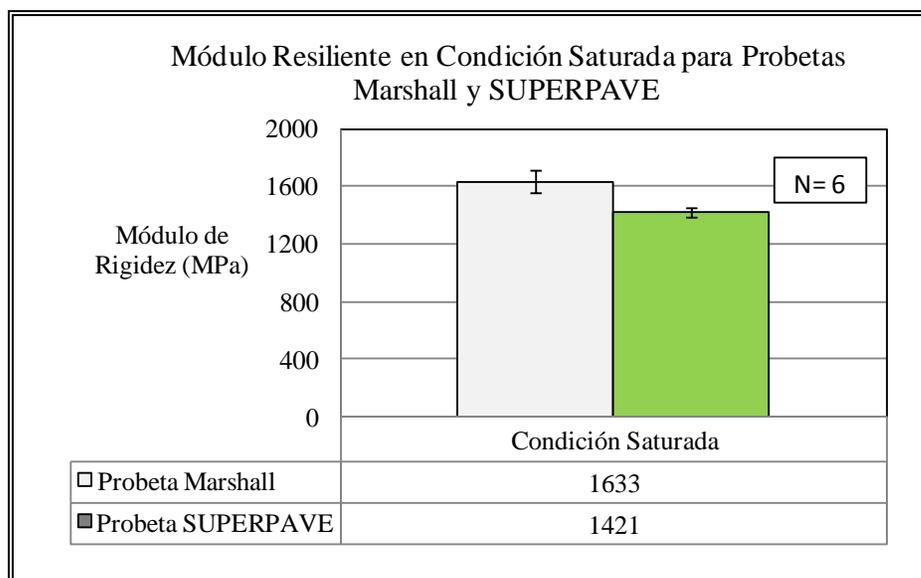


Figura 6-4: Módulo Resiliente para Mezclas de Emulsión Asfáltica en Condición Saturada Ensayadas en Probetas Marshall (100 mm) y SUPERPAVE (150 mm).

Fuente: Elaboración Propia.

De los testigos extraídos del pavimento, se determinó la variabilidad que existe en la determinación del módulo de mezclas de asfalto en caliente como emulsión asfáltica sobre testigos con dos diámetros distintos (100 y 150 mm); obteniendo como resultado un mayor módulo de la mezcla de emulsión asfáltica en aproximadamente al doble en comparación con una mezcla de asfalto en caliente. Estos resultados concuerdan con investigaciones anteriores donde indica que existe un incremento en el módulo de una mezcla con la adición o presencia de materiales cementantes (Niazi, 2008).

De igual forma se determinó que existe una diferencia aproximada de 7% entre resultados de módulo evaluado con testigos de 100 y 150 mm para el caso de mezclas de asfalto en caliente, obteniendo valores mayores para probetas de 100 mm. Para mezclas de emulsión asfáltica, se determinó que existe una mayor variabilidad de resultados entre testigos (14% aproximadamente) con tendencia mayor de resultado para testigos de 100 mm, similar al caso anterior. Los resultados se presentaron en la Figura 5-9.

Además se determinó la variación de resultados de módulo que existieron entre una probeta con mezcla elaborada en terreno y un testigo extraído aproximadamente 3 meses después. El incremento del módulo aumentó en aproximadamente 3 veces respecto al módulo inicial de diseño. La Figura 6-5 presenta los resultados de módulo para mezcla de emulsión asfáltica ensayada en probeta y testigo de 150 mm de diámetro.

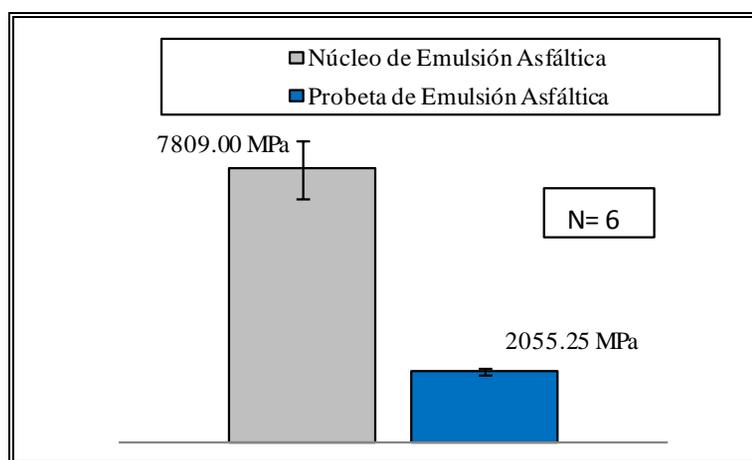


Figura 6-5: Módulo de Rigidez en Mezclas de Emulsión Asfáltica Fabricadas en Terreno sobre Probeta y Testigo (diámetro de 150 mm) en Condición Seca.

Fuente: Elaboración Propia.

6.2. Propiedades Mecánicas del Pavimento Asfáltico

Los resultados obtenidos de deflectometría de impacto liviano LFWD sobre la estructura del pavimento para cada una de las capas, se resumen en la Figura 6-7, donde se puede observar que el tramo de pavimento construido con mezcla de emulsión asfáltica y con ceniza FBC presenta resultados de módulo de deformación dinámica muy próximos a un pavimento flexible de asfalto en caliente; presentando así propiedades mecánicas acorde a una capa estructural de rodadura, y por ende un valor mayor que el de las capas granulares inferiores que conforman el pavimento, obteniendo como resultado una alternativa más de mezcla asfáltica para la fabricación de bloques. Todos los valores determinados de módulo usando este equipo de ensayo, concuerda con los rango

entregados de módulo según el tipo de capa estructural del pavimento (Carl Bro Pavement Consultants, 2005).

La variabilidad en los resultados de mezcla de emulsión asfáltica se debe principalmente al proceso constructivo utilizado en campo (ver Anexo D). Siendo la mezcla de emulsión asfáltica con cierto porcentaje de ceniza, una alternativa nueva de pavimentación presentada en este estudio, y que aún no existen plantas industriales que produzcan y comercialicen esta mezcla, se utilizó en este estudio una mezcladora de hormigón común para el proceso de mezclado (arena, ceniza, agua, emulsión) dosificando en volumen para cada uno de los materiales y obteniendo el volumen total en volúmenes parciales de mezcla. Para la construcción del tramo con asfalto en caliente se abasteció por medio de volquetes desde la planta particular Bitumix (ver Anexo D).

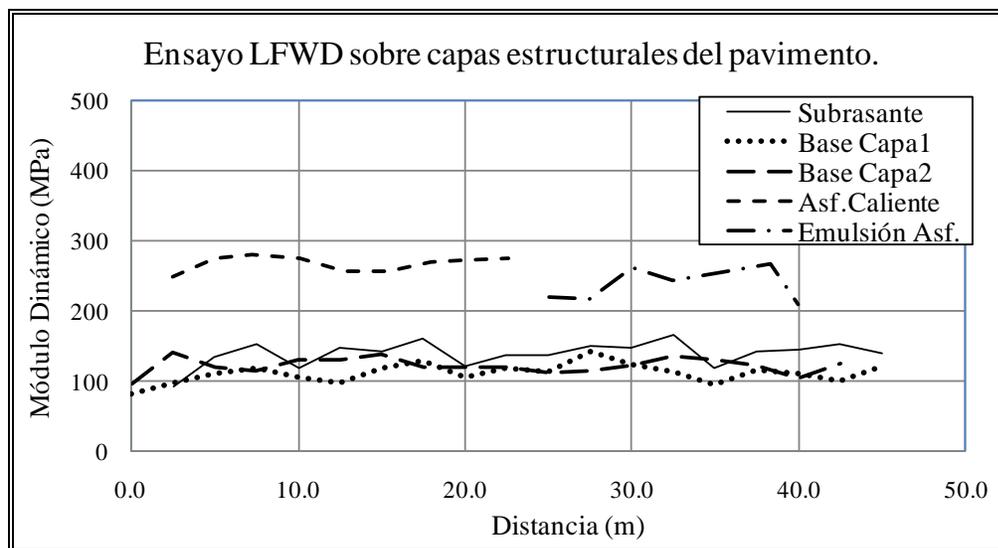


Figura 6-6: Módulo Deformación Dinámico Mediante Ensayo LFWD para Diferentes Capas Estructurales del Pavimento sobre Tramo de Prueba.

Fuente: Elaboración Propia.

Además se determinó la variación de resultados entre el ensayo de LFWD sobre el pavimento flexible de mezcla de emulsión asfáltica y el pavimento articulado de bloques

de emulsión asfáltica, encontrando un rango de variabilidad entre el 13% y 15% entre estos dos tipos de pavimento. La Figura 6-7 presenta los resultados de ensayo LFWD sobre pavimento flexible de emulsión asfáltica y pavimento articulado de bloques de emulsión asfáltica, observando que no existe una pérdida considerable de capacidad de soporte entre un pavimento flexible y un pavimento articulado de emulsión asfáltica, propiedad que se refleja en el módulo de deformación dinámico determinado para ambos tipos de pavimento. Además es importante destacar que los resultados de módulo de deformación dinámico del pavimento articulado con bloques de emulsión asfáltico son mayores a los resultados obtenidos para las capas granulares inferiores del pavimento, presentando una mayor capacidad de soporte y por tanto, siendo una alternativa de pavimentación como capa de rodado.

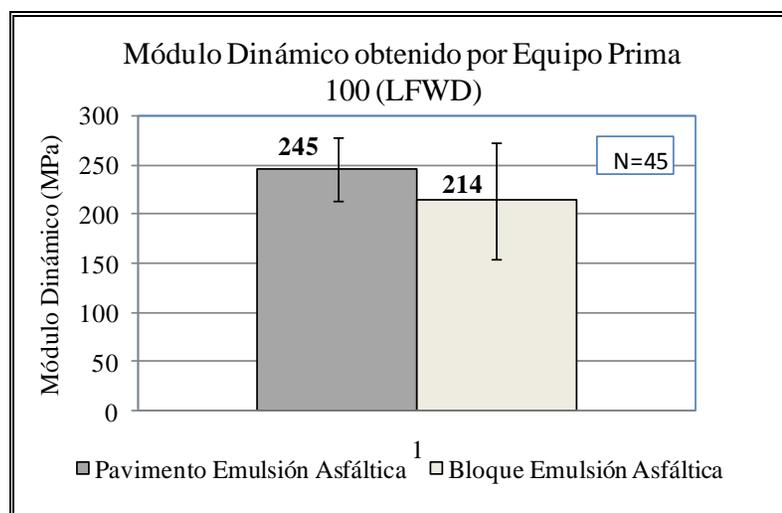


Figura 6-7: Módulo Deformación Dinámico Mediante Ensayo LFWD para Diferentes Tipos de Pavimento (Flexible y Articulado) de Mezcla de Emulsión Asfáltica.

Fuente: Elaboración Propia.

De los resultados obtenidos del ensayo de deflectometría de impacto FWD, se puede observar que existe un incremento significativo de módulo calculado para la capa de rodado compuesta por bloques asfálticos, comparada con los valores de módulo de las capas granulares del pavimento. Así mismo, el resultado obtenido de módulo de un

pavimento articulado de bloques de asfalto es menor al valor estándar dado para una superficie de rodado de carpeta asfáltica igual a 4000 MPa aproximadamente; por lo tanto, las hipótesis planteadas de asumir como un pavimento agrietado son correctas, cuyo resultado se reflejan en los resultados de módulo mediante este ensayo de FWD. Así mismo, los resultados de módulo descendente obtenidos en función de la profundidad de la capa estructural del pavimento, concuerda con los estudios realizados anteriormente con este tipo de ensayo no destructivo de carga (Pérez, 2004). La Figura 6-8 presenta un cuadro comparativo entre los resultados obtenidos mediante el ensayo de LFWD y FWD, observando una similitud entre los resultados obtenidos para las capas granulares del pavimento. Para la capa de superficie de rodado existe una gran variación de resultados del módulo calculado; obteniendo un mayor valor según el ensayo de FWD, y que se acerca mayormente a los valores obtenidos en la etapa de laboratorio y terreno de la mezcla de emulsión asfáltica; debido principalmente que mediante ensayo LFWD se determinó un módulo dinámico mientras que a través del ensayo FWD se determinó un módulo resiliente, ecuaciones que se presentaron en la sección 4.3 y 5.2.1. Además esta variabilidad representa las sugerencias que dan diferentes autores cuando se evalúa una superficie de rodado mediante este tipo de ensayo, ya que se encuentra influenciada por distintos factores como agrietamiento, temperatura, entre otros (Pérez, 2004).

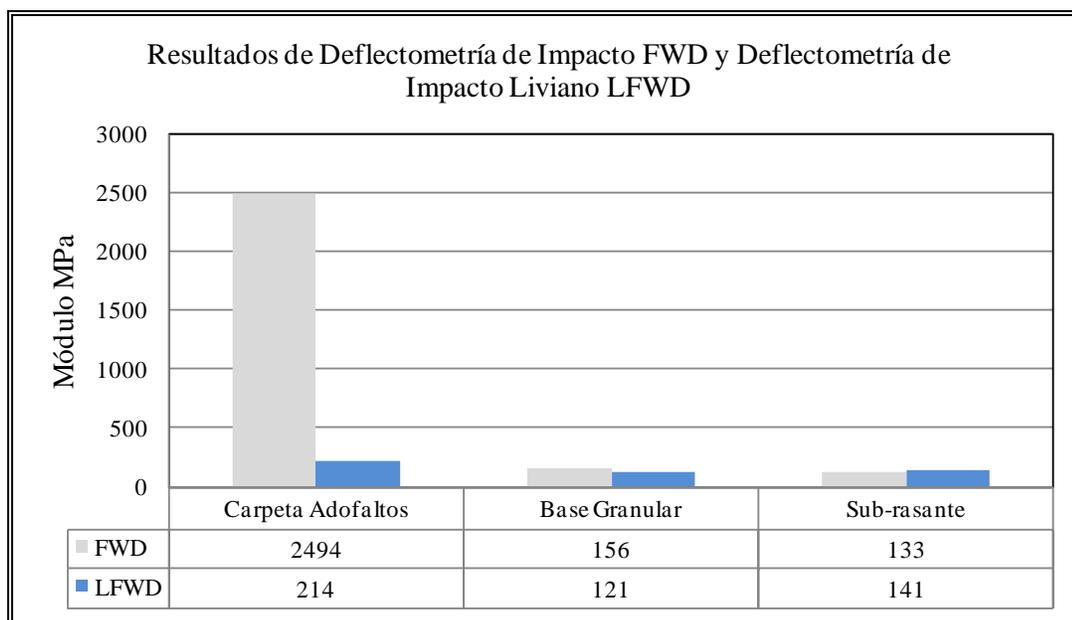


Figura 6-8: Módulo Dinámico y Resiliente de Capas Estructurales de Pavimento Determinadas Mediante Ensayo LFWD y FWD.

Fuente: Elaboración Propia.

6.3. Propiedades Mecánicas del Bloque Asfáltico (Adofalto)

De los resultados de resistencia a compresión obtenidos se determinó que los bloques de emulsión asfáltica presentan similares características mecánicas que un pavimento de asfalto en caliente, para condiciones de carga con esfuerzos de compresión, considerando que la ceniza FBC actúa como un material cementante, rigidizando la mezcla de emulsión asfáltica. Así también, se puede determinar la carga admisible del bloque de asfalto, considerando un promedio de resistencia a compresión igual a 20 Kg/cm² y la superficie del adofalto de 375 cm², se obtiene que dicho bloque tiene una resistencia máxima aproximada a compresión igual a 75 kN; siendo mayor su resistencia a la carga de diseño igual a 20 kN, considerando que dichos elementos trabajan generalmente a la compresión.

De los resultados obtenidos de flexión se pudo observar que los bloques de asfalto en caliente en general presentan mejores características de resistencia a la flexión que uno fabricado con emulsión asfáltica, observando una proporción aproximada de 2:1 respectivamente. Es importante aclarar que la mezcla de emulsión asfáltica al encontrarse formada con un porcentaje considerable de material cementante como la ceniza FBC, esta brinda un comportamiento más rígido a la mezcla, volviéndola a su vez más frágil, sin además considerar que se trata de una mezcla con asfalto en frío. Así mismo se puede observar que la construcción y profundidad de ranura sobre la superficie de bloque de asfalto, tiene una relación directa con la resistencia a la flexión, logrando inducir la sección transversal de falla del bloque bajo la ranura existente, tal como se aprecia en la Figura 6-9.

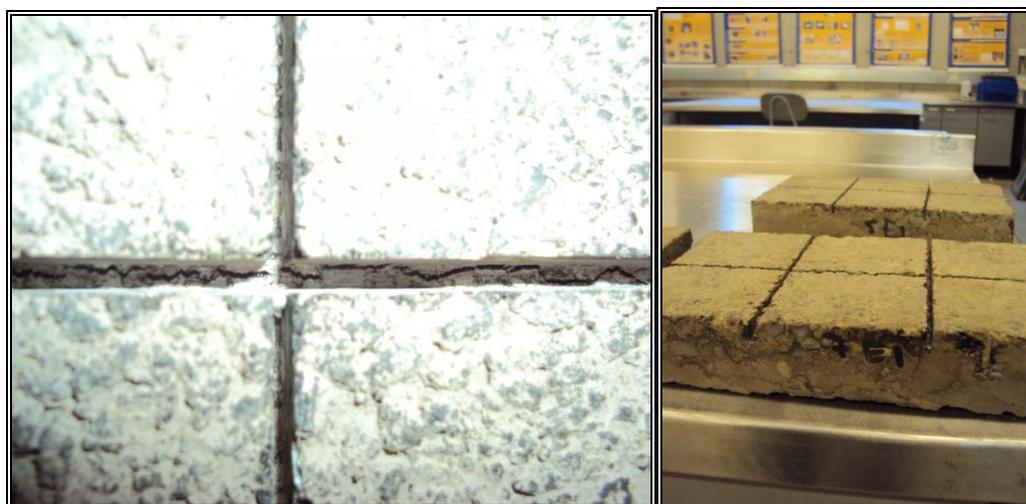


Figura 6-9: Punto de Falla a Flexión Bajo Ranura en Superficie del Bloque Asfáltico.

Fuente: Archivo Personal.

La conformación de una ranura sobre la superficie del bloque con una profundidad de 5, y 10 mm según los resultados obtenidos es esperable, debido que está disminuye la sección transversal del bloque la cual representa la superficie que resiste cierta carga aplicada, determinando que a mayor profundidad de ranura en el bloque, menor resistencia a la flexión. Este ensayo experimental respecto a la conformación de ranura

sobre el bloque permitió inducir la falla de flexión en dicha ubicación, y generalizando este procedimiento se induciría directamente el agrietamiento futuro debido a fatiga dentro del pavimento.

De los resultados obtenidos en la sección 5.2.4 (b), según la forma del bloque de asfalto podemos determinar que existe una influencia considerable en la resistencia a flexión sobre bloques de emulsión asfáltica, presentando mejores resultados la forma rectangular frente a una forma cuadrada, propiedad que fue evaluada sobre bloques asfálticos sin considerar la profundidad de ranura (0 mm). Así mismo se puede observar que el bloque de emulsión asfáltica presenta resultados similares de resistencia a flexión que un bloque de asfalto en caliente, para una profundidad de ranura 0 mm. A través de este ensayo se puede también comprobar las ventajas que presenta un bloque asfáltico de 15 x 25 cm de superficie, al presentar una mayor resistencia a la flexión para el caso de mezclas de asfalto en caliente.

De los resultados obtenidos de resistencia a la tracción indirecta se pudo observar una tendencia esperada de la curva ITS en función de la temperatura de curado de los testigos, ya que a un pavimento asfáltico a bajas temperaturas se rigidiza, resistiendo así mayores esfuerzos de tracción. Los resultados obtenidos para testigos de emulsión asfáltica presentan una considerable disminución de resistencia a tracción indirecta comparado con testigos de asfalto en caliente.

De los resultados de módulo de rigidez obtenidos se observó que los testigos de emulsión asfáltica presentan un mayor módulo comparado con una mezcla tipo de asfalto en caliente, ya que debido a ser una mezcla más rígida, permite deformaciones menores del elemento. Además se puede determinar que los resultados del módulo resiliente están afectados por el diámetro de la probeta, obteniendo mayores resultados del módulo para probetas de menor diámetro (probeta Marshall) que una de mayor diámetro (probeta SUPERPAVE). La variable diferente entre ambos ensayos fue la densidad, la cual fue determinada según los resultados obtenidos de los ensayos anteriores (2190 gr/cm^3 para asfalto en caliente y 2140 gr/cm^3 para emulsión asfáltica).

Mediante el ensayo de desgaste superficial se determinó que existe un mayor desgaste abrasivo para bloques de emulsión asfáltica igual a 1147 gr/m^2 comparado con un bloque de asfalto en caliente con un desgaste superficial de 1012 gr/m^2 . Esto se podría justificar por la mayor cantidad de finos (porcentaje adicional de ceniza) que posee la mezcla de emulsión asfáltica, siendo esto una propiedad importante de considerar al momento de evaluar la condición funcional de un pavimento.

7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1. Conclusiones

Se determinó un diseño de mezcla con emulsión asfáltica AE tipo CSS-1h y cenizas volantes FBC 10% en relación al peso, como alternativa de mezcla para la fabricación de bloques de asfalto, en base a resultados obtenidos de resistencia a tracción indirecta, resistencia retenida, módulo, estabilidad, y fluencia; y comparando estos resultados con una mezcla comúnmente usada de asfalto en caliente HMA. Se obtuvo una resistencia inicial ITS aproximada de 340 kPa con un factor promedio de 0.70 de resistencia retenida TSR (%). Este factor indicó la influencia que tiene este tipo de mezcla respecto a la presencia de agua, debido principalmente a la presencia del filler en la mezcla, que actúa como cementante dentro de la misma y por la necesidad de agua que está requiere durante su fabricación y quiebre. Estos resultados se pueden dimensionar mejor a través de los resultados obtenidos de TSR para una mezcla HMA, con valores mayores a 0.9. De igual forma, se obtuvo valores de estabilidad Marshall aproximado de 13800 N y fluencia Marshall de 13; comparado con los rangos establecidos de estabilidad mínima de 5338 N para tráfico menor a un millón de ejes equivalentes; y con fluencia en el rango de 8-16 (por factor 0.25 mm). Respecto al valor de módulo determinado en condición seca para AE aproximado de 2000 MPa, se puede apreciar un menor valor respecto a 4000 MPa especificado para una mezcla de HMA medido en condiciones estándar.

Se determinó el valor de módulo resiliente para una capa compuesta de bloques de Asfalto AE de 50 mm de espesor con un colchón de arena de 1 cm aproximado de espesor, mediante el ensayo de deflectometría de Impacto FWD y complementado con programa EVERCALC para análisis de retrocálculo, bajo ciertas condiciones de carga, clima, humedad. Como resultado se obtuvo un módulo de capa aproximado de 2500 MPa, con un error cuadrático medio de 8%; valor que tiene relación con el módulo generalmente asumido para una capa de pavimento flexible de mezcla de asfalto en caliente igual a 4000 MPa; considerando las diferencias tanto estructurales como

funcionales entre estos dos tipos de pavimentos asfálticos. Así mismo, se recomienda utilizar un módulo igual a 1400 MPa para el cálculo estructural utilizando un método mecanicista como mePADS, como una manera de considerar en el diseño valores de parámetros conservadores y por la falta de un tipo de método para el análisis de este tipo de pavimento.

Mediante el análisis estructural de pavimento articulado con bloques asfálticos se propone dos alternativas de diseño: a) La primera alternativa es la construcción de un pavimento articulado compuesto por un suelo de sub-rasante con CBR no menor a 11%, una capa de sub-base con 15 cm de espesor y con CBR 40% mínimo; una capa de base de 15 cm de espesor con un CBR 80% mínimo y finalmente una capa de bloques asfálticos de 5 cm de espesor con una sección de 15 x 25 cm y apoyados sobre un colchón de arena de 1 cm de espesor; y b) La segunda alternativa es la construcción de un pavimento articulado compuesto por un suelo de subrasante con CBR no menor a 11%, una capa de base con 30 cm de espesor y con CBR 80% mínimo; y finalmente una capa de bloques asfálticos de 5 cm de espesor con una sección de 15 x 25 cm y apoyados sobre un colchón de arena de 1 cm de espesor aproximado.

Se determinó que existe un incremento de la resistencia a tracción indirecta ITS y del módulo de rigidez, respecto al tiempo de fabricación, sobre mezclas de emulsión asfáltica; debido principalmente a la existencia de ceniza FBC como material cementante dentro de la misma, la cual por la presencia de humedad debido a la emulsión y clima, tiene un proceso de curado e hidratación durante el tiempo, logrando incrementar el valor de su propiedad mecánica inicial.

Ensayos realizados sobre un mismo tipo de mezcla, condiciones de curado y procesos de ensayo, en probetas de 100 mm y 150 mm; presentan resultados con cierta variación como: 13% en ensayo de ITS y 7% en ensayos de módulo.

Se determinó mediante ensayo de deflectometría de impacto liviano LFWD entre un pavimento flexible y el pavimento articulado propuesto en esta investigación, fabricado ambos con mezcla de emulsión asfáltica, que presentan valores de módulo dinámico muy similares, cumpliendo con un requisito estructural necesario para el estudio de pavimentos asfálticos.

Existe una variación mínima entre los resultados obtenidos de ensayos de deflectometría de impacto FWD y LFWD, realizados sobre capas granulares en un pavimento (subrasante y base granular); mientras que sobre pavimentos articulados con bloques asfálticos, existe una variación considerable, debido esto principalmente al proceso de análisis de los resultados y de la capacidad de carga de cada equipo.

Bloques asfálticos de 25x15x5 cm, fabricados con mezcla de asfalto en caliente y emulsión asfáltica, presentan similares propiedades de resistencia a la compresión. Respecto de la resistencia a la flexión, los bloques fabricados con emulsión asfáltica presentan menores valores de resistencia frente a bloques fabricados con mezclas convencionales de asfalto en caliente debido a que este tipo de mezcla con presencia de materiales cementantes como la ceniza FBC, crea un tipo de mezcla más rígido y más frágil. Respecto a la resistencia al desgaste superficial, existe un mayor valor de desgaste en bloques de emulsión asfáltica frente a bloques de asfalto en caliente, debido a la presencia de mayor cantidad de finos dentro de la misma, lo que provoca una menor adherencia entre material aglomerante y agregados.

7.2. Recomendaciones

En el proceso de diseño de mezcla asfáltica, se debe mencionar que una mezcla común de HMA puede ser utilizada de igual forma para la fabricación de bloques de asfalto, requiriéndose complementar esta alternativa con un análisis de precios unitarios para evitar costos innecesarios como una alternativa de pavimentación. Además se requiere mejorar el diseño de mezcla de emulsión con ceniza FBC, ya que se observó un

comportamiento de falla frágil de los elementos de ensayo, debido al comportamiento cementante que brinda la ceniza dentro de la mezcla.

De los resultados obtenidos de testigos de mezclas de asfalto HMA y AE para evaluar tanto ITS como módulo, se pudo apreciar que existe un considerable aumento de resistencia en dichas propiedades en función del tiempo en base a la presencia de ceniza que actúa como material cementante y comparado con los valores obtenidos inicialmente tanto para mezclas de laboratorio como terreno, por lo que es necesario realizar un estudio complementario del comportamiento a través del tiempo, principalmente para mezclas AE con adición de ceniza FBC.

Los ensayos realizados de resistencia a compresión, flexión y desgaste superficial sobre probetas y bloques asfálticos, fueron adaptados según las condiciones de los equipos utilizados respecto a condiciones de carga, presión, abrasión; por lo cual se recomienda validar dichos resultados mediante repetitividad de ensayos o a través de implementación de equipos y materiales que permitan determinar de forma más real dichas propiedades requeridas de los elementos.

El análisis de retro cálculo mediante programa EVERCALC, presentó un error cuadrático medio aproximado de 8 %, respecto al análisis del módulo de las capas del pavimento, y que fueron obtenidos del ensayo FWD; siendo un valor superior al recomendado entre 1-2%; recomendando realizar diferentes iteraciones con los mismos ensayos realizados o ensayos adicionales, de tal forma de disminuir el error cuadrático medio, y comparar con los resultados obtenidos en esta investigación.

Los resultados obtenidos entre la deflectometría de impacto FWD y el deflectómetro de impacto liviano LFWD, sobre capa de bloques de asfalto, presentaron una elevada diferencia de resultados igual a 2559 MPa y 214 MPa, respectivamente, recomendando determinar la relación que existe entre estos dos métodos al momento de evaluar dos capas de bloques asfálticos.

Para el diseño estructural de pavimento de bloques de asfalto se utilizó un método mecanicista analizado mediante el programa mePADS, obteniendo como resultado tensiones y deformaciones luego de un análisis donde se asume una capa continua de asfalto como superficie de rodado; por lo cual, dichos supuestos no representa el comportamiento real de un pavimento compuesto por bloques asfálticos. En lo posible considerar o determinar un método que permita evaluar pavimentos compuestos por una capa de rodado de bloques de asfalto, donde a más de considerar el espesor de la carpeta, permita considerar longitudes de la misma, para valores considerablemente pequeños y de materiales de comportamiento visco-elástico.

Esta investigación estuvo limitada a la evaluación de un pavimento construido con bloques de asfalto a escala real, mediante el análisis estructural de diferentes ensayos con la utilización de cargas estáticas y dinámicas. Como complemento a esta investigación, se requerirá evaluar el comportamiento de este tipo de pavimento bajo condiciones de carga dinámicas continuas, con el propósito de determinar su comportamiento estructural y funcional durante el tiempo.

BIBLIOGRAFIA

AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials) (Ed.). (2001). Standard specifications for transportation materials and methods of sampling and testing: Washington, D.C. USA.

AASHTO T 312, Preparing and determining the density of hot-mix asphalt (HMA) specimens by means of the superpave gyratory compactor.

American Association of State Highway and Transportation Officials (Ed.). (1993). AASHTO-guide for design of pavement structures 1993. Washington, D.C. USA.

American Society for Testing and Materials (ASTM). USA:

ASTM C 136, Standard test method for sieve analysis of fine and coarse aggregates.

ASTM C 140, Standard test methods for sampling and testing concrete masonry units and related units.

ASTM C 144, Standard specification for aggregate for masonry mortar.

ASTM C 33, Standard specification for concrete aggregates.

ASTM C 67, Standard test methods for sampling and testing brick and structural clay tile, section 8, freezing and thawing.

ASTM C 698, Standard test method for laboratory compaction characteristics of soil using standard effort (12,000 ft-lbf/ft³ (600 kN-m/m³)).

ASTM C 936, Specification for solid interlocking concrete paving units.

ASTM D 1557, Test method for laboratory compaction characteristics of soil using modified effort (56,000 ft-lb/ft³ (2,700 kN-m/m³)).

ASTM D 2940, Specification for graded aggregate material for bases or subbases for highways or airports.

ASTM D 3381, Standard specification for viscosity-graded asphalt cement for use in pavement construction.

Asphalt Institute (Ed.). A basic asphalt emulsion manual, MS-19 (3ra Ed.). USA.

Baoshan, H., Xiang Shu, & Xingwei Chen. (2006). Effects of mineral fillers on hot-mix asphalt laboratory-measured properties. *International Journal of Pavement Engineering*, 8, 1-1-9.

- British Standards BSi (Ed.). (2004). Bituminous mixtures test methods for hot mix asphalt. London.
- Carl Bro Pavement Consultants (Ed.). (2005). Portable falling weight deflectometer. USA.
- Garnica, P., & Correa, A. (2004). Conceptos Mecanicistas en Pavimentos (Publicación Técnica No. No 258). México.
- Huang, Y. H. (Ed.). (2004). Pavement analysis and design (Second ed.). USA.
- Instituto del Cemento y del Hormigón en Chile - ICH. (2011). Pavimentos de adoquines.
- Knapton, J. (1976). The design of concrete block roads No. 42.515). UK.: Cement and Concrete Association.
- Labuz, J., Kim, W., & Dai, S. (2007). Resilient modulus of base course containing recycled asphalt pavement. Journal of Transportation Research Board.
- Meegoda, J. (1999). Stabilization/Solidification of petroleum-contaminated soils with asphalt emulsions. ASCE (American Society of Civil Engineers).
- Ministerio de Obras Públicas MC.V-3. (2005). Santiago, Chile.
- Manual de Carreteras V.3 "Instrucciones y Criterios de Diseño".
- Manual de Carreteras V.5. "Especificaciones técnicas generales de construcción".
- Manual de Carreteras V.8. "Especificaciones y métodos de muestreo".
- National Asphalt Pavement Association NAPA. (2005). Virtual superpave laboratory.2/5
- Niazi, Y., & Jalili, M. (2008). Effect of portland cement and lime additives on properties of cold in-place recycled mixtures with asphalt emulsion.
- Nicholls, C. (1998). In Nicholls C. (Ed.), Asphalt surfacings (1998th ed.). London and New York: E&FN Spon.
- Núñez, Á., & Thenoux, G. (2008). Estudio de Factibilidad Técnica de Mezclas Asfálticas en Frío con Emulsiones y Cenizas FBC para la Fabricación de Adoquines: "Adofaltos". Memoria para optar al título de Magíster en Ciencias de la Ingeniería, Pontificia Universidad Católica de Chile. Chile.
- Panda, B., & Ghosh, A. (2002). Structural behavior of concrete block paving II. Journal of Transportation Engineering, 128, 130-135.

Park, J., Lee, J., Pyun, H., & Gee, Chae, Lee, Sangho. Novel porous pavement blocks for urban rainwater management and non-point source pollution control.

Pérez, A., Garnica, P., Gómez, J., & Martínez, G. (2004). In IMT (Instituto Mexicano del Transporte) (Ed.), *Uso y calibración de deflectómetros de impacto en la evaluación estructural de pavimentos*. México.

Qin Jianfeng. (2010). Predicting flexible pavement structural response using falling weight deflectometer deflections. Unpublished The Russ College of Engineering and Technology of Ohio University, USA.

Rada, G., Smith, D., Miller, J., & Witczak, M. (1990). Structural design of concrete block pavements. *Journal of Transportation Engineering*, 116, 615-615-635.

Reyes, O., Troncoso, J., & Camacho, J. (2006). *Comportamiento Mecánico y Dinámico de una mezcla asfáltica con adición de Cenizas Volantes*.

Rivera, G. (1998). *Emulsiones asfálticas* (4ta ed.). México: Alfaomega.

Shell International Petroleum Company Limited (Ed.). (1978). *Shell pavement design manual*. London.

Songlin, M., Xiangshen, H., & Dayong, W. (2009). Research on structural design of interlocking concrete block pavement for rural road. *ICCTP 2009: Critical Issues in Transportation Systems Planning, Development, and Management*, 2535-2538.

Thenoux, G. (Ed.). (2009). *Apuntes de Curso Diseño Estructural de Pavimentos* (Escuela de Ingeniería, Dpto. Ingeniería y Gestión de la Construcción, Pontificia Universidad Católica de Chile ed.). Santiago, Chile.

Theyse, H. L., De Beer, M., & Rust, F. C. (1996). Overview of the south african mechanistic pavement design method. *Journal of the Transportation Research Board*, 1539, 1-1-42.

Uni-Group U.S.A. (2010). Technical data.

Washington State Department of Transportation. (2005). *EVERSERIES, User's guide pavement analysis computer software and case studies*. USA.

ANEXOS

ANEXO A: ENSAYOS DE LABORATORIO PARA DISEÑO Y FABRICACIÓN DE MEZCLAS ASFÁLTICAS

Tabla A-1: Informe de Laboratorio LACEM sobre Diseño de HMA

LACEM S.A.

Laboratorio Control y Ensayos de Materiales
Institución Oficial de Control Técnico, Resolución MINVU N° 8637 del 29 de Diciembre de 2008



SISTEMA NACIONAL
DE ACREDITACIÓN
LE 452 / LE 453 / LE 455

Informe N°	95570
Fecha de emisión :	13.03.09
Página	1 de 4

DISEÑO DE MEZCLA ASFALTICA

Obra	OBRAS VARIAS
Solicitante	BITUMIX S.A., PLANTA MAIPÚ
Dirección Solicitante	OBISPO ARTURO ESPINOZA CAMPOS N° 3172, MACUL
Localización obra	REGION METROPOLITANA
Proyecto N°	SIN INFORMACION

ANTECEDENTES GENERALES

Ensayo realizado	Diseño de mezclas asfálticas en caliente mediante el método Marshall
Normas aplicadas	LNV-47-2003
Identificación del elemento muestreado	Concreto Asfáltico en caliente con CA 24, tamaño máximo 12,5mm. Carpeta tránsito liviano. Según especificaciones técnicas para pav. asfálticos del SERVIU Metropolitano. Producto: Carpeta 12,5 mm (1/2"), TL Pasajes SERVIU, banda V-12a; Maipú.-
Ubicación en obra	-----
Fecha de muestreo	26 de enero de 2009
Fecha de ensayo	05 al 27 de febrero de 2009
Número de OTT	6989 - 6990 - AF
N° Correlativo de obra	-----

Observaciones particulares :
De acuerdo a lo que se indica en el Manual de Carreteras, Vol. 8, cap. 8.302.40, ítem 3.6c, la compactación de las probetas se realizó con 50 golpes por cada cara.

Observaciones generales :
Este Informe no puede ser reproducido sin autorización de la Gerencia General.

LACEM S.A.
Laboratorio Control y
Ensayos de Materiales

AV. AMERICO VESPUCIO N° 1392 - QUILICURA
FONO/FAX: 6038242 E-Mail: lacem@123mail.cl

LACEM S.A.

Laboratorio Control y Ensayes de Materiales

Institución Oficial de Control Técnico, Resolución MINVU N° 8637 del 29 de Diciembre de 2008



Informe N°	95570
Fecha de emisión :	13.03.09
Página	2 de 4

DISEÑO DE MEZCLA ASFALTICA**RESULTADOS****I.- IDENTIFICACION DE LOS MATERIALES****1.1.- ASFALTO**

Tipo CA 24
 Procedencia PROBISA

1.2.- ARIDOS

Muestra N°

Tipo de material

Procedencia

	1	2	3
	Garvilla 10 - 13	P. Roca 0-6	P. Roca 0-6
	Pta. Maipú	Pta. Maipú	Antuco

II.- ANALISIS DE LOS MATERIALES**2.1.- Granulometría (% en peso que pasa)**

tamiz de 20 mm (3/4")	100		
tamiz de 12.5 mm (1/2")	100	100	
tamiz de 10 mm (3/8")	62	100	100
tamiz de 5 mm (N° 4)	1	93	98
tamiz de 2.5 mm (N° 8)	1	66	74
tamiz de 1.25 mm (N° 16)	--	44	52
tamiz de 0.63 mm (N° 30)		30	36
tamiz de 0.315 mm (N° 50)		20	25
tamiz de 0.16 mm (N° 100)		14	18
tamiz de 0.08 mm (N° 200)		10	11

2.2.- Constantes físicas e hídricas

Densidad real seca (Kg/m ³)	2,622	2,630	2,637
Densidad aparente (Kg/m ³)	1,402	1,595	1,719
Partículas chancadas (%)	100	100	100
Partículas lajeadas (%)	0	0	0
Angularidad finos (%)	14,3	22,0	15,6
Desgaste de Los Angeles (%)	6,0	7,0	7
Índice de plasticidad	NP	NP	N.P.

LACEM S.A.
 Laboratorio Control y
 Ensayes de Materiales

LACEM S.A.

Laboratorio Control y Ensayes de Materiales

Institución Oficial de Control Técnico, Resolución MINVU N° 8637 del 29 de Diciembre de 2008



Informe N°	95570
Fecha de emisión :	13.03.09
Página	3 de 4

DISEÑO DE MEZCLA ASFALTICA**RESULTADOS****III.- DOSIFICACION DE LOS ARIDOS EN PESO**

De acuerdo a las características de los áridos, estos se mezclaron como sigue

Muestra N° 1	Garvilia 10 - 13	16%
Muestra N° 2	P. Roca 0-6	50%
Muestra N° 3	P. Roca 0-6	34%

3.1.- Características de la mezcla

Granulometría (% en peso que pasa)

Banda Especificada
V-12a

Granulometría (% en peso que pasa)				Banda Especificada V-12a	
tamiz de 20 mm (3/4")	100			100	
tamiz de 12.5 mm (1/2")	100			85	100
tamiz de 10 mm (3/8")	94			---	---
tamiz de 5 mm (N° 4)	80			65	80
tamiz de 2.5 mm (N° 8)	58			50	65
tamiz de 1.25 mm (N° 16)	40			37	52
tamiz de 0.63 mm (N° 30)	27			25	40
tamiz de 0.315 mm (N° 50)	19			18	30
tamiz de 0.16 mm (N° 100)	13			10	20
tamiz de 0.08 mm (N° 200)	9			3	10
Densidad real (Kg/m3)	2,631				
Densidad específica (Kg/m3)	2,644				
Absorción de Asfalto (%)	0,185				
Dmm para 6,0 % (Kg/m3)	2,422				
Adherencia con CA - 24 AASHTO (% ref. ag.)	+95			min.	95
Adherencia R. y W. (%)	2 - 9			min.	0 - 5
Equivalente de Arena (%)	74			min.	50
Desintegración por Sulfatos (%) (*)	0,9			máx.	15
Sales solubles (%) (*)	no contiene			máx.	2
Desgaste de Los Angeles (%)	18,6			máx.	35
Partículas Chancadas (%)	100			min.	70
Partículas Lajeadas	0			máx.	10
Índice de Plasticidad	N.P.			N.P.	

(*) Ensayo fuera del alcance de la acreditación.-

LACEM S.A.
Laboratorio Control y
Ensayes de Materiales

AV. AMERICO VESPUCIO N° 1392 - QUILICURA
FONO/FAX: 6038242 E-Mail: lacem@123mail.cl

LACEM S.A.

Laboratorio Control y Ensayes de Materiales
Institución Oficial de Control Técnico, Resolución MINVU N° 8637 del 29 de Diciembre de 2008



Informe N°	95570
Fecha de emisión :	13.03.09
Página	4 de 4

DISEÑO DE MEZCLA ASFALTICA**RESULTADOS**

IV.- PARAMETROS MARSHALL (50 golpes por cara)						
CA 24	5,0	5,5	6,0	6,5	7,0	exigencias
Densidad (kg/m ³)	2,260	2,281	2,304	2,325	2,315	
Huecos en la mezcla	7,9	6,5	4,9	3,4	3,2	3 - 8
V.A.M (%)	18,2	17,8	17,4	17,0	17,8	min. 14
Huecos Llenos (%)	56	64	72	80	82	
Fluencia (0,01")	11,7	12,4	13,2	13,8	14,3	8 - 16
Estabilidad (N)	7,652	8,203	8,599	8,972	8,315	6000 - 9000
Relac. Estabilidad / Fluencia	2,667	2,697	2,656	2,651	2,371	1800 - 4200

Según L.N.V. - 47 - 2003:

Optimo por estabilidad	6,5
Optimo por densidad	6,5
Optimo para 5,5 % de huecos	5,8
	6,3 +/- 0,3

V.- MEZCLA DE TRABAJO

Granulometría (% en peso que pasa)			Banda de Trabajo	
tamiz de 20	mm	(3/4")	100	
tamiz de 12.5	mm	(1/2")	95	100
tamiz de 10	mm	(3/8")	89	99
tamiz de 5	mm	(N° 4)	75	85
tamiz de 2.5	mm	(N° 8)	54	62
tamiz de 1.25	mm	(N° 16)	36	44
tamiz de 0.63	mm	(N° 30)	24	30
tamiz de 0.315	mm	(N° 50)	16	22
tamiz de 0.16	mm	(N° 100)	11	15
tamiz de 0.08	mm	(N° 200)	7	11
Optimo C.A. - 24	(% ref. ag.)		6,3 +/- 0,3	
Densidad Marshall	(kg/m ³)		2,317	
Temp. de mezclado	(°C)		140 - 175	
Temp. de compactación inicial	(°C)		125 - 150	

OBSERVACIONES:

La dosificación de los áridos para efectos de la alimentación en frío debe variar de acuerdo a la dispersión de las granulometrías en el transcurso de la obra.

LACEM S.A.
Laboratorio Control y
Ensayes de Materiales

CRISTIAN ALARCON BRAVO
INGENIERO CIVIL U.C.

3.2.- Análisis Granulométrico.

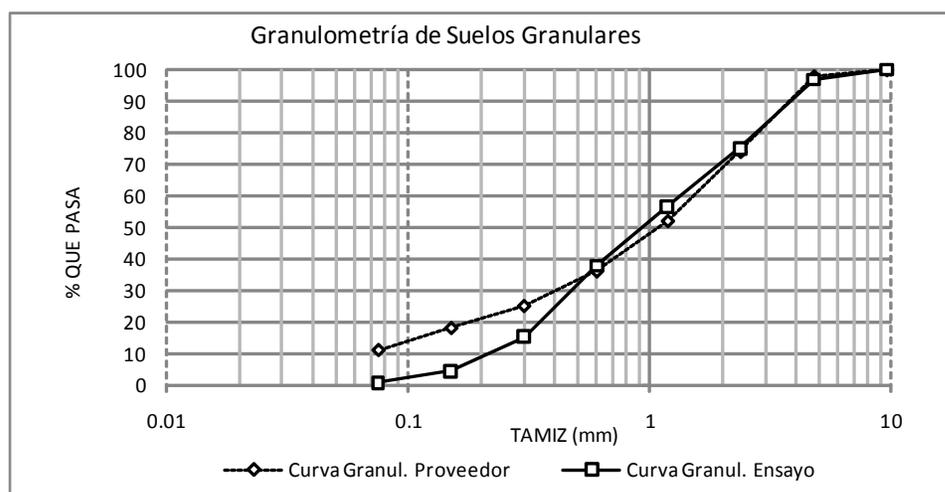
Mallas Tyler Muestra	Abertura Malla (mm)	Masa (g)	% Retención
40	0.42	28.128	20.63
100	0.147	52.128	38.24
200	0.074	13.520	9.92
325	0.043	11.350	8.32
<325	<0.043	31.200	22.89

NOTA: Los resultados obtenidos son válidos sólo para la muestra analizada, la cual fue proporcionada e identificada por el solicitante.

MONICA DIAZ BADILLO
Jefe División Química
Cesmec S.A.

Tabla A-3: Granulometría de Polvo de Piedra Antuco para Diseño de Mezcla.

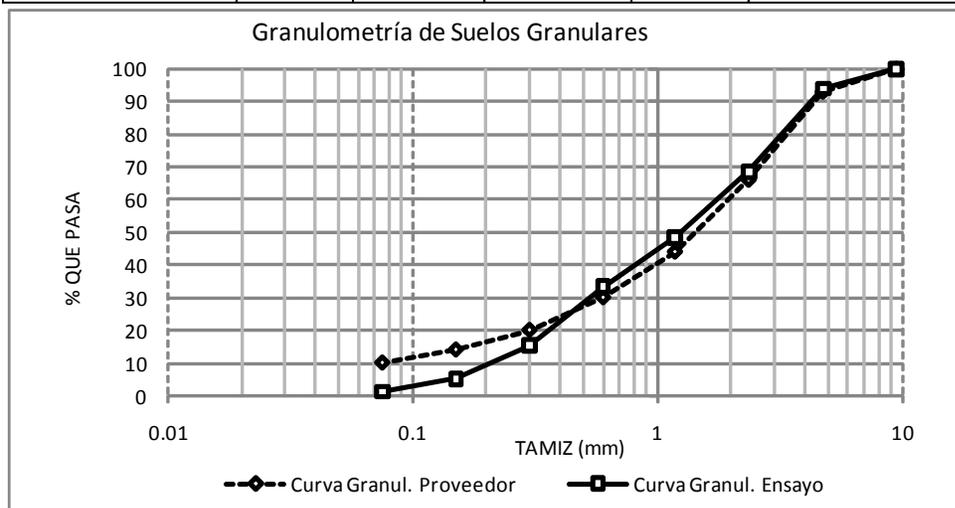
PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CHILE LABORATORIO DE INGENIERÍA CIVIL						
PROYECTO: Adofaltos - Tramo de Prueba			FECHA: 28/ enero / 2010			
MUESTRA: Polvo de Piedra - Antuco			USO : DISEÑO MEZCLA ASFÁLTICA			
PROVEEDOR:			REALIZADO POR : F.A			
DETERMINACIÓN DE GRANULOMETRÍA DE LOS AGREGADOS						
TAMIZ		PESO RETENIDO	%RETENIDO	%RETENIDO ACUMULADO	%QUE PASA	Datos de Proveedor
1"	25					
3/4"	19					
1/2"	12.5					
3/8"	9.5	0	0.00	0.00	100.00	100
N° 4	4.75	16.29	3.24	3.24	96.76	98
N° 8	2.36	108.99	21.70	24.95	75.05	74
N° 16	1.18	92.62	18.44	43.39	56.61	52
N° 30	0.600	94.55	18.83	62.21	37.79	36
N° 50	0.300	112.67	22.43	84.65	15.35	25
N° 100	0.150	54.79	10.91	95.56	4.44	18
N° 200	0.075	18.76	3.74	99.29	0.71	11
fondo	0	3.55	0.71	100.00	0.00	
TOTAL		502.22	100.00			



OBSERVACIONES: La muestra fue tomada de la pila de material correspondiente depositadas en el tramo de prueba.

Tabla A-4: Granulometría de Polvo de Piedra Maipú para Diseño de Mezcla.

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CHILE LABORATORIO DE INGENIERÍA CIVIL						
PROYECTO: Adofaltos - Tramo de Prueba			FECHA: 28/ enero / 2010			
MUESTRA: Polvo de Piedra - Maipú			USO : DISEÑO MEZCLA ASFÁLTIC.			
PROVEEDOR:			REALIZADO POR : F.A			
DETERMINACIÓN DE GRANULOMETRÍA DE LOS AGREGADOS						
TAMIZ		PESO RETENIDO	%RETENIDO	%RETENIDO ACUMULADO	%QUE PASA	Datos de Proveedor
1"	25					
3/4"	19					
1/2"	12.5					
3/8"	9.5	0	0.00	0.00	100.00	100
N° 4	4.75	31.34	5.99	5.99	94.01	93
N° 8	2.36	133	25.41	31.40	68.60	66
N° 16	1.18	105.55	20.17	51.57	48.43	44
N° 30	0.600	79.03	15.10	66.67	33.33	30
N° 50	0.300	93.88	17.94	84.61	15.39	20
N° 100	0.150	53.11	10.15	94.76	5.24	14
N° 200	0.075	20.82	3.98	98.74	1.26	10
fondo	0	6.59	1.26	100.00	0.00	
TOTAL		523.32	100.00			



OBSERVACIONES: La muestra fue tomada de la pila de material correspondiente depositadas en el tramo de prueba.

Tabla A-5: Granulometría Combinada de Agregados (%) para Diseño de Mezcla Asfáltica.

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CHILE									
LABORATORIOS DE ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL									
PROYECTO: Adofaltos - Tramo de Prueba					FECHA: 28 Enero del 2010				
PROVEEDOR:					USO: Diseño de Mezcla Asfáltica.				
Muestra: Muestra Combinada					REALIZAD F.A				
COMBINACIÓN GRANULOMÉTRICA DE AGREGADOS									
Material		COMBINACIONES EN PORCENTAJE							
Gravilla 1/2		20		30		40		35	
Polvo piedra Maipu		45		30		30		35	
Polvo piedra Antuco		24		30		20		20	
Ceniza		11		10		10		10	
Tamiz		Peso Retenido	% Pasa	Peso Retenido	% Pasa	Peso Retenido	% Pasa	Peso Retenido	% Pasa
1"	25		100		100		100		100
3/4"	19		100		100		100		100
1/2"	12.5		100		100		100		100
3/8"	9.5	48.62	93.91	100.95	89.91	100.02	89.99	76.90	92.30
N° 4	4.75	137.89	76.65	223.96	67.51	318.59	58.11	299.65	62.32
N° 8	2.36	150.55	57.80	164.71	51.04	147.69	43.33	178.40	44.46
N° 16	1.18	109.34	44.12	117.23	39.32	97.50	33.57	109.15	33.54
N° 30	0.600	84.17	33.58	94.49	29.87	77.56	25.81	78.39	25.69
N° 50	0.300	88.02	22.56	103.57	19.51	114.55	14.34	66.49	19.04
N° 100	0.150	75.33	13.13	66.17	12.89	56.71	8.67	41.99	14.84
N° 200	0.075	86.63	2.28	105.00	2.39	70.55	1.61	102.39	4.59
fondo	0	18.24		23.93		16.05		45.87	
total		798.79		1000.01		999.22		999.23	

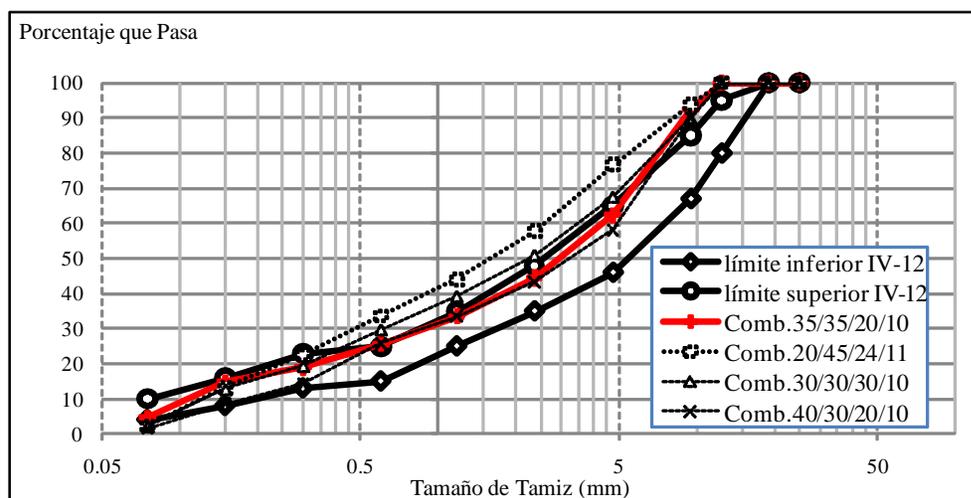


Tabla A-6: Compactación Proctor Modificado para Determinar % Humedad Óptimo.

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CHILE										
LABORATORIOS DE ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL										
PROYECTO: Adofaltos - Tramo de Prueba					FECHA: 28 Enero del 2010					
PROVEEDOR:					USO: Diseño de Mezcla Asfáltica.					
MUESTRA: Granulometría 35-35-20-10					REALIZADO: F.A					
ENSAYO DE COMPACTACIÓN - PROCTOR MODIFICADO										
VOLUMEN DE MOLDE: 929 ml.				PESO INICIAL MUESTRA: 3000 gr.						
ENSAYO NÚMERO :		1	2	3	4	5	6	7	8	
AGUA		0%	2%	4%	6%	8%	11%	13%	4%	
AGREGADA		ml	0	54.9	111	180	240	330	390	120
PESO MOLDE+		con base (gr)	6100.3	6063.6	6042.9	6085.4	6213.8	6286.5	6263	6102.9
SUELO HUM		sin base (gr)		3894	3871.5	3918	4045.3	4117.6	4095.7	3935.1
PESO MOLDE		con base (gr)	4062.7	4062.7	4062.7	4062.7	4062.7	4062.7	4062.7	4062.7
SUELO HUM		sin base (gr)	1896.6	1896.6	1896.6	1896.6	1896.6	1896.6	1896.6	1896.6
PESO SUELO			2037.6	2000.9	1980.2	2022.7	2151.1	2223.8	2200.3	2040.2
HÚMEDO				1997.4	1974.9	2021.4	2148.7	2221	2199.1	2038.5
SUELO HÚMEDO		promedio (gr)	2037.6	1999.15	1977.55	2022.05	2149.9	2222.4	2199.7	2039.35
DENSIDAD HÚMEDA (gr/cm ³)			2.19	2.15	2.13	2.18	2.31	2.39	2.37	2.20
DETERMINACIÓN DE HUMEDAD Y DENS.SECA										
CAPSULA NÚMERO		1	2	3	4	5	6	7	8	
CAPSULA + SUELO HÚMEDO (gr)		641.1	622.9	609.8	538	505.6	598.7	471.5	543.2	
CAPSULA + SUELO SECO (gr)		639.2	616.8	597	519.7	483.3	561.8	448.1	531.7	
PESO CAPSULA (gr)		196.5	196.9	197.2	195.6	197.4	196.6	197.2	197.2	
AGUA (ml)		1.9	6.1	12.8	18.3	22.3	36.9	23.4	11.5	
SUELO SECO (gr)		442.7	419.9	399.8	324.1	285.9	365.2	250.9	334.5	
HUMEDAD (%)		0.4	1.5	3.2	5.6	7.8	10.1	9.3	3.4	
DENSIDAD SECA (gr/cm ³)		2.18	2.12	2.06	2.06	2.15	2.17	2.17	2.12	

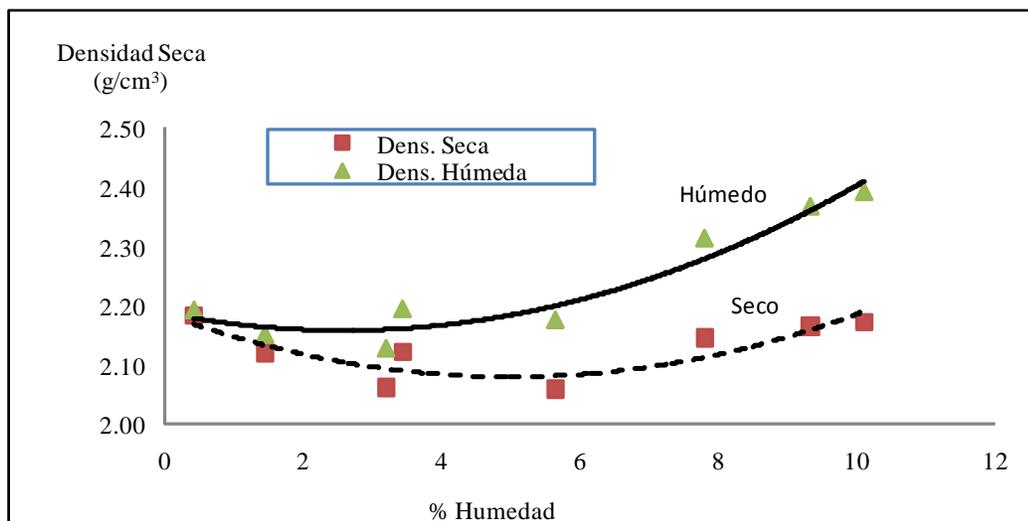


Tabla A-7: Resistencia a Tracción Indirecta ITS de Mezcla AE en Probetas de 100 mm.

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CHILE																	
LABORATORIOS DE ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL																	
PROYECTO: Adofaltos - Laboratorio						FECHA: Febrero - 2010											
PROVEEDOR:						USO: Diseño de Mezcla Asfáltica.											
MUESTRA: Probetas diámetro 100 mm - Laboratorio						REALIZADO: F.A											
DETERMINACIÓN DE LA DENSIDAD Y RESISTENCIA A TRACCIÓN INDIRECTA EN PROBETAS 100 mm Laboratorio																	
No	fecha moldeo	% emulsión	% H _{opt}	Identif. probeta	seca o sumergida	alturas (mm)			h.media (mm)	Peso (gr)	Fuerza (kN)	Densidad (gr/cm ³) promedio		Res. Trac. Indirecta (kPa)	% St	Desv. St (kPa)	Coef. Var %
						h1	h2	h3				St	St				
12	04/02/2000	7.5	10	19	seca	63.23	63.55	63.82	63.53	1072.75	3.74	2.10	369.95	393.88	32	8	
13	04/02/2000	7.5	10	20	seca	63.25	62.91	63.85	63.34	1052.99	3.84	2.06	381.02	430.69	32	8	
14	04/02/2000	7.5	10	21	seca	62.85	62.97	63.29	63.04	1075.68	4.32	2.12	430.69	0.62	32	13	
15	04/02/2000	7.5	10	22	sumergida	62.74	62.67	62.65	62.69	1129.41	2.78	2.24	278.70	243.82	32	13	
16	04/02/2000	7.5	10	23	sumergida	62.94	63.40	63.14	63.16	1126.39	2.17	2.21	215.92	236.84	30	8	
17	04/02/2000	7.5	10	24	sumergida	62.79	62.94	62.93	62.89	1112.61	2.37	2.20	236.84	0.67	7	2	
18	04/02/2000	8	10	1	seca	63.05	63.25	62.93	63.08	1086.77	4.21	2.14	419.45	396.08	10	3	
19	04/02/2000	8	10	2	seca	64.10	64.46	63.82	64.13	1085.39	3.70	2.10	362.60	271.98	10	3	
20	04/02/2000	8	10	3	seca	63.18	63.34	63.33	63.28	1088.44	4.09	2.13	406.17	265.36	7	2	
21	04/02/2000	8	10	4	sumergida	63.34	63.25	63.55	63.38	1133.48	2.61	2.22	258.80	265.36	7	2	
22	04/02/2000	8	10	5	sumergida	63.42	62.71	62.86	63.00	1131.42	2.66	2.23	265.36	271.98	10	3	
23	04/02/2000	8	10	6	sumergida	63.21	63.18	62.85	63.08	1124.23	2.73	2.21	271.98	335.81	19	8	
24	04/02/2000	8.5	10	7	seca	64.63	64.43	64.17	64.41	1073.35	3.31	2.07	322.96	333.83	32	8	
25	04/02/2000	8.5	10	8	seca	63.65	63.87	63.92	63.81	1079.99	3.48	2.10	342.72	233.45	32	8	
26	04/02/2000	8.5	10	9	seca	64.31	64.50	63.76	64.19	1082.57	3.43	2.09	335.81	255.38	32	8	
27	04/02/2000	8.5	10	10	sumergida	63.37	63.62	63.50	63.50	1127.13	2.23	2.20	220.71	233.45	32	8	
28	04/02/2000	8.5	10	11	sumergida	63.02	63.31	63.66	63.33	1121.29	2.26	2.20	224.27	255.38	32	8	
29	04/02/2000	8.5	10	12	sumergida	63.72	63.81	63.68	63.74	1122.68	2.59	2.19	255.38	325.25	32	8	
30	04/02/2000	9	10	13	seca	64.61	63.86	63.98	64.15	1076.83	3.32	2.08	325.25	348.08	32	8	
31	04/02/2000	9	10	14	seca	64.55	64.69	64.43	64.56	1080.40	3.44	2.08	334.88	227.89	32	8	
32	04/02/2000	9	10	15	seca	65.10	64.66	64.61	64.79	1077.68	3.96	2.06	384.11	227.89	32	8	
33	04/02/2000	9	10	16	sumergida	63.94	63.65	63.88	63.82	1126.27	2.39	2.19	235.34	227.89	32	8	
34	04/02/2000	9	10	17	sumergida	64.01	64.06	64.18	64.08	1130.50	2.29	2.19	224.57	227.89	32	8	
35	04/02/2000	9	10	18	sumergida	63.96	64.56	64.43	64.32	1126.30	2.29	2.17	223.76	227.89	32	8	

Tabla A-8: Determinación de Número de Giros en Equipo Compactador SUPERPAVE.

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CHILE LABORATORIOS DE ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL														
PROYECTO:			Adofaltos - Tramo de Prueba			FECHA:			Febrero - 2010					
PROVEEDOR:			Probetas 150 mm			USO:			Diseño de Mezcla Asfáltica.					
MUESTRA:						REALIZADO:			F.A					
DETERMINACIÓN NÚMERO DE VUELTAS Vs DENSIDAD DE MEZCLA - PROBETAS SUPERPAVE														
Muestra No	Identificación muestra	Ensayo Realizado	Fecha Moldeo	Condición Ensayo	# vueltas	Presión (kPa)	Alt. Total molde (mm)	Diámetro (mm)	Altura			Peso (gr)	Densidad (gr/cm ³)	
									1 (mm)	2 (mm)	3 (mm)			Promedio (mm)
1	1	Dens.	05/02/2010	seco	150	150	260	152.40	107.52	107.76	107.23	107.50	4290.20	2.19
2	2	Dens.	05/02/2010	seco	100	150	260	152.40	107.46	107.86	107.77	107.70	4228.80	2.15
3	3	Dens.	05/02/2010	seco	75	150	260	152.40	53.80	53.93	53.88	53.87	2101.40	2.14
4	4	Dens.	05/02/2010	seco	12	150	260	152.40	110.36	111.24	110.97	110.86	4218.10	2.09
5	5	Dens.	05/02/2010	seco	89	150	260	152.40	109.91	109.90	109.50	109.77	4251.30	2.12

ANEXO B: PROGRAMAS COMPUTACIONALES UTILIZADOS EN EL DISEÑO ESTRUCTURAL DE PAVIMENTO

Tabla B-1: Interface de Datos de Entrada de Programa mePADS (Sudafricano) para
Diseño Estructural de Pavimentos Asfáltico Utilizando Método Mecanicista.

The screenshot shows the mePADS software interface with the following data and settings:

mePADS - Untitled

File Help Tools

Pavement Structure | Loads and Evaluation Points | Stresses and Strains | Design Parameters | Pavement Life | Contour Plot | Profile Plot | Calculation Table

Number of Layers: 3 | Number of Phases: 1 | Default input: On

Phase 1

Material	Thickness	E-Modulus	Poisson's Ratio
AC	50	4000	0.4
G2	240	280	0.35
Soil	0	105	0.35

Material E-Modulus Poisson's Ratio

Material E-Modulus Poisson's Ratio

Climatic Region: Dry | Terminal rut: 10 mm

Road Category: A | Design Traffic class: ES0,003

Heading: _____

Description: _____

CSIR
TRANSPORTER

Technical support: Hechter Theyse
email: httheyse@csir.co.za
Marshall Muthen
email: mmuthen@csir.co.za

Software support: Johan du Toit
email: jadutoit@csir.co.za

Calculate

Tabla B-2: Interface de Datos de Salida de Programa mePADS (Sudafricano) para Diseño Estructural de Pavimento Asfáltico Utilizando Método Mecanicista.

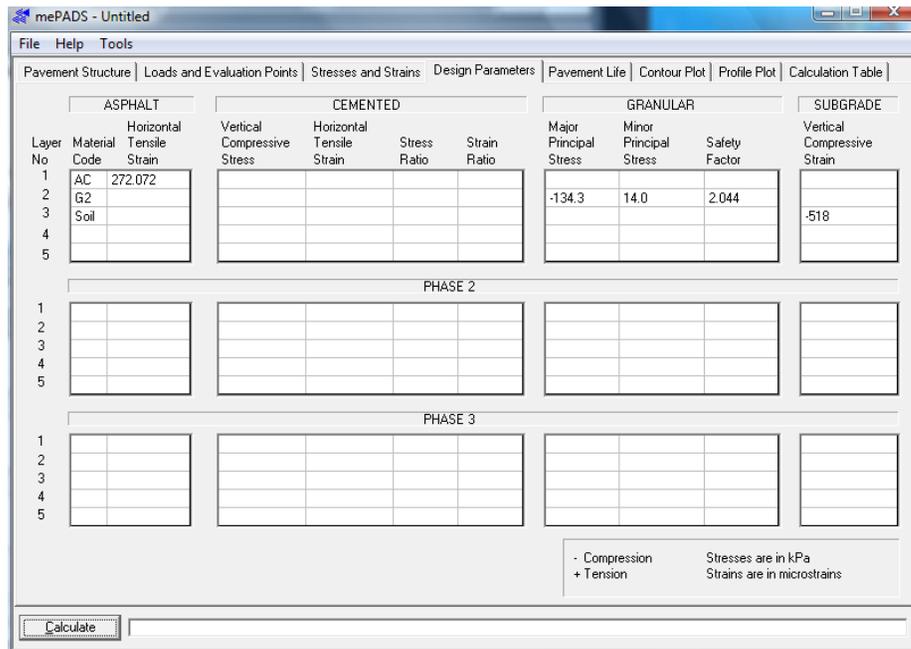


Tabla B-3: Interface de Datos de Entrada de Programa mePADS (Sudafricano) para Diseño Estructural de Pavimentos Articulado de Bloques Asfalto Utilizando Método Mecanicista.

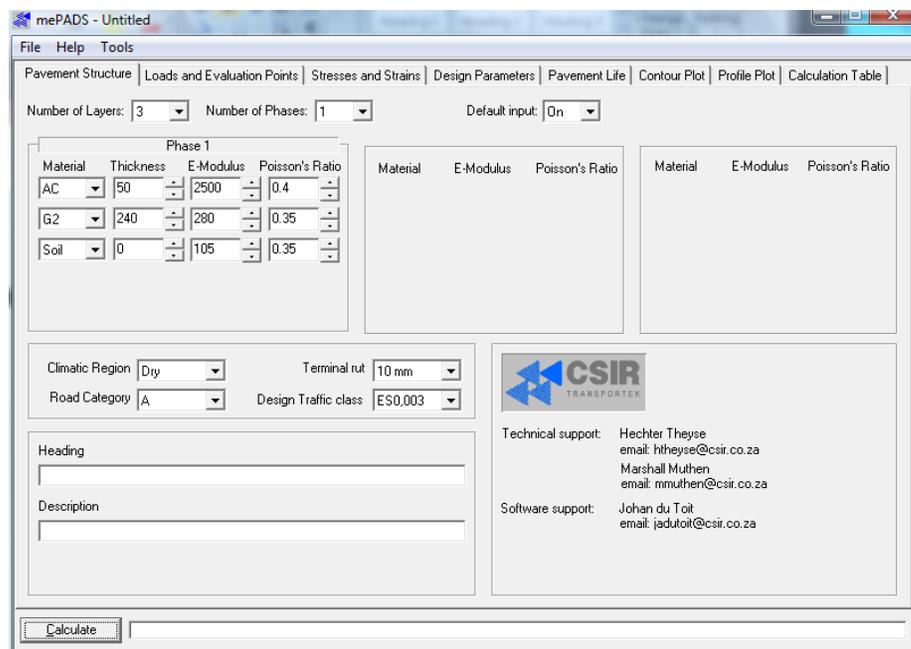


Tabla B-4: Interface de Datos de Salida de Programa mePADS (Sudafricano) para Diseño Estructural de Pavimento Articulado de Bloques Asfálticos Utilizando Método Mecanicista.

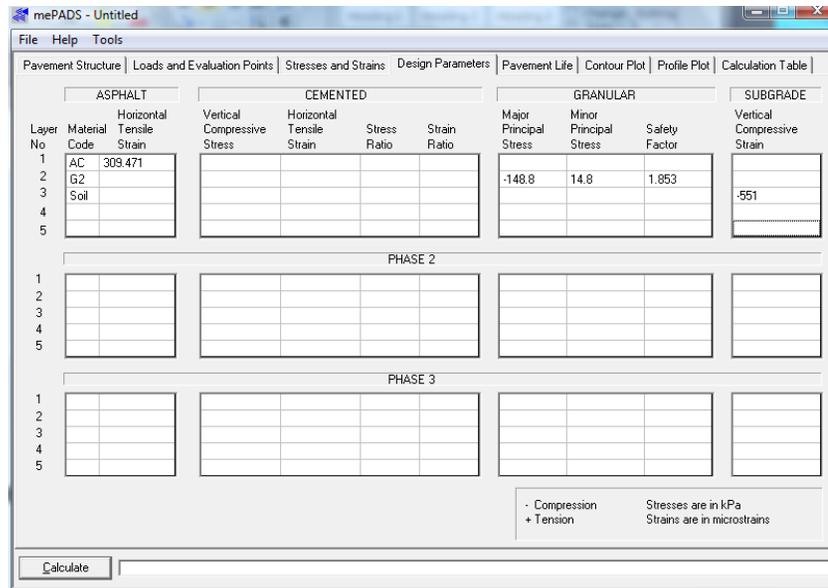


Tabla B-5: Interface de Resultados de Capacidad de Soporte del Pavimento, Representado en Millones de EEq en Programa mePADS para Diseño Estructural de Pavimento Articulado de Bloques Asfálticos.

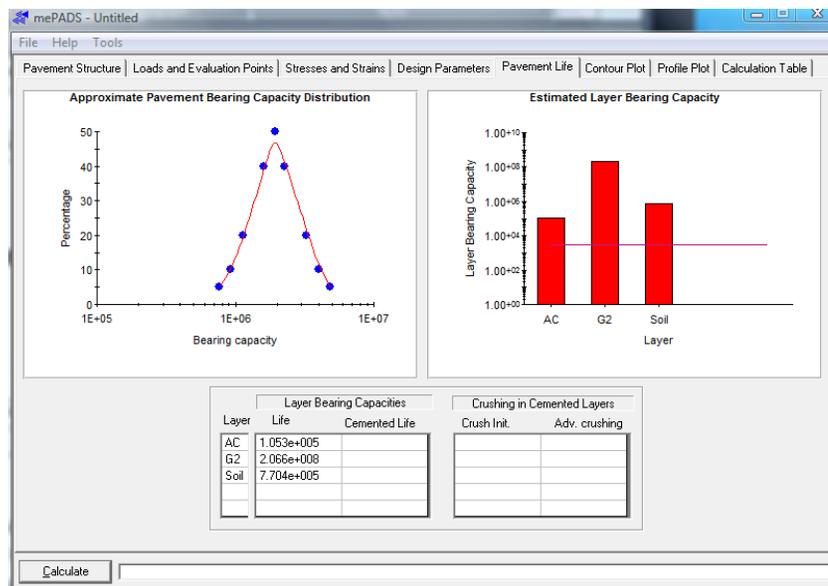


Tabla B-6: Interface de Resultados de Tensiones y Deformaciones en Pavimento, en Función de la Profundidad de Análisis x, y, z, en Programa mePADS para Diseño Estructural de Pavimento Articulado de Bloques Asfálticos.

mePADS - Untitled

File Help Tools

Pavement Structure | Loads and Evaluation Points | **Stresses and Strains** | Design Parameters | Pavement Life | Contour Plot | Profile Plot | Calculation Table

Stress and Strain Results

Phase 1			
x =	0	y = 0	z = 291
SXX =	4.438	SYX =	4.438
SXY =	0	SXZ =	0
PS1 =	4.438	PS2 =	4.438
PSS1 =	29.839	PSS2 =	0
UX =	0	UY =	0
EXX =	2.116e-004	EYY =	2.116e-004
EXY =	0	EXZ =	0
PE1 =	2.116e-004	PE2 =	2.116e-004
PSE1 =	7.673e-004	PSE2 =	0
SZZ =	-55.240	SYZ =	0
PS3 =	-55.240	PSS3 =	29.839
UZ =	0.157	EZZ =	-5.557e-004
EYZ =	0	PE3 =	-5.557e-004
PSE3 =	7.673e-004		

Stresses are in kPa
- Compression
+ Tension

Calculate

Tabla B-7: Archivo Original de Texto Entregado por Equipo para Ensayo de Deflectometría de Impacto FWD sobre Pavimento Articulado de Bloques de Asfalto.

```

1-1 y 1-2 - Notepad
File Edit Format View Help
IKUAB FWD FILE : Cancha de prueba U.C

IFecha de creación : 09/04/2010
IVersion : 2.3.23
IModo de carga : 2 (4+4 small buffers, all weights)
IRadio del plato : 15.0 (cm)
IConjunto de campo : Test
ISecuencia de carga : 123
ICantidad de impactos : 111
IRegistrar impacto : YYY
IAltura de caída : 1 2 3 4
ICarga de impacto : 19.6 29.4 49.0 73.5 kN
ISensor número : 0 1 2 3 4 5 6
IDistancia de sensor: 0.0 20.0 30.0 45.0 60.0 90.0 120.0 (cm)
IPosición de sensor : CENTRO DETRÁS DETRÁS DETRÁS DETRÁS DETRÁS DETRÁS

IPunto de referencia: 0 m
IDistancia entre puntos: 50 m

JDist. Imp Carga D0 D1 D2 D3 D4 D5 D6 Aire Pavi Time
J m Num kN µm µm µm µm µm µm µm °C °C
-----
1-1
D 0 1 21.6 422 218 123 106 79 56 0 24.4 32.5 11:07:56
D 0 2 41.6 816 458 234 226 170 119 0 24.4 32.5 11:08:08
D 0 3 50.9 924 545 345 274 210 147 0 24.4 32.5 11:08:21
1-1-1
D 0 1 21.3 400 215 124 107 80 57 0 24.9 32.6 11:10:58
D 0 2 41.4 738 433 235 222 169 117 0 24.9 32.6 11:11:11
D 0 3 50.5 878 530 347 273 210 145 0 24.9 32.6 11:11:26
1-2
D 0 1 21.6 388 238 124 91 73 50 0 26.1 24.6 11:20:50
D 0 2 41.8 748 478 235 202 159 107 0 26.1 24.6 11:21:04
D 0 3 50.8 858 564 356 256 201 134 0 26.1 24.6 11:21:18

```

Nota: Esta tabla y las posteriores de este anexo, presentan los resultados de análisis de un punto por ensayo. Los archivos completos de ensayos y resultados de los equipos y programas utilizados para esta investigación, se encuentran en el CD correspondiente a la tesis.

Tabla B-8: Interface de Datos de Entrada en Programa EVERCAL para Análisis de Datos de Deflectometría de Impacto FWD Mediante Método de Retrocálculo.

General Data Entry - C:\EVERSERS\EVERCALC\RESULT~1\11Y12.GEN

Title:

No of Layers: No of Sensors: Plate Radius (cm):

Units: Metric US Units Stiff Layer Temp. Correction

Temp. Measurement: Direct Method Southgate Method

Seed Moduli: Internal User Supplied

Sensor Weigh Factor: Uniform Inverse First Sensor User Supplied

Sensor No: 1 2 3 4 5 6 7
 Radial Offset (cm):

Layer Information

No	Layer ID	Poisson' Ratio	Initial Modulus (MPa)	Min. Modulus (MPa)	Max. Modulus (MPa)
<input type="text" value="1"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0.35"/>	<input type="text" value="100.0"/>	<input type="text" value="100.0"/>	<input type="text" value="4000.0"/>

Max. Iteration: RMS Tol. (%): Modulus Tol. (%):

Tabla B-9: Interface de Datos de Entrada (deflexiones y espesores) en Programa EVERCAL para Análisis de Datos de Deflectometría de Impacto FWD para Retrocálculo.

Route:

Station Information

Station	H(1) (cm)	H(2) (cm)	No. of Drops
1	5.50	30.00	3

Deflection Information

Drop No.	Load (N)	Sensor Deflection (microns)						
		1	2	3	4	5	6	7
1	21600.00	422.000	218.000	123.000	106.000	79.000	56.000	0.000
2	41600.00	816.000	458.000	234.000	226.000	170.000	119.000	0.000
3	50900.00	924.000	545.000	345.000	274.000	210.000	147.000	0.000

Buttons: Add Station, Plot, Delete Station, Save, Save As, Cancel

Tabla B-10: Archivos de Salida de Programa de Retrocálculo EVERCALC sobre Datos de Ensayo FWD sobre Pavimento Articulado de Bloques de Asfalto.

```

Backcalculation by Evercalc 5.0 - Summary Output
Route: 11y12
Plate Radius (cm): 15.0 No of Layers: 3
No of Sensors: 7 Stiff Layer: No
Offsets (cm): .0 20.0 30.0 45.0 60.0 90.0 120.0 P-Ratio: .350 .350 .000
Station Load (N) E(1)(MPa) E(2)(MPa) E(3)(MPa) RMS Error
1 Thickness (cm) 5.50 30.00 -
1 21600.0 287.5 202.6 122.4 6.28
1 41600.0 280.7 214.5 112.4 10.15
1 50900.0 924.1 203.7 103.5 3.25
1 Norm. 281.3 213.6 113.2 6.56
  
```

ANEXO C: ENSAYOS EN TERRENO SOBRE TRAMO DE PRUEBA

Tabla C-1: Estudio de Mecánica de Suelos a Nivel de Subrasante Sobre Tramo de Prueba Realizado por DICTUC.

CORRELATIVO GENERAL 863734	
 SISTEMA NACIONAL DE ACREDITACIÓN INN - CHILE Acreditación LE 343 / LE 344 Resolución Exenta 9110 MINVU Versión 02: 09/07/2009 F-E.03-AIG	
FECHA, Santiago 28 de Enero de 2010	
INFORME DE RESULTADOS DE ENSAYOS DE MECANICA DE SUELOS	
IG-2010-0040	
OBRA	: CANCHA DE PRUEBA – CAMPUS SAN JOAQUÍN
UBICACIÓN	: Av. Vicuña Mackenna 4860 - Macul
SOLICITANTE	: Centro de Ingeniería e Investigación Vial - DICTUC
DIRECCIÓN	: Av. Vicuña Mackenna 4860 - Macul
ATENCIÓN	: Srta. Alelí Osorio Lird
Nº PROYECTO	: 2010-003
1. ANTECEDENTES	
Se informan los resultados de ensayos realizados sobre tres muestras ingresadas al Laboratorio del Área de Ingeniería Geotécnica por el cliente con fecha 18 de enero de 2010, se informan además los resultados de ensayos realizados en terreno con por personal de nuestra Área durante los días 19 y 26 de enero de 2010.	
2. RESULTADOS	
2.1. Ensayos de Clasificación	
<ul style="list-style-type: none"> • Granulometría • Límites de Atterberg • Humedad Natural • Proctor Modificado • CBR 	
2.2. Ensayos de Densidad en terreno con Densímetro Nuclear	
2.3. Ensayos de Densidad en terreno con Cono de Arena	
Ing. Ramón Lobos Aravena Gerente de Área Ingeniería Geotécnica	
RLA/VBO/kca.	
La información contenida en el presente informe o certificado constituye el resultado de un ensayo, calibración o inspección técnica especificada acotado únicamente a las piezas, partes, instrumentos, patrones o procesos analizados, lo que en ningún caso permite al solicitante afirmar que sus productos han sido certificados por DICTUC ni reproducir total o parcialmente el logo, nombre o marca registrada de DICTUC, salvo que exista una autorización previa y por escrito de DICTUC.	
Página 1 de 4 IG-2010-0040 Proy. 2010-003 (Cancha de Prueba – San Joaquín)	

CORRELATIVO GENERAL 863734

2. RESULTADOS

2.1 Ensayos de Clasificación

Muestra	A	B	C
Material	Fino	Acopio	Integral
Profundidad (m)	0.70		0.30
Fecha de Ingreso	18-01-10	18-01-10	18-01-10
OTE N°	0590	0590	0590
GRANULOMETRÍA 8.102.1 (MC-V8) (LNV 105) año 2008	Fecha	20-01-10	20-01-10
Tamiz ASTM	Abertura (mm)	Porcentaje que Pasa (%)	
4"	100		100
3"	80		90
2 1/2"	63		81
2"	50		79
1 1/2"	40	100	74
1"	25	78	69
3/4"	20	100	64
3/8"	10	99	55
#4	5	99	51
#8	2.36	99	49
#16	1.18	98	46
#30	0.600	97	41
#50	0.300	93	35
#100	0.150	80	28
#200	0.075	65	24
(1) LÍMITES DE ATTERBERG (NCh 1517/1.079 - NCh 1517/2.079)	Fecha	21-01-10	21-01-10
Límite Líquido		25	25
Límite Plástico		17	17
Índice de Plasticidad		8	8
HUMEDAD NATURAL (NCh 1515.079)	Fecha	20-01-10	20-01-10
Humedad Natural (%)		12.8	7.2
PROCTOR MODIFICADO (NCh 1534/2.079)	Fecha	21-01-10	21-01-10
Método		C	D
Reemplazo (%)		-	28.5
Densidad Seca Máxima (Kg)		1.98	2.11
Humedad Óptima (%)		11.2	8.3

CORRELATIVO GENERAL 863734

Muestra		1	2	3
Material		Fino	Acopio	Integral
Profundidad (m)		0.70		0.30
Fecha de Ingreso		18-01-10	18-01-10	18-01-10
OTE N°		9590	9590	9590
DESGASTE DE LOS ÁNGELES (NCh 1369.Of78)	Fecha	-	25-01-10	-
Desgaste (%)		-	20.7	-
Grado		-	(A)	-
CUBICIDAD DE LAS PARTÍCULAS 8.202.6 (MC-V8) (LNV 3) año 2008	Fecha	-	25-01-10	-
Chancado (%)		-	59	-
Rodadura (%)		-	41	-
Laja (%)		-	1	-
(2) CBR (NCh 1852.Of81)	Fecha	25-01-10	25-01-10	26-01-10
Método		D	D	D
CBR 0.1* Penetración (%)		44	99	49
CBR 0.2* Penetración (%)		44	>100	50
Hinchamiento (%)		1.3	0.1	0.5
Densidad seca de la muestra antes de Inmersión (g/cm ³)		1.88	2.12	2.02
Densidad seca de la muestra después de Inmersión (g/cm ³)		1.85	2.12	2.00
Humedad antes de compactación (%)		11.2	7.0	8.3
Humedad después de compactación (%)		11.2	7.0	8.4
Humedad después de Inmersión (capa superior) (%)		16.1	10.2	12.7
Humedad después de Inmersión (promedio) (%)		14.9	10.4	13.0

(1) Límites de Atterberg: Acanalador Casagrande, método mecánico.

(2) CBR: los porcentajes de penetración de 0.1" y 0.2" se informan para el 95% de la densidad seca máxima del Proctor Modificado o para el 80% de la Densidad Relativa, en muestras sumergidas en agua, de lo contrario se indicará el cambio. Las humedades que se informan, corresponden a la probeta de 25 golpes por capa, estando disponible la información de las otras probetas, en caso de que el cliente la requiera, la medición de hinchamiento que se informa se realiza a la probeta de 25 golpes por capa. Las sobrecargas utilizadas para el ensayo corresponden a 2 cargas de 2.27 Kg. cada una.

Las muestras son guardadas durante un plazo de 1 mes de emitido el Informe de resultados, posterior a este tiempo serán eliminadas, a menos que exista una solicitud escrita del cliente para su resguardo.

CORRELATIVO GENERAL 863734

2.2. Ensayos de Densidad en terreno con Densímetro Nuclear

Se informan los resultados de densidades en terreno tomadas por personal de DICTUC, según Método 8.502.1 (MC-V8) (LNV 19) y 8.502.2 (MC-V8) (LNV 20), año 2008.

Muestra	Capa	Fecha de Muestreo	Densidad Húmeda (kg/l)	Densidad Seca (Kg/l)	Humedad (%)	% Proctor
B-1	S.R.	19-01-10	2.149	2.028	6.0	91.8
B-2	S.R.	19-01-10	2.120	2.014	5.3	91.1
B-4	Base	26-01-10	2.165	2.077	4.2	94.0
B-5	Base	26-01-10	2.274	2.190	3.8	99.1
B-6	Base	26-01-10	2.198	2.111	4.1	95.5

Muestra	Ubicación
B-1	Cancha de Prueba, a 1.0 m al Sur de eje y Km. 0.0318
B-2	Cancha de Prueba, a 1.0 m al Norte del eje y Km. 0.0195
B-4	Cancha de Prueba, Km. 0 + 036
B-5	Cancha de Prueba, Km. 0 + 024
B-6	Cancha de Prueba, Km. 0 + 012

Equipo utilizado: Densímetro Nuclear marca Troxler modelo 3430
Número de serie del Densímetro Nuclear: 28621

2.3 Ensayos de Densidad en terreno con Cono de Arena

Se informan los resultados de densidades en terreno tomadas por personal de DICTUC, según norma NCh 1516.Of79.

Muestra	Capa	Fecha de Muestreo	Densidad Húmeda (kg/l)	Densidad Seca (Kg/l)	Humedad (%)	% Proctor
B-3	S.R.	19-01-10	2.129	2.030	4.9	91.9

Muestra	Ubicación
B-3	Cancha de Prueba, a 1.0 m al Sur de eje y Km. 0.0318

Equipo utilizado: Equipo de Cono Nº 2 y arena normal.

Tabla C-2: Ensayo de Deflectometría de Impacto liviano LFWD con Equipo Prima 100 sobre Suelo de Subrasante.

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CHILE			
LABORATORIOS DE ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL			
PROYECTO:	Adofaltos - Tramo de Prueba	FECHA :	Febrero - 2010
PROVEEDOR:		USO:	Diseño de Mezcla Asfáltica.
MUESTRA:	Tramo de Prueba	REALIZADO :	F.A

ENSAYO CON EQUIPO PRIMA 100 - MÓDULO RESILIENTE - SUB-RASANTE

DERECHA		CENTRO		IZQUIERDA		PROMEDIO		Media
Distancia (m)	Mr (MPa)	Distancia (m)	Mr (MPa)	Distancia (m)	Mr (MPa)	Distancia (m)	Mr (MPa)	Acumulada
2.5	90	2.5	108	2.5	81	2.5	93	
5.0	156	5.2	137	5.2	114	5.0	136	
7.4	127	7.2	172	7.2	160	7.5	153	
9.8	157	10.3	96	10.2	103	10.0	119	
13.0	222	13.0	101	12.4	119	12.5	147	130
15.3	122	15.3	138	15.6	165	15.0	142	139
18.1	203	17.5	119	18.2	162	17.5	161	144
20.0	134	20.0	125	20.0	109	20.0	122	138
22.2	163	22.6	121	23.2	126	22.5	136	142
25.0	125	25.0	130	25.0	154	25.0	136	140
26.5	140	27.9	115	28.0	195	27.5	150	141
30.0	188	30.0	137	30.2	117	30.0	147	138
32.1	178	33.3	170	32.9	152	32.5	166	147
35.2	98	35.2	119	35.0	144	35.0	120	144
38.3	131	38.4	114	37.9	180	37.5	142	145
40.0	83	40.0	139	40.4	214	40.0	145	144
42.4	121	42.1	173	42.3	167	42.5	154	145
44.5	97	44.7	139	44.6	183	45.0	140	140
promedio	141		131		147		139	141
desv.stan	39.1		22.7		35.3		17.4	4.4
coef.var	27.8		17.4		24.0		12.5	3.1

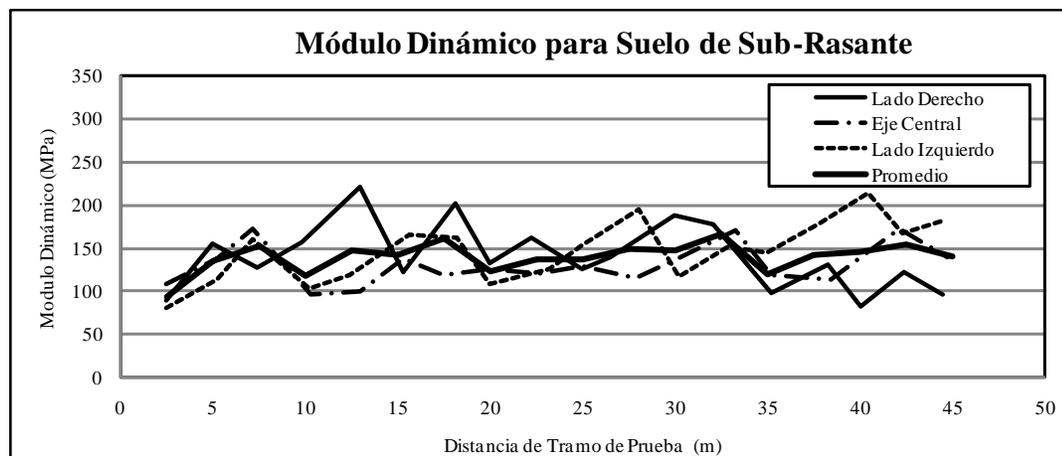
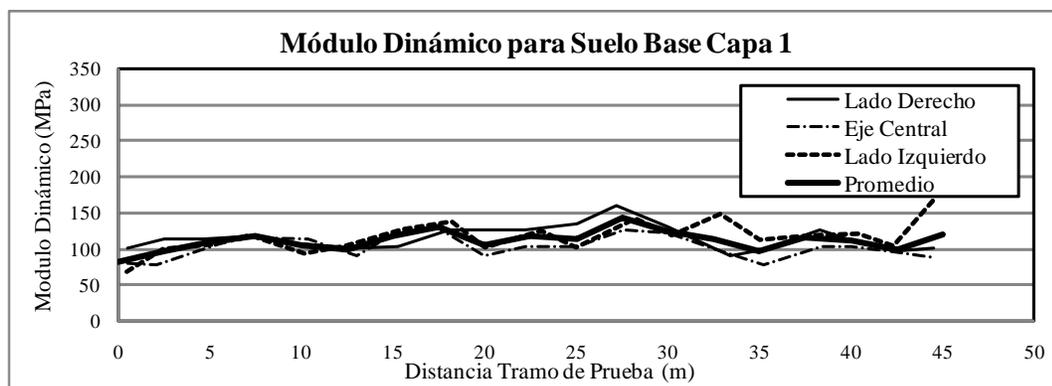


Tabla C-3: Ensayo de Deflectometría de Impacto Liviano LFWD con Equipo Prima 100 sobre Capa 1 de Base (espesor 10 cm).

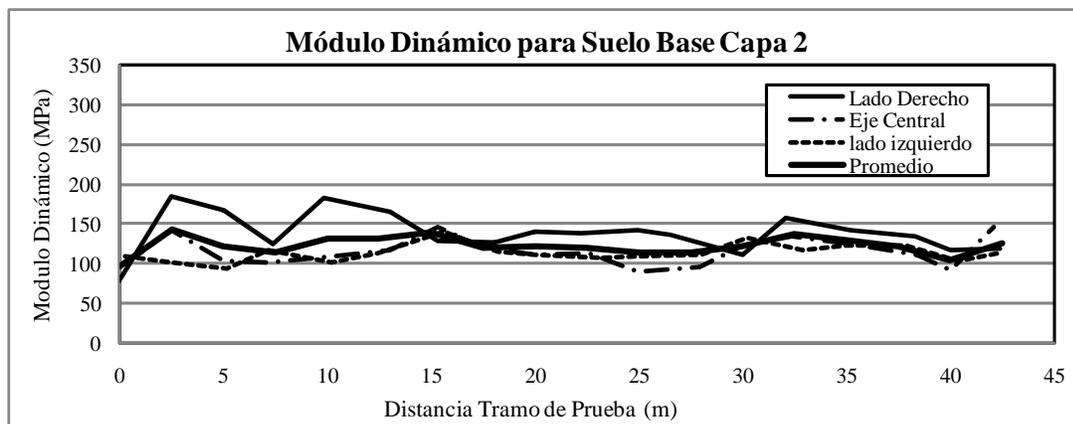
PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CHILE											
LABORATORIOS DE ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL											
PROYECTO: Adofaltos - Tramo de Prueba			FECHA: Febrero - 2010			PROVEEDOR: Tramo de Prueba			USO: Diseño de Mezcla Asfáltica.		
MUESTRA: Tramo de Prueba			REALIZADO: F.A								
ENSAYO CON EQUIPO PRIMA 100 - MÓDULO RESILIENTE - BASE CAPA 1											
DERECHA			DERECHA			DERECHA			DERECHA		Media Acumulada
distancia (m)	Mr (MPa)		distancia (m)	Mr (MPa)		distancia (m)	Mr (MPa)		distancia (m)	Mr (MPa)	
	p=100KPa	p=130KPa		p=100KPa	p=130KPa		p=100KPa	p=130KPa		p=100KPa	
0.50	100.45		0.50	79.67		0.50	68.75		0.00	82.96	
2.50	113.47		2.10	78.31		2.50	99.39		2.50	97.06	
4.70	114.39		5.60	108.53		5.20	107.28		5.00	110.06	
7.50	117.58		7.15	116.99		7.20	119.78		7.50	118.12	
9.80	108.16		10.40	115.10		10.20	94.83		10.00	106.03	103
13.00	100.41		13.00	90.63		12.40	103.88		12.50	98.30	106
15.30	103.26		15.30	125.14		15.60	127.10		15.00	118.50	110
18.10	126.21		17.50	128.97		18.20	137.40	145.95	17.50	130.86	114
20.00	125.78	131.68	20.00	90.35	102.54	20.00	102.54	109.91	20.00	106.22	112
22.20	126.71	141.99	22.20	102.75	104.89	23.10	125.78		22.50	118.41	114
25.00	134.47	137.46	25.00	104.32	118.64	25.00	101.90	107.76	25.00	113.56	118
27.20	160.96	177.48	27.60	125.81	132.80	28.20	141.58	146.21	27.50	142.78	122
30.00	131.76	143.25	30.00	122.45	126.85	30.20	120.28	124.67	30.00	124.83	121
33.40	90.29	98.15	32.40	101.32	110.15	32.90	147.91	156.15	32.50	113.17	123
35.20	99.27	106.79	35.20	77.37	72.31	35.00	112.56	122.00	35.00	96.40	118
38.30	125.77	138.37	38.40	102.84	110.32	37.90	120.17	126.88	37.50	116.26	119
40.00	112.30	116.57	40.00	102.80	124.79	40.40	121.41	137.17	40.00	112.17	113
42.40	96.67	98.49	42.10	98.19	118.10	42.30	105.35	118.67	42.50	100.07	108
44.50	101.19	118.01	44.40	88.40	89.57	44.60	172.82	177.56	45.00	120.80	109
promedio	115.21	128.02		103.15	110.09		117.40	133.90		111.92	114
desv.stan	17.12			16.33			22.74			13.75	6.1
coef.var	14.86			15.83			19.37			12.28	5.4



Nota: Para el ensayo se utilizó dos alturas de caída del equipo Prima 100 (100 kPa y 130 kPa) para evaluar la variación de los resultados de ensayo.

Tabla C-4: Ensayo de Deflectometría de Impacto liviano LFWD con Equipo Prima 100 sobre Capa 2 de Base (espesor + 10 cm).

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CHILE												
LABORATORIOS DE ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL												
PROYECTO: Adofaltos - Tramo de Prueba				FECHA: Febrero - 2010								
PROVEEDOR:				USO: Diseño de Mezcla Asfáltica.								
MUESTRA: Tramo de Prueba				REALIZADO: F.A								
ENSAYO CON EQUIPO PRIMA 100 - MÓDULO RESILIENTE - BASE CAPA 2												
DERECHA			DERECHA			DERECHA			DERECHA			Diferencia Acumulada
distancia (m)	M _r (MPa)		distancia (m)	M _r (MPa)		distancia (m)	M _r (MPa)		distancia (m)	M _r (MPa)		
	p=100KPa	p=130KPa		p=100KPa	p=130KPa		p=100KPa	p=130KPa		p=100KPa	p=130KPa	
0.0	79.0	84.8	0.3	99.9	104.8	0.3	109.9	112.7	0.0	96.3	100.7	
2.5	184.1	184.1	2.5	142.0	151.6	2.5	101.6	104.6	2.5	142.6	146.8	
5.0	167.0	175.8	5.0	102.7	112.4	5.2	93.0	98.0	5.0	120.9	128.7	
7.4	124.5	135.3	7.2	102.1	115.1	7.2	116.3	118.0	7.5	114.3	122.8	
9.8	183.4	186.0	10.3	108.6	114.9	10.2	101.5	106.7	10.0	131.1	135.9	127.0
13.0	165.2	173.8	13.0	116.5	120.4	12.4	113.4	117.6	12.5	131.7	137.3	134.3
15.3	128.9	134.5	15.3	146.3	148.7	15.6	139.6	139.7	15.0	138.3	141.0	133.1
18.1	125.8	124.5	17.5	120.8	128.6	18.2	115.1	126.7	17.5	120.6	126.6	132.7
20.0	140.9	147.5	20.0	111.2	109.4	20.0	110.6	116.5	20.0	120.9	124.4	133.0
22.2	137.5	139.6	22.6	112.8	118.3	23.2	108.2	109.6	22.5	119.5	122.5	130.4
25.0	141.8	138.7	25.0	89.1	95.6	25.0	109.1	118.4	25.0	113.3	117.5	126.4
26.5	136.8	144.2	27.9	96.3	103.9	28.0	110.5	113.8	27.5	114.6	120.6	122.3
30.0	110.8	112.1	30.0	122.3	122.4	30.2	132.1	127.7	30.0	121.8	120.7	121.2
32.1	158.1	163.5	32.4	135.3	137.2	32.9	117.5	123.0	32.5	137.0	141.2	124.5
35.2	142.8	141.4	35.2	124.2	124.7	35.0	122.2	124.0	35.0	129.7	130.0	126.0
38.3	134.3	139.5	38.4	110.6	118.4	37.9	122.4	131.9	37.5	122.4	129.9	128.5
40.0	117.0	119.8	40.0	92.6	92.2	40.4	103.8	109.5	40.0	104.5	107.2	125.8
42.4	119.5	121.2	42.1	146.7	150.0	42.3	112.8	120.1	42.5	126.3	130.4	127.8
promedio	138.7	142.6		115.6	120.5		113.3	117.7		122.5	126.9	128.1
desv.st	26.2			17.9			11.1			11.7		4.1
coef.var	18.9			15.5			9.8			9.6		3.2



Nota: Para el ensayo se utilizó dos alturas de caída del equipo Prima 100 (100 kPa y 130 kPa) para evaluar la variación de los resultados de ensayo.

Tabla C-5: Ensayo de Deflectometría de Impacto liviano LFWD con Equipo Prima 100 sobre Carpeta Asfáltica (espesor 5 cm).

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CHILE								
LABORATORIOS DE ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL								
PROYECTO: Adofaltos - Tramo de Prueba				FECHA : Febrero - 2010				
PROVEEDOR:				USO: Diseño de Mezcla Asfáltica.				
MUESTRA: Tramo de Prueba				REALIZAD F.A				
ENSAYO CON EQUIPO PRIMA 100 - MÓDULO RESILIENTE - CAPA DE RODADO								
MEZCLA DE ASFALTO EN CALIENTE								
DERECHA		CENTRO		IZQUIERDA		PROMEDIO MPa		Difer.
Distancia (m)	Mr (MPa)	Distancia (m)	Mr (MPa)	Distancia (m)	Mr (MPa)	Distancia (m)	Mr (MPa)	Acumul.
2.5	257	2.5	287	2.5	207	3	250	
5	297	5	274	5.2	260	5	277	
7.4	265	7.15	290	7.2	287	7	281	269
9.8	307	10.3	302	10.2	219	10	276	278
13	278	13	264	12.4	230	13	257	271
15.3	263	15.3	262	15.6	249	15	258	264
18.1	306	17.5	260	18.2	249	18	272	262
20	311	20	263	20	248	20	274	268
22.2	264	22.6	283	23.2	277	23	275	273
promedio	283		276		247		269	269
desv.stand	22		15		26		11	5
coef.var	8		5		10		4	2
ENSAYO CON EQUIPO PRIMA 100 - MÓDULO RESILIENTE - CAPA DE RODADO								
MEZCLA DE EMULSIÓN ASFÁLTICA								
DERECHA		CENTRO		IZQUIERDA		PROMEDIO MPa		Difer.
Distancia (m)	Mr (MPa)	Distancia (m)	Mr (MPa)	Distancia (m)	Mr (MPa)	Distancia (m)	Mr (MPa)	Acumul.
25	221	25	208	25	233	25	221	
26.5	241	27.9	221	28	193	27	218	
30	318	30	263	30.2	205	30	262	234
32.1	220	32.4	276	32.9	233	32	243	241
35.2	269	35.2	241	35	251	35	254	253
38.3	253	38.4	283			38	268	255
40	205	40	213			40	209	243
promedio	247		244		223		239	245
desv.stand	38		31		23		23	9
coef.var	15		13		11		10	4

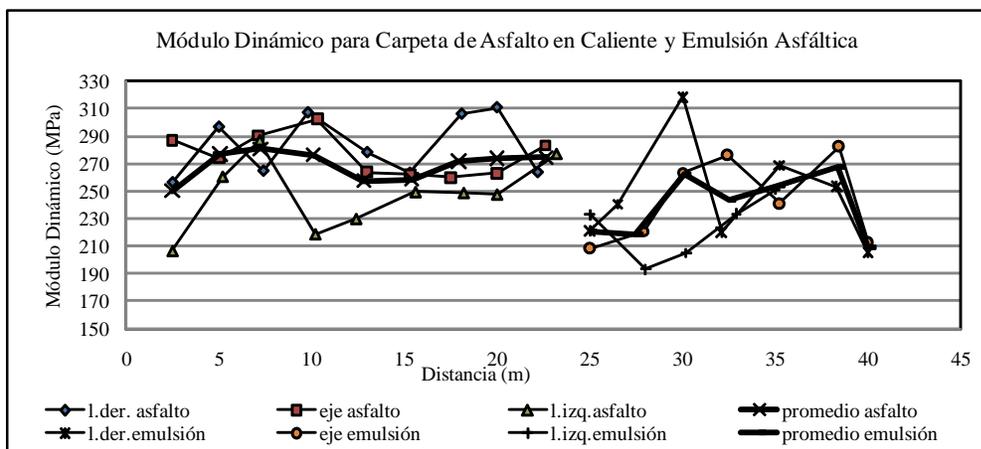
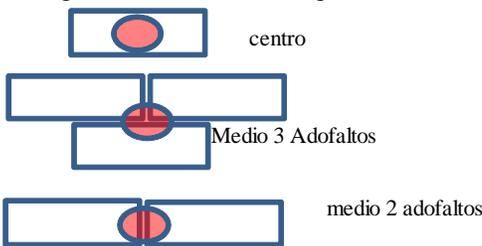
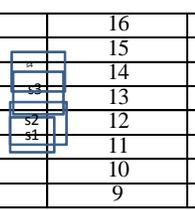
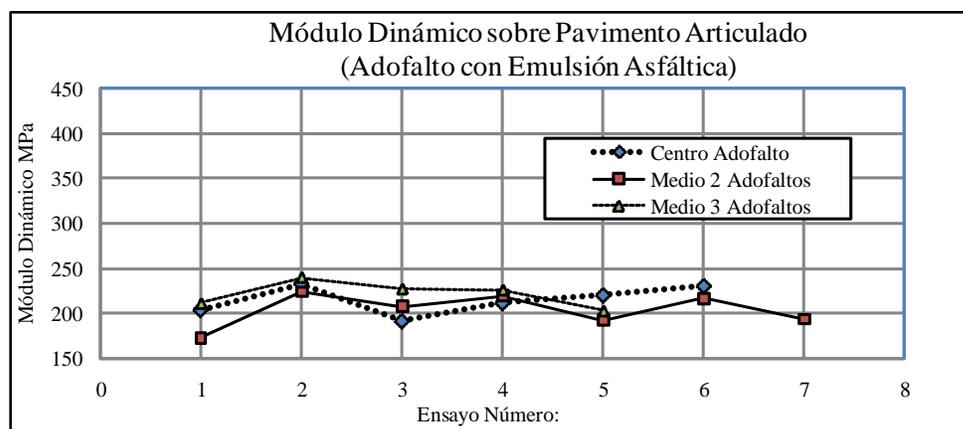


Tabla C-6: Ensayo de Deflectometría de Impacto liviano LFWD con Equipo Prima 100 sobre Capa de Bloques de Asfalto (espesor 5 cm)

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CHILE						
LABORATORIOS DE ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL						
PROYECTO: Adofaltos - Tramo de Prueba			FECHA : Febrero - 2010			
PROVEEDOR:			USO: Diseño de Mezcla Asfáltica.			
MUESTRA: Tramo de Prueba			REALIZADO F.A			
ENSAYO CON EQUIPO PRIMA 100 - MÓDULO RESILIENTE - CAPA DE RODADO						
MEZCLA DE EMULSIÓN ASFÁLTICA						
Centro Adofalto		Centro Dos Adofaltos		Centro Tres Adofaltos		Promedio
# Punto	Mr (MPa)	# Punto	Mr (MPa)	# Punto	Mr (MPa)	Mr (MPa)
1	204	2	147	3	211	207
4	401	5	275	6	240	240
7	233	10	172	11	227	211
9	191	13	224	14	344	208
12	155	17	208	18	323	208
15	211	20	219	21	226	219
19	220	23	192	s2	203	205
22	230	s1	309	-	-	230
-	-	s3	216	-	-	216
-	-	s4	193	-	-	193
215		204		221		214
Desv.Stand.	73	47		56		
Coef.Var.	34	23		25		
ESQUEMA UBICACION EQUIPO				ESQUEMA # PUNTO.		
						
				8	16	24
				7	15	23
				6	14	22
				5	13	21
				4	12	20
				3	11	19
				2	10	18
				1	9	17



Nota: Los resultados de ensayo resaltados no son parte del análisis de promedio por considerar fuera de la tendencia de los resultados restantes.

Tabla C-7: Resultados Obtenidos de Programa EVERCAL en Base al Ensayo de Deflectometría de Impacto FWD sobre Capa de Bloques de Asfalto (espesor 5 cm)

Identificación	No punto	Carga Load (N)	Carpeta Adofaltos E(1)(MPa)	Base Granular E(2)(MPa)	Sub-rasante E(3)(MPa)	Error % RMS Error
Route: 11y12	1	21600	287.5	202.6	122.4	6.28
	1	41600	280.7	214.5	112.4	10.15
	1	50900	924.1	203.7	103.5	3.25
	1	Norm.	281.3	213.6	113.2	6.56
Route: 12y13	2	21400	1093	185.9	122.6	6.94
	2	41400	1030.3	218.3	114	8.91
	2	50700	3822.6	178.5	104.2	3.33
	2	Norm.	1034.7	216.1	114.6	6.39
Route: 141repe	3	20800	911	176.5	141.6	4.6
	3	40500	909.2	203.9	130.1	6.53
	3	49400	4000	171.8	119.4	5.55
	3	Norm.	909.3	203.2	130.4	5.56
Route: 142	4	21500	2644.8	160	125.8	9.03
	4	41400	4000	160	113.9	7.3
	4	50400	4000	160	114.2	4.74
	4	Norm.	3904.7	160	114.8	7.02
Route: 143	5	21300	2321.2	160	128.2	7.19
	5	41400	4000	160	116	6.31
	5	50200	4000	160	115.6	3.93
	5	Norm.	3883.1	160	116.9	5.81
Route: 144de	5	21200	2307.4	160	130.3	7.82
	5	41200	1641.7	182.8	122.6	5.64
	5	50200	4000	160	114.5	2.59
	5	Norm.	1681.6	181.5	123.1	5.35
Route: 145	6	21200	2241.7	160	127.2	7.36
	6	41100	2689.4	168.1	118.6	3.51
	6	50300	4000	164.3	115.3	2.41
	6	Norm.	2664.6	167.7	119	4.43
Route: 146	7	21200	1905.2	160	128	5.67
	7	41100	1234.2	191.8	123	7.17
	7	50000	4000	161.1	112.9	1.91
	7	Norm.	1271.3	190	123.3	4.92
Route: 147	8	20900	1624.9	160	128.5	4.11
	8	40900	1310	190.1	121.7	7.1
	8	50000	4000	163.3	113.1	2.05
	8	Norm.	1324.1	188.7	122	4.42

Identificación	No punto	Carga Load (N)	Carpeta Adofaltos E(1)(MPa)	Base Granular E(2)(MPa)	Sub-rasante E(3)(MPa)	Error % RMS Error
Route: 151	9	21200	1553.9	160	166.5	18.16
	9	41100	1510.9	160	135.9	9.81
	9	50300	3377.9	160	119.8	6.88
	9	Norm.	1513.3	160	137.6	11.62
Route: 152	10	21000	2595.3	160	130.5	9.73
	10	41100	2430.3	172.1	122.2	8.04
	10	50100	4000	160	114.8	4.67
	10	Norm.	2439.3	171.4	122.6	7.48
Route: 153	11	21000	2107.1	160	134.1	8.64
	11	41200	3128.7	162.8	121.3	7.11
	11	49900	4000	160	115.1	4.87
	11	Norm.	3068	162.7	122.1	6.87
Route: 154	12	21100	2050.5	160	134.7	8.67
	12	41100	3066.6	164.3	120.2	7.22
	12	50000	4000	160	113.1	4.76
	12	Norm.	3010.7	164	121	6.88
Route: 155	13	21100	1994.7	160	132.3	8.58
	13	41100	3041.9	164.2	120	7.37
	13	49700	4000	160	111.3	5.01
	13	Norm.	2984.3	164	120.7	6.99
Route: 156	14	21000	2011.6	160	132.8	8.48
	14	40900	3069.3	163.4	119.2	7.45
	14	49900	4000	160	111.8	5.08
	14	Norm.	3021.5	163.2	119.8	7.01
Route: 157	15	20900	1924	160	133.2	9.42
	15	41100	3403.4	160	117.6	6.8
	15	49700	4000	160	112.4	5.25
	15	Norm.	3322.8	160	118.4	7.16
Route: 161	16	21200	2042.6	123.4	152.5	8.55
	16	40800	1605.5	147.2	126.2	7.21
	16	49800	3711.7	146.6	113.3	4.69
	16	Norm.	1623.3	146.2	127.3	6.82
Route: 162	17	21100	2301.8	150.2	127.6	6.88
	17	41100	1952.1	179.8	115.5	7.28
	17	49800	4000	158.2	108	4.89
	17	Norm.	1971.3	178.1	116.1	6.35
Route: 163	18	21000	1834.7	146.7	129.1	7.15
	18	41000	1055.8	196.6	117	9.41
	18	49700	2594.1	173	107.1	5.33
	18	Norm.	1094.7	194.1	117.6	7.29

Identificación	No punto	Carga Load (N)	Carpeta Adofaltos E(1)(MPa)	Base Granular E(2)(MPa)	Sub-rasante E(3)(MPa)	Error % RMS Error
Route: 164	19	21100	2049.7	160.9	129.4	7.44
	19	41100	1585.4	199.8	116.5	9.13
	19	49400	3500	180.4	106	4.59
	19	Norm.	1610.9	197.7	117.2	7.06
Route: 166	20	20800	1257.6	160.1	128	7.33
	20	40800	1017.4	199.6	116	9.17
	20	49600	3500	161.3	105.3	3.52
	20	Norm.	1027	198	116.4	6.68
Route: 167	21	21000	3127	128.7	122.5	3.43
	21	40800	1207.6	193.9	113.8	8.2
	21	49600	3500	159.8	105.1	3.25
	21	Norm.	1285.1	191.3	114.1	4.96
Route: 168	22	20800	2552.2	134.6	123.1	4.31
	22	40800	2246.2	170.1	112.2	5.95
	22	49500	3500	166.1	105	4.05
	22	Norm.	2258.5	168.7	112.6	4.77
Route: 171	23	20800	2539.9	118.2	134.1	7.3
	23	41000	1214.7	163.8	126.9	11.68
	23	49800	3500	126.5	117.1	7.11
	23	Norm.	1280.3	161.6	127.3	8.7
Route: 172	24	20700	3138.6	110.5	131.6	6
	24	40800	1205.5	164.1	126	11.73
	24	49500	3500	129.4	114.4	7.16
	24	Norm.	1282.4	162	126.2	8.3
Route: 173	25	20800	2641.4	128.3	133.5	8.59
	25	41000	1744.4	171.3	123	12.36
	25	49600	3500	145.1	113.4	8.57
	25	Norm.	1788.8	169.2	123.6	9.84
Route: 174	26	20800	2875.7	124.8	133	8.54
	26	40700	1775.2	167.7	121.8	12.28
	26	49600	3500	146.5	113.6	8.79
	26	Norm.	1813.9	166.2	122.2	9.87
Route: 175	27	20600	2380.4	125.9	132.6	8.45
	27	40600	1930.7	161.9	119.5	11.34
	27	49900	3500	144.2	114.1	8.38
	27	Norm.	1944.2	160.8	119.9	9.39
Route: 176	28	20600	1939.3	126.1	131.3	8.21
	28	40900	1636	159.8	121.2	11.21
	28	49500	4000	136.7	112.2	7.75
	28	Norm.	1649.4	158.3	121.7	9.06

Identificación	No punto	Carga Load (N)	Carpeta Adofaltos E(1)(MPa)	Base Granular E(2)(MPa)	Sub-rasante E(3)(MPa)	Error % RMS Error
Route: 177	29	20700	1430.6	126.7	131.4	8.88
	29	40700	1851.2	148	120.7	10.52
	29	49800	3997.5	134	114.4	8.85
	29	Norm.	1836.5	147.2	121.1	9.42
Route: 181	30	20900	2567.5	106.1	144.3	8.92
	30	40500	1715.2	125.5	132.9	12.69
	30	49400	4000	115.4	122.3	10.27
	30	Norm.	1737	125	133.2	10.63
Route: 182	31	21000	4000	110.3	135.3	9.29
	31	40900	3999.2	130	122.5	10.9
	31	50000	4000	122.3	119.6	9.88
	31	Norm.	3999.2	129.1	123.1	10.02
Route: 183	32	21100	3712.9	116.4	134.1	11.84
	32	40800	3619.8	137.3	121	12.8
	32	49800	4000	123.9	117.2	10.9
	32	Norm.	3623.6	136.5	121.5	11.85
Route: 184	33	20900	2933.9	113.2	133.8	12.01
	33	40800	3217.8	132.2	122.5	13.28
	33	49600	4000	116	117.7	10.18
	33	Norm.	3206.4	131.4	122.9	11.82
Route: 185	34	20900	3011.9	112.6	131.1	11.53
	34	40700	3207.6	132.7	120.6	13
	34	497003	4000	280	2705.4	*****
	34	Norm.	3200.6	132	121	47.97
Route: 186	35	20700	3657.7	105.8	135.3	12
	35	40700	3156.9	132.8	121.5	13.56
	35	49600	4000	120.4	117	10.18
	35	Norm.	3174.5	131.9	122	11.91
Route: 188	36	20800	3884.1	113.7	131.5	12.41
	36	40800	4000	137.7	118.5	13.07
	36	49600	4000	130.2	114.7	10.82
	36	Norm.	3995.4	136.7	119	12.1
Route: 191	37	20900	2396.7	114.1	148.6	9.65
	37	40900	1677.6	132	139.3	11.83
	37	49600	4000	120.7	123.8	8.52
	37	Norm.	1710	131.2	139.7	10
Route: 192	38	21100	3314.4	139.7	136.6	7.6
	38	40700	2624.6	160.3	124.9	8.92
	38	49400	4000	142.5	118.4	8.04
	38	Norm.	2649.3	159.5	125.3	8.18

Identificación	No punto	Carga Load (N)	Carpeta Adofaltos E(1)(MPa)	Base Granular E(2)(MPa)	Sub-rasante E(3)(MPa)	Error % RMS Error
Route: 193	39	20800	2360	147.1	138.6	7.83
	39	40700	2875.5	161.5	124.3	9
	39	49700	4000	144.9	118.3	8.4
	39	Norm.	2857.4	161	124.8	8.41
Route: 211	40	21000	194.9	166.1	153.4	5.52
	40	40900	468	179.6	141.1	3.41
	40	49800	4000	164.8	126.7	6.27
	40	Norm.	455.7	179	141.7	5.07
Route: 212	41	21100	1131	189.5	149.1	3.9
	41	41000	1309	210.9	136.8	3.61
	41	49800	4000	179.4	127.4	5.63
	41	Norm.	1300.1	209.8	137.4	4.38
Route: 213	42	21100	1279.6	187.9	144.3	3.61
	42	40800	1438.9	213.1	133.5	3.8
	42	49900	4000	186.3	125.9	4.78
	42	Norm.	1432.5	212.1	134	4.06
Route: 251	43	20800	3680.4	104.3	184.2	7.81
	43	40700	4000	124	163.6	8.53
	43	49700	4000	115.1	157.8	8.13
	43	Norm.	3988.8	123.3	164.4	8.16
Route: 252	44	20800	3610.1	105.9	179.1	8.4
	44	40700	4000	122.5	161.3	7.96
	44	49700	4000	119.5	153.7	8.16
	44	Norm.	3986.3	121.9	162	8.17
Route: 253	45	20600	2998	102.4	182.5	8.55
	45	40400	3776	121.7	161.8	8.72
	45	49500	5000	106.4	157	6.12
	45	Norm.	3760.3	121.3	162.2	7.8
Route: 254	46	20600	3454.6	106.6	174	8.55
	46	40600	4500	125	160.9	8.75
	46	49600	4500	118.2	153.5	7.97
	46	Norm.	4468.6	124.5	161.3	8.43
Route: 255	47	20800	3046.4	103.2	177.8	9.61
	47	40600	3800.5	122.9	160.6	9.34
	47	49400	4000	113.3	154.8	7.57
	47	Norm.	3777.7	122.3	161.1	8.84
Route: 256	48	20600	3665.3	104.5	177.3	9.06
	48	40500	4500	123.5	159.8	8.99
	48	49300	4500	112.2	162.3	9.9
	48	Norm.	4479	123	160.2	9.32

Identificación	No punto	Carga Load (N)	Carpeta Adofaltos E(1)(MPa)	Base Granular E(2)(MPa)	Sub-rasante E(3)(MPa)	Error % RMS Error
Route: 257	49	20800	2752.6	106.8	172.9	10.24
	49	40500	4031.9	122.4	158.1	9.78
	49	49600	5000	109.3	152.4	6.95
	49	Norm.	3999.5	122	158.4	8.99
Route: 272	50	21000	2687	110.1	179	8.16
	50	41000	3096.2	125.3	160.8	8.92
	50	49500	4000	109.9	155.9	7.52
	50	Norm.	3075.8	124.5	161.7	8.2
Route: 273	51	20900	3619.4	101.4	175.3	7.77
	51	40800	3305.8	125.8	157.9	9.37
	51	49600	4000	113.5	152.6	7.7
	51	Norm.	3318.4	124.8	158.6	8.28
Route: 274	52	20800	2973.3	108.1	172.9	8.89
	52	40500	3472.6	125.7	155.4	9.49
	52	49400	4000	114.1	149.4	7.63
	52	Norm.	3459.9	125.3	155.8	8.67
Route: 275	53	20800	2189.3	110	170.5	8.55
	53	40300	2780.8	124.4	155	9.79
	53	48900	4000	106.9	150.2	7.15
	53	Norm.	2771.7	124.2	155.2	8.49
Route: 276	54	20600	2270.3	108.9	168.6	8.24
	54	40400	2718.9	126.4	152.8	9.9
	54	49300	4000	109	149.3	6.97
	54	Norm.	2709.9	126.1	153.1	8.37
Route: 277	55	20600	2476.4	106.8	170	9.89
	55	40300	2907.7	125.1	153.3	10.24
	55	49100	4000	110.2	149.2	6.93
	55	Norm.	2901.2	124.8	153.6	9.02
Route: 281	56	20400	1149.1	100	215.5	12.28
	56	40200	2035	100	187.1	8.9
	56	49100	4000	100	172.3	6.78
	56	Norm.	2026.1	100	187.4	9.32
Route: 282	57	20500	3330.9	100.4	180.1	8.67
	57	40400	3791.4	115	167.5	8.59
	57	49100	4000	101.6	163.9	6.65
	57	Norm.	3782.2	114.7	167.8	7.97
Promedio General			2929.67	145.08	149.33	7.94
Promedio Normalizado a 40 kN			2493.59	155.58	132.95	8.58

Nota: El módulo determinado para la capa de pavimento articulado de bloques de asfalto, fue determinado sobre una estructura de 5-6 cm de espesor de bloque de asfalto y 30 cm de base granular y suelo de sub-rasante. (***) Representan error de resultado en equipo.

Tabla C-8: Comprobación de Diseño de Mezcla AE de laboratorio mediante Probetas Superpave elaboradas con mezclas de terreno.

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CHILE LABORATORIOS DE ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL																
PROYECTO:		Adofaltos - Tramo de Prueba				FECHA:		Febrero - 2010								
PROVEEDOR:		Probetas Superpave				USO:		Diseño de Mezcla Asfáltica.								
MUESTRA:		Probetas Superpave				REALIZADO:		F.A								
COMPROBACIÓN DE DISEÑO DE MEZCLA EN TERRENO - TRAMO DE PRUEBA																
Identific. Probeta	Ensayo Realizado	Fecha Moldeo	Condición Ensayo	Diámetro (mm)	Altura			Peso (gr)	Densidad (gr/cm ³)	Fuerza (kN)	Res. Trae. Indirecta		Modulo Resiliente			
					1 (mm)	2 (mm)	3 (mm)				Promedio (mm)	ITS (kPa)	TSR %	1 (MPa)	2 (MPa)	promedios (MPa)
6	MR-ITS	10/02/2010	saturado	152,40	57,44	57,69	57,72	2311,76	2,20	4,16	301,61	302,03	1429	1360	1395	1420,67
7	MR-ITS	10/02/2010	saturado	152,40	53,82	53,96	53,72	2158,1	2,20	3,89	301,85	0,78	1428	1394	1411	
8	MR-ITS	10/02/2010	saturado	152,40	52,56	52,56	52,65	2100,85	2,19	3,81	302,63		1461	1452	1457	
9	MR-ITS	10/02/2010	seco	152,40	51,01	51,13	50,92	1988,01	2,14	4,71	385,63		2061	1878	1970	
10	MR-ITS	10/02/2010	seco	152,40	48,51	48,54	48,31	1886,44	2,13	4,8	413,82	385,62	2139	2143	2141	2055,25
11	MR-ITS	10/02/2010	seco	152,40	55,98	55,69	55,58	2181,6	2,15	4,77	357,41		840	850	845	

Nota: Todos los archivos de resultados obtenidos del ensayo de Módulo de Rigidez sobre probetas de diámetro 100 y 150 mm, se encuentran en el CD de esta investigación.

Tabla C-9: Comprobación de Diseño de Mezcla AE de laboratorio Mediante Probetas

Marshall Elaboradas con Mezclas de Terreno.

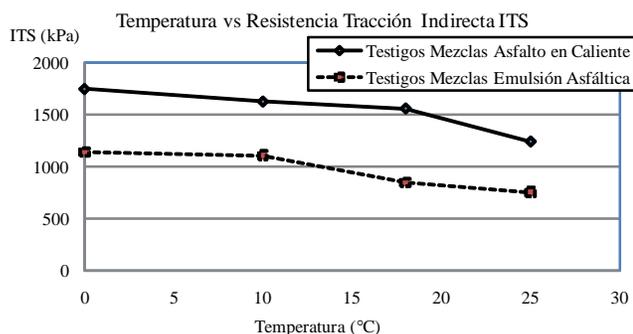
PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CHILE LABORATORIOS DE ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL																	
PROYECTO: Adófalto - Tramo de Prueba PROVEEDOR: Probetas Marshall MUESTRA:						FECHA: Febrero - 2010 USO: Diseño de Mezcla Asfáltica. REALIZADO: F.A											
COMPROBACIÓN DE DISEÑO DE MEZCLA EN TERRENO - TRAMO DE PRUEBA																	
No	fecha moldeo	% emulsión	% H.opt	Identif. probeta	seca o sumergida	alturas (mm)			h.media (mm)	Peso gr	Fuerza (kN)	Densidad		Res.Trac.indirecta (kPa)	St %		
						h1	h2	h3				(gr/cm ³) promedio	ITS				
39	10/02/2010	8.5	10	28	seca	63.34	62.50	62.82	62.89	1099.14	2.82	2.17	281.81				
40	10/02/2010	8.5	10	29	seca	62.93	62.57	62.10	62.53	1088.99	3.32	2.16	333.65	344.18			
41	10/02/2010	8.5	10	30	seca	63.16	63.07	63.52	63.25	1097.84	3.57	2.15	354.71				
36	10/02/2010	8.5	10	25	sumergida	62.66	62.38	62.16	62.40	1132.61	3.37	2.25	339.40	0.90			
37	10/02/2010	8.5	10	26	sumergida	62.45	62.35	62.23	62.34	1130.85	3.10	2.25	312.49	311.35			
38	10/02/2010	8.5	10	27	sumergida	63.05	63.09	62.88	63.01	1135.39	3.11	2.24	310.20				

No	fecha moldeo	% emulsión	% H.opt	Identif. probeta	seca o sumergida	alturas (mm)			h.media (mm)	Peso (gr)	Densidad (gr/cm ³) promedio	Estabilidad (kN)	Fluencia (U _m)
						h1	h2	h3					
42	10/02/2010	8.5	10	31	um 60°-30mil	63.34	62.86	63.42	63.21	1088.51	2.14	14.93	2.43
43	10/02/2010	8.5	10	32	um 60°-30mil	63.22	63.47	63.09	63.26	1093.91	2.15	13.57	3.33
44	10/02/2010	8.5	10	33	um 60°-30mil	63.85	63.32	63.58	63.58	1095.56	2.14	13.08	3.76

No	fecha moldeo	% emulsión	% H.opt	Identif. probeta	seca o sumergida	alturas (mm)			h.media (mm)	Peso (gr)	Fuerza (kN)	Densidad		Modulo Resiliente (M Pa)	
						h1	h2	h3				(gr/cm ³) promedio	1	2	
36	10/02/2010	8.5	10	25	sumergida	62.66	62.38	62.16	62.40	1132.61	3.37	2.25	1709	1729	
37	10/02/2010	8.5	10	26	sumergida	62.45	62.35	62.23	62.34	1130.85	3.10	2.25	1576	1539	
38	10/02/2010	8.5	10	27	sumergida	63.05	63.09	62.88	63.01	1135.39	3.11	2.24	1633	1613	

Tabla C-10: Determinación de la Influencia de Temperatura de Curado en la Resistencia a Tracción Indirecta ITS, Sobre Testigos Asfálticos.

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CHILE														
LABORATORIO DE INGENIERÍA CIVIL														
PROYECTO: Adofaltos - Tramo de Prueba							FECHA: 19/abril / 2010							
MUESTRA: téstigos de asfalto.							USO :							
PROVEEDOR:							REALIZADO POR : F.A							
DETERMINACIÓN DE RESISTENCIA A TRACCIÓN INDIRECTA - ITS														
Prob No	material	Tem (°C)	Diámetro (mm)	Espesor (mm)				Volumen (cm ³)	Peso (gr)	Densidad (gr/cm ³)	Fuerza (kN)	Tracción		TSR %
				1	2	3	prom.					(kPa)	(MPa)	
1	HMA	25	104.40	52.54	53.05	53.46	53.02	453.84	944.40	2.08	9.99	1149.03	1238.68	0.90
2	HMA	25	103.89	43.64	43.29	43.75	43.56	369.25	794.00	2.15	9.22	1297.03		
3	HMA	25	104.01	52.52	53.27	53.69	53.16	451.67	956.40	2.12	11.03	1269.98		
1	Emulsión	25	104.12	56.64	57.06	57.77	57.16	486.66	1016.10	2.09	7.17	767.01	754.09	0.72
2	Emulsión	25	104.20	56.72	58.45	57.04	57.40	489.51	1049.30	2.14	8.19	871.68		
3	Emulsión	25	104.15	55.37	55.11	55.96	55.48	472.66	985.50	2.09	5.66	623.59		
4	HMA	18	103.63	57.67	56.52	58.33	57.51	485.04	1032.10	2.13	14.28	1525.47	1559.82	1.14
5	HMA	18	104.38	59.07	60.07	61.27	60.14	514.59	1068.30	2.08	12.31	1248.48		
6	HMA	18	103.87	59.27	58.01	58.63	58.64	496.87	1083.30	2.18	18.23	1905.49		
4	Emulsión	18	104.31	53.92	54.12	54.11	54.05	461.89	967.20	2.09	7.24	817.52	846.91	0.80
5	Emulsión	18	104.23	54.65	56.05	54.07	54.92	468.63	997.90	2.13	7.88	876.31		
6	Emulsión	18	104.30	52.10	52.23	52.87	52.40	447.70	930.50	2.08	4.29	499.71		
13	HMA	10	104.14	61.66	59.86	60.31	60.61	516.26	1129.70	2.19	19.16	1932.47	1626.68	1.18
14	HMA	10	104.31	55.23	54.40	53.66	54.43	465.14	963.20	2.07	13.94	1563.07		
15	HMA	10	104.2	52.95	51.42	51.56	51.98	443.23	934.30	2.11	14.38	1690.30		
13	Emulsión	10	104.2	50.75	53.61	51.75	52.04	443.75	900.10	2.03	9.13	1071.95	1107.52	1.05
14	Emulsión	10	103.85	58.17	57.77	58.63	58.19	492.89	1027.50	2.08	9.95	1048.21		
15	Emulsión	10	103.73	55.09	55.65	55.25	55.33	467.58	997.20	2.13	10.84	1202.39		
6	HMA	0	103.9	51.93	55.73	55.86	54.51	462.14	1014.30	2.19	16.76	1884.03	1748.80	1.27
7	HMA	0	104.87	51.13	53.10	51.11	51.78	447.25	908.10	2.03	9.40	1102.03		
8	HMA	0	104.48	55.27	54.64	53.79	54.57	467.83	984.70	2.10	14.45	1613.57		
6	Emulsión	0	104.41	57.68	58.22	58.23	58.04	496.97	1074.80	2.16	11.34	1191.24	1142.95	1.09
7	Emulsión	0	104.46	54.86	55.09	54.89	54.95	470.90	1015.40	2.16	10.96	1215.62		
8	Emulsión	0	104.13	53.62	53.95	53.41	53.66	456.97	993.30	2.17	8.97	1021.99		
10	HMA	seco	103.98	55.04	55.28	57.05	55.79	473.75	991.70	2.09	13.74	1507.86	1373.64	
11	HMA	seco	104.00	56.52	54.11	55.30	55.31	469.85	998.20	2.12	12.55	1388.95		
12	HMA	seco	104.02	51.87	51.40	51.82	51.70	439.33	889.50	2.02	10.34	1224.11		
10	Emulsión	seco	104.35	52.72	52.03	52.34	52.36	447.82	916.80	2.05	6.62	771.29	1053.35	
11	Emulsión	seco	104.31	59.10	59.37	59.36	59.28	506.55	1055.40	2.08	10.76	1107.85		
12	Emulsión	seco	104.30	58.54	57.05	55.40	57.00	486.98	1017.20	2.09	9.49	1016.28		
14	Emulsión	seco	103.65	55.43	52.76	54.92	54.37	458.76	952.90	2.08	9.17	1035.91		



Observación: Los resultados de ensayo señalados no se consideran para análisis de promedio por considerar fuera de una tendencia de resultados de ensayo.

Tabla C-11: Determinación del Módulo de Mezclas Asfálticas HMA y AE, para Diámetros de 100 y150 mm sobre Testigos Asfálticos.

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CHILE LABORATORIO DE INGENIERÍA CIVIL												
PROYECTO:		Adofaltos - Tramo de Prueba										
MUESTRA:		testigos de asfalto										
PROVEEDOR:		FECHA: 21/abril / 2010 USO : \										
		REALIZADO POR : F.A										
DETERMINACIÓN DE MÓDULO RESILIENTE DE TESTIGOS DE ASFALTO												
Probeta No	material	Tipo probeta	Diámetro (mm)	Espesor (mm)			Volumen cm ³	Peso (gr)	Densidad (gr/cm ³)	Modulo Resiliente (MPa)		Observación
				1	2	3				Promedio		
16	HMA	Marshall	104.14	50.65	52.61	52.52	442.30	874.80	1.98	3402	4715.5	
17	HMA	Marshall	103.94	55.38	55.54	57.56	476.52	984.20	2.07	4653		
18	HMA	Marshall	105.65	56.80	56.70	51.60	482.45	978.90	2.03	4778		
17	Emulsión	Marshall	103.96	61.04	59.53	60.61	512.64	1082.70	2.11	9936	9074.5	
18	Emulsión	Marshall	103.71	59.43	55.76	56.11	482.36	1006.30	2.09	8213		
1P	HMA	Superpave	153.60	57.70	57.43	56.39	1059.41	2230.90	2.11	3895		
2P	HMA	Superpave	153.40	58.16	56.27	55.21	1045.08	2208.90	2.11	3978	3993.0	
3P	HMA	Superpave	153.00	55.58	54.57	55.64	1016.04	2150.30	2.12	4106		
1O	Emulsión	Superpave	152.80	57.41	57.74	56.55	1049.51	2188.50	2.09	7950		
2O	Emulsión	Superpave	152.05	53.45	52.60	53.82	977.31	2031.20	2.08	6929	7809.0	
3O	Emulsión	Superpave	152.95	56.45	54.25	55.24	1016.29	2116.60	2.08	8548		

Tabla C-12: Ensayo de Resistencia a Compresión sobre Paralelepípedos de Mezclas
Asfálticas HMA y AE.

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CHILE LABORATORIO DE INGENIERÍA CIVIL FECHA: 28/ enero / 2010 USO : compresión REALIZADO POR : F.A															
DETERMINACIÓN DE RESISTENCIA A COMPRESIÓN															
Probet	Largo (mm)		Ancho (mm)		Altura (cm)		Area (cm ²)	Volumen (cm ³)	Peso (gr)	Densidad (gr/cm ³)	Fuerza (Kf)	Resist.		Observación	
	1	2	1	2	1	2						(MPa)	(MPa)		
No															
AC1	50.38	52.81	53.40	51.10	52.25	15.30	15.50	15.40	26.96	415.16	902.90	2.17	712.00	2.70	inclinado
AC2	51.40	52.54	51.15	52.07	51.61	15.50	15.40	15.45	26.82	414.40	887.90	2.14	-	-	inclinado, no se determinó la
AC3	49.84	49.43	52.84	51.92	52.38	15.40	15.50	15.45	26.00	401.68	806.20	2.01	468.00	1.84	
AC4	46.72	48.66	51.14	51.78	51.46	16.00	16.30	16.15	24.54	396.34	813.20	2.05	492.00	2.05	
AC5	49.70	50.50	52.05	52.70	52.38	15.50	15.40	15.45	26.24	405.41	821.80	2.03	648.00	2.52	grieta pre-existente
AC6	49.36	49.73	51.83	50.45	51.14	15.80	15.80	15.80	25.34	400.33	757.40	1.89	390.00	1.57	
EC1	45.75	46.11	51.09	51.44	51.27	14.80	15.00	14.90	23.55	350.84	722.00	2.06	392.00	1.70	
EC2	51.35	51.03	51.19	46.40	46.07	15.00	15.20	15.10	23.58	356.07	726.20	2.04	462.00	2.00	
EC3	46.14	46.57	50.45	51.40	50.93	14.80	14.90	14.85	23.61	350.55	739.10	2.11	478.00	2.07	
EC4	45.93	45.61	45.77	50.68	50.86	15.00	15.00	15.00	23.28	349.18	717.30	2.05	446.00	1.96	
EC5	44.72	43.93	44.33	50.25	50.19	14.90	14.90	14.90	22.25	331.48	688.30	2.08	424.00	1.94	
EC6	51.06	51.08	44.87	45.14	45.01	14.90	14.90	14.90	22.98	342.46	706.90	2.06	420.00	1.86	

Tabla C-13: Ensayo de Resistencia a la Flexión sobre Bloques Asfálticos en Función de Profundidad de Ranura sobre la Superficie.

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CHILE																		
LABORATORIO DE INGENIERÍA CIVIL																		
PROYECTO: Adofaltes - Tramo de Prueba								FECHA: 28/ enero / 2010										
MUESTRA: Adofalfo								USO : ensayo de adofaltes										
PROVEEDOR:								REALIZADO POR : F.A										
DETERMINACIÓN DE RESISTENCIA A FLEXIÓN DE ADOQUINES DE ASFALTO																		
Ident. probeta	Posición	ranura (mm)	Largo (cm)	Ancho (cm)	Espesor (mm)				Volumen (cm3)	Peso (gr.)	Densidad (gr/cm3)	Carga	Defom (mm)	Res.Flexión		Observación		
					1	2	3	prom.						Kg/cm2	prom.2			
A1	1	0	25.1	13.6	52.99	52.43	51.53	52.32	1785.88	3639.40	2.04	182.00	5.60	14.74	13.8			
A2	1	0	25.2	14.8	52.7	54.99	51.55	53.08	1979.67	4300.80	2.17	280.00	4.80	20.35				
A3	1	0	25.1	15.1	47.49	50.52	49.6	49.20	1864.86	3846.20	2.06	177.00		14.60				
A4	1	0	25.1	14.9	50.41	51.16	51.59	51.05	1909.34	3898.00	2.04	183.00		14.21				
A5	1	0	25.2	13.5	51.65	52.06	52.52	52.08	1771.65	3670.10	2.07	166.00		13.74				
A6	1	0	25.2	15	49.58	48.71	51.6	49.963	1888.61	3887.70	2.06	142.00		11.49				
A7	2	0	25.3	13.5	53.97	54.37	53.85	54.06	1846.53	3738.10	2.02	154.00	4.20	11.88	13.21			
A8	2	0	25.1	15	45.22	46.48	46.84	46.18	1738.68	3614.00	2.08	132.00	4.40	12.44				
A9	2	0	25.2	16	51.8	50.25	50.22	50.76	2046.51	4159.70	2.03	181.00	5.00	13.31				
A10	2	0	25.4	15	50.8	50.65	50.5	50.65	1929.77	4248.60	2.20	313.00	4.40	24.89				
A11	2	0	25.4	15.7	54.8	53.1	50.4	52.77	2104.23	4440.30	2.11	264.00	4.60	18.48				
A12	2	0	25.3	16	54.37	54.88	56.13	55.13	2231.53	4612.70	2.07	208.00	6.10	13.03				
E1	1	0	25.1	14.6	4.9	4.9	4.6	4.80	1759.01	3792.80	2.16	100.00		8.96	7.6			
E2	1	0	25.1	14.6	4.8	4.7	4.7	4.73	1734.58	3409.90	1.97	70.00	2.30	6.45				
E3	1	0	25	14.5	4.9	4.9	4.7	4.83	1752.08	3787.70	2.16	108.00	2.10	9.56				
E4	1	0	25	14.6	4.8	5.1	4.9	4.93	1800.67	3806.90	2.11	71.00	1.90	5.99				
E5	1	0	25.1	14.7	4.9	4.9	4.7	4.83	1783.36	3861.80	2.17	85.00	1.60	7.46				
E6	1	0	24.9	14.9	4.7	4.7	4.7	4.70	1743.75	3695.10	2.12	78.00	1.70	7.07				
E7	2	0	25	14.7	4.6	4.6	4.7	4.63	1702.75	3626.40	2.13	94.00	1.40	8.94	8.16			
E8	2	0	25	14.7	4.8	4.8	4.8	4.80	1764.00	3611.30	2.05	86.00	1.30	7.62				
E9	2	0	25	14.6	4.8	4.7	4.7	4.73	1727.67	3730.90	2.16	80.00	1.30	7.34				
E10	2	0	25.1	15.2	4.5	4.6	4.5	4.53	1729.56	3737.90	2.16	87.00	1.20	8.40				
E11	2	0	25	14.9	4.7	4.6	4.7	4.67	1738.33	3807.70	2.19	120.00	2.20	11.09				
E12	2	0	25.1	14.5	4.5	4.7	4.8	4.67	1698.43	3535.10	2.08	94.00	2.20	8.97				
1A05	1	5	24.6	14.8	51.2	52.25	51.87	51.77	1888.48	3845	2.04	142	-	10.52	13.60			
2A05	1	5	24.6	15.2	48.89	47.46	48.33	48.23	1807.16	3973	2.20	236	5.7	19.63				
3A05	1	5	25	15	48.5	51.54	50.11	50.05	1879.13	3984	2.12	224	5.8	17.88				
A13	1	5	25	14.9	4.8	4.7	4.7	4.73	1763.17	3725.00	2.11	114.00		10.24				
A14	1	5	25	14.9	4.7	4.8	4.7	4.73	1763.17	3854.00	2.19	108.00		9.71				
7A5	2	5	25.5	14.65	51.54	51.03	51.34	51.30	1917.93	4063	2.12	163	4.3	13.00				
8A5	2	5	25.3	14.7	50.95	49.77	50.21	50.31	1867.36	3988	2.14	134	3.8	10.97	10.91	f.central f.central f.central		
9A5	2	5	25.5	15.35	53.08	51.7	52.67	52.48	2061.64	4257	2.06	151	4.3	10.98				
A15	2	5	25	14.9	4.7	4.7	4.6	4.67	1738.33	3655.00	2.10	94.00		8.69				
1E05	1	5	24.8	15	47.67	49.29	47.25	48.07	1757.70	3635	2.07	61	1.9	5.23				
4E05	1	5	24.8	14.9	45.33	46.1	46.24	45.89	1708.66	3455	2.02	86	1.5	8.14				
5E05	1	5	25	14.8	49.97	52.1	49.1	50.39	1816.70	3861	2.13	33	-	2.63				
E13	1	5	25	15	4.2	4.3	4.4	4.30	1612.50	3400.00	2.11	40.00		4.33	5.62			
E14	1	5	25	14.8	4.7	4.6	4.6	4.63	1714.33	3362.00	1.96	39.00		3.68				
E15	1	5	25	14.8	4.3	4.2	4.2	4.23	1566.33	3264.00	2.08	24.00		2.71				
E17	1	5	24.9	14.9	4.3	4.3	4.2	4.27	1582.98	3239.00	2.05	40.00		4.40				
2	1	5	25	14.8	4.4	4.5	4.5	4.47	1652.67	3361	2.03	78.00		7.92				
E16	2	5	24.9	14.9	4.3	4.3	4.2	4.27	1582.98	3339.00	2.11	37.00		4.07				
3	2	5	25	14.6	4.8	4.8	4.7	4.77	1739.83	3435.00	1.97	53.00		4.79	5.52	f.central f.central		
16E5	2	5	25.2	14.7	42.9	43.09	42.5	42.83	1574.37	3341	2.12	57	2.7	6.40				
14E5	2	5	25	15.1	45.01	43.7	42.91	43.87	1619.85	3492	2.16	66	1.3	6.81				
1A1	1	10	24.4	14.8	52.63	49.62	51.27	51.17	1851.46	3763.00	2.03	241.00	-	18.10	15.22			
2A1	1	10	25.1	15.5	54.34	53.59	53.44	53.79	2079.08	4623.00	2.22	500.00	-	33.61				
3A1	1	10	25.1	14.9	52.01	52.2	52.05	52.09	1946.62	4137.00	2.13	188.00	-	14.02				
4A1	1	10	24.4	15	50.55	49.5	50.64	50.23	1853.42	3721.00	2.01	176.00	-	13.53				
5A1	2	10	25.3	14.9	53.65	54.33	54.37	54.12	2049.59	4436.00	2.16	193.00	-	13.47				
6A1	2	10	25.2	15.2	50.84	50.85	50.99	50.89	1953.12	4175	2.14	107	3.8	8.23				
7A1	2	10	24.5	15.3	52.87	50.01	51.56	51.48	1932.73	3928	2.03	111	4	8.01	9.30			
8A1	2	10	24.8	15.2	50.27	51.52	52.09	51.29	1963.58	4040	2.06	101	3.5	7.50				
2E1	1	10	24.8	14.9	46.85	45.85	44.34	45.68	1638.45	3315	2.02	53	1.7	5.06			6.05	
3E1	1	10	24.9	15	46.56	46.51	46.87	46.65	1750.59	3481	1.99	77	2	7.04				
5E1	2	10	25	14.75	44.66	43.57	43.46	43.90	1602.59	3396	2.12	42	0.8	4.43				
6E1	2	10	25.05	14.85	42.67	45.25	43.3	43.74	1610.73	3394	2.11	65	1.1	6.88	6.03	f.ranura f.ranura		
7E1	2	10	25	15	45.19	43.99	43.29	44.16	1623.38	3462	2.13	66	1	6.77				

Tabla C-14: Ensayo de Resistencia a la Flexión sobre Bloques Asfálticos en Función de la Forma del Elemento.

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CHILE																	
LABORATORIO DE INGENIERÍA CIVIL																	
PROYECTO: Adofaltos - Tramo de Prueba									FECHA: 28/ enero / 2010								
MUESTRA: Adofalto									USO : ensayo de adofaltos								
PROVEEDOR:									REALIZADO POR : F.A								
DETERMINACIÓN DE RESISTENCIA A FLEXIÓN DE ADOQUINES DE ASFALTO																	
Ident. probeta	Posición	ranura (mm)	Largo (cm)	Ancho (cm)	Espesor (cm)				Volumen (cm3)	Peso (gr)	Densidad (gr/cm3)	Carga (Kgf)	Deform. (mm)	Res.Flexión (Kgf/cm2)		Observación	
					1	2	3	prom.						prom.1	prom.2		
1AC	1	0	25	25	55.84	53.56	52.6	54.00	3287.50	6975.00	2.12	217.00	4.4	8.93			
2AC	1	0	24.7	25.2	50.61	49.9	50.22	50.24	3125.89	6388.00	2.04	215.00	3.5	9.99	10.56		
3AC	1	0	25.1	25.2	49.59	48.64	50.84	49.69	3215.73	6287.00	1.96	267.00	3.6	12.94			
4AC	1	0	25	24.8	53.07	54.45	54.8	54.11	3397.60	6813.00	2.01	251.00	3.5	10.37			
5AC	2	0	25	24.9	51.53	49.92	50.32	50.59	3132.42	6467.00	2.06	220.00	4	10.36			
6AC	2	0	25.1	25.1	53.63	49.87	51.72	51.74	3258.41	6619.00	2.03	209.00	4.2	9.38	10.95		
7AC	2	0	25.4	24.9	48.74	52.17	52.46	51.12	3317.89	6682.00	2.01	294.00	4.9	13.82			
8AC	2	0	24.7	25	52.61	55.02	53.01	53.55	3273.37	6716.00	2.05	248.00	4.5	10.22			
2EC	1	0	25	24	59.87	59.33	58.99	59.40	3539.40	7844.00	2.22	171.00	0.9	6.06			
3EC	1	0	25	24.5	61.19	60.72	60.7	60.87	3717.88	8098.00	2.18	235.00	1.2	7.77	6.64		
4EC	1	0	25.1	25	59.14	60.37	61.19	60.23	3839.67	8327.00	2.17	183.00	0.9	6.08			
1EC	2	0	25	24.8	59.13	60.67	58.27	59.36	3612.74	7922.00	2.19	271.00	-	9.30	6.66		
6EC	2	0	24.8	24.9	61.21	60.03	59.28	60.17	3660.66	8065.00	2.20	64.00	0.3	2.11			
7EC	2	0	25.2	25	59.19	59.15	57.04	58.46	3593.52	8038.00	2.24	115.00	0.5	4.08	6.69		
8EC	2	0	24.8	24.7	64.7	65.35	62.9	64.32	3853.00	8512.00	2.21	101.00	0.4	2.94			
5AR	1	0	30	19.9	51.1	51.92	51.3	51.44	3062.61	6324.00	2.06	146.00	5.7	10.40			
6AR	1	0	30.3	20.1	52.69	51.33	53.55	52.52	3261.36	6589.00	2.02	200.00	6.1	13.69	10.09		
7AR	1	0	30.1	20	51.15	51.21	53.93	52.10	3246.59	6312.00	1.94	137.00	6.5	9.50			
8AR	1	0	29.9	20.4	49.59	53.81	52.36	51.92	3193.75	6041.00	1.89	100.00	7.3	6.79			
1AR	2	0	29.5	20	52.32	52.95	55.62	53.63	3281.58	6469.00	1.97	143.00	4.8	9.14	10.01		
2AR	2	0	29.7	20	52.93	53.46	51.31	52.57	3047.81	6401.00	2.10	168.00	5.6	11.26			
3AR	2	0	29.9	20	52.18	52.41	53.53	52.71	3201.09	6550.00	2.05	170.00	5.6	11.43	9.92		
4AR	2	0	29.9	20	48.84	49.04	52.59	50.16	3144.88	5969.00	1.90	106.00	5.5	7.87			
1ER	1	0	30.2	19.9	57.29	57.12	56.82	57.08	3414.77	7310.00	2.14	195.00	2.6	11.37			
2ER	1	0	30	19.9	58.9	60.43	59.12	59.48	3529.46	7694.00	2.18	209.00	2.1	11.13	10.87		
3ER	1	0	30.2	19.6	56.37	55.12	53.91	55.13	3191.04	7129.00	2.23	150.00	1.5	9.52			
4ER	1	0	30	19.5	53.91	55.13	54.4	54.48	3182.40	6762.00	2.12	177.00	2	11.47			
5ER	2	0	30	20	51.79	54.15	54.3	53.41	3258.00	6686.00	2.05	64.00	-	4.21	9.41		
6ER	2	0	30	19.6	57.54	56.26	58.15	57.32	3419.22	7291.00	2.13	210.00	2.3	12.23			
7ER	2	0	29.9	19.9	56.04	56.35	57.01	56.47	3392.15	7157.00	2.11	36.00	1	2.12			
8ER	2	0	29.9	19.9	56.44	58.4	57.35	57.40	3412.38	7360.00	2.16	130.00	1.6	7.41	7.95		

Nota: Los resultados del bloque rectangular de sección 15 x 25 cm, se encuentra en Anexo C:Tabla C-13

Tabla C-15: Ensayo de Resistencia al Desgaste Superficial de Bloques Asfálticos para mezclas HMA y AE.

Identificación material		Largo (cm)	Espesor (mm)			Ancho (cm)			Peso (gr)					Superficie (m ²)	Peso Perdido (gr)	Desgaste Superficial	
			1	2	3	prom.	1	2	3	prom.	Inicial	1 min	2 min			3min	5 min
PROYECTO: Adofaltos - Tramo de Prueba MUESTRA: bloques de asfalto PROVEEDOR:		<p style="text-align: center;">PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DE CHILE LABORATORIO DE INGENIERÍA CIVIL FECHA: 19/abril/ 2010 USO : REALIZADO POR : F.A</p>															
DETERMINACIÓN DE DESGASTE SUPERFICIAL SOBRE BLOQUES ASFÁLTICOS																	
1A	HMA	14,5	43,44	44,96	45,44	44,61	12,40	12,00	11,90	12,10	1607,29	1597,45	1591,22	0,017545	16,07	915,9305	1012
2A	HMA	14,5	39,42	45,10	39,45	41,32	12,60	12,40	12,30	12,43	1490,93	1484,55	1476,92	0,0180283	19,02	1055,006	
4A	HMA	15	49,33	46,09	45,22	46,88	12,30	12,60	12,30	12,40	1867,69	2191,16	1847,86	0,0186	19,83	1066,129	
1E	Emulsión	15,1	57,06	57,78	58,26	57,70	11,70	11,80	11,80	11,77	2206,29	2186,73	0,017677	19,56	1100,876	1147	
2E	Emulsión	15,2	58,31	58,10	58,44	58,28	12,00	12,10	12,20	12,10	2384,34	2362,44	0,018392	21,90	1190,735		
3E	Emulsión	14,7	52,54	54,55	53,30	53,46	12,80	12,70	13,20	12,80	2151,11	2138,46	2129,47	0,018816	21,64		1150,085

ANEXO D: REGISTRO FOTOGRÁFICO DURANTE LAS DIFERENTES ETAPAS DE LA INVESTIGACIÓN



Fotografía 1.- Martes 12-01-2010. Visita e inspección a terreno en tramo de prueba. Ubicación junto a edificios de laboratorios de Escuela de Construcción Civil – RESMAT de la PUC, campus San Joaquín; y demarcación de área de trabajo en tramo de prueba para su construcción. Material utilizado polvo de caliza.



Fotografía 2.- Martes 12-01-2010. Instalación de equipos y materiales de la compañía constructora THX encargada de la construcción de tramo de prueba y con representante Sr. Juan Sandoval; y Miércoles 13-01-2010. Inicio de trabajo en construcción de tramo de prueba sector Poniente con equipo de Bobcat y personal humano (1 jefe de trabajo, 1 maestro y 3 peones)



Fotografía 3.- Miércoles 13-01-2010. Material existente como sub-rasante en el tramo de prueba. Sector poniente. Jueves 14-01-2010. Terminado parcial a nivel de subrasante con superficie húmeda.



Fotografía 4.- Ensayo con equipo Prima 100- Deflectómetro de Impacto para determinar la resistencia del suelo a nivel de Sub-rasante, Base espesor 15 cm, Base espesor 30 cm a cada 2.5 m del abscisado y en lado derecho, eje, izquierdo de cada abscisa señalada. Lunes 18-01-2010. Excavación de calicata y toma de muestra sobre terreno adjunto al tramo de prueba para ensayos de mecánica de suelos.



Fotografía 5.- Viernes 15-01-2010. Stock de material granular para construcción de capa de base en tramo de prueba. Miércoles 20-01-2010. Comprobación de irregularidad superficial a nivel de base – primera capa ($e= 15$ cm).



Fotografía 6.- Martes 26-01-2010. Colocación de perfil de acero para guías en la colocación de mezcla de Asfalto en Caliente y en Frio. Jueves 28-01-2010. Colocación de Arena Fina sobre capa de Base para evitar adherencia entre capa de carpeta asfáltica y base.



Fotografía 7.- Jueves 28-01-2010. Vaciado de mezcla asfáltica en caliente sobre calzada de prueba entre las abscisas 0+000 - 0+020 (ancho de 4.5 m). Enrasado de mezcla asfáltica.



Fotografía 8.- Jueves 28-01-2010. Control de temperatura de la mezcla asfáltica en caliente durante su colocación y compactación sobre tramo de prueba. Enrasado y compactación de mezcla asfáltica en caliente en tramo de prueba (20 m de longitud).



Fotografía 9.- Martes 02-02-2010. Diseño y Elaboración de mezcla de emulsión asfáltica en laboratorio. Viernes 05-02-2010. Elaboración de Mezcla de emulsión asfáltica en campo para la construcción de capa asfáltica desde la abscisa 0+020 - 0+040.



Fotografía 10.- Viernes 05-02-2010. Enrasado de mezcla de emulsión asfáltica en campo. Compactación de capa de emulsión asfáltica en campo desde la abscisa 0+020 lado derecho.



Fotografía 11.- Viernes 05-02-2010. Toma de muestra en campo (probeta superpave) de mezcla de emulsión asfáltica. Miércoles 10-02-2010. Elaboración de probeta Superpave mediante compactador giratorio (SGC) con presión 650 KPa 100 vueltas a velocidad de 30 giros/min.



Fotografía 12.- Elaboración de probetas Marshall con diámetro de 4 pulg. mediante el compactador mecánico 75 golpes por cara de la probeta. Ensayo de Resistencia a la Tracción Indirecta (ITS) sobre probetas superpave con diámetro de 6 pulg.



Fotografía 13.- Preparación y curado de la probetas para ensayos por un período de 72 horas a una temperatura de 40°C. Curado de muestras en condición saturada luego de curado en seco, por un período de 24 horas a 25°.



Fotografía 14.- Ensayo de Resistencia a la Tracción Indirecta (ITS) sobre probetas Marshall con diámetro de 4 pulg. Ensayo Marshall para determinación de la Fluencia y Estabilidad de la mezcla asfáltica en frío (emulsión asfáltica).



Fotografía 15.- Terminado final de tramo de prueba con dos superficies de rodadura: abs. 0+000 – 0+020 mezcla asfáltica en caliente; 0+020 – 0+040 mezcla de emulsión asfáltica utilizando ceniza FBC. Letrero de identificación de Proyecto en tramo de prueba en el campus San Joaquín de la PUC.



Fotografía 16.- Cortadora asfáltica de pavimento HMA y AE para obtener bloques de asfalto (cortes longitudinales y transversales). Obtención de los Bloques asfálticos retirando del colchón de arena.



Fotografía 17.- Ensayo de Deflectometría de Impacto Liviano LFWD con Equipo Prima 100 sobre carpeta de Bloques de Asfalto. Ensayo de Deflectometría de Impacto FWD sobre carpeta de Bloques de Asfalto.



Fotografía 18.- Obtención de Paralelepípedos de mezcla asfáltica AE , para ensayo de resistencia a compresión. Ensayo de Resistencia al Desgaste Superficial de Bloques de Asfalto.



Fotografía 19.- Ensayo a la Flexión de Bloques de Asfalto. Inducción de Plano de Falla en ensayo de resistencia a la flexión de Bloques de Asfalto, bajo la ubicación de la ranura, con una profundidad entre 5 y 10 mm.



Fotografía 20.- Extracción de Testigos Asfálticos sobre Tramo de Prueba, para diámetros de 4 y 6 pulgadas. Ensayo de Módulo en equipo NAT para testigos asfálticos.

ANEXO E: PROCEDIMIENTO DE ENSAYO PARA DETERMINAR EL MÓDULO DE RIGIDEZ EN PROBETAS CILÍNDRICAS DE VARIOS DIÁMETROS Y ESPESORES.

INTRODUCCIÓN

Este ensayo es aplicable a especímenes cilíndricos de diverso diámetro (80, 100, 120, 150 y 200 mm.) y espesor entre 30 y 75 mm, fabricado en laboratorio o extraído directamente de terreno (testigos).



Figura 1: Identificación de probeta de ensayo.

EQUIPO

- Equipo de Carga COOPER HYD25
- Accesorios de Ensayo IT-CY
- Calibrador
- Balanza
- Regla o escuadra 90°
- Tiza o plumón
- Hexágonos

El diámetro de la probeta será aproximadamente de 4 o 6 pulgadas según el molde Marshall o SUPERPAVE, respectivamente; las mismas que son mayormente utilizadas en laboratorio y terreno. El espesor de la probeta deberá ser determinado con precisión (mínimo 3), medida que estará en función del espesor de la capa de rodado según el diseño de laboratorio o determinado directamente en terreno. El peso de la probeta será determinado según las condiciones de ensayo (seco o saturado) y estará en función del tipo de mezcla (asfalto, emulsión, concreto, etc.).

PROCEDIMIENTO.

Determinación de parámetros de la Muestra.

Dentro de los parámetros requeridos de la probeta de ensayo son: identificación, tipo de mezcla, diámetro, espesor, peso. Respecto a la identificación es necesario que cada probeta lleve un único número que la identifique dentro de una muestra.



Figura 2: Medida de espesor y peso de la probeta.

Marcado Perpendicular.

Es necesario demarcar la superficie de la probeta mediante una cruz perpendicular y en la parte central (un solo lado) en un rango de $90 \pm 10^\circ$ de una alineación con respecto a la otra, para efectos posteriormente requeridos durante la realización del ensayo.



Figura 3: Demarcación perpendicular en probeta.

Montaje de Accesorios de Ensayo.

El montaje del ensayo se compone de tres partes: anillo para deformación diametral horizontal, alineamiento de LVDT (Linear Variable Differential Transformer), platina de carga superior e inferior. El dimensionamiento de estos accesorios está en función del tamaño (diámetro) de la probeta de ensayo.



Figura 4: Montaje de Ensayo y varilla de liberación del nivel de alineamiento.

Será necesario verificar el ajuste de todas las partes de los accesorios. El equipo de alineamiento para LVDT deberá soportar el anillo para deformación diametral horizontal, debiendo estar nivelada de tal manera que permita medir la deformación diametral en la parte central de la probeta de ensayo (demarcación perpendicular). Verificar que la varilla de liberación del nivel LVDT se encuentre hacia abajo al inicio de ensayo.

Colocación de Probeta en Accesorios de ensayo IT-CY (Indirect Tension to Cylindrical Specimens).

Se apoya la probeta sobre la platina de carga inferior y centrada en el alineamiento de LVDT y anillo de deformación diametral horizontal debidamente ajustada a las caras laterales de la probeta. Posteriormente se coloca la platina de carga superior sobre la probeta de ensayo.

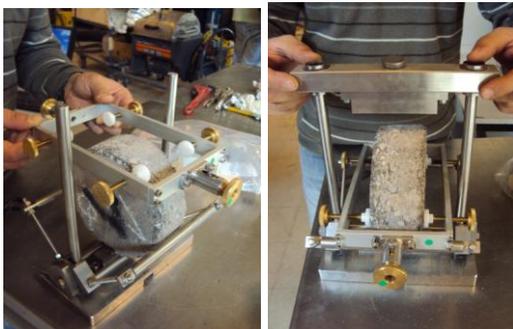


Figura 5: Colocación de Anillo para deformación diametral horizontal y Platina Superior de Carga sobre probeta de ensayo.

Preparación de Equipo COOPER HYD25.

Revisar el funcionamiento y accesorios de la celda de carga y LVDT. Existe una barra de acero acoplada a la celda de carga y colocada en la parte superior del equipo; y LVDT con un alcance de deformación requerida; accesorios propios para el ensayo, por lo que deberá ser revisado, o de ser el caso, colocados o cambiados al inicio del mismo.



Figura 6: Barra de Carga y LVDT.

Posteriormente se procederá a encender el equipo electrónico conjuntamente con su PC. Para el equipo electrónico es necesario chequear el encendido y

funcionamiento adecuado del compresor y válvula de aire para procesos de carga, conexión adecuada de cables de LVDTs (2 unidades) para deformación, y cable de celda de carga (1 unidad). Con respecto al PC del equipo se requerirá dar inicio al software ITSM EN correspondiente a dicho ensayo. Para efectos de acoplamiento del montaje de ensayo a la barra de carga, será necesario trasladar la mesa de apoyo del equipo según la altura requerida para el ensayo, mediante el software correspondiente.



Figura 7: Encendido de Equipo COOPER HYD25 y Chequeo de conexión de cable de LVDT y Celda de Carga.

Ilustración 1

Ingreso de Datos para Ensayo IT-CY.

Al inicio del software (ITSM EN) de ensayo solicitará la siguiente información: nombre de archivo, nombre de operador o laboratorista, nombre o identificación de la probeta, parámetros de la probeta como densidad, diámetro; deformación horizontal máxima, número de pulsos de carga, temperatura de ensayo, etc., y finalmente información para el informe final de ensayo como tipo de compactación, preparación de la muestra, etc. Respecto a la deformación horizontal máxima solicitada,

experiencias indican que debe estar en el orden de $7\pm 2 \mu\text{m}$ para probetas de 150 mm de diámetro y $5\pm 2 \mu\text{m}$ para probetas de 100 mm de diámetro. Al menos 10 pulsos de carga deberán ser aplicados para el ajuste de la magnitud de carga y duración con el objeto de lograr la deformación horizontal máxima solicitada. Entre las temperaturas recomendadas de ensayo están: 2°C , 10°C , 20°C , sin embargo se podrán utilizar otras temperaturas de ensayo según los objetivos a determinar.

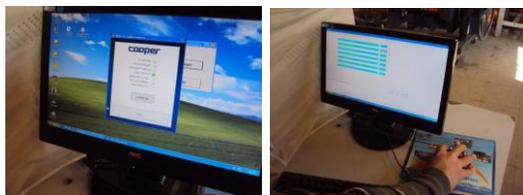


Figura 8: Inicio de Software ITSM EN e Ingreso de Información y parámetros requeridos para ensayo IT-CY.

Proceso de Ensayo IT-CY.

Se introduce el montaje de accesorios de ensayo IT-CY en el equipo COOPER HYD25. Se acopla y asegura los LVDTs de deformación con el anillo de soporte instalados a los costados de la probeta. Procurar no colocar al inicio del ensayo el montaje con la probeta directamente bajo la barra de carga de equipo para evitar daños en el mismo, hasta el momento indicado en los pasos a seguir en el software del ensayo, lo cual ocurre una vez que se ha ingresado correctamente los datos y parámetros de ensayo.

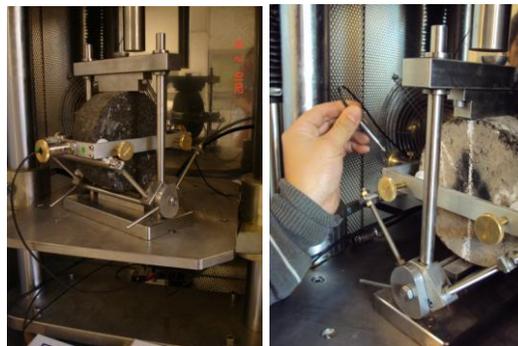


Figura 9: Ingreso de Montaje de ensayo IT-CY en equipo de carga y acoplamiento lateral de LVDT sobre anillo de deformación horizontal. Posteriormente se apoya la barra de carga del equipo COOPER HYD25 sobre la platina de carga superior del montaje de ensayo IT-CY. Poner en contacto los LVDTs con la superficie de la probeta de ensayo. Levantar la varilla de liberación del nivel LVDT, quedando el anillo de deformación diametral horizontal apoyado únicamente sobre las caras de la probeta de ensayo mediante las abrazaderas laterales. Dar inicio al número de pulsos de carga (10) para calibración y duración de carga final de ensayo. Durante este proceso es común esperar un desajuste de los LVDTs sobre la superficie de la probeta, para lo cual deberá ser recalibrado y ajustado nuevamente. Comenzar el proceso de carga y descarga sobre la probeta de ensayo, presentando finalmente una pantalla en el PC con las gráficas de resultados (pulsar continuar). Durante el proceso de ensayo se requerirá permanecer cerrada la cámara del equipo COOPER HYD25 para lograr la temperatura especificada de ensayo.

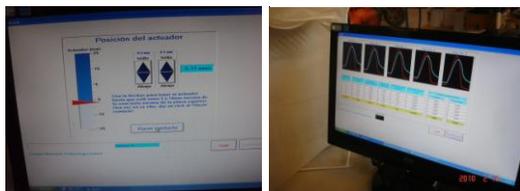


Figura 10: Pantalla PC de ajuste entre barra de carga y platina de carga superior del montaje de ensayo y, gráfica de resultados carga/deformación.

El ensayo consta de dos partes, cuyo procedimiento es el mismo para ambas, con la diferencia que la segunda será realizada sobre la misma probeta, pero girada 90° . Una vez realizado el paso anterior, la segunda parte inicia nuevamente desde el ajuste entre la barra de carga del equipo y la platina superior de carga del montaje de ensayo. Tomar en cuenta que al momento de girar la probeta de ensayo para la segunda parte es necesario bajar nuevamente la varilla de liberación del nivel LVDT, desajustar las abrazaderas laterales del anillo de deformación diametral horizontal de las caras laterales de la probeta, y separar la platina superior de carga; quedando la



Figura 11: Giro 90° de la probeta para segunda parte de ensayo.

probeta completamente libre y apoyada únicamente sobre la platina inferior de carga.

Una vez finalizado la segunda parte del ensayo, en la pantalla de PC se pulsará *imprimir*, para obtener un archivo del informe completo del ensayo, emitido automáticamente por el software de ensayo ITSM EN en base a los parámetros y datos entregados y los resultados obtenidos. Existen dos opciones de archivo final de ensayo: guardar en un solo archivo el número total de ensayos de probetas al final del día o; crear y guardar un archivo por cada probeta ensayada. Si se escoge la segunda opción, será necesario salir del programa al final de cada ensayo por probeta y abrir nuevamente el software ITSM EN para un nuevo ensayo.

Al final de cada ensayo se retirará el montaje de ensayo IT-CY de la cámara y se procederá a retirar la probeta del mismo. Para el inicio de un nuevo ensayo deberá limpiarse completamente el equipo y accesorios de ensayo