

**PREPARACIÓN Y EVALUACIÓN DE UNA MEZCLA EN CALIENTE PARA LA
OBTENCIÓN DE UN PAVIMENTO FERROMAGNÉTICO QUE MEJORE LA
ADHESIÓN ENTRE LA SUPERFICIE PAVIMENTO Y LLANTA MAGNÉTICA**

**PAOLA ANDREA CELIS RIVERA
SUANI ZULEIMA DESCHAMPS JULIO**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICOQUIMICAS
ESCUELA DE INGENIERIA QUIMICA
Bucaramanga, Marzo de 2005**

**PREPARACION Y EVALUACIÓN DE UNA MEZCLA EN CALIENTE PARA LA
OBTENCIÓN DE UN PAVIMENTO FERROMAGNETICO QUE MEJORE LA
ADHESION ENTRE LA SUPERFICIE PAVIMENTO Y LLANTA MAGNETICA**

**PAOLA ANDREA CELIS RIVERA
SUANI ZULEIMA DESCHAMPS JULIO**

Trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar al título de
Ingeniero Químico

Director de Proyecto

RAMIRO SALAZAR
Ingeniero Químico, Ph.D.

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICOQUIMICAS
ESCUELA DE INGENIERIA QUÍMICA
Bucaramanga, Marzo de 2005**

AGRADECIMIENTOS

- Al culminar este trabajo de grado no nos resta mas que agradecer primero que todo a Dios por estar presente con nosotras en todo momento, brindándonos toda la sabiduría que necesitamos así como la paciencia y tranquilidad en los momentos de desespero.
- Al Profesor Ramiro Augusto Salazar por su orientación y dirección.
- A la escuela de Ingeniería Química de la Universidad Industrial de Santander por formarnos como profesionales con bases científicas, tecnológicas y humanísticas.
- Al Laboratorio de Pavimentos de la escuela de Ingeniería Civil por permitirnos realizar el trabajo requerido para la conformación de este trabajo de grado.
- A Wilson, Eduardo, Enrique y todas aquellas personas que directa o indirectamente participaron y colaboraron en la realización de este proyecto.

A mi mamá por todos los sacrificios hechos para que pudiera culminar mis estudios, por todo su amor, ternura, apoyo y comprensión, gracias a ti soy la persona y profesional que hoy en día soy, mami ya puedes descansar.

A mi padre que con su paciencia y apoyo me supo encaminar en el sendero que un día me trace, papi gracias por todos tus esfuerzos y sacrificios, mi realización como profesional es merito tuyo y te prometo que no te decepcionaré.

A mis hermanas que con su amor siempre estuvieron a mi lado infundiéndome constancia para seguir adelante frente a las situaciones difíciles.

A mi amiga Diana por haber estado siempre a mi lado en las buenas y en las malas, a mi compañera de grado Paola por brindarme toda su colaboración y su amistad para culminar este proyecto.

Por ultimo pero no menos importante quiero agradecer a mi novio por estar siempre conmigo, por brindarme su amor, su ternura y su presencia en los momentos en que mas los necesitaba.

SUANI ZULEIMA DESCHAMPS JULIO

A Dios por brindarme la fortaleza y sabiduría en momentos difíciles.

A quienes me concedieron la vida, por hacer de mí una persona espiritual con capacidad de crear metas y sueños por las cuales luchar y por estar presente en cada uno de ellos... Nelson y Martha mis padres.

A quien siempre me ha acompañado desde la infancia, porque juntas hemos compartido momentos maravillosos de nuestras vidas... Jenny mi hermana.

A los ángeles que con su dulzura e inocencia hacen que cada instante de la vida sea valioso... Sergio y Diego mis hermanos.

Al hombre que cada día me entrega su amor y su incondicionalidad... mi novio.

PAOLA ANDREA CELIS RIVERA

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	1
1. OBJETIVOS	3
1.1 OBJETIVO GENERAL	3
1.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS	3
2. MARCO TEORICO: MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE PARA PAVIMENTACIÓN Y PROPIEDADES DE LOS IMANES DE NEODIMIO UTILIZADOS EN LA LLANTA MAGNÉTICA	4
2.1 GENERALIDADES	4
2.2 TIPOS DE MEZCLAS ASFÁLTICAS	4
2.3 DEFINICIÓN DE MEZCLA DE ASFALTO PREPARADA EN CALIENTE	5
2.4 MATERIALES USADOS EN LA FABRICACION DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE	5
2.4.1 Asfalto.	5
2.4.2 Agregado.	6
2.4.3 Aditivos mejoradores para las mezclas.	7
2.5 ENSAYOS DE CALIDAD DEL CEMENTO ASFÁLTICO UTILIZADO EN PAVIMENTACIÓN	8
2.5.1 Peso Específico.	8
2.5.2 Penetración	8
2.5.3 Punto de Ablandamiento	8
2.5.4 Viscosidad Cinemática.	8
2.5.5 Ductilidad.	8
2.5.6 Punto de Chispa	8
2.6 ENSAYOS PREDICTIVOS DE LAS PROPIEDADES DEL ASFALTO	9
2.6.1 Ensayo de Envejecimiento Termooxidante en Película Fina o TFOT (Thin Film Oven Test).	9
2.6.2 Ensayo de Envejecimiento de Película Fina Rotatoria o RTFOT (Rolling Thin Film Oven Test).	9
2.7 PROPIEDADES BÁSICAS DE LOS AGREGADOS	10
2.7.1 Naturaleza de la roca.	10
2.7.2 Granulometría.	10
2.7.2.1 Material llenante.	11
2.8 ESPECIFICACIONES Y CALIDAD DE LOS AGREGADOS	11
2.8.1 Ensayo de granulometría.	12
2.8.2 Peso volumétrico suelto y seco	12
2.8.3 Equivalente de arena.	12
2.8.4 Gravedad específica	12
2.8.5 Absorción.	13
2.8.6 Límite plástico e índice de plasticidad	13

2.8.7	Ensayo de desgaste de los agregados en la máquina de Los Ángeles	13
2.8.8	Ensayo de estabilidad o resistencia al ataque de sulfato de magnesio o de sodio.	14
2.8.9	Adhesividad en bandeja.	14
2.9	PROPIEDADES DE MEZCLAS ASFÁLTICAS	15
2.10	CONCEPTOS GENERALES DE MATERIALES MAGNÉTICOS Y DEFINICIÓN DE PROPIEDADES DE LOS IMANES DE NEODIMIO UTILIZADOS EN LA LLANTA MAGNÉTICA	16
2.10.1	Materiales magnéticos	16
2.10.2	Qué es un imán.	17
2.10.3	Procedencia del magnetismo.	17
2.10.4	Tipos de imanes permanentes	18
2.10.4.1	Imanes cerámicos.	18
2.10.4.2	Imanes de alnico	18
2.10.4.3	Imanes de tierras raras	19
2.10.4.4	Imanes flexibles.	19
2.10.4.5	Otros imanes.	19
2.10.5	Imanes de neodimio	20
2.10.5.1	Características magnéticas y físicas de los imanes de neodimio	20
2.10.5.2	Características magnéticas y físicas típicas de un imán de neodimio	21
2.10.6	Pruebas magnéticas	21
2.10.6.1	Inducción remanente	21
2.10.6.2	Fuerza coercitiva.	21
3.	DESARROLLO EXPERIMENTAL	22
3.1	REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	22
3.2	IDENTIFICACIÓN Y EVALUACIÓN DE LAS MATERIAS PRIMAS A UTILIZAR	23
3.2.1	Propiedades del asfalto.	23
3.2.1.1	Peso Específico	25
3.2.1.2	Penetración.	25
3.2.1.3	Punto de Ablandamiento.	26
3.2.1.4	Viscosidad Cinemática.	26
3.2.1.5	Ductilidad.	26
3.2.1.6	Punto de Chispa	26
3.2.2	Propiedades del agregado.	27
3.2.2.1	Ensayo de granulometría.	27
3.2.2.2	Gravedad específica	29
3.2.2.3	Límite plástico e índice de plasticidad.	29
3.2.2.4	Ensayo de desgaste de los agregados en la máquina de Los Ángeles	29
3.2.2.5	Adhesividad en bandeja.	30
3.2.2.6	Ensayo de estabilidad o resistencia al ataque de sulfato de magnesio o de sodio	30
3.2.2.7	Equivalente de arena.	30
3.3	ELABORACIÓN DE LA MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE	

	APLICANDO EL MÉTODO DE BRUCE MARSHALL	30
3.3.1	Procedimiento de ensayo.	32
3.3.1.1	Número de muestras.	32
3.3.1.2	Preparación de los agregados	32
3.3.1.3	Determinación de las temperaturas de mezcla y compactación.	33
3.3.1.4	Preparación de las mezclas.	34
3.3.1.5	Compactación de las mezclas.	35
3.3.2	Ensayo de probetas compactadas	36
3.3.2.1	Determinación del peso específico "Bulk".	36
3.3.2.2	Ensayo de estabilidad y flujo.	37
3.3.2.3	Análisis de densidad y vacíos.	38
3.4	ELABORACIÓN DE LA LLANTA MAGNÉTICA	39
3.5	PRUEBAS MAGNÉTICAS	39
3.5.1	Inducción remanente.	39
3.5.2	Fuerza de atracción	39
3.6	ENSAYOS PARA LA EVALUACIÓN DE LA ADHERENCIA	40
3.6.1	Ensayos cuantitativos	40
3.6.2	Ensayos cualitativos	40
4.	ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	42
4.1	PROPIEDADES DEL ASFALTO UTILIZADO.	42
4.2	PROPIEDADES DEL AGREGADO UTILIZADO.	43
4.2.1	Granulometría.	43
4.2.2	Peso específico y absorción de agregados finos	43
4.2.3	Porcentaje de caras fracturadas.	44
4.2.4	Límite líquido y límite plástico.	44
4.2.5	Solidez de agregados bajo la acción de sulfatos.	44
4.2.6	Abrasión de agregados (Desgaste en la máquina de los Ángeles).	45
4.2.7	Adhesividad en bandeja	45
4.2.8	Equivalente de arena	45
4.3	MÉTODO MARSHALL PARA DISEÑO DE MEZCLAS DE AGREGADOS CON CEMENTO ASFALTICO	45
4.3.1	Pautas de comportamiento	48
4.3.2	Selección del contenido óptimo de asfalto en la mezcla.	49
4.3.3	Aplicación de los resultados obtenidos.	51
4.3.4	Algunas observaciones adicionales sobre el efecto de las características de los materiales en los resultados del ensayo Marshall.	51
4.3.4.1	Efecto de los agregados.	51
4.3.4.2	Efecto del cemento asfáltico	52
4.3.4.3	Efecto de la compactación.	52
4.3.5	Causas del error en el ensayo.	52
4.4	PREPARACIÓN Y EVALUACIÓN DE PAVIMENTO FERROMAGNÉTICO.	56
4.5	PRUEBAS FÍSICAS PARA LA DETERMINACIÓN DE VARIABLES	56
4.5.1	Ensayos Cuantitativos	56

4.5.1.1	Distancia máxima entre las superficies PF-IMÁN donde se da una FAP el área de imanes constante.	56
4.5.1.2	Distancia máxima entre las superficies PF-IMÁN donde se da una FAP con espesor de imanes constante.	57
4.5.1.3	Determinación de velocidad a un mismo ángulo en diferentes superficies.	58
4.5.2	Ensayos Cualitativos	59
4.6	PRUEBAS MAGNÉTICAS.	60
4.6.1	Inducción remanente.	60
4.6.2	Fuerza de Atracción Superficial (FAS)	60
4.7	ANÁLISIS ECONÓMICO	61
	CONCLUSIONES	62
	RECOMENDACIONES	64
	BIBLIOGRAFÍA	65
	ANEXOS	67

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Parámetros de clasificación de las mezclas asfálticas	4
Tabla 2. Clasificación del asfalto de acuerdo a su uso	6
Tabla 3. Características y propiedades granulométricas de los agregados	11
Tabla 4. Clasificación de gravedades específicas y sus características	13
Tabla 5. Normas correspondientes para los ensayos a los agregados	14
Tabla 6. Características Magnéticas Y Físicas De Los Imanes De Neodimio	20
Tabla 7. Características Magnéticas Y Físicas De Un Imán De Neodimio	21
Tabla 8. Tipo de cemento asfáltico por emplear en mezclas en caliente	24
Tabla 9. Especificaciones del cemento asfáltico	24
Tabla 10. Características fisicoquímicas del asfalto del CIB	25
Tabla 11. Requisitos de agregados pétreos para mezclas asfálticas en caliente	27
Tabla 12. Gradaciones de agregados pétreos y llenante mineral para diferentes tipos de mezcla asfáltica	29
Tabla 13. Porcentaje que pasa para la gradación MDC-3	33
Tabla 14. Características físicas del asfalto utilizado en obra y su procedencia	42
Tabla 15. Requisitos de agregados pétreos para mezclas asfálticas en caliente	43
Tabla 16. Diseño de mezcla bituminosa por el método Marshall	106
Tabla 17. Selección del contenido óptimo de asfalto en la mezcla	49
Tabla 18. Criterio de diseño del Instituto del Asfalto para el Ensayo Marshall	49
Tabla 19. Mínimo porcentaje admisible de vacíos en los agregados minerales	50
Tabla 20. Propiedades de la mezcla con el contenido de asfalto óptimo	50
Tabla 21. Guía Para Ajustes De Mezclas Asfálticas	51
Tabla 22. Diseño de mezcla bituminosa por el método Marshall	107
Tabla 23. Selección del contenido óptimo de asfalto en la mezcla	55
Tabla 24. Datos para determinar la fuerza de atracción superficial	60
Tabla 25. Costo total de materia prima para obtener 1m ³ de M.A.C.	61
Tabla 26. Costo total de materia prima para 1m ³ de M.A.C. con agregado común.	61

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Gráfico de granulometrías límites para agregado (ASTM D3515)	28
Figura 2. Gráfico de variación de densidad de probetas con el aumento de % de asfalto	46
Figura 3. Gráfico de variación de estabilidad con el aumento de % de asfalto	46
Figura 4. Gráfico de variación del flujo de las probetas con el aumento de % de asfalto	47
Figura 5. Gráfico de variación de vacíos con aire con el aumento de % de asfalto	47
Figura 6. Gráfico de variación en % de vacíos en agregados con el aumento de % de asfalto	47
Figura 7. Gráfico de variación de estabilidad con el aumento de % de asfalto	53
Figura 8. Gráfico de variación de vacíos con aire con el aumento de % de asfalto	54
Figura 9. Gráfico de variación de densidad de probetas con el aumento de % de asfalto	54
Figura 10. Gráfico de variación del flujo de las probetas con el aumento de % de asfalto	55
Figura 11. Variación de distancia máx. entre las superficies PF-IMÁN donde se da una FAP en función del espesor del imán con el área expuesta constante.	57
Figura 12. Variación de distancia máx. entre las superficies PF-IMÁN donde se da una FAP en función del área del imán con espesor constante	58
Figura 13. Variación de la velocidad de un vehículo (juguete) vs. ángulo de inclinación en dos superficies diferentes usando un mismo carro (conteniendo imanes de neodimio en sus llantas)	59

LISTA DE ANEXOS.

	Pág.
ANEXO A. Características de imanes	68
ANEXO B. Artículo 400	70
ANEXO C. Artículo 450	84
ANEXO D. Seguridad industrial	97
ANEXO E. Análisis del difractograma de RX de la roca imán	98
ANEXO F. Análisis del material llenante	100
ANEXO G. Fotos	101
ANEXO H. Ensayos cualitativos	105
ANEXO I. Diseño de mezcla bituminosa por el método Marshall	107
ANEXO J. Diseño de mezcla bituminosa por el método Marshal	108

RESUMEN

TÍTULO*:

PREPARACION Y EVALUACIÓN DE UNA MEZCLA EN CALIENTE PARA LA OBTENCIÓN DE UN PAVIMENTO FERROMAGNETICO QUE MEJORE LA ADHESION ENTRE LA SUPERFICIE PAVIMENTO Y LLANTA MAGNETICA

AUTOR (ES):

PAOLA ANDREA CELIS RIVERA
SUANI ZULEIMA DESCHAMPS JULIO**

PALABRAS CLAVES:

Pavimento ferromagnético, adhesión, INVIAS, mezcla asfáltica en caliente

DESCRIPCIÓN:

Con este trabajo de grado se logró preparar y evaluar mediante una mezcla asfáltica en caliente un pavimento ferromagnético con el fin de mejorar la adhesión entre este tipo de pavimento y la llanta magnética. Así mismo se pretende que sea aplicado en tramos peligrosos como inclinaciones, curvas, peraltes, etc., y además que sea resistente a condiciones climáticas desfavorables como lluvias, nieve, hielo y arena.

Para la elaboración del pavimento, se reemplazó el agregado común utilizado en la pavimentación, por un agregado con alto contenido de hierro que proporcione al pavimento la capacidad de ser atraído por un campo magnético ejercido por la llanta magnética. Este carácter magnético en la llanta es debido al acondicionamiento de una banda de imanes de neodimio en su interior.

El agregado fue sometido a pruebas tales como la determinación del porcentaje de absorción, caras fracturadas, resistencia a ataques químicos, abrasión, entre otras con el fin de que cumpliera con las normas del INVIAS. Así mismo el asfalto se caracterizó y se evaluó cada una de sus propiedades para así compararlas con las especificaciones del asfalto de Barrancabermeja, mediante lo cual se determinó que el asfalto a emplear era óptimo. Una vez realizado este proceso se elaboraron probetas para determinar el porcentaje óptimo de asfalto y la temperatura de compactación y mezclado del asfalto con el agregado, datos con los cuales finalmente se construyó el pavimento ferromagnético. Se realizaron pruebas cuantitativas (determinación de la velocidad y la fuerza de atracción perceptible) y cualitativas tendientes a evaluar la adhesión entre estas dos superficies arrojando buenos resultados, concluyendo que con la implantación de este proyecto se estará disminuyendo el índice de accidentabilidad en las carreteras a un costo permisible.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química. Ramiro Augusto Salazar Larrota

ABSTRACT

TITLE:

PREPARATION AND EVALUATION OF A MIXTURE IN HOT FOR THE OBTAINING OF A FERROMAGNETIC PAVEMENT THAT IMPROVES THE ADHESION BETWEEN THE SURFACE PAVEMENT AND MAGNETIC TIRE *

AUTHOR:

**PAOLA ANDREA CELIS RIVERA
SUANI ZULEIMA DESCHAMPS JULIO ****

KEY WORDS:

Ferromagnetic pavement, adhesion, INVIAS, mixes asphaltic in hot

DESCRIPTION:

With this grade work it was possible to prepare and evaluate by means of an asphaltic mixture in hot a ferromagnetic pavement with the purpose of improving the adhesion between this type of pavement and the magnetic tire. Likewise it is sought that it is applied in dangerous tracts as inclinations, curved, bank, etc., and also that it is resistant to unfavorable climatic conditions as rains, snow, ice and sand.

For the elaboration of the pavement, the common rock used in the pavement was replaced, for a rock with high iron content that provides to the pavement the capacity of being attracted by a magnetic field exercised by the magnetic tire. This magnetic character in the tire is due to the installation of a Neodymium band in its interior.

The rock was subjected to such tests as the determination of the absorption percentage, fractured faces, resistance to chemical attacks, abrasion, among others with the purpose of that it fulfilled the INVIAS norms. Likewise the asphalt was characterized and each one of its properties was evaluated it stops this way to compare them with the specifications of the Barrancabermeja asphalt, by means of that which was determined that the asphalt to use was good. One is carried out this process test tubes they were elaborated to determine the good percentage of asphalt and the compactor temperature and blended of the asphalt with the rock, data with those which finally the ferromagnetic pavement was built. They were carried out quantitative tests (determination of the speed and the force of perceptible attraction) and qualitative to evaluate the adhesion among these two surfaces throwing good results, concluding that with the installation of this project it will be diminishing the accident index in the highways at a permissible cost.

* Work of Grade.

** Faculty of Physiochemical Engineerings. School of Chemical Engineering. Ramiro Augusto Salazar Larrota

INTRODUCCIÓN

Con el presente trabajo de grado se busca obtener un pavimento utilizando agregado ferromagnético capaz de brindarle una fuerza magnética al mismo y así crear un campo de atracción entre la superficie llanta-pavimento; con lo cual en un futuro, se estaría mejorando el factor de seguridad en la red vial ya que se reduciría el número de accidentes, consiguiendo salvar muchas vidas.

Se propone obtener una nueva formulación de la mezcla asfáltica en caliente con el fin de verificar la propiedad magnética en la superficie del pavimento ferromagnético y la llanta magnética; es de anotar aquí que la llanta a utilizar será una llanta radial a la cual se le acondicionarán imanes de neodimio para lograr una mayor adhesión; este concepto cambiará la modificación de los pavimentos y la aplicación de estos en las carreteras debido a que se abrirá un camino para una nueva tecnología en su aplicación, pues se pretende que se aplique en tramos peligrosos como inclinaciones, curvas, peraltes, etc., además que sea resistente y permita mantener la adhesión del vehículo sobre el pavimento en condiciones climáticas desfavorables como lluvias, nieve, hielo, aceite y arena; por otra parte se pretende que el vehículo reduzca su velocidad obligatoriamente en tramos determinados.

El agregado utilizado para la carpeta asfáltica se someterá a un proceso de trituración, molienda y tamizado, para luego ser analizado junto con el asfalto en base a las normas del Instituto Nacional de Vías (INVIAS); en seguida se procederá al diseño de la mezcla asfáltica en caliente aplicando el método de Bruce Marshall para medir las propiedades mecánicas y la compatibilidad del agregado pétreo con el cemento asfáltico. Se evaluarán y medirán las propiedades magnéticas, inducción remanente (densidad de flujo magnético), fuerza de

atracción entre las superficies expuestas y así mismo se realizarán ensayos tendientes a cuantificar la adhesión entre las superficies pavimento ferromagnético y llanta magnética que en adelante se llamará PF-LLM. Finalmente se realizará un estudio económico de la mezcla óptima preparada en caliente.

Según el análisis de la roca utilizada para el pavimento ferromagnético ésta es aceptada, ya que cumple con las normas del INVÍAS, para su aplicación en carpetas asfálticas, al igual que el asfalto 70/90 utilizado en la preparación de mezclas asfálticas en caliente, obteniendo así excelentes resultados de estabilidad, flujo y densidad de vacíos en las probetas hechas para determinar el contenido óptimo de asfalto.

De allí se verificarán en la placa realizada de pavimento, las propiedades de adhesión entre las superficies PF-LLM. Al realizar los ensayos tendientes a evaluar estas propiedades se observa claramente que los resultados aquí obtenidos son satisfactorios ya que se logra el objetivo principal de este trabajo de grado el cual es mantener una buena adhesión entre PF-LLM, generando en inclinaciones una disminución en la velocidad, proporcionada por el campo magnético que se da entre las superficies; del mismo modo en los ensayos cualitativos se muestra que existe adhesión cuando la llanta magnética está en movimiento sobre el pavimento ferromagnético en diferentes posiciones.

1. OBJETIVOS

1.1 OBJETIVO GENERAL

- Obtener y evaluar mediante una mezcla asfáltica en caliente, un pavimento ferromagnético que logre una mayor adhesión entre las superficies Pavimento Ferromagnético-Llanta Magnética.

1.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Analizar la aplicación del método de Bruce Marshall para obtener un diseño óptimo de una mezcla asfáltica en caliente.
- Evaluar las propiedades mecánicas de la mezcla asfáltica preparada y la compatibilidad que presenta el agregado mineral y el asfalto utilizado.
- Estudiar los principales factores que afectan el comportamiento de la mezcla asfáltica preparada.
- Elaborar un pavimento ferromagnético para su aplicación en capas de rodadura.
- Realizar ensayos tendientes a evaluar la adhesión entre las superficies PF-LLM.

2. MARCO TEORICO: MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE PARA PAVIMENTACIÓN Y PROPIEDADES DE LOS IMANES DE NEODIMIO UTILIZADOS EN LA LLANTA MAGNÉTICA

2.1 GENERALIDADES

Una mezcla asfáltica es la incorporación de un agente aglutinante de origen asfáltico a un agregado mineral con el objeto de cubrir la superficie de cada una de las partículas mejorando así sus propiedades físicas y mecánicas. Las mezclas asfálticas empleadas como parte estructural de un pavimento, han sido ampliamente estudiadas por conformar éstas las capas con las más exigentes condiciones de tipo físico, mecánico y químico.

2.2 TIPOS DE MEZCLAS ASFÁLTICAS

Existe una variada gama de materiales, tanto de ligantes bituminosos como de agregados minerales, que a su vez dan origen a mezclas asfálticas de las más diversas calidades. Es por esto, que de acuerdo al parámetro de comparación que se considere se pueden clasificar de diferentes maneras. En la tabla 1 se recopilan los diferentes tipos de mezcla asfálticas en función de diversos parámetros de comparación.

Tabla 1. Parámetros de clasificación de las mezclas asfálticas	
PARAMETRO DE CLASIFICACIÓN	TIPO DE MEZCLA
Temperatura de puesta en obra	En frío En caliente
Vacíos en la mezcla	Densas Abiertas Semiabiertas Drenantes
Tamaño del agregado	Gruesas, Finas
Estructura del agregado	Con material llenante Sin material llenante
Granulometría	Uniforme, Continua, discontinua

2.3 DEFINICIÓN DE MEZCLA DE ASFALTO PREPARADA EN CALIENTE

Una mezcla de asfalto en caliente, denominada concreto asfáltico es la combinación uniformemente dosificada de agregado y cemento asfáltico, mezclados mientras se mantiene una temperatura previamente determinada en el laboratorio que garantice para cada tipo de asfalto la mejor adherencia con el agregado seleccionado. Estos materiales pueden combinarse en tal proporción que la mezcla final cumple con las especificaciones requeridas para las condiciones determinadas en el diseño. Una mezcla de asfalto en caliente se produce, extiende y compacta mientras la temperatura se mantiene elevada; estas temperaturas de mezclado oscilan entre 135 y 145° C ⁽³⁾; la temperatura de mezclado varía con cada país y cada planta.

2.4 MATERIALES USADOS EN LA FABRICACION DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE

Los pavimentos asfálticos están compuestos por tres componentes básicos: cemento asfáltico (ligante), agregado y aire (vacíos). Los aditivos asfálticos son el cuarto componente opcional para mejorar las condiciones adhesivas del asfalto.

2.4.1 Asfalto. Químicamente, el asfalto o bitumen es una mezcla compleja de diferentes clases de hidrocarburos saturados, aromáticos, nafténicos, de bajo, mediano y alto peso molecular; la cual está constituida por los elementos Carbono, Hidrógeno, Nitrógeno, Azufre, Oxígeno y puede contener Vanadio, Níquel, Silicio, Titanio, etc; altamente resistente a la acción de la mayoría de los ácidos, álcalis y sales. Físicamente, es un cemento o material ligante (adhesivo), de color negro o marrón, flexible e impermeable y puede hallarse en estado líquido, semisólido o sólido ⁽¹²⁾. Se encuentra en yacimientos de asfalto natural o como constituyente del petróleo (petróleo de base asfáltica) de donde se extrae en una refinería por destilación al vacío, como producto de fondo o en procesos de visco-reducción.

El asfalto o cemento asfáltico es considerado un material de construcción muy económico y es utilizado principalmente en la carpeta asfáltica y capas que constituyen un pavimento flexible (entre un 4 y 10% de su peso) gracias a sus propiedades como ligante o aglutinante, altamente impermeable, cohesivo, capaz de soportar grandes esfuerzos instantáneos sin figurarse y fluir bajo la acción de cargas permanentes ⁽⁹⁾. En la tabla 2 se clasifican los asfaltos de acuerdo con su uso:

Tabla 2. Clasificación del asfalto de acuerdo a su uso	
Tipo de asfalto	Clasificación
Asfaltos para pavimentos	Cementos asfálticos sólidos Asfaltos líquidos (naturales o disueltos)
Emulsiones asfálticas	-----
Asfaltos compuestos ⁽²⁾	-----
Asfaltos mejorados o industriales	Asfaltos oxidados Asfaltos modificados

El cemento asfáltico sólido se utiliza para producir mezclas de asfalto caliente, debido a sus propiedades de material termoplástico.

2.4.2 Agregado. El agregado es un mineral inerte duro, usado en partículas o fragmentos para la fabricación de mezclas asfálticas. Se conoce como agregado la arena, grava, caliza, piedra triturada, cascajo, fragmentos rocosos, escoria o combinaciones de estos elementos. El agregado constituye entre el 90 y 96% en peso y entre el 75 a 85% en volumen de la mezcla asfáltica, siendo el principal responsable de soportar las cargas del tráfico a que se somete la carpeta asfáltica. Los agregados comúnmente utilizados en la preparación de mezclas asfálticas son el basalto, caliza, grava, mármol, escoria y arena. El comportamiento de las mezclas asfálticas depende en alto grado de las características que presentan los agregados; estos forman en el pavimento un esqueleto mineral discontinuo, sólido, resistente y suficientemente indeformable, de acuerdo con una granulometría predeterminada ⁽⁹⁾.

Los agregados que se utilizan en la elaboración de una mezcla densa deben tener las siguientes características:

- **Trituración.** Deben ser gravas trituradas, porque éstas poseen una mayor estabilidad que las no trituradas, no sólo por su angularidad sino por la rugosidad de las caras producidas por fractura.
- **Porosidad.** Deben ser lo suficientemente porosos para que el ligante penetre en los poros evitando el desplazamiento de la película de asfalto.
- **Naturaleza química.** Influye directamente en la adherencia; los materiales calizos presentan buena adherencia con el asfalto, son de carácter hidrófoba; mientras que los silíceos al tener mayor afinidad con el agua, es decir, hidrófilos, se dificulta más su cubrimiento.
- **Limpieza del agregado.** Se compondrá de materiales limpios, sólidos y resistentes, de uniformidad razonable, exentos de polvo, suciedad, arcilla u otras materias extrañas.

Estos requerimientos se hacen para cualquier tamaño y procedencia.

2.4.3 Aditivos mejoradores para las mezclas. Los aditivos mejoradores son sustancias que se agregan al asfalto o al agregado para mejorar algunas de las propiedades que inciden directamente en la calidad final de la mezcla asfáltica y del pavimento. Los aditivos más comunes son:

- Siliconas, que se adicionan al asfalto para evitar la formación de espuma durante el proceso de mezclado y prevenir el agrietamiento de la capa de asfalto sobre el agregado durante la pavimentación.
- Aditivos adherentes, son ejemplos la gilsonita o caucho que se adicionan al asfalto o encima del agregado caliente para mejorar la adhesión entre el cemento asfáltico y el agregado ⁽³⁾.

2.5 ENSAYOS DE CALIDAD DEL CEMENTO ASFÁLTICO UTILIZADO EN PAVIMENTACIÓN

2.5.1 Peso Específico. Es la relación entre el peso de un volumen dado del material a 25° C (77° F) o a 15.6 ° C (60° F) y el peso de un volumen igual de agua a la misma temperatura; este ensayo se realiza empleando un picnómetro.

2.5.2 Penetración. La consistencia o dureza de un asfalto hace referencia a la estabilidad, durabilidad, solidez de un asfalto; el ensayo de penetración (ASTM D5) se utiliza para medir esta propiedad y para clasificar los cementos asfálticos en diferentes clases.

2.5.3 Punto de Ablandamiento. El asfalto es un material termoplástico, por lo que no presenta un punto de fusión propiamente dicho, por lo tanto, el punto de ablandamiento es la temperatura a la que el asfalto alcanza un determinado estado de fluidez.

2.5.4 Viscosidad Cinemática. La viscosidad es el grado de fluidez o plasticidad de un asfalto a una temperatura particular. La medición de la viscosidad busca determinar el grado de fluidez del asfalto, en el intervalo de temperaturas de operación y aplicación de una mezcla asfáltica en caliente y se mide mediante viscosidad cinemática o de Saybolt-Furol, según la norma ASTM D88 ⁽⁶⁾.

2.5.5 Ductilidad. La ductilidad es la propiedad que tienen los asfaltos de mantenerse coherentes bajo grandes deformaciones inducidas por el tránsito; mide la resistencia a la ruptura por medio del alargamiento de una probeta de cemento asfáltico. Los asfaltos más dúctiles son más adhesivos (ASTM D113) ⁽⁹⁾.

2.5.6 Punto de Chispa. El punto de chispa (flash point) es la temperatura a la cual el asfalto puede ser calentado, sin peligro a que se inflame en presencia de una

llama. Esta temperatura es mas baja que la necesaria para que el material entre en combustión, por lo tanto, este análisis sirve como prueba de seguridad en la operación de las plantas de mezcla de asfalto en caliente ⁽⁴⁾.

2.6 ENSAYOS PREDICTIVOS DE LAS PROPIEDADES DEL ASFALTO

2.6.1 Ensayo de Envejecimiento Termooxidante en Película Fina o TFOT (Thin Film Oven Test). El ensayo de película delgada o ensayo TFOT (ASTM D1754) es un procedimiento que trata de simular en el laboratorio, las condiciones de un endurecimiento del asfalto durante el mezclado en la planta; se realiza en un horno, donde se calienta a 163° C durante 5 horas, una película de asfalto de 3 mm de espesor, al cabo de las cuales se somete a ensayos de penetración, punto de ablandamiento y viscosidad; se calcula el porcentaje de pérdida de peso, la penetración retenida, el aumento del punto de ablandamiento y el incremento de viscosidad ⁽⁴⁾.

2.6.2 Ensayo de Envejecimiento de Película Fina Rotatoria o RTFOT (Rolling Thin Film Oven Test). Es una variación del ensayo en horno de película delgada y es conocido como ensayo RTFOT; su propósito es el mismo del ensayo TFOT pero su equipo y procedimientos son diferentes y más modernos; el horno empleado para el ensayo RTFOT (ASTM D2872) cuenta con varios recipientes tipo botella donde se colocan las muestras de asfalto para rotación giratoria vertical. El ensayo consiste en colocar cantidades determinadas de asfalto en cada recipiente; luego cada recipiente se instala en un soporte con que cuenta el horno y en el cual se pueden colocar varias muestras al tiempo; el soporte gira alrededor de un eje horizontal a una velocidad determinada mientras el horno se mantiene a 163° C (325° F) y se inyecta aire caliente por el interior de cada recipiente, extrayendo los vapores producidos en el horno durante el ensayo. El tiempo requerido para la prueba es menor que para el ensayo TFOT ⁽⁴⁾.

2.7 PROPIEDADES BÁSICAS DE LOS AGREGADOS

El agregado mineral es cualquier material inerte y duro, con partículas o fragmentos bien gradados para ser utilizado en la mezcla. Es preciso realizar un estudio acerca de la procedencia y características del agregado, con el fin de evaluar su comportamiento en la mezcla y en la estructura del pavimento.

2.7.1 Naturaleza de la roca. Según la naturaleza de la roca los agregados se clasifican en:

- *Rocas Ígneas.* Formadas por solidificación del material fundido; su composición química depende principalmente del magma que se formaron; los magmas se consideran como silicatos y principalmente están compuestos por los siguientes elementos expresados en forma de óxidos: sílice, alúmina, óxido ferroso y férrico, magnesio, cal, soda, potasa y algunas trazas de agua.
- *Rocas Sedimentarias.* Se forman por descomposición de sedimentos orgánicos, precipitados químicos o mezcla de ambos; los minerales más comunes presentes en esta roca son: cuarzo, feldespato, micas y óxido de hierro; también la caolita, algunos carbonatos como calcita, dolomita, siderita y sulfatos como la anhidrita y el yeso.
- *Rocas Metamórficas.* Son las rocas ígneas o sedimentarias que han sufrido cambios o alteraciones fisicoquímicas en su composición mineral o mineralógica y en su textura; la composición química es bastante variada debido a la heterogeneidad de las rocas ígneas y sedimentarias que las originan ⁽⁸⁾.

2.7.2 Granulometría. Es una de las características más importantes de los agregados, afecta el comportamiento de las mezclas y es uno de los requisitos básicos en las especificaciones. En la tabla 3 se muestra la clasificación de los materiales de acuerdo a sus propiedades granulométricas.

Tabla 3. Características y propiedades granulométricas de los agregados	
Tipo de Granulometría	Características
Densamente gradados	Contienen cantidades de todos los tamaños, de grueso a fino, incluyendo llenante, de manera que se obtiene una mezcla con pocos vacíos lo cual reduce su permeabilidad y sensibilidad a los cambios de humedad
Granulometrías abiertas	Materiales que presentan una gradación incompleta, contienen menos llenante que las densas; el número de puntos de contacto entre partículas es menor, a consecuencia de ello soportan mayores esfuerzos
Granulometrías discontinuas	Presentan saltos en su gradación puede notarse con claridad sobre su irregular curva granulométrica
Granulometrías uniformes	Son materiales con gradación deficiente al estar compuestos por agregados de tamaño similar

2.7.2.1 Material llenante. El material llenante o *filler* es la fracción que pasa el tamiz A.S.T.M. N° 200, aún cuando no representa una gran porción en el peso de los agregados, juega un papel muy importante en el comportamiento de la mezcla al incidir en la estabilidad, la rigidez y el contenido de vacíos.

Su función es la de reducir vacíos en la mezcla, requiriéndose así de una cantidad menor de asfalto, siempre y cuando no se exceda la cantidad de *filler*, puesto que el sobrante de este material puede afectar la cobertura de la mezcla. Se debe controlar la presencia de arcilla en el llenante, ya que el contenido de materiales calcáreos puede mejorar la adherencia del asfalto.

2.8 ESPECIFICACIONES Y CALIDAD DE LOS AGREGADOS

Los ensayos que se practican a los agregados para el diseño de una mezcla asfáltica son: granulometría, peso volumétrico suelto y seco (kg/m^3), equivalente de arena (%), gravedad específica del agregado grueso, gravedad específica del agregado fino, absorción (%), límite plástico e índice de plasticidad, resistencia al ataque de sulfato de magnesio o de sodio, desgaste en la máquina de Los

Ángeles (%). Límite plástico e índice de plasticidad. La realización de estos ensayos requiere de gran precisión y exactitud puesto que, los resultados obtenidos se usan en los cálculos para el diseño de las mezclas.

2.8.1 Ensayo de granulometría. Indica la distribución de tamaños de sus partículas y puede presentarse de tres formas: porcentaje acumulativo o total retenido, porcentaje total que pasa y porcentaje retenido en cada tamiz.

2.8.2 Peso volumétrico suelto y seco. Es el peso por unidad de volumen del material previamente seco, considerando los vacíos que quedan entre sus partículas cuando éstas no han estado sujetas a un proceso de acomodo.

El peso volumétrico es función de la granulometría y de la densidad de las partículas del material, siendo mayor para materiales granulares bien gradados y de densidad alta. La principal aplicación de esta prueba es poder hacer la conversión de peso de material a volúmenes y viceversa.

2.8.3 Equivalente de arena. Determina la presencia de finos activos que pueden ser perjudiciales, tanto para el agregado pétreo, como para el material aglutinante dentro de la estructura de un pavimento. Los agregados pueden contener impurezas o sustancias de otra naturaleza, que en cantidades considerables son indeseables para las mezclas asfálticas.

2.8.4 Gravedad específica. Se define como el cociente entre el peso de la unidad de volumen del agregado y el peso de igual volumen de agua a temperatura entre 20 y 25° C. Existen tres tipos de gravedades específicas aceptadas, mostradas en la tabla 4, las cuales dependen de la definición del volumen de la partícula.

Tabla 4. Clasificación de gravedades específicas y sus características	
Tipo de gravedad específica	Características
Gravedad específica aparente en condición saturada y superficialmente seca, s.s.s	Es la relación entre el peso en el aire del agregado saturado y superficialmente seco y el volumen de las partículas incluyendo sus poros naturales saturables y no saturables. Considera el volumen del agregado como el volumen total, incluyendo el volumen de poros capilares que pueden llenarse de agua en 24 horas de absorción.
Gravedad específica aparente seca o <i>bulk</i>	Es la relación entre el peso en el aire del agregado seco y el volumen de las partículas excluyendo sus poros naturales.
Gravedad específica efectiva	Es la relación entre el peso de la masa del material y el volumen que ocupa única y exclusivamente la masa sólida, es decir, se excluyen los poros naturales saturables y no saturables.

Cuando se usa el peso específico aparente s.s.s., se asume que el asfalto será absorbido por todos los poros permeables al agua; cuando se usa el peso específico *bulk* se acepta que el asfalto no será absorbido por los poros permeables al agua. Para una combinación de agregados se toma un promedio ponderado, con respecto a los porcentajes de cada fracción, de las gravedades específicas aparentes de cada una de ellas.

2.8.5 Absorción. La porosidad de un agregado se indica comúnmente por la cantidad de líquido que absorbe cuando se le sumerge en él. Un agregado poroso retendrá asfalto, lo cual hace que una mezcla asfáltica sea seca o menos cohesiva, este tipo de agregado requerirá de una cantidad de asfalto sensiblemente mayor.

2.8.6 Límite plástico e índice de plasticidad. Este ensayo determina en el laboratorio el límite plástico de un suelo (AASHTO T90) y el cálculo del índice de plasticidad si se conoce el límite líquido del mismo suelo (AASHTO T89).

2.8.7 Ensayo de desgaste de los agregados en la máquina de Los Ángeles. Los agregados están sujetos a trituración y desgaste abrasivo durante la

construcción y puesta en servicio de la vía, por lo tanto, deben presentar un grado de resistencia a la trituración, desgaste y desintegración. El ensayo de desgaste de Los Ángeles, procedimiento descrito en la ASHTO T96 (ASTM C131), suele emplearse para determinar la dureza y resistencia al desgaste de los agregados.

2.8.8 Ensayo de estabilidad o resistencia al ataque de sulfato de magnesio o de sodio. La estabilidad de los agregados es la resistencia mecánica interna o resistencia a la desintegración causada por los agentes atmosféricos, proceso de preparación de la mezcla, pavimentación y cargas del tráfico originando un aumento en las fracciones finas del agregado; los efectos atmosféricos más comunes son producidos por cambios climáticos del medio, nieve, granizo, humedad y cambios de temperatura. La estabilidad de los agregados depende de la forma y textura superficial de las partículas; la degradación del agregado en la mezcla está influenciada por el grado de cubrimiento del asfalto.

2.8.9 Adhesividad en bandeja. En este ensayo se determina la adherencia entre un ligante bituminoso y una muestra representativa del agregado grueso que se va a utilizar en un pavimento asfáltico. En la tabla 5 se resumen las especificaciones para los diferentes ensayos a los agregados.

Tabla 5. Normas correspondientes para los ensayos a los agregados			
ENSAYO	NORMA		
	ICONTEC	ASTM	AASHTO
Granulometría	77 - 78	C 117-69	
Gravedad específica y absorción de agregados gruesos y finos	176	C 127	T 85
	237	C 128	T 84
Desgaste en la máquina de Los Ángeles de agregados finos y gruesos	93 - 98	C 535 C 131	T 96
Resistencia de los agregados al ataque con Sulfato de Sodio o de Magnesio	126	C 88 – 63	T 104
Equivalente de arena		D 2419	T 176
Limite plástico e índice de plasticidad	106		T 90
Peso volumétrico suelto y seco	92	C 29 - 69	

2.9 PROPIEDADES DE MEZCLAS ASFÁLTICAS

Las propiedades requeridas para la mezcla asfáltica que se diseña son:

- Contenido de asfalto en la mezcla: garantizar la integración y estabilidad de la mezcla.
- Contenido de vacíos: variable crítica en el diseño de la mezcla, ya que estos proveen el espacio que necesita el cemento asfáltico para expandirse, antes los cambios de temperatura de ambiente.
- Estabilidad: capacidad de un pavimento para resistirse a la deformación ante las cargas del tráfico.
- Durabilidad: habilidad de la mezcla para resistirse a la desintegración por efecto del desgaste y las cargas del tráfico.
- Flexibilidad: capacidad de la mezcla para ajustar su densidad en la carpeta asfáltica sin quebrarse ante las cargas del tráfico.
- Resistencia a la fatiga: habilidad del pavimento para resistir flexiones, ligeras dislocaciones o fracturas causadas por las cargas del tráfico.
- Resistencia al deslizamiento: capacidad de la mezcla compactada para permitir el agarre de los neumáticos a la superficie del pavimento, evitando los deslizamientos especialmente cuando la superficie está húmeda.
- Impermeabilidad: resistencia que presenta la mezcla asfáltica compactada a ser infiltrada por el agua o el aire.
- Maniobrabilidad: facilidad para esparcir y compactar la mezcla en la vía.
- Economía: la calidad de los materiales para producir la mezcla, debe estar en equilibrio con el costo de los mismos ⁽³⁾.

Los procedimientos de diseño de mezclas asfálticas han sido establecidos empíricamente. El diseño de mezcla permite encontrar la fórmula de la mezcla que presente un desempeño satisfactorio y el sistema de control de calidad de la misma. Los objetivos fundamentales del diseño de la mezcla asfáltica son:

- Determinar el contenido de asfalto adecuado para asegurar un pavimento duradero y estable
- Garantizar una granulometría de los agregados que se ajuste a los límites establecidos por especificaciones
- Establecer una mezcla asfáltica de buena calidad y económica ⁽¹¹⁾.

El método Marshall para el diseño de mezclas asfálticas para pavimentos es el más común, ya que se viene utilizando desde 1943 por las agencias de vías de todo el mundo; este procedimiento está descrito en la norma AASHTO T245 (ASTM 1559) y permite:

- Determinar el contenido de asfalto óptimo para cada tipo de mezcla
- Precisar los niveles de estabilidad, flujo, propiedades volumétricas, sensibilidad a la humedad, entre otros criterios para un agregado definido
- Establecer la densidad, gravedad específica y contenido de vacíos óptimos de la mezcla compactada
- Determinar la fórmula óptima y especificaciones para el mezclado final en la planta ⁽⁴⁾.

2.10 CONCEPTOS GENERALES DE MATERIALES MAGNÉTICOS Y DEFINICIÓN DE PROPIEDADES DE LOS IMANES DE NEODIMIO UTILIZADOS EN LA LLANTA MAGNÉTICA

Es necesario conocer acerca de otros tipos de imanes existentes para establecer diferencias con las características que presentan los imanes de neodimio, por tanto se especifican propiedades a evaluar para estos imanes (Ver Anexo A).

2.10.1 Materiales magnéticos. Teniendo en cuenta el tipo de magnetización los materiales se pueden clasificar como diamagnéticos, paramagnéticos y

ferromagnéticos. Cabe decir que la descripción completa del comportamiento de los momentos atómicos de estos materiales requiere un tratamiento de mecánica cuántica.

Existen varios tipos de ferromagnetismo dependiendo en la forma que los momentos atómicos se alinean. Ciertas direcciones o ejes dentro de la red cristalina de un sólido ferromagnético emergen como ejes preferenciales donde reside la magnetización. Esta anisotropía magnética es responsable por el hecho de que la magnetización remanente sea estable mientras no haya energía externa aplicada al material. Existen dos fenómenos relacionados con el ferromagnetismo: el antiferromagnetismo y el ferrimagnetismo.

2.10.2 Qué es un imán. Un imán es un material capaz de producir un campo magnético exterior y atraer el hierro (también puede atraer al cobalto y al níquel). Los imanes que manifiestan sus propiedades de forma permanente pueden ser naturales, como la magnetita (Fe_3O_4) o artificiales, obtenidos a partir de aleaciones de diferentes metales. En un imán la capacidad de atracción es mayor en sus extremos o polos. Estos polos se denominan norte y sur, debido a que tienden a orientarse según los polos geográficos de la Tierra, que es un gigantesco imán natural.

La región del espacio donde se pone de manifiesto la acción de un imán se llama campo magnético. Este campo se representa mediante líneas de fuerza, que son unas líneas imaginarias, cerradas, que van del polo norte al polo sur, por fuera del imán y en sentido contrario en el interior de éste.

2.10.3 Procedencia del magnetismo. Desde hace tiempo es conocido que una corriente eléctrica genera un campo magnético a su alrededor. En el interior de la materia existen pequeñas corrientes cerradas debidas al movimiento de los electrones que contienen los átomos, cada una de ellas origina un microscópico imán o dipolo. Cuando estos pequeños imanes están orientados en todas

direcciones sus efectos se anulan mutuamente y el material no presenta propiedades magnéticas; en cambio si todos los imanes se alinean actúan como un único imán y en ese caso decimos que la sustancia se ha magnetizado. Para que un imán pierda sus propiedades debe llegar a la llamada "temperatura de Curie" que es diferente para cada composición. Por ejemplo para un imán cerámico es de 450° C, para uno de cobalto 800° C, etc.

2.10.4 Tipos de imanes permanentes. Además de la magnetita o imán natural existen diferentes tipos de imanes fabricados con diferentes aleaciones:

- Imanes cerámicos o ferritas.
- Imanes de alnico.
- Imanes de tierras raras.
- Imanes flexibles.
- Otros.

2.10.4.1 Imanes cerámicos. Se llaman así por sus propiedades físicas. Su apariencia es lisa y de color gris oscuro, de aspecto parecido a la porcelana. Se les puede dar cualquier forma, por eso es uno de los imanes más usados (altavoces, aros para auriculares, cilindros para pegar en figuras que se adhieren a las neveras, etc.). Son muy frágiles, pueden romperse si se caen o se acercan a otro imán sin el debido cuidado. Se fabrican a partir de partículas muy finas de material ferromagnético (óxidos de hierro) que se transforman en un conglomerado por medio de tratamientos térmicos a presión elevada, sin sobrepasar la temperatura de fusión. Otro tipo de imanes cerámicos, conocidos como ferritas, están fabricados con una mezcla de bario y estroncio. Son resistentes a muchas sustancias químicas (disolventes y ácidos) y pueden utilizarse a temperaturas comprendidas entre 40° C y 260° C.

2.10.4.2 Imanes de alnico. Se llaman así porque en su composición llevan los elementos aluminio, níquel y cobalto. Se fabrican por fusión de un 8 % de

aluminio, un 14 % de níquel, un 24 % de cobalto, un 51 % de hierro y un 3 % de cobre. Son los que presentan mejor comportamiento a temperaturas elevadas. Tienen la ventaja de poseer buen precio, aunque no tienen mucha fuerza.

2.10.4.3 Imanes de tierras raras. Son imanes pequeños, de apariencia metálica, con una fuerza de 6 a 10 veces superior a los materiales magnéticos tradicionales. Los imanes de boro / neodimio están formados por hierro, neodimio y boro; tienen alta resistencia a la desmagnetización. Son lo bastante fuertes como para magnetizar y desmagnetizar algunos imanes de alnico y flexibles. Se oxidan fácilmente, por eso van recubiertos con un baño de cinc, níquel o un barniz epoxídico y son bastante frágiles. Los imanes de samario / cobalto no presentan problemas de oxidación pero tienen el inconveniente de ser muy caros. Están siendo sustituidos por los de boro - neodimio. Es importante manejar estos imanes con cuidado para evitar daños corporales y daño a los imanes (los dedos se pueden pellizcar seriamente).

2.10.4.4 Imanes flexibles. Se fabrican por aglomeración de partículas magnéticas (hierro y estroncio) en un elastómero (caucho, PVC, etc.). Su principal característica es la flexibilidad, presentan forma de rollos o planchas con posibilidad de una cara adhesiva. Se utilizan en publicidad, cierres para nevera, llaves codificadas, etc. Consisten en una serie de bandas estrechas que alternan los polos norte y sur. Justo en la superficie su campo magnético es intenso pero se anula a una distancia muy pequeña, dependiendo de la anchura de las bandas. Se hacen así para eliminar problemas, como por ejemplo que se borre la banda magnética de una tarjeta de crédito (se anulan con el grosor del cuero de una cartera).

2.10.4.5 Otros imanes. Los imanes de platino / cobalto son muy buenos y se utilizan en relojería, en dispositivos aeroespaciales y en odontología para mejorar la retención de prótesis completas. Son muy caros. Otras aleaciones utilizadas son cobre/níquel/cobalto y hierro/cobalto/vanadio.

2.10.5 Imanes de neodimio. Los imanes en tierras raras (Samarium Cobalto, Neodimio-Hierro-Boro) representan lo más avanzado en tecnología que el mercado pueda ofrecer. Los imanes de Neodimio están compuestos por Tierras Raras, aleación Ne, Fe, B. son imanes con una gran tendencia a la corrosión por lo que necesitan un recubrimiento de protección, Níquel - Plata ó Zinc - Plata, barniz epoxídico o de otro tipo habitualmente. El Neodimio desarrolla una potencia 7/10 veces superior a los materiales magnéticos tradicionales. Por ejemplo la base magnética tipo Soit Neo 60x60x24 mm eleva 230 kg. de hierro o bien un contacto Reed se cierra desde una distancia incluso 2/3 veces superior son, por tanto, soluciones técnicas posibles que hace unos años eran totalmente impensables.

2.10.5.1 Características magnéticas y físicas de los imanes de neodimio

Tabla 6. Características Magnéticas Y Físicas De Los Imanes De Neodimio

ESPECIFICACIÓN		HG 27SH	HG 30SH	HG 33SH	HG 35SH
Remanence	(kGs)	10.0-10.8	10.8-11.2	11.3-11.7	11.7-12.1
Br	(T)	1.00-1.08	1.08-1.12	1.13-1.17	1.17-1.21
Coercive Force	(KOe)	9.60-10.5	10.2-10.7	10.5-11.2	10.8-11.5
bHc	(kA/m)	764-836	820-850	840-890	850-895
Intrinsic Coercive Force	(KOe)	>21	>21	>21	>21
iHc	(kA/m)	>1670	>1670	>1670	>1670
Max. Energy Product	(MGOe)	25-27	28-30	31-33	33-35
(BH)max	(kJ/m ³)	200-216	223-240	248-263	263-280
Max. Operanting Temp.	(C)	150	150	150	150
Max Curie Temperature	(C)	350	350	350	350
Temp. Coefficient	(%/C)	-0.07	-0.07	-0.07	-0.07
Density	(g/cm ³)	7.4	7.4	7.4	7.4
Hardness	(Hv)	500-600	500-600	500-600	500-600

Tomado de www.soloimanes.com

En los imanes a cada uno de los polos le corresponde una forma de energía eléctrica distinta. El polo norte significa detención, freno, y el polo sur avance, acelera, da energía. En el polo sur de un imán hay un remolino de electrones que gira en el sentido de las agujas del reloj, con una carga positiva. En el polo norte

de un imán tenemos un remolino de electrones girando en sentido contrario a las agujas del reloj, con una carga negativa.

2.10.5.2 Características magnéticas y físicas típicas de un imán de neodimio

Tabla 7. Características Magnéticas Y Físicas De Un Imán De Neodimio										
Anisotropía Ánico	Densidad		Energía Máxima Producida BH(máx.)	Inducción Residual Br	Fuerza Coercitiva Hc	Fuerza coercitiva Intrínseca Hci	Temperatura máxima de operación		Temperatura Curie	
	Lbs/in ³	g/cm ³	MGO	Gauss	Oersteds	Oersteds	F°	C°	F°	C°
Neodymium27	0.267	7.4	27.0	10800	9300	11000	176	80	536	280
Neodymium27H	0.267	7.4	27.0	10800	9800	17000	212	100	572	300
Neodymium30	0.267	7.4	30.0	11000	10000	18000	176	80	536	280
Neodymium30H	0.267	7.4	30.0	11000	10500	17000	212	100	572	300
Neodymium35	0.267	7.4	35.0	12300	10500	12000	176	80	536	280

Tomado de www.soloimanes.com

2.10.6 Pruebas magnéticas. Estas pruebas son necesarias para determinar las propiedades y características que presentan los imanes de neodimio, las cuales son inducción remanente y fuerza coercitiva.

2.10.6.1 Inducción remanente. El magnetismo es producido por el movimiento de rotación de los electrones (espín) en un átomo, lo cual genera un momento magnético; la suma vectorial de estos momentos determina el momento magnético total, el cual es alto para los materiales que se comportan como imanes permanentes. La inducción remanente o remanencia, es la fuerza de imantación que está presente (debido al momento magnético total) o que permanece en un material que ha sido imantado hasta la saturación en un circuito cerrado.

2.10.6.2 Fuerza coercitiva. La fuerza coercitiva es la fuerza de desimanación correspondiente a una inducción magnética nula.

3. DESARROLLO EXPERIMENTAL

En el mundo existen asfaltos y agregados de diferentes características que dependen esencialmente de su origen y procesamiento de extracción, por lo tanto en este capítulo se quiere evaluar cada una de estas propiedades con el fin de garantizar el alcance de los objetivos que se han propuesto para este trabajo. La metodología para la realización de este proyecto comprende las siguientes fases:

- Revisión bibliográfica
- Identificación y evaluación de las materias primas a utilizar
- Elaboración de la mezcla asfáltica en caliente aplicando el método de Bruce Marshall
- Preparación y evaluación del pavimento ferromagnético
- Diseño de la llanta magnética
- Evaluación de la adherencia entre las superficies PF-LLM
- Realización de un estudio económico de la mezcla asfáltica modificada y la convencional preparada en caliente
- Análisis de resultados.

3.1 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

Se realiza mediante consulta de libros, tesis de grado, artículos publicados en revistas especializadas en la industria del asfalto y materiales magnéticos, memorias de congresos y páginas de Internet. Mediante esta consulta se logra obtener la siguiente información.

- Conceptos básicos del proceso de preparación de mezclas asfálticas en caliente

- Normas y estándares actuales que las materias primas deben cumplir para obtener un producto final de gran calidad
- Conocimientos acerca de las propiedades magnéticas que poseen los imanes de Neodimio obtenidos a partir del reciclaje de disco duro

3.2 IDENTIFICACIÓN Y EVALUACIÓN DE LAS MATERIAS PRIMAS A UTILIZAR

Las materias primas empleadas fueron el cemento asfáltico y el agregado pétreo llamado comúnmente “Roca Imán” que presentaba un alto contenido de hierro, magnetita y otros elementos en menor proporción (Ver Anexo E). La combinación de las características individuales de cada uno de estos materiales disponibles con las características requeridas para la mezcla asfáltica es posible producir el tipo de mezcla que cumpla con las especificaciones apropiadas y exigidas para la construcción de la vía. La construcción de pavimentos en Colombia debe cumplir con las normas de ensayo para los materiales empleados establecidos en su orden por: Instituto Nacional de Vías (INV), AASHTO (American Association of State Highway Transportation Officials), ASTM, NLT, IRAM (Instituto Argentino de Racionalización de Materiales), MELC (Método de Ensayo de Laboratorio Central) e ICONTEC.

3.2.1 Propiedades del asfalto. El asfalto empleado en la preparación de las mezclas asfálticas en caliente, se denomina comúnmente “cemento asfáltico”, para este trabajo de grado se adquirió por medio de MPI (Manufacturas y Procesos Industriales Ltda.), cuya especificación del asfalto base es 70/90. Los cementos asfálticos se clasifican con base en su consistencia, mediante los ensayos de penetración y viscosidad. Las propiedades que se evalúan a los asfaltos colombianos para clasificarlos son peso específico, penetración, punto de ablandamiento, viscosidad, ductilidad y punto de chispa. Los asfaltos se clasifican por el Instituto del Asfalto (Asphalt Institute) en AC-70/90 y AC-60/80 según el

grado de penetración. El cemento asfáltico a emplear en los riegos de liga y en las mezclas asfálticas elaboradas en caliente será de penetración 60-70 u 80-100, según las características climáticas de la región y las condiciones de operación de la vía (Artículo 400, Ver Anexo B) ⁽¹⁶⁾, tal como lo indica la tabla 8.

Transito de diseño 10 ⁶ ejes de 80 kN	Temperatura media anual de la región		
	24 °C+	15-24°C	15°C-
5+	60-70	60-70	80-100
0.5 a 5	60-70	60-70 u 80-100	80-100
0.5 -	60-70	60-70 u 80-100	80-100

Los requisitos de calidad del cemento asfáltico son los que establece la tabla 9.

CARACTERISTICA	NORMA DE ENSAYO INV	60-70		80-100	
		MIN	MAX	MIN	MAX
Penetración (25°C, 100 g, 5 s) 0.1mm	E-706	60	70	80	100
Índice de penetración	E-724	-1	+1	-1	+1
Perdida por calentamiento en película delgada (163°C, 5 h), %	E-721	-	1.0	-	1.0
Ductilidad (25° C, 5 cm/mín) cm.	E-702	100	-	100	-
Penetración del residuo luego de la pérdida por calentamiento, en % de la penetración original %		75	-	75	-
Solubilidad en tricloroetileno, %	E-713	99	-	99	-
Contenido de agua, %	E-704	-	0.2	-	0.2

El cemento asfáltico empleado en Santander, proviene de la refinería de Barrancabermeja (Complejo Industrial de Barrancabermeja, ECOPEPETROL CIB) que es un asfalto resultante de la mezcla de fondos de vacío con distintas cantidades de gasóleo para ajustar sus características físicas las cuales se especifican en la tabla 10.

Tabla 10. Características fisicoquímicas del asfalto del CIB ⁽⁴³⁾		
Ensayo	ASTM	Valor promedio
Peso específico 25° C / 25° C	D 70	0.998
Penetración 100 g, 5 s, 25° C	D 5	76 mm /10
Punto de chispa	D 92	320° C
Ductilidad a 25° C	D113	+100 cm
Punto de ablandamiento (anillo y bola)	D 36	47.7° C
Viscosidad Saybolt Furol a 135°C	D 88	342 cSt
Viscosidad absoluta a 60° C	----	1810 poises
Equivalente heptano-xileno	----	5-10

A continuación se describe las etapas que incluyen el proceso de caracterización de las propiedades del asfalto:

3.2.1.1 Peso Específico. Se prepara de la muestra de asfalto y se calienta hasta alcanzar fluidez a menos de 111° C, se vierte una cantidad de muestra dentro de un picnómetro hasta tres cuartos de su capacidad, se deja enfriar para luego ser pesado con el tapón y se coloca en un baño maría; posteriormente se llena el picnómetro con agua destilada y se tapa retornándolo al baño. Se retira del baño se seca y se pesa.

$$Peso\ específico = \frac{C - A}{(B - A) - (D - C)}$$

Donde:

A = Peso del picnómetro (incluido el tapón)

B = Peso del picnómetro con agua

C = Peso del picnómetro parcialmente lleno con asfalto

D = Peso del picnómetro con asfalto y agua

3.2.1.2 Penetración. (ASTM D5) se utiliza para medir esta propiedad y para clasificar los cementos asfálticos en diferentes clases; este ensayo consiste en calentar una muestra de asfalto a 25° C (o a otra temperatura definida con anterioridad) en un baño de agua termostáticamente controlado, luego se hace penetrar en la superficie de la muestra una aguja normalizada de 100 g, durante

un tiempo de 5 segundos; la penetración se mide como la distancia en décimas de milímetro que la aguja penetra en el cemento asfáltico ⁽⁶⁾.

3.2.1.3 Punto de Ablandamiento. La prueba de anillo y bola es el método más común para determinar esta propiedad. El ensayo consiste en calentar a velocidad constante, en baño de maría, un anillo de latón de dimensiones establecidas, relleno con asfalto previamente fundido y enfriado durante 4 horas ubicado a una altura determinada, y sobre el cual se coloca una esfera; la temperatura a la cual la esfera, envuelta por el asfalto, toca el fondo del recipiente se denomina punto de ablandamiento de anillo y bola.

3.2.1.4 Viscosidad Cinemática. Los asfaltos presentan un amplio rango de viscosidad, siendo necesario disponer de diferentes tipos de viscosímetros; el fundamento de estos ensayos es medir el tiempo necesario para que un volumen determinado de material fluya bajo ciertas condiciones rígidamente controladas como en el caso de la viscosidad capilar ⁽⁴⁾.

3.2.1.5 Ductilidad. esta propiedad se mide en un ductilímetro, que mide la resistencia a la ruptura por medio del alargamiento de una probeta de cemento asfáltico, estirada en sus extremos a una velocidad constante (5 cm/min) y a una determinada temperatura (25° C).

3.2.1.6 Punto de Chispa. Este ensayo se realiza en la copa abierta de Cleveland, y consiste en calentar a una velocidad constante, un volumen determinado de asfalto depositado en una copa de bronce, pasando sobre la superficie del asfalto una llama auxiliar a intervalos de tiempos definidos, según la norma ASTM D92, hasta cuando se liberen suficientes vapores para producir chispas o destellos instantáneos al paso de la llama ⁽⁴⁾.

3.2.2 Propiedades del agregado. Este material fue sometido a una serie de pruebas de laboratorio que se describe a continuación con el fin de evaluar sus propiedades, así como su correspondiente equivalencia con las normas establecidas por el INVIAS para un agregado usado en capas de rodadura. Los agregados pétreos y el llenante mineral para la elaboración de mezclas asfálticas en caliente (concreto asfáltico) deberán satisfacer los requisitos de calidad impuestos para ello por el aparte 400.2.1 del artículo 400 del INV⁽¹⁰⁾ (Ver Anexo B). El agregado deberá satisfacer los requisitos de calidad indicados en la tabla 11.

Tabla 11. Requisitos de los agregados pétreos para mezclas asfálticas en caliente				
Ensayo	Norma INV	Agregado grueso	Agregado fino	Gradación combinada
Granulometría	E-123			
Partículas fraccionadas mecánicamente	E-227	75% mín.		
Desgaste de los Angeles	E-219	Rodadura: 30% máx.		
Pérdida en ensayo de solidéz	Na ₂ SO ₄	E-220	12% máx.	12% máx.
	Mg ₂ SO ₄	E-220	18% máx.	18% máx.
Adhesividad	Riedel Webber	E-774		
	Stripping	E-737		
	Bandeja	E-740		
	Inmersión-compresión	E-738		75% mín.
Coeficiente pulimento acelerado	E-232	0.45 mín.		
Índice de plasticidad	E-232			N.P
Contenido de agregado fino			3% mín. y 8% máx.	
Caras fracturadas				75% mín.
Equivalente de arena	E-133			50% mín.

3.2.2.1 Ensayo de granulometría. La granulometría para los agregados varía con cada tipo de mezcla asfáltica y para prepararlas se utiliza el gráfico de especificaciones límites, según la norma ASTM D 3515 (Figura 1); en Colombia se utiliza el artículo 450 para mezclas densas en caliente (Ver Anexo C). El gráfico de granulometrías límites para agregado se caracteriza por presentar una zona enmarcada por los límites de granulometrías máximas y mínima permisibles, que se han determinado mediante experimentos y análisis teórico, dentro de los cuales la granulometría de un agregado puede considerarse satisfactoria.

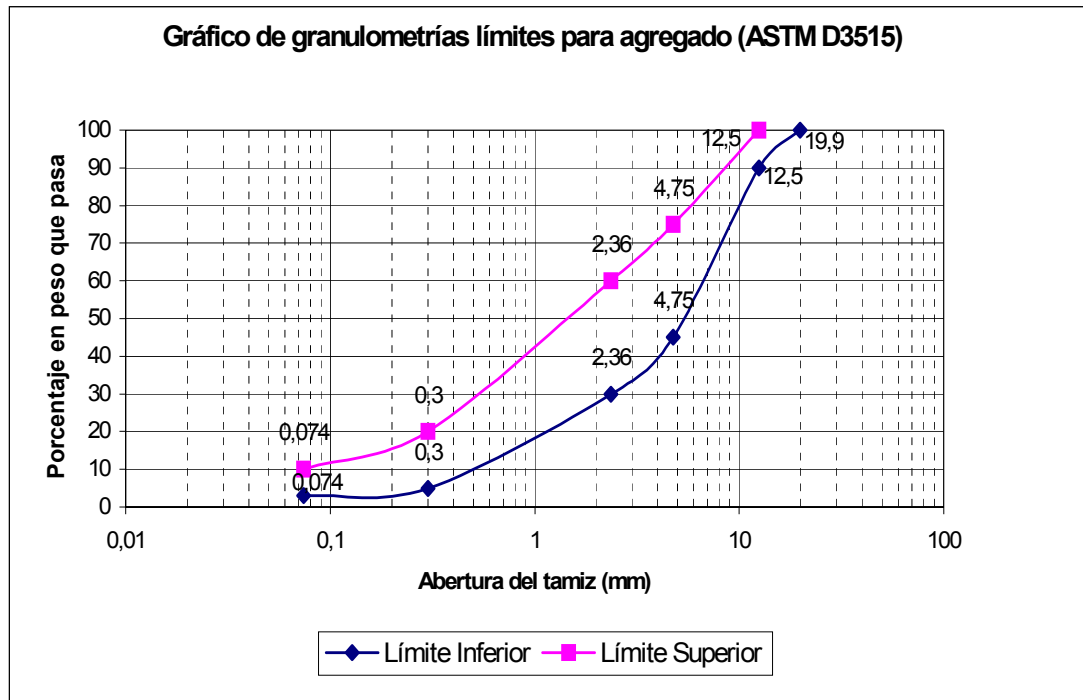


Figura 1. Gráfico de granulometrías límites para agregado (ASTM D3515)

Se hace pasar el material a través de una serie de tamices de abertura sucesivamente decreciente; gráficamente sólo pueden representarse los porcentajes totales retenidos o que pasan contra el diámetro del tamiz en un gráfico semilogarítmico. El sistema más empleado para designar el tamaño de los tamices es la serie U.S. Estándar; estos tamices se clasifican así:

- Mayor tamaño. 2 ½, 2, 1 ½, ¾, 5/8, ½ y 3/8 pulgadas de diámetro
- Abertura menor. Tamices No. 4, 10, 20, 40, 80, 200.
- Mínima abertura. Tamices No. 8, 16, 50, 100, 200. ⁽⁴⁾

El conjunto de agregado grueso, agregado fino, y llenante mineral deberá ajustarse a alguna de las gradaciones mostradas en la tabla 12.

Tabla 12. Gradaciones de agregados pétreos y llenante mineral para diferentes tipos de mezcla asfáltica ⁽¹⁰⁾				
TAMIZ		PORCENTAJE QUE PASA		
Normal	Alternativo	MDC-1	MDC-2	MDC-3
25.0 mm	1"	100	-	-
19.0 mm	3/4"	80-100	100	-
12.5 mm	1/2"	67-85	80-100	-
9.5 mm	3/8"	60-77	70-88	100
4.75 mm	No.4	43-54	51-68	65-87
2.00 mm	No.10	29-45	38-52	43-61
425 µm	No.40	14-25	17-28	16-29
180 µm	No.80	8-17	8-17	9-19
75 µm	No.200	4-8	4-8	5-10

La gradación MDC-1 se empleará en la construcción de bases asfálticas, MDC-3 en rodadura para capas menores de 3 cm y MDC-2 para espesores superiores. Por tanto se utilizará la gradación MDC-3 que cumple con el objetivo del trabajo de grado.

3.2.2.2 Gravedad específica. La gravedad específica se halla por separado, para la fracción gruesa (retenido en el tamiz A.S.T.M. N° 4) y para el agregado fino (pasa el tamiz A.S.T.M. N° 4).

3.2.2.3 Límite plástico e índice de plasticidad. Se denomina límite plástico a la humedad más baja a la que pueden formarse cilindros de suelo de unos tres milímetros (1/8") de diámetro, rodando dicho suelo entre la palma de la mano y una superficie lisa, sin que dichos cilindros se desmoronen. El límite plástico se expresa como porcentaje de humedad, con una cifra decimal.

3.2.2.4 Ensayo de desgaste de los agregados en la máquina de Los Ángeles. El ensayo busca determinar la pérdida de peso del agregado al tratarlo en la máquina de Los Ángeles ⁽⁹⁾; una pérdida de peso menor al 20% corresponde a un agregado duro y mayor al 50% representa un agregado blando. Los agregados más duros se utilizan en capas superficiales de la carpeta asfáltica, mientras que los menos duros se aplican en capas inferiores. Un 40% de pérdida en peso, en la

máquina de Los Ángeles, se acepta para los agregados de rodadura y un 50% para otros tipos de mezcla asfáltica ⁽¹²⁾.

3.2.2.5 Adhesividad en bandeja. Se toman 50 partículas representativas del agregado grueso y se colocan sobre 100 ml de asfalto calentado previamente a 125° C y vertido en una bandeja para formar una película de un espesor de 1.5 mm. La bandeja se deja enfriar por 30 minutos y se coloca en un horno a 60° C por 24 horas. Seguidamente se agrega agua a la bandeja hasta cubrir las piedras dejándola a temperatura ambiente por cuatro días para luego quitar las partículas una por una y evaluar a ojo el porcentaje de la superficie de cada partícula que aún tiene asfalto pegado.

3.2.2.6 Ensayo de estabilidad o resistencia al ataque de sulfato de magnesio o de sodio. El ensayo de estabilidad, procedimiento descrito en la AASHTO T104, somete una muestra de agregado a la acción del sulfato de sodio en solución, cinco veces, para medir la resistencia mecánica interna con base a la pérdida de peso en la muestra; un agregado que presente una pérdida de peso menor o igual al 12% en este ensayo es considerado aceptable para construcción de vías ⁽⁷⁾.

3.2.2.7 Equivalente de arena. Para determinar el equivalente de arena se puede realizar un cribado por vía húmeda, procedimiento descrito en la AASHTO T11 (ASTM C117) o el ensayo denominado equivalente de arena descrito en la AASHTO T176 (ASTM D2419). Este es un método para determinar el porcentaje de impurezas en una porción de agregado que pase el tamiz número 4.

3.3 ELABORACIÓN DE LA MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE APLICANDO EL MÉTODO DE BRUCE MARSHALL

El procedimiento tradicional de Marshall consiste en preparar tres briquetas manteniendo constante el peso del agregado y variando el contenido de asfalto en

cada una de ellas; las briquetas se preparan mediante el procedimiento de calentamiento, mezclado y compactación establecido en el método Marshall; luego las briquetas se someten a una serie de esfuerzos o golpes que tratan de simular las cargas del tráfico; el número de golpes depende del tipo de tráfico para el cual se diseña la mezcla. El procedimiento incluye un análisis de resultados para seleccionar la fórmula de la mezcla asfáltica que más se ajuste a las especificaciones requeridas ⁽¹¹⁾. El objetivo del diseño de una mezcla asfáltica es determinar la proporción adecuada de cemento asfáltico en la mezcla, que asegure que está presente:

- Suficiente estabilidad como para satisfacer las exigencias del servicio sin desplazamiento o distorsiones.
- Suficiente asfalto para asegurar la obtención de un pavimento durable que resulte del recubrimiento completo de las partículas de agregado pétreo, impermeabilizando o ligando las mismas entre sí, bajo una compactación adecuada.
- Suficiente trabajabilidad para permitir una eficiente colocación de la mezcla con que se pavimentará, sin que se produzca segregación.
- Suficientes vacíos con aire en la mezcla compactada, para proveer una reserva de espacio que impida exudaciones y pérdidas de estabilidad al producirse una pequeña compactación adicional bajo las cargas del tránsito, como los posibles aumentos de volumen del asfalto a altas temperaturas.

El método emplea muestras normales para ensayos de 2 ½ pulgadas de altura por 4 de diámetro, las cuales se preparan siguiendo un procedimiento especificado para calentar, mezclar y compactar las mezclas de agregados y cemento asfáltico.

Las dos características principales del ensayo son un análisis de DENSIDAD-VACÍOS y una prueba de ESTABILIDAD-FLUJO. La estabilidad es la máxima resistencia a la carga que la muestra soporta a 60° C cuando se ensaya, mientras

que el flujo es la deformación total que se produce en la muestra, desde la carga cero hasta la carga máxima.

3.3.1 Procedimiento de ensayo. A continuación se describirán las etapas a seguir para la elaboración de las probetas y su posterior caracterización.

3.3.1.1 Número de muestras. Deberán prepararse tres muestras para cada combinación de agregados y contenido de cemento asfáltico elegido. Tanto los agregados como el asfalto deberán cumplir individualmente las especificaciones correspondientes a ellos. Generalmente se emplean para el diseño cinco porcentajes diferentes de cemento asfáltico, por lo que se deduce que es necesario elaborar, cuando menos 15 muestras para ensayo. Se acostumbra a comenzar desde 4.5 o 5% de cemento asfáltico con respecto al peso de la mezcla total, elaborándose los juegos de probetas con incrementos en dicho porcentaje de 0.5%.

3.3.1.2 Preparación de los agregados. En primer término, se secan a 110° C hasta peso constante. Como casi nunca es posible obtener un agregado que cumpla con los requisitos granulométricos exigidos, deberá hacerse una combinación de los disponibles. Generalmente, en la planta asfáltica se dispone de un material tipo grava (retenido en el tamiz No. 4) de una arena gruesa (pasa No. 4 y retiene No. 10 o No. 40), de una arena fina (pasa No.10 o No. 40 y retiene No. 200) y un llenante mineral (pasa No. 200), con los cuales se trata de obtener la granulometría especificada, por lo que parece adecuado separar en el laboratorio el material en fracciones similares, determinando la proporción en que debe intervenir cada una de ellas, para obtener la gradación requerida. Para la elaboración de la mezcla se trabaja con los materiales disponibles correspondientes a la gradación MDC-3 (requerida para capa de rodadura) para la cual se dispone de materiales cuyas gradaciones presentan tamaños de grava, arena gruesa, arena fina y llenante mineral, cuya combinación debe satisfacer a la gradación requerida. Debe determinarse la proporción en que deben mezclarse los

cuatro materiales disponibles con el fin de obtener uno que satisfaga la gradación MDC-3. Para ello se tomará en cuenta la tabla 13 de donde se tomará la base para obtener la gradación deseada, la cual es la que va por el centro de la norma.

Tamiz		% que pasa	
Normal (mm)	Alternativo	Gradación MDC-3	Gradación deseada
9.5	3/8"	100	100
4.75	No. 4	65-87	76
2	No. 10	43-61	52
425 µm	No. 40	16-29	22.5
180 µm	No. 80	9-19	14
75 µm	No. 200	5-10	7.5

Los porcentajes usados en la elaboración de las probetas se determinan de la siguiente manera:

$$\% \text{ grava} = 100 - \% \text{ pasa tamiz No.4 en la gradación deseada} \quad (1)$$

$$\% \text{ arena gruesa} = \begin{cases} \% \text{ pasa tamiz No.4} - \% \text{ pasa tamiz No.10} & (2) \\ \% \text{ pasa tamiz No.10} - \% \text{ pasa tamiz No.40} & (3) \end{cases}$$

$$\% \text{ arena fina} = \begin{cases} \% \text{ pasa tamiz No.40} - \% \text{ pasa tamiz No.80} & (4) \\ \% \text{ pasa tamiz No.80} - \% \text{ pasa tamiz No.200} & (5) \end{cases}$$

$$\% \text{ llenante} = \% \text{ pasa tamiz No.200 en la gradación deseada} \quad (6)$$

Estas ecuaciones se aplicarán para obtener los porcentajes de los materiales disponibles, los cuales se suman y se compara con la norma de diseño (gradación MDC-3) para verificar si la mezcla en tales proporciones cumple con las especificaciones. En caso de no ser así, se deberá hacer los ajustes a que haya lugar, debiéndose buscar, inclusive, otros materiales hasta que la mezcla satisfaga la especificación.

3.3.1.3 Determinación de las temperaturas de mezcla y compactación. La temperatura a la cual debe calentarse el cemento asfáltico para producir viscosidades Saybolt-Furol de 85 ± 10 y 140 ± 15 segundos, debe establecerse como la de mezcla con los agregados y compactación respectivamente. Debe evitarse un calentamiento excesivo del cemento asfáltico, el cual trae como

consecuencia su endurecimiento. La temperatura de los agregados deberá superar en 20° C a la del cemento asfáltico durante la mezcla. Si es mayor, puede perjudicar al asfalto durante el mezclado, mientras que si es muy baja, la envoltura de los agregados por el asfalto y la extensión de la mezcla serán difíciles.

3.3.1.4 Preparación de las mezclas. Generalmente la experiencia ha demostrado que las mezcla de agregados y cemento asfáltico de 1200 gramos de peso permiten obtener muestras compactadas de 2.5 ± 0.01 pulgadas de altura. Por lo tanto para elaborar cada probeta se mezclarán las cantidades necesarias de cada fracción para alcanzar dicho peso. En el ensayo se seleccionarán porcentajes de cemento asfáltico de 4.5, 5, 5.5, 6 y 6.5 con respecto al peso de la mezcla total. Para las mezclas preparadas, por ejemplo, que corresponde a un 5% de cemento asfáltico, las cantidades se calculan de la siguiente manera: Como en los 1200 gramos habrá un 5% de cemento asfáltico, es obvio que el 95% restante tendrán que componerlo los agregados minerales y por lo tanto, de cada fracción de ellos se empleará un 95%.

$$\%grava \text{ con respecto a la mezcla total} = \% grava \times 0.95 \quad (7)$$

$$\%arena \text{ gruesa con respecto a la mezcla total} = \% arena \text{ gruesa} \times 0.95 \quad (8)$$

$$\%arena \text{ fina con respecto a la mezcla total} = \% arena \text{ fina} \times 0.95 \quad (9)$$

$$\%llenante \text{ con respecto a la mezcla total} = \% llenante \times 0.95 \quad (10)$$

$$\%cemento \text{ asfáltico con respecto a la mezcla total} = 5.0 \quad (11)$$

Como la cochada ha de pesar 1200 gramos la cantidad por incluir en ella, de cada uno de los materiales disponibles se determina aplicando los anteriores porcentajes así:

$$Material = \frac{1200 \times \% material \text{ con respecto a la mezcla total}}{100} \quad (12)$$

Por tanto, en una bandeja de mezcla deberá colocarse la cantidad indicada de cada fracción de agregado a la temperatura especificada, mezclándose éstas

rápidamente y abriéndose un cráter dentro del cual se añade la cantidad calculada de cemento asfáltico, también a la temperatura especificada. Se hace la mezcla entre agregados y asfalto con un palustre o mezclador mecánico, tan rápido como sea posible, con el fin de evitar disminuciones perjudiciales de temperatura. Este procedimiento se repite para las otras dos muestras que se van a preparar con el mismo porcentaje de cemento asfáltico. Para los otros porcentajes elegidos, se procede de manera similar, calculando las cantidades de cada fracción de agregados y el asfalto que corresponde a cada caso.

3.3.1.5 Compactación de las mezclas.

- a) Antes de colocar la cochada dentro del molde, tanto éste como el pistón de compactación deben limpiarse con gasolina o kerosene y colocarse en una estufa entre 100 y 150° C por unos 30 minutos.
- b) Al retirarlo de la estufa, se arma el molde, se le coloca su base y collar de extensión y se introduce un papel de filtro en el fondo, colocando luego de manera rápida dentro de él, la cochada de 1200 gramos, el cual debe emparejarse con una espátula o palustre caliente, aplicando 15 golpes alrededor del perímetro y 10 en su interior y nivelando finalmente la superficie del material. La temperatura en este instante debe encontrarse dentro de los límites mencionados en el numeral 3.3.1.3 o de lo contrario la mezcla debe descartarse, pues no se permite su recalentamiento.
- c) A continuación, se sujeta el molde con el aro de ajuste que tiene para tal efecto, se coloca en el pedestal de compactación, se apoya sobre la mezcla la zapata del pisón y se aplican 50 golpes correspondiente a una simulación de tránsito medio, a caída libre y cuidando que el vástago del pisón se mantenga siempre vertical
- d) Terminada la aplicación del número de golpes requerido, se retira el molde del dispositivo de ajuste, se le quita la placa de base y el collar de extensión, se

invierte el molde y se vuelve a montar el dispositivo, aplicando el mismo número de golpes a la que ahora es la cara superior de la muestra.

- e) Se retira el molde del pedestal, se le quita el collar y la base y se deja enfriar a la temperatura ambiente.
- f) Se le coloca al molde el collar de extensión y con el extractor se saca de él la probeta compactada, la cual debe identificarse marcándola en cada cara con una crayola.
- g) Se pesa la probeta y se mide su espesor; si su altura está fuera de lo especificado, puede ajustarse la cantidad de agregado a utilizar para elaborar las siguientes probetas, aplicando la expresión:

$$\text{Peso ajustado del agregado} = \frac{2.5 \times \text{peso del agregado usado}}{\text{altura medida de la muestra (pg)}} \quad (13)$$

- h) Finalmente, se coloca la probeta sobre una superficie lisa y bien ventilada durante toda la noche.

Este procedimiento de compactación se realiza sobre todas las muestras que se elaboren con los diversos porcentajes de cemento asfáltico.

3.3.2 Ensayo de probetas compactadas. En el método de ensayo Marshall, cada muestra compactada se somete a los siguientes ensayos en el orden indicado.

3.3.2.1 Determinación del peso específico “Bulk”. El peso específico “bulk” de una probeta compactada es la relación entre su peso en el aire y su volumen incluyendo los vacíos permeables. Si la probeta tiene una textura superficial densa e impermeable, su peso específico “bulk” se determina sencillamente mediante la expresión:

$$G_b = \frac{W_a}{W_{ss} - W_w} \quad (14)$$

Siendo:

W_a = peso de la probeta seca en el aire

W_{ss} = peso en el aire de la probeta saturada y superficialmente seca

W_w = peso de la probeta en el agua

3.3.2.2 Ensayo de estabilidad y flujo. El procedimiento que se describe a continuación, es aplicable a todas las probetas compactadas.

- a) Se lleva la probeta a un baño de agua a $60 \pm 1^\circ \text{C}$ durante un lapso de 30 a 40 minutos.
- b) Se limpia cuidadosamente la superficie interior de la mordaza de prueba y se lubrican las barras guías con una delgada película de aceite, de manera que el segmento superior del anillo deslice libremente. Si se usa un anillo para medir la carga aplicada, debe controlarse que su dial esté bien fijo y en cero cuando no haya carga.
- c) Estando listo el aparato de carga Marshall para el ensayo, se saca la probeta del agua y se seca rápida y cuidadosamente su superficie.
- d) Se coloca la probeta en la mordaza inferior de prueba y se centra. Luego se ajusta el anillo superior en posición y se centra el conjunto en el mecanismo de carga.
- e) A continuación se coloca el medidor de flujo sobre la barra guía marcada y se lleva su aguja a cero.
- f) Se aplica carga a la probeta a una velocidad de 2 pulgadas / minuto hasta que ocurra la falla. El punto de falla se define mediante la máxima lectura obtenida en el dial de carga.
El número de libras correspondiente a esta lectura se anota como ESTABILIDAD MARSHALL.
- g) Mientras se está aplicando carga, se mantiene el medidor de flujo firmemente en posición sobre la barra guía y se retira cuando ocurra la carga máxima. La

lectura en el dial en este instante se denomina FLUJO y se acostumbra expresar en centésimas de pulgada.

- h) El procedimiento completo, desde que se saca la probeta del baño de agua hasta que falla en la máquina, no debe tardar más de 30 segundos.

3.3.2.3 Análisis de densidad y vacíos. Al terminar los ensayos de estabilidad y flujo, debe realizarse un análisis de la densidad y vacíos para cada serie de muestras en la forma siguiente:

- a) Se promedian los pesos específicos “bulk” de todas las probetas elaboradas con el mismo porcentaje de asfalto, descartando las que se alejen demasiado del promedio G_b (lb/pie³).
- b) Se calcula el peso específico promedio del agregado total, mediante la expresión:

$$G_{agr} = \frac{100}{\frac{P_1}{G_1} + \frac{P_2}{G_2} + \frac{P_3}{G_3} + \dots} \quad (15)$$

Donde:

$P_1, P_2, P_3 \dots$ = Porcentajes en peso de cada una de las fracciones de material que intervienen en el total del agregado (numeral 3.3.1.2)

$G_1, G_2, G_3 \dots$ = Pesos específicos de los materiales a los que corresponden las fracciones anteriormente mencionadas. Deberá emplearse el aparente para el llenante mineral y el “bulk” para las fracciones de agregado grueso y fino.

- c) Se calcula el peso específico máximo teórico de la muestra para cada porcentaje de asfalto, el cual corresponde al que teóricamente se obtendría si fuera posible comprimir la muestra hasta obtener una masa e asfalto y agregados carente de vacíos con aire, este valor se calcula así:

$$G_{mt} = \frac{100}{\frac{\% \text{ agregados}}{G_{agr}} + \frac{\% \text{ cemento asfáltico}}{G_{asf}}} \quad (16)$$

- d) Se calcula el porcentaje de absorción de asfalto por peso del agregado seco, para cada porcentaje de cemento asfáltico utilizado, mediante la fórmula:

$$Aa = \frac{Gmm - Gmt}{Gmm * Gmt - \% \text{ agregados}} \quad (17)$$

Donde:

Gmm = Peso específico máximo medido

Gmt = Peso específico máximo teórico

% agregados = Porcentajes de agregados con relación al peso de la mezcla total

- e) Se determina el porcentaje de volumen que ocupa el agregado con respecto al volumen total de la probeta.

$$Vagr = \frac{\% \text{ agregados} \times Gb}{Gagr} \quad (18)$$

- f) Se calcula el porcentaje de vacíos en aire con respecto al volumen total de la probeta

$$Vv = \left(1 - \frac{Gb}{Gm}\right) \times 100 \quad (19)$$

- g) Se calcula el volumen de asfalto efectivo como porcentaje del volumen total de la probeta

$$Vae = 100 - (Vagr + Vv) \quad (20)$$

- h) Se determina el porcentaje de vacíos en los agregados minerales en la mezcla compactada.

$$Vam = 100 - Vagr \quad (21)$$

- i) Se determina el contenido de asfalto efectivo con respecto al peso de la mezcla.

$$Ae = \% \text{ cemento asfáltico añadido} - \frac{Aa \times \% \text{ agregados}}{100} \quad (22)$$

3.4 ELABORACIÓN DE LA LLANTA MAGNÉTICA

Se utilizará un carro de juguete el cual tiene sus llantas de caucho, donde se colocarán los imanes de neodimio internamente para ensayos posteriores; se debe tener precaución con el uso de los imanes, (Ver Anexo D).

3.5 PRUEBAS MAGNÉTICAS

A continuación se mencionan las pruebas magnéticas desarrolladas con el fin de caracterizarlo. Se incluyen sus definiciones y el procedimiento de medida en el laboratorio para cada una de ellas.

3.5.1 Inducción remanente. Los materiales que se comportan como materiales magnéticos presentan una propiedad que esta relacionada directamente con el campo magnético que producen; esta propiedad es la inducción remanente o remanencia. Las unidades de medida de la remanencia son Tesla (T) o Gauss (G), los cuales se pueden determinar directamente en un gaussímetro, magnetómetro u osciloscopio ó indirectamente en un fluxómetro. La inducción remanente se midió mediante un gaussímetro *Yokogawa* modelo 3251, facilitado por el Instituto Colombiano de Petróleo – ICP para una probeta cilíndrica de pavimento ferromagnético de 2.5 ± 0.01 pulgadas de altura y diámetro 4 ± 0.01 pulgadas de altura, al igual que para una llanta magnética (provista de una cinta de resina con imanes de neodimio).

3.5.2 Fuerza de atracción. La fuerza de atracción entre las superficies PF-LLM se puede medir mediante métodos físicos, determinando el peso que puede soportar una superficie de imanes de neodimio justo antes de desprenderse de la superficie del PF.

3.6 ENSAYOS PARA LA EVALUACIÓN DE LA ADHERENCIA

Se realizarán ensayos para evaluar la adherencia que presenta el conjunto PF-LLM, después de haber realizado el tramo de pavimentación para cuantificar y cualificar propiedades; la adherencia entre superficies se puede determinar en unidades de presión dividiendo la fuerza de atracción por el área de contacto de las superficies PF-LLM.

3.6.1 Ensayos cuantitativos. Se determinará la velocidad, y la variación de la distancia en la cual se empieza a presentar una atracción debido al campo magnético entre las superficies PF-LLM en función del área y del volumen de los imanes de neodimio.

- **Velocidad.** Se medirá la velocidad del carro provisto de imanes frente al pavimento ferromagnético y se comparará con una superficie distinta a éste, la cual será un tramo de madera. Este ensayo se realizará a diferentes ángulos de inclinación para demostrar la disminución de la velocidad frente al conjunto PF-LLM.
- **Distancia máxima entre las superficies PF-IMÁN para obtener una Fuerza de Atracción Perceptible (FAP) debido a un campo magnético en función del área y espesor de imanes de neodimio.** Se medirá la distancia donde se empieza a obtener una fuerza de atracción entre las superficies PF-IMÁN, inicialmente manteniendo el área de imanes constante y variando el espesor de imanes, seguidamente se mantendrá el espesor constante y se cambiará el área de imanes, para establecer diferencias y conclusiones.

3.6.2 Ensayos cualitativos. Mediante la observación se dará un análisis acerca de la fuerza de atracción entre el conjunto PF-LLM.

4. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

El análisis de los resultados está enfocado hacia la evaluación de las propiedades que presentan tanto los agregados como el asfalto utilizado en la preparación de una mezcla asfáltica en caliente. Así mismo, determinar el porcentaje óptimo de asfalto mediante el análisis de densidad - vacíos y pruebas de estabilidad – flujo, que permita obtener un pavimento ferromagnético que se ajuste a las normas y que a su vez mejore la adhesión entre las superficies pavimento - llanta magnética.

4.1 PROPIEDADES DEL ASFALTO UTILIZADO.

Mediante los ensayos realizados en el laboratorio de pavimentos de Ingeniería Civil se obtuvieron los resultados establecidos en la tabla 14.

Tabla 14. Características físicas del asfalto utilizado en obra y su procedencia				
Ensayo	Unidades	INV	Valor Promedio Obtenido	
			Valor Promedio obtenido	B/meja
Peso específico 25° C / 25° C		E – 707	0.9232	0.998
Penetración 100 g, 5 s, 25° C	0.1 mm	E – 706	78	76
Punto de chispa	° C	E – 709	308	320
Ductilidad a 25° C	cm	E – 702	+100	+100
Punto de ablandamiento (anillo y bola)	° C	E – 712	41	47.7
Viscosidad Saybolt Furol a 135°C	cSt		338	342
Viscosidad absoluta a 60° C	poises			1810

Según los datos reportados en la tabla anterior se puede apreciar que las propiedades del asfalto empleado para la realización del proyecto cumple con las normas y se encuentran dentro del rango de la especificación entregada por el proveedor del asfalto MPI, con lo cual se considera que el asfalto es apto para la realización del pavimento.

4.2 PROPIEDADES DEL AGREGADO UTILIZADO.

Debido a su procedencia el agregado se clasifica como pétreo y roca ígnea, debido a que proviene de minerales degradados por procesos naturales como erosión y está compuesto por elementos expresados como óxidos ferrosos y férricos. En el Anexo E se reporta la composición y el difractograma de rayos X del agregado utilizado (Ver Anexo G, numeral 1) A continuación se reportan en la tabla 15 los resultados obtenidos en la caracterización del agregado pétreo, y seguidamente se realizará un análisis de cada uno de los ensayos.

Tabla 15. Requisitos de los agregados pétreos para mezclas asfálticas en caliente		
Ensayo	Norma INV	Resultado
Granulometría	E-123	MDC-3
Peso específico real	E-222	4.080
Peso específico aparente		3.581
Peso específico aparente en s.s.s.		3.703
Peso unitario del agregado s.s.s., compactado		2080.81 kg/m ³
Peso unitario del agregado s.s.s., suelto		1878.66 kg/m ³
Absorción		3.41%
Partículas fraccionadas mecánicamente	E-227	100%
Límite líquido	E-125	N.P.
Límite plástico e índice de plasticidad	E-126	N.P.
Desgaste de los Angeles	E-218	Rodadura: 20.1 %
Pérdida en ensayo de solidez Na ₂ SO ₄	E-220	4.46 %
Adhesividad Bandeja	E-740	92 %
Equivalente de arena	E-133	53%

4.2.1 Granulometría. En el análisis granulométrico se determinó cuantitativamente la distribución de tamaños de partículas de suelo, que corresponde a la gradación MDC-3, la cual es recomendada para capas de rodadura de 3 cm de espesor.

4.2.2 Peso específico y absorción de agregados finos. Se determinó el peso específico aparente y real a 23° C/23° C, así como la absorción después de 24 horas de sumergidos en agua, de los agregados con tamaño inferior a 4.75 mm (tamiz No.4). Se puede aplicar el siguiente criterio para juzgar la aceptabilidad de los resultados con un 95 por ciento de probabilidad. Los

ensayos por duplicado, realizados en el laboratorio sobre una misma muestra, se consideran satisfactorios, ya que no difieren en más de las siguientes cantidades: para los pesos específicos, 0.03; para la absorción (un solo operador), 0.45. El resultado obtenido es un valor relativamente mayor comparado con el peso específico de agregados diferentes (aproximadamente 2.00) utilizados para pavimentación, lo que ocasiona un requerimiento mayor de agregado en la realización de las probetas permitiendo obtener la altura necesaria para realizar el ensayo Marshall. El resultado de absorción da una clara muestra que el agregado utilizado presenta baja porosidad, lo que indica que la mezcla requiere una cantidad de asfalto menor siendo la mezcla mas cohesiva.

4.2.3 Porcentaje de caras fracturadas. Se determinó el porcentaje en peso del material que presentó una o más caras fracturadas de las muestras de agregados pétreos. Todas las muestras tomadas presentaron esta característica, ya que la roca fue sometida a trituración y molienda lo que ocasiona que el agregado presente una forma irregular y no lisa, dando así un agregado capaz de adherirse mejor al asfalto.

4.2.4 Límite líquido y límite plástico. Este valor se determina cuando el suelo o la roca a analizar se halla en el límite entre el estado líquido y el estado plástico, teniendo en cuenta estos criterios se realizó el ensayo donde se determinó que el material no tiene plasticidad, es decir, no presentó límite líquido ni plástico.

4.2.5 Solidez de agregados bajo la acción de sulfatos. El agregado presentó un bajo porcentaje en pérdida de peso frente a la acción de sulfatos, lo que indica que tiene alta resistencia a la desintegración y mantiene su calidad al estar sometido a la acción de agentes atmosféricos. Se debe tener en cuenta que este resultado puede variar según la sal que se emplee. Dado que la precisión de este método es limitada, el rechazo de los agregados que no cumplan las especificaciones pertinentes, no puede darse

únicamente con él y se deben confirmar con resultados de otros ensayos más ligados a las características del material.

4.2.6 Abrasión de agregados (Desgaste en la máquina de los Ángeles). La roca presenta un porcentaje de pérdida de peso que corresponde a un agregado duro y con alta resistencia al desgaste y desintegración después de haber sido sometido a proceso de trituración, dando así un material apto para la aplicación en capas superficiales de la carpeta asfáltica.

4.2.7 Adhesividad en bandeja. La relación de adherencia presentada entre el asfalto y el agregado es admisible, pues el porcentaje alcanzado refleja que gran parte del asfalto que fijado en la roca una vez culminado el ensayo.

4.2.8 Equivalente de arena. El valor obtenido en este ensayo está cerca del valor mínimo especificado del equivalente de arena, el cual limita la cantidad permisible de finos arcillosos en un agregado y cuantifica la proporción relativa del contenido de polvo fino nocivo, o material arcilloso, en el agregados finos. Este resultado obtenido es admisible ya que presenta alta precisión, debido a que los resultados obtenidos en tres ensayos independientes, con el mismo espécimen de muestra, no varía en más de ± 4 puntos con respecto al promedio de estos ensayos.

4.3 MÉTODO MARSHALL PARA DISEÑO DE MEZCLAS DE AGREGADOS CON CEMENTO ASFALTICO

En la tabla 16 (Ver Anexo I) se registran los resultados obtenidos en los ensayos hechos a cada una de las probetas realizadas (Ver Anexo G, numeral 2) con su respectivo porcentaje de asfalto para así diseñar una mezcla óptima a partir del método Marshall.

A partir de los datos de la tabla 15 se obtuvieron los siguientes gráficos que determinan los parámetros para la elección del porcentaje óptimo de asfalto en la mezcla asfáltica.

- Densidad vs. % Cemento Asfáltico

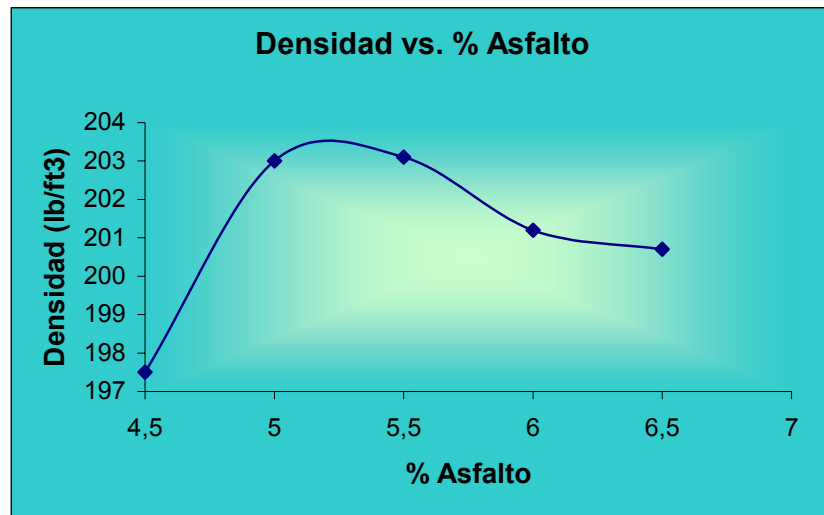


Figura 2. Gráfico de variación de densidad de probetas con el aumento de % de asfalto

- Estabilidad vs. % Cemento Asfáltico

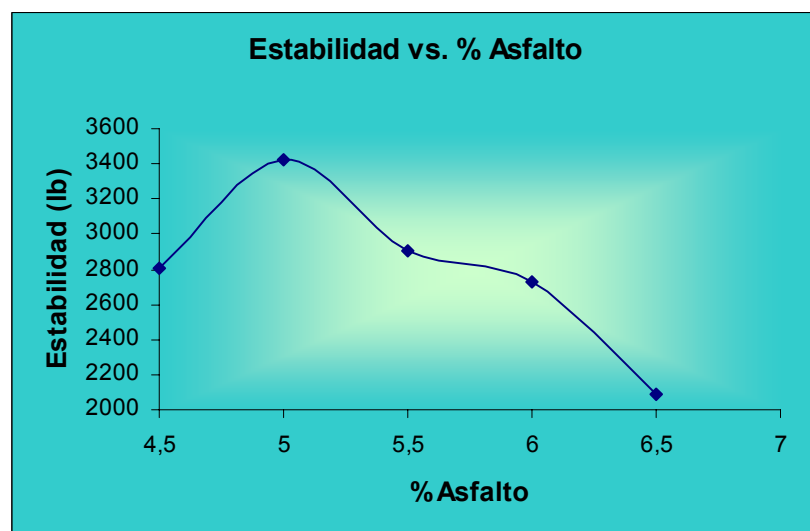


Figura 3. Gráfico de variación de estabilidad con el aumento de % de asfalto

- Flujo vs. % Cemento Asfáltico

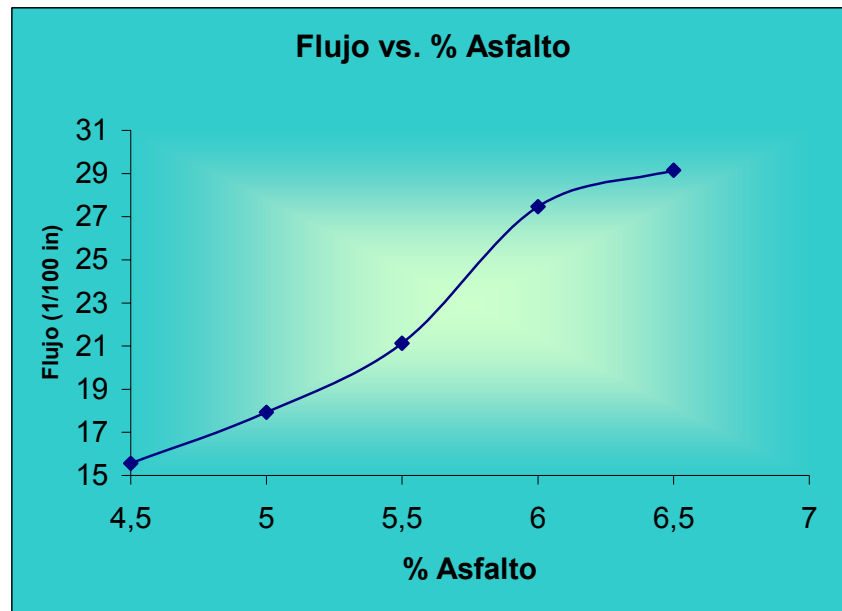


Figura 4. Gráfico de variación del flujo de las probetas con el aumento de % de asfalto

- % vacíos con aire en la mezcla total vs. % Cemento Asfáltico

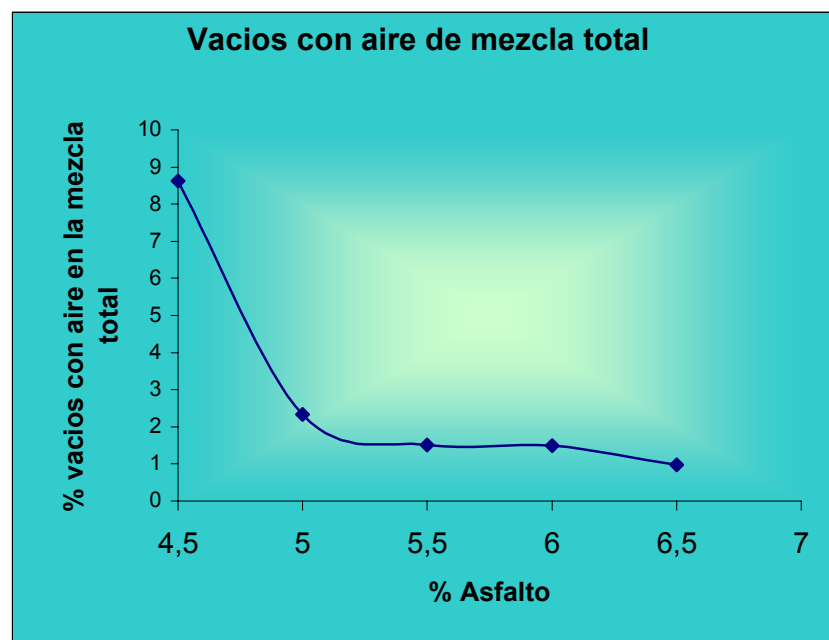


Figura 5. Gráfico de variación de vacíos con aire con el aumento de % de asfalto

- % vacíos en los agregados minerales vs % Cemento Asfáltico

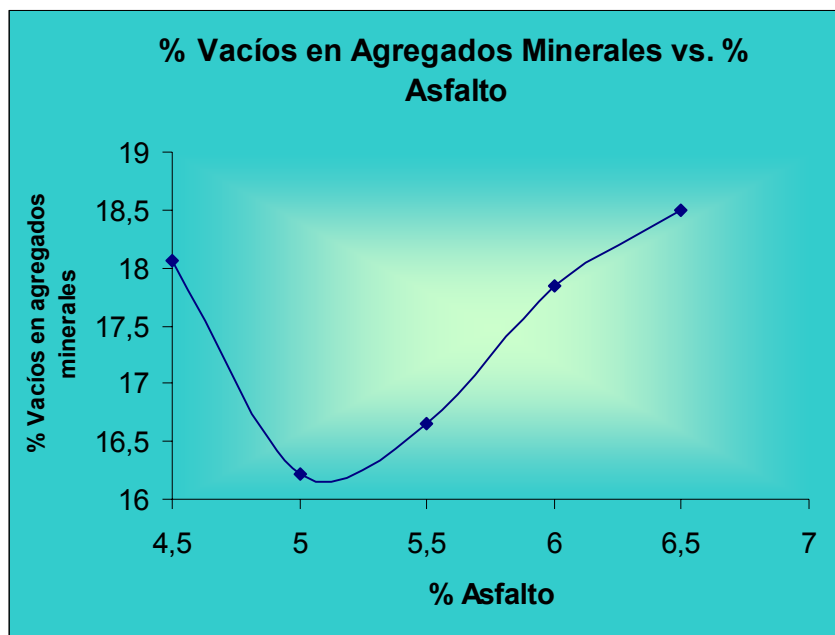


Figura 6. Gráfico de variación en % de vacíos en agregados con el aumento de % de asfalto

4.3.1 Pautas de comportamiento. Se determinó que la mezcla asfáltica obedece al siguiente comportamiento:

- La densidad aumenta con el contenido de asfalto hasta un máximo después del cual comienza a decrecer
- La curva de estabilidad es similar a la de la densidad, salvo que la máxima estabilidad ocurre normalmente (no siempre) a un contenido de asfalto ligeramente inferior al de máxima densidad.
- Los valores de flujo aumentan con los incrementos en el contenido de asfalto.
- El porcentaje de vacíos con aire en la mezcla total disminuye al incrementarse el contenido de asfalto, tendiendo hacia un mínimo.
- El porcentaje de vacíos en los agregados minerales disminuye al incrementarse el contenido de asfalto, hasta alcanzar un mínimo a partir del cual comienza a aumentar.

4.3.2 Selección del contenido óptimo de asfalto en la mezcla. Con base en las curvas dibujadas, el contenido óptimo de asfalto se calculó promediando los siguientes valores registrados en la tabla 17: el que corresponda a la densidad máxima, el que corresponda a la estabilidad máxima, el que corresponda el valor medio del porcentaje de vacíos con aire permitido por las especificaciones.

Propiedades de la mezcla	% asfalto correspondiente
Densidad máxima	5.22
Estabilidad Máxima	5.00
Promedio de % vacíos con aire permitido	4.83
Contenido promedio de cemento asfáltico	5.02

Los valores anteriores se promediaron y se calculó que el contenido óptimo de cemento asfáltico es 5% aproximadamente; con el porcentaje promedio así obtenido, se verificó si los valores de flujo, estabilidad y vacíos se encontraban dentro de los límites especificados en la tabla 18 para un tránsito medio y además si el porcentaje de vacíos en los agregados minerales era superior al mínimo admisible registrado en la tabla 19.

Tránsito	Pesado DTN>100	Medio DTN = 10 a 100	Liviano DTN <10
No. de golpes por cara	75	50	35
Estabilidad mínima (libras)	750	500	500
Flujo (1/100 in)	8-16	8-18	8-20
% de vacíos con aire:			
- Concreto asfáltico para rodadura	3-5	3-5	3-5
% vacíos en agregados minerales		Ver siguiente tabla	

Con el porcentaje óptimo de asfalto (5%) se determinaron las propiedades de la mezcla que se reportan en la tabla 20.

Tabla 19. Mínimo porcentaje admisible de vacíos en los Agregados minerales	
Tamaño máximo nominal De las partículas del agregado	% mínimo de vacíos en los agregados minerales
No. 16	23.5
No. 8	21
No. 4	18
3/8 "	16
1/2"	15
3/4"	14

Tabla 20. Propiedades de la mezcla con el contenido de asfalto óptimo	
Propiedades de la mezcla	Valor obtenido
Estabilidad (lb)	3425
Flujo (1/100 pulg)	17.9
% Vacíos con aire	2.4
% vacíos en agregados minerales	16.22

Por lo general, la mezcla de diseño a elegir debe ser la más económica que cumpla con los criterios establecidos. Debido a que las condiciones económicas son iguales, se eligió la mezcla de mayor estabilidad y con un valor de flujo acorde a las especificaciones. Es asimismo deseable que el porcentaje de vacíos con aire permanezca dentro de los límites fijados por las especificaciones, ya que si es muy bajo habrá tendencia hacia la exudación del asfalto de la mezcla, mientras que si es muy alto puede producirse un envejecimiento prematuro del asfalto por cuanto la capa queda más expuesta a los agentes atmosféricos, lo que se traduce en la desintegración del pavimento. Comparando el resultado obtenido de % de vacíos con aire (tabla 19) con el especificado en la tabla 17 se observa que no se encuentra dentro del rango, por tanto se realizaron algunos ajustes, tales como los indicados en la tabla 21; sin embargo, siguiendo estos parámetros no se alcanzaron los criterios de diseño, por ende, según el Instituto del asfalto ⁽⁴⁾, se puede permitir una tolerancia de 1% en los vacíos con aire, pero por ningún motivo se podrá aceptar que el valor del flujo sea mayor al permitido, ni la estabilidad inferior de la exigida.

Tabla 21. Guía Para Ajustes De Mezclas Asfálticas		
Vacíos con aire	Estabilidad Satisfactoria	Estabilidad Baja
Vacíos con aire bajos	Reducir el contenido de asfalto o el llenante mineral, o ambos. Modificar la gradación y/o la combinación de los agregados para obtener más vacíos en el agregado	Aumentar el llenante mineral, Disminuir el contenido de asfalto o ambas cosas simultáneamente. Aumentar la cantidad y/o la Angulosidad del agregado grueso
Vacíos con aire satisfactorios	No se requiere ajuste alguno	Disminuir el contenido de asfalto, Aumentar el llenante mineral o ambas Cosas al mismo tiempo. Aumentar la cantidad y/o angulosidad Del agregado grueso
Vacíos con aire altos	Aumentar el contenido de asfalto y/o el de llenante mineral. Modificar la gradación y/o la combinación de los agregados para obtener menos vacíos en los agregados.	

4.3.3 Aplicación de los resultados obtenidos. El valor óptimo obtenido en el diseño es el porcentaje de cemento asfáltico que debe intervenir en la manufactura de la mezcla en la obra, empleando el mismo tipo de agregados y asfalto utilizados en el diseño de laboratorio. Sin embargo, como durante el proceso de construcción es posible que se presenten modificaciones en la gradación de los agregados, el Ingeniero de Control deberá estar atento para ordenar todos los ajustes que considere necesarios. Durante la producción de mezclas en planta, además del control del porcentaje de cemento asfáltico añadido, deberá llevarse una cuidadosa investigación de la estabilidad, flujo y densidad de las mezclas.

4.3.4 Algunas observaciones adicionales sobre el efecto de las características de los materiales en los resultados del ensayo Marshall. Al igual que en otros ensayos mecánicos, los resultados del Ensayo Marshall son afectados por las propiedades de los agregados y las del asfalto que interviene en la mezcla, como de manera muy resumida se indica a continuación.

4.3.4.1 Efecto de los agregados.

- Al incrementarse el tamaño máximo de los agregados aumenta la estabilidad.

- Con relación al tipo de agregado, se puede predecir que un agregado con partículas sin trituración, lisas y redondas, producirá menor estabilidad que uno triturado con partículas cuya superficie sea áspera con sus bordes duros. Esto es válido tanto para los agregados gruesos como para los finos. Si se mezclan agregados gruesos de textura áspera con finos de superficie lisa, la estabilidad crece con proporción de gruesos hasta valores del orden del 50%, por encima de los cuales la mezcla pierde estabilidad. La tendencia en el flujo es en este caso inversa a la de la estabilidad. En lo que se refiere al llenante mineral, al aumentar su cantidad se reduce el contenido necesario de asfalto (para conservar el porcentaje de vacíos con aire) y se obtienen aumentos importantes de estabilidad, mientras las variaciones en el flujo no son de consideración.

4.3.4.2 Efecto del cemento asfáltico. El grado de asfalto en el ensayo Marshall tiene gran efecto en la estabilidad, pero muy poco en el valor de flujo. Entre más viscoso sea el asfalto, mayor será la estabilidad obtenida para un porcentaje dado de éste.

4.3.4.3 Efecto de la compactación. El nivel de compactación de las probetas depende del número de golpes por cara que se aplique durante el ensayo. Entre mayor sea, más altas serán las densidades obtenidas y menores los contenidos óptimos de asfalto requeridos. Además, el compactar a altas temperaturas produce aumentos en la densidad y la estabilidad y menores contenidos óptimos de asfalto.

4.3.5 Causas del error en el ensayo. Las posibles causas de error en los ensayos podrían deberse a:

- Errores en la dosificación de los materiales para la mezcla.
- Temperaturas de mezcla y compactación inadecuadas.
- Baja temperatura de las probetas en el instante en que se cargan y /o lecturas incorrectas en los diales de estabilidad y flujo.

- Errores en las pesadas para la determinación de los pesos específicos. Se ha encontrado que si los pesos no se determinan con aproximación al décimo de gramo, el error que puede cometerse en la determinación del volumen de vacíos con aire puede llegar hasta 1.6% suponiendo que el resto del ensayo se realice en forma correcta.

Después de analizar los resultados se pensó en utilizar un nuevo agregado que consiste en polvo proveniente de una película de óxido de hierro formado por el enfriamiento del corte de tuberías, para emplearlo como llenante en la mezcla asfáltica, al cual fue sometido a un análisis de contenido de hierro (Ver Anexo F) y posteriormente se realizó el ensayo Marshall, obteniendo los resultados registrados en la tabla 22 (Ver anexo G). A partir de los datos de la tabla 22 se obtuvieron los siguientes gráficos que determinan los parámetros para la elección del porcentaje óptimo de asfalto en la mezcla asfáltica.

- Estabilidad vs. % Asfalto

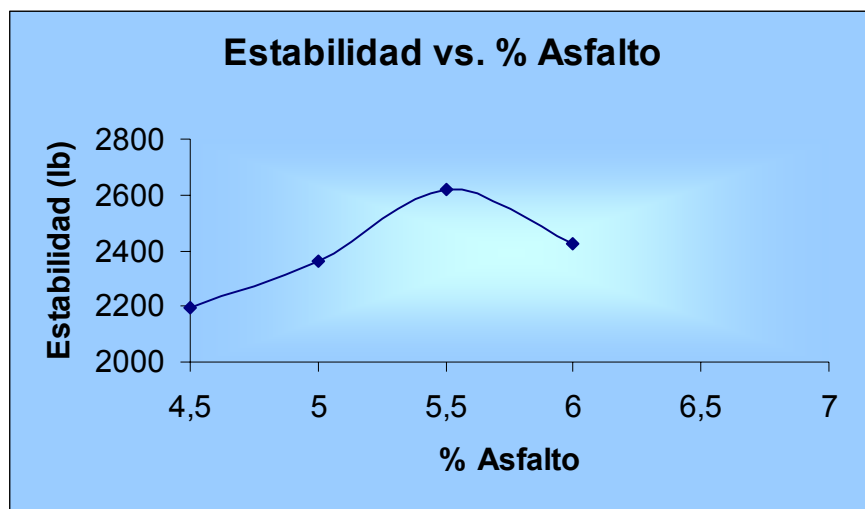


Figura 7. Gráfico de variación de estabilidad con el aumento de % de asfalto

- % Vacíos con aire de la mezcla total vs. % Asfalto

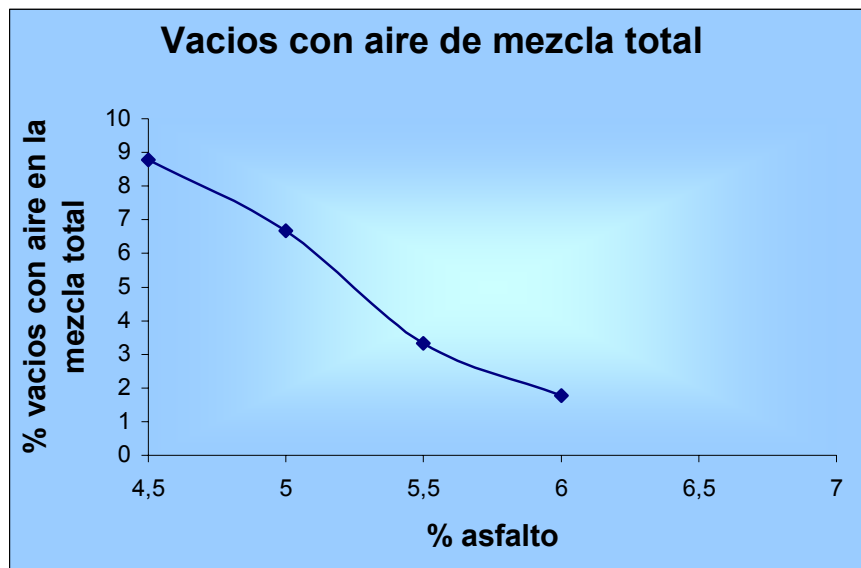


Figura 8. Gráfico de variación de vacíos con aire con el aumento de % de asfalto

- Densidad promedio de las probetas vs. % Asfalto

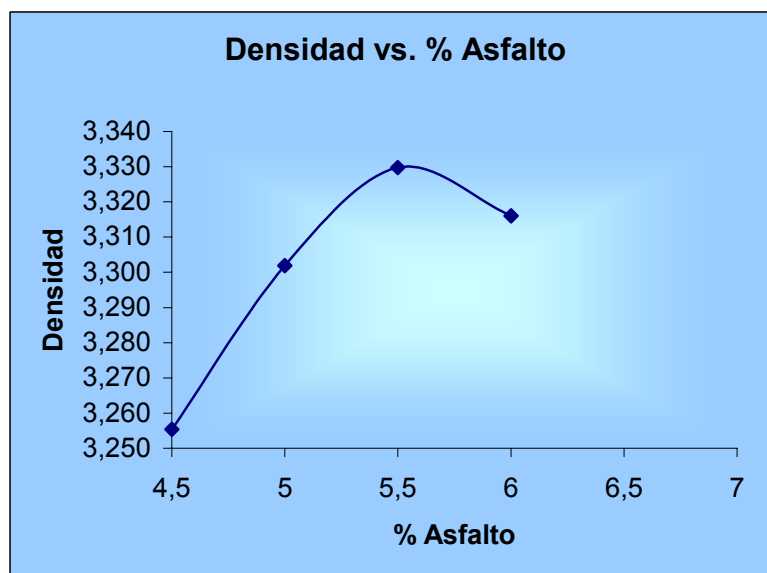


Figura 9. Gráfico de variación de densidad de probetas con el aumento de % de asfalto

- Flujo vs. % Asfalto

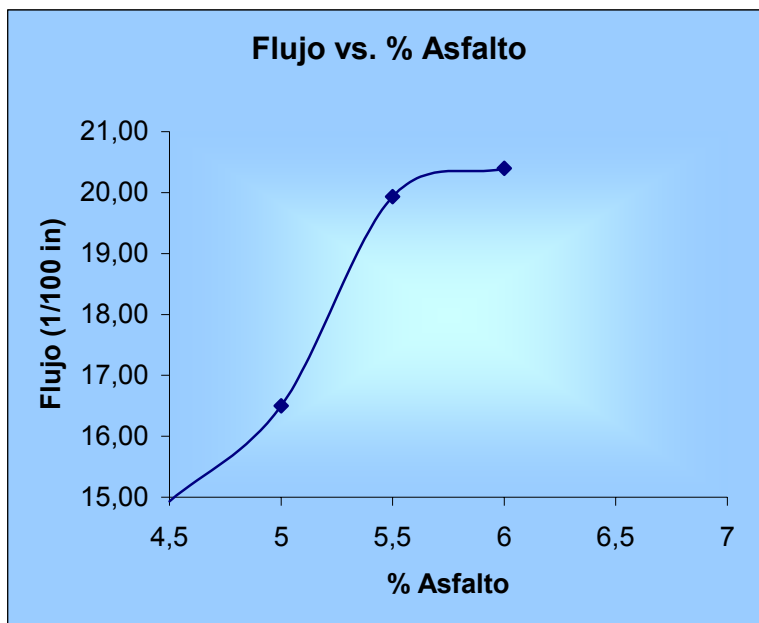


Figura 10. Gráfico de variación del flujo de las probetas con el aumento de % de asfalto

En base a los resultados obtenidos con el nuevo agregado utilizado como llenante y mediante el análisis de las gráficas, se tuvo en cuenta los criterios del apartado 4.3.2 para calcular el contenido óptimo de asfalto donde se obtuvo los valores registrados en la tabla 23.

Propiedades de la mezcla	% asfalto correspondiente
Densidad máxima	5.58
Estabilidad Máxima	5.50
Promedio de % vacíos con aire permitido	5.38
Contenido promedio de cemento asfáltico	5.48

Con este contenido de asfalto se verificó los criterios descritos en las tablas 18 y 19 y se encontró que cumple con los requisitos de las propiedades de estabilidad y % de vacíos con aire pero el valor de flujo se excede del valor permitido por las normas, por tanto teniendo en cuenta esto, según el Instituto del asfalto ⁽⁴⁾, por ningún motivo se podrá aceptar que el valor del flujo sea mayor al permitido, ni la

estabilidad inferior a la exigida, por consiguiente se decidió no utilizar este material como llenante para la mezcla ya que no cumple con los requisitos exigidos por las normas.

4.4 PREPARACIÓN Y EVALUACIÓN DE PAVIMENTO FERROMAGNÉTICO.

Ya realizadas las pruebas para la elaboración de la mezcla asfáltica en caliente aplicando el método de Bruce Marshall y con el porcentaje óptimo de asfalto a utilizar se tomó la decisión de utilizar la roca imán para realizar el pavimento, ya que es la que mejor se adapta a los esquemas del trabajo de grado. Se realizó el procedimiento descrito por INVIAS para elaborar una capa de rodadura de 3 cm de espesor, obteniendo el pavimento ferromagnético. (Ver Anexo G, numeral 3)

4.5 PRUEBAS FÍSICAS PARA LA DETERMINACIÓN DE VARIABLES

Se realizaron los ensayos para evaluar la adherencia entre el conjunto PF-LLM, obteniéndose los siguientes resultados.

4.5.1 Ensayos Cuantitativos. Se determinó la velocidad, y la variación de la distancia en la cual se empieza a presentar una fuerza de atracción perceptible (FAP), debido a un campo magnético entre las superficies PF-LLM en función del área y el espesor de los imanes de neodimio.

4.5.1.1 Distancia máxima entre las superficies PF-IMÁN donde se da una FAP el área de imanes constante. Este ensayo se realizó con el fin de determinar la variación de la distancia donde se inicia una FAP en función del espesor del imán expuesto al pavimento.

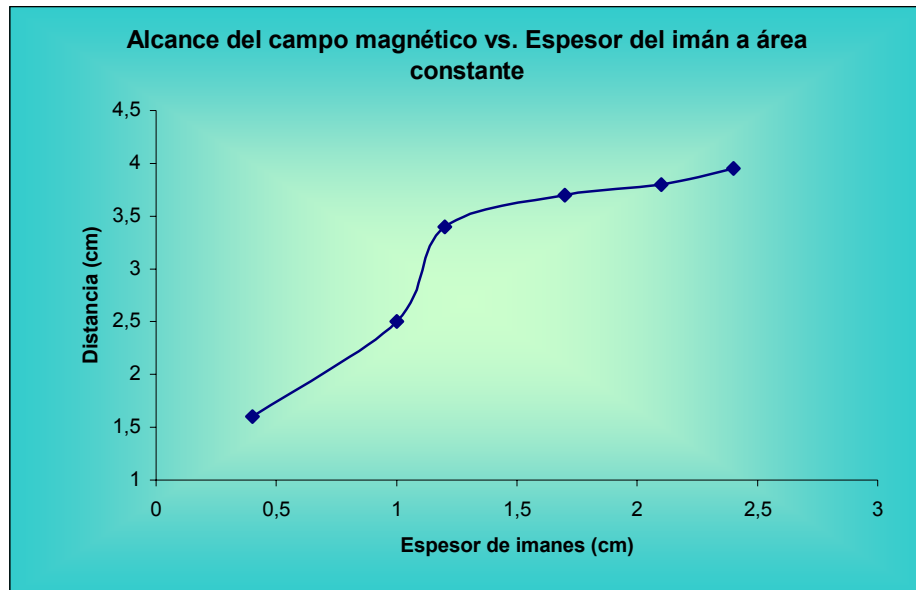


Figura 11. Variación de distancia máx. entre las superficies PF-IMÁN donde se da una FAP en función del espesor del imán con el área expuesta constante

Se observa que la distancia máxima donde se presenta una fuerza de atracción perceptible (FAP) aumenta a medida que se incrementa el espesor de los imanes manteniendo el área constante; por tanto la variación del espesor da una gran incidencia aumentando el alcance del campo magnético generado para producir una fuerza de atracción entre las superficies expuestas. (Ver Anexo G, numeral 4)

4.5.1.2 Distancia máxima entre las superficies PF-IMÁN donde se da una FAP con espesor de imanes constante. Este ensayo se realizó con el fin de determinar cual era la variación de la distancia donde se inicia una atracción entre las superficies PF- IMÁN debido a un campo magnético al momento de cambiar el área del imán expuesta al pavimento.

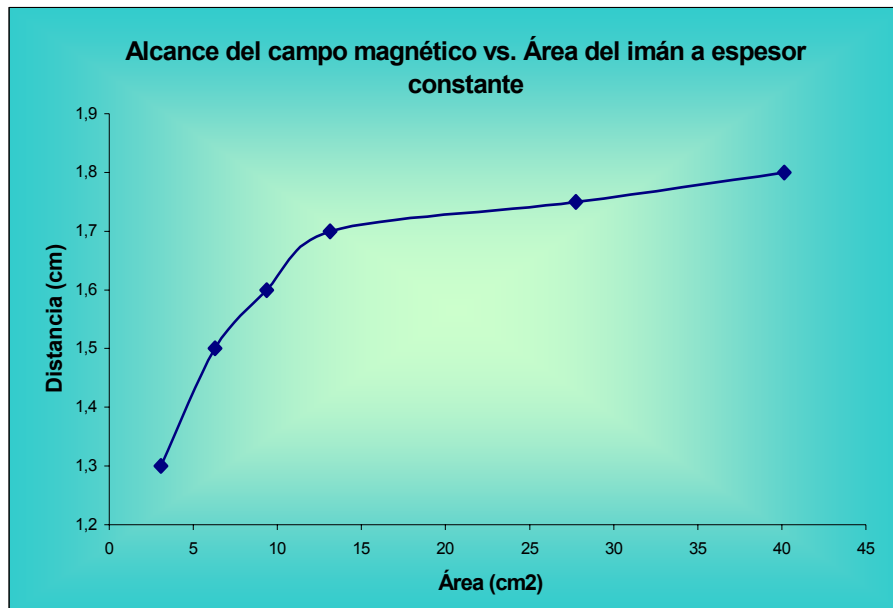


Figura 12. Variación de distancia máx. entre las superficies PF-IMÁN donde se da una FAP en función del área del imán con espesor constante

A partir del gráfico anterior y observando el ensayo realizado se determinó que hasta cierto punto donde se incrementaba el área de imanes en contacto con el pavimento ferromagnético, aumentaba la distancia donde se daba una FAP, pero ya al seguir aumentando el área no se observó una variación significativa en la distancia pero sí en la fuerza coercitiva, por tanto el área no influye determinantemente en la distancia máxima de generación de una FAP, pero sí en la fuerza de atracción superficial (distancia cero) entre las superficies PF-IMÁN, lo cual es importante para el proyecto ya que es necesario que exista una fuerza alta para separar las superficies PF-LLM. Es de anotar que estas dos variables (el área y el espesor de imanes) son proporcionales a la fuerza de atracción superficial; esto es lógico puesto que entre más grande sea el imán mayor serán la fuerza de atracción.

4.5.1.3 Determinación de velocidad a un mismo ángulo en diferentes superficies. Este ensayo se realizó con el fin de determinar la variación de la velocidad en diferentes superficies a un mismo ángulo de inclinación.

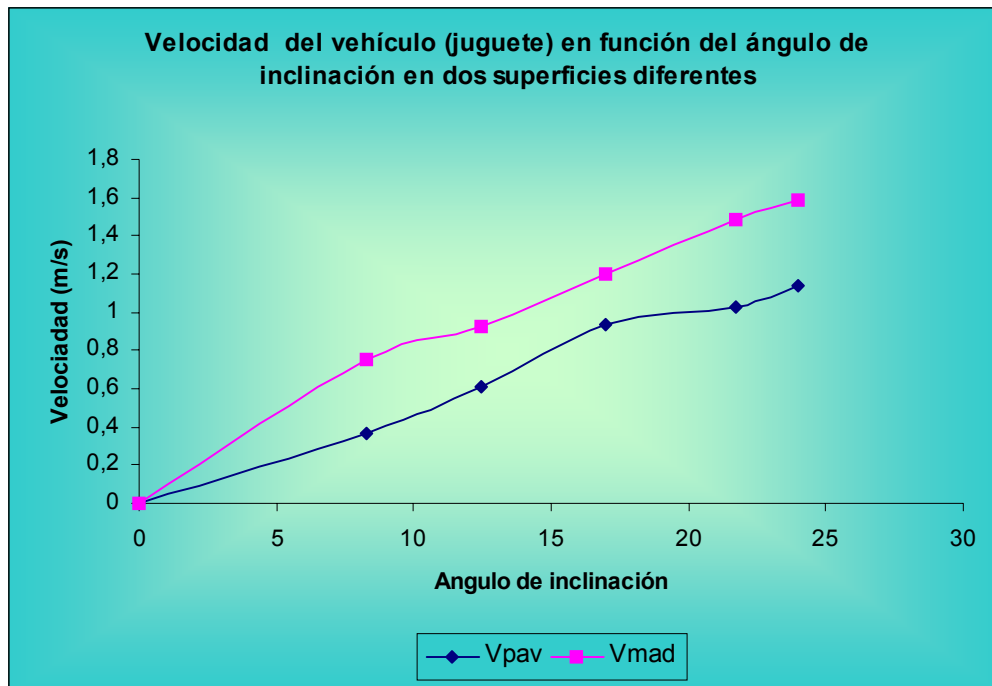


Figura 13. Variación de la velocidad de un vehículo (juguete) vs. ángulo de inclinación en dos superficies diferentes usando un mismo carro (conteniendo imanes de neodimio en sus llantas)

Al realizar una comparación de la velocidad que presenta el carro provisto de llantas magnéticas frente a las superficies pavimento ferromagnético y madera se comprobó que existe una menor velocidad en el PF a un mismo ángulo de inclinación (Ver Anexo G, numeral 5 y 6); por consiguiente se da una clara visión de que el pavimento realizado disminuye la velocidad frente a inclinaciones, comparado con otras superficies (madera). Es de aclarar que se dispuso una lámina de acetato en cada superficie ensayada para que la rugosidad de las superficies en contacto no interviniera en la fricción y así establecer una comparación de las diferencias encontradas en las velocidades.

4.5.2 Ensayos Cualitativos. Se observó que el pavimento genera un campo suficiente como para atraer la llanta utilizada en las pruebas (Ver Anexo H). Se realizaron ensayos donde se coloca el carro de juguete en diferentes posiciones, lateral, vertical y horizontal para apreciar como se adhieren las superficies entre sí,

la relación del peso (peso total carro-imanes con respecto al peso de los imanes) para que el carrito contrarreste la gravedad es aproximadamente de 6 a 1 al utilizar el PF e imanes de neodimio.

4.6 PRUEBAS MAGNÉTICAS. Estas pruebas se realizaron para caracterizar el conjunto PF-LLM y determinar valores necesarios como lo son Fuerza de Atracción Superficial (F.A.S.) e inducción remanente.

4.6.1 Inducción remanente. Se midió el campo magnético generado por las superficies a trabajar y se obtuvieron los siguientes resultados; para la probeta cilíndrica de pavimento 10.8 Gauss y para la llanta 1.114 KGauss.

4.6.2 Fuerza de Atracción Superficial (FAS). Este ensayo es medido estando las dos superpies en contacto, y se realizó colocando el pavimento en forma horizontal de manera que se pudiera colocar una placa de imanes suspendida a él con medidas de 230 cm³ de volumen (Área = 209 cm²; Espesor = 1.1 cm) y así determinar la masa necesaria para separar el conjunto PF-IMANES. El resultado obtenido se encuentra en la tabla 24:

Tabla 24. Datos para determinar la fuerza de atracción superficial	
Masa necesaria para separar el conjunto PF-IMANES	2.783 Kg.
Masa placa de imanes de 230 cm ³ (100 imanes)	0.892 Kg.
Masa total	3.675 Kg.
Fuerza coercitiva = $W_{total} * gravedad$	36.015 N

El resultado obtenido es satisfactorio ya que se requiere de un alto grado de fuerza para separar las superficies expuestas, lo cual indica que existe una buena adhesión entre el PF-IMANES. Con relación a pesos se puede decir que los imanes de neodimio en este caso pueden sostener cuatro veces su propio peso en la superficie de PF, esta relación es menor a la encontrada utilizando un solo imán (resiste 21 veces su propio peso), esto puede ser debido al área y espesor del imán, que influyen en la fuerza de atracción superficial. Otra causa puede ser por

la utilización de varios imanes (100) sobre la placa en este ensayo, los cuales no quedaron homogéneamente distribuidos dejando vacíos y por otro lado el área de contacto era inferior al área efectiva, lo cual disminuye la eficiencia de los imanes utilizados. También se realizó el ensayo de fuerza de atracción superficial determinando el peso que puede sostener un imán de neodimio con respecto a su propio peso, al estar adherido al PF, se determinó que se requiere de 21 veces el peso del imán para separarlo del PF.

4.7 ANÁLISIS ECONÓMICO

Se calculó el costo de la materia prima a utilizar para obtener 1m^3 de mezcla asfáltica en caliente con roca imán utilizado como agregado.

Tabla 25. Costo total de materia prima para obtener 1m^3 de M.A.C.				
\$ /Kg Asfalto 70/90	\$ /Kg Roca sin triturar	$W_{\text{materia prima}}$ para 1m^3 con $\rho=3251.79 \text{ kg/m}^3$	Costo (\$)	
			5% en peso de asfalto	95% peso de agregado
400	20	3251.74 kg	66236	61783
COSTO TOTAL			128019	

Los siguientes datos se tomaron para establecer una comparación de costos al utilizar otro tipo de agregado ⁽⁵⁾.

Tabla 26. Costo total de materia prima para obtener 1m^3 de M.A.C. con agregado común				
\$ /Kg Asfalto 70/90	\$ /Kg Roca sin triturar	$W_{\text{materia prima}}$ para 1m^3 con $\rho=2653.7 \text{ kg/m}^3$	Costo (\$)	
			5% en peso de asfalto	95% peso de agregado
400	7.55	2653.7 kg	53076	19033.7
COSTO TOTAL			72109.7	

Se observa que el costo de la mezcla incrementa dependiendo del agregado a utilizar; en este caso al utilizar como agregado la “Roca imán” incrementa el valor del m^3 pero se debe tener en cuenta que la relación costo-seguridad se justifica ya que se van a prevenir accidentes en las vías.

CONCLUSIONES

Con este trabajo se lograron mejorar algunas propiedades del pavimento convencional, tales como la corrosividad, estabilidad entre otras; del mismo modo la propiedad mas importante que era el objeto de nuestra investigación (adhesión entre PF-LLM) proporcionó los resultados deseados, ya que se encontró que esta característica, al realizar las pruebas físicas, aumenta en función de diferentes parámetros como lo son área y volumen de imanes puestos en la llanta utilizada en los ensayos y a su vez comparando estas propiedades con las que se presentan en una superficie no magnética. Cabe mencionar que la adhesión depende ampliamente del campo magnético generado por los imanes contenidos en la llanta así como de la distancia de ellos con respecto al pavimento ferromagnético. La fuerza de atracción entre PF-LLM es relativamente uniforme en toda la superficie de PF debido a la dispersión de las cargas (polaridades) y a los diferentes compuestos de Fe que contiene el agregado.

Respecto a la llanta magnética se concluye que tanto el campo magnético así como la fuerza de atracción ejercida por ella sobre el PF (debido a la incorporación de imanes de neodimio en su interior) son de gran intensidad mejorando la adhesión entre las superficies PF-LLM y reduciendo moderadamente su velocidad (llanta o vehículo), se debe tener en cuenta que se debe contar con imanes totalmente cargados y de tamaños grandes con respecto a los utilizados (imanes de neodimio de reciclaje) ya que a mayor número de imanes empleados mayor fuerza de atracción pero es de aclarar que se elevarían los costos para las llantas, mas no para el pavimento ferromagnético.

Comparando los costos, propiedades mecánicas y físicas, rentabilidad y aplicabilidad del PF obtenido con las de un pavimento convencional (PC), se

puede decir que el PF iguala y supera el prototipo de propiedades mecánicas y físicas del pavimento convencional; respecto a los costos, se puede apreciar que la fabricación del PF no tiene mayores incrementos económicos comparado con el PC debido a que el agregado empleado para su fabricación es proveniente de minas que se encuentran ubicadas en diversos sitios del país, debido a su origen ígneo y mineral al igual que el agregado del PC, sin embargo, sí se puede apreciar un incremento en los costos totales del proyecto ocasionado por parte de la fabricación de la llanta magnética, ya que el emplear imanes de neodimio ocasiona elevados costos; no obstante si se observa el precio total de un carro con el porcentaje que aumentaría debido al uso de LLM no sería tan alto, razón por la cual se considera que el costo total de este proyecto es permisible versus los beneficios que se obtendrían.

Analizando el punto de la aplicabilidad, cabe recordar que inicialmente se planteo que el PF sería usado en tramos especiales donde existan condiciones desfavorables, tales como superficies lisas, inclinadas, peraltes y curvas, por lo tanto se puede decir que para estos tipos de superficies el proyecto tendrá una buena aplicabilidad en un futuro una vez realizadas y evaluadas cada una de las recomendaciones citadas.

Se puede decir finalmente que este trabajo de grado es una propuesta realmente innovadora sujeta a futuras mejoras que revolucionara el mercado de la pavimentación tradicional, al igual que el de la fabricación de llantas y que logrará aumentar el grado de seguridad en la red vial traduciéndose en menos accidentes, logrando salvar muchas vidas.

RECOMENDACIONES

- Obtener un pavimento ferromagnético utilizando emulsiones asfálticas, para así comparar los resultados mediante estos dos métodos.
- Trabajar con caucho magnético en la elaboración de la llanta magnética debido a que en este trabajo de grado solo se evaluaron propiedades mecánicas y físicas del PF haciendo uso de imanes de neodimio en la llanta.
- Emplear imanes de neodimio de mayor tamaño y preferiblemente nuevos para la fabricación de la LLM y tener presente la orientación de estos dentro de la llanta.
- Durante la fabricación del PF se debe estar muy pendientes de que la temperatura de mezcla del asfalto y el agregado sea la misma que la determinada experimentalmente en el laboratorio, ya que si esto no ocurre, en el momento de evaluar las propiedades del pavimento se podrán encontrar diferencias notables respecto de las evaluadas en el laboratorio, ocasionando la no conformidad con las normas establecidas para el asfalto, agregado y mezclas densas en caliente por INVIAS.
- Idear un mecanismo para el mejoramiento de la distribución del hierro del agregado en el pavimento.
- Realizar pruebas físicas con vehículos reales.
- Emplear combinaciones de agregados (por ejemplo ferrita + viruta +roca imán) en diversos porcentajes para el diseño de la mezcla asfáltica y evaluar sus propiedades físicas y mecánicas.

BIBLIOGRAFÍA

1. ACEVEDO, Leonardo; CASTILLO, Edgar; ORDUZ, Janneth. Perfil tecnológico ambiental de la industria de mezclas asfálticas en caliente – sistema de información para la evaluación ambiental de sectores productivos colombianos, Primeras jornadas internacionales del asfalto. Piedecuesta: Corasfaltos – Universidad Industrial de Santander, 1998.
2. AFANASIEVA, Natalia. Introducción a los asfaltos, Especialización en asfaltos para pavimentos. Escuela de Ingeniería Civil, Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga: La Universidad, 1996.
3. ASPHALT INSTITUTE. Asphalt plant manual, Manual series No. 3 (MS-3), 5ª edición. USA; El Instituto, 1983.
4. _____ The asphalt handbook, Manual series No. 4 (Ms-4). USA: El instituto, 1989.
5. CALDERON, Jorge y DUARTE, Sonia. Caracterización del proceso de preparación en caliente de mezclas asfálticas en Santander, Tesis de grado. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander, 1998.
6. ECOPETROL-ICP y Universidad del Cauca. Cartilla práctica para el manejo de los asfaltos colombianos. Piedecuesta (Colombia): ECOPETROL y la Universidad 1997.
7. GARCÍA M., Francisco. Rutinas de operación y mantenimiento de una planta de mezclas, Tesis de grado. Medellín: Universidad Pontificia Bolivariana, 1985.
8. GRUPO DE ASFALTOS. Interacción de asfalto – agregado, Boletín CIT – ICP, año 9, números 3 y 4. Colombia: ECOPETROL, 1996.
9. HMA/QMS Manua. www.dot.com
10. INSTITUTO NACIONAL DE VIAS (INV), MINISTERIO DE TRANSPORTE. Artículos 400 y 450, Especificaciones generales de construcción de carreteras, Construcción de carreteras, Contenido general, tomo 1, capítulo 1. Colombia: INV, 1998.

11. MUÑOZ, Hernando. El Marshall como método de diseño y de control de las mezclas asfálticas en caliente y frío, undécimo simposio colombiano sobre ingeniería de pavimentos. Cartagena: Editorial escuela colombiana de ingeniería, 1997.
12. PEREA, Oscar y VILLABONA, Adriana. Inventario Nacional de plantas mezcladoras de asfalto en caliente, Tesis de grado. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander, 1998.
13. RÍOS, María y OVIEDO, Diego. Desarrollo de un método para el diseño de mezclas asfálticas en frío, Tesis de grado. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander, 1994.
14. SANABRIA, Luis y ARENAS, Hugo L. Caracterización y evaluación de los asfaltos del Complejo Industrial de Barrancabermeja y la Refinería de Cartagena, noveno simposio colombiano sobre ingeniería de pavimentos, Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga: ECOPETROL – ICP, 1993.
15. SIERRA, Ralph. El poder curativo de un imán. Editorial: Terapion, ISBN: 84-88903-02-2 Magnetoterapia.
16. TAMAYO, José. Algunos factores asociados con la calidad de los concretos asfálticos producidos en el área de Bogotá. Cartagena: Tercer congreso ibero-latinoamericano del asfalto, 1985.

<http://centros5.pntic.mec.es/ies.victoria.kent/Rincon-C/Curiosid/rc-66/rc-66.htm>

<http://www.calamit.com/esp/neodimio.htm>

<http://www.cientificosaficionados.com/Reciclado/disco.htm>

<http://www.elrincondelaciencia.com>

<http://www.halde-gac.com>

<http://www.imanesmagnum.com.ar/accesorios/imanes/imanes.htm>

<http://www.magiapym.com/magia/imanes.htm>

<http://www.soloimanes.com>

ANEXOS

ANEXO A. CARACTERÍSTICAS DE IMANES

1. Características De Los Imanes De Cerámica

- Hechos de Óxido Ferroso del Estroncio y de algunos otros elementos
- De apariencia lisa y en gris oscuro
- Es el Imán posiblemente más usado
- Limitado a las formas simples debido al proceso de fabricación
- El acabado requiere corte de diamante
- La mayoría de los grados utilizados son de 5 y 8
- El grado 8 es el material de cerámica más fuerte disponible
- Imanes de figuras de anillos, Blocks y discos
- Este imán es extremadamente frágil y puede romperse si se cae o se atrae a otro sin el debido cuidado

2. Características De Los Imanes De Neodimio

- Este tipo de imán, de “tierra rara”, es llamado así porque los elementos que lo componen fueron encontrados dentro de la Tabla de Elementos como “Lantánidos”. Prensados y horneados
- Los IMANES de “Neodymium” (Nd-Fe-B) están compuestos de Neodymium (Nd), Hierro (Fe), Boro (B) y una transición de algunos metales
- Tienen alta resistencia a la desmagnetización
- De alta energía y potencia en gauss
- Muy bueno en temperatura ambiente
- Precios moderados
- Material corrosivo que deberá ser cubierto para una larga duración y máxima energía
- Son suficientemente fuertes para magnetizar y desmagnetizar algunos tamaños de Alnico y Flexibles
- Los grados más comunes son de 30 y 35
- Imanes pequeños en apariencia metálica y de figuras de anillos, Blocks y discos .
- La manipulación de los imanes de neodimio deberá de ser con sumo cuidado ya que son muy frágiles y muy fuertes en atracción magnética. Por lo tanto, es cruciales manejar estos imanes con cuidado extremo para evitarlo daños corporales y el daños a los imanes. Los dedos se pueden pellizcar seriamente entre la atracción de los imanes.
- Este tipo de imán, de “tierra rara”, es llamado así porque los elementos que lo componen fueron encontrados dentro de la Tabla de Elementos como “Lantánidos”. Prensados y horneados.
- Los IMANES de “Neodymium” (Nd-Fe-B) están compuestos de Neodymium (Nd), Hierro (Fe), Boro (B) y una transición de algunos metales
- Tienen alta resistencia a la desmagnetización

- De alta energía y potencia en gauss
- Muy bueno en temperatura ambiente
- Material corrosivo que deberá ser cubierto para una larga duración y máxima energía
- Son suficientemente fuertes para magnetizar y desmagnetizar algunos tamaños de Alnico y Flexibles y aun de Cerámica.
- Los imanes de la tierra rara son muy frágiles y muy fuertes magnéticamente. Por lo tanto, es crucial manejar estos imanes con cuidado extremo para evitar daños corporales y daño a los imanes. Los dedos se pueden pellizcar seriamente entre la atracción de los imanes

3. Características De Los Imanes Flexibles

- Hecho de Óxido Ferroso del Estroncio y de algunos otros elementos
- Utilizados frecuentemente para muestras de publicidad, promocionales, decorativos, calendarios, agendas, sellos para puertas, aislantes, mostradores metálicos, anaqueles, etcétera
- Los imanes flexibles de la alta energía son anisotrópic (orientado) donde como el material flexible regular no lo está. Por lo tanto, los imanes de la alta energía se limitan a la magnetización con el grueso, y son similares en fuerza a un imán de cerámica del grado 1

ANEXO B. ARTICULO 400

DISPOSICIONES GENERALES PARA LA EJECUCION DE RIEGOS DE IMPRIMACION Y LIGA, TRATAMIENTOS SUPERFICIALES, SELLOS DE ARENA ASFALTO, LECHADAS ASFALTICAS, MEZCLAS DENSAS Y ABIERTAS EN FRIO Y EN CALIENTE Y RECICLADO DE PAVIMENTOS ASFALTICOS

400.1 DESCRIPCION

Esta especificación presenta las disposiciones que son generales a los trabajos de imprimación y riegos de liga; tratamientos superficiales; lechadas asfálticas; bases, carpetas y bacheos asfálticos en frío y en caliente y reciclados bituminosos.

400.2 MATERIALES

400.2.1 Agregados pétreos y llenante mineral

Los agregados pétreos empleados para la ejecución de cualquier tratamiento o mezcla bituminosa deberán poseer una naturaleza tal, que al aplicársele una capa del material asfáltico por utilizar en el trabajo, ésta no se desprenda por la acción del agua y del tránsito. Sólo se admitirá el empleo de agregados con características hidrófilas, si se añade algún aditivo de comprobada eficacia para proporcionar una buena adhesividad.

Para el objeto de las especificaciones del Capítulo IV, se denominará agregado grueso la porción del agregado retenida en el tamiz de 4.75 mm (No.4); agregado fino la porción comprendida entre los tamices de 4.75 mm y 75 μm (No.4 y No.200) y llenante mineral la que pase el tamiz de 75 μm (No.200).

El agregado grueso deberá proceder de la trituración de roca o de grava o por una combinación de ambas; sus fragmentos deberán ser limpios, resistentes y durables, sin exceso de partículas planas, alargadas, blandas o desintegrables. Estará exento de polvo, tierra, terrones de arcilla u otras sustancias objetables que puedan impedir la adhesión completa del asfalto. Sus requisitos básicos de calidad se presentan en la Tabla No.400.1.

El agregado fino estará constituido por arena de trituración o una mezcla de ella con arena natural. La proporción admisible de esta última dentro del conjunto se encuentra definida en la respectiva especificación. Los granos del agregado fino deberán ser duros, limpios y de superficie rugosa y angular. El material deberá estar libre de cualquier sustancia que impida la adhesión del asfalto y deberá satisfacer los requisitos de calidad indicados en la Tabla No.400.1.

**TABLA No.400.1
REQUISITOS DE LOS AGREGADOS PETREOS PARA TRATAMIENTOS
Y MEZCLAS BITUMINOSAS**

TIPO DE TTO. O MEZCLA	PART. FRAC. MEC. (Agreg. Grueso)	DESGASTE LOS ANGELES	PERD. EN ENSAYO DE SOLIDEZ		ADHESIVIDAD				INDICES DE APLAN. Y ALARG.	COEFICIENTE PULIMENTO ACELERADO	I. P.	EQUIV. DE ARENA
			Sulf. de sodio	Sulf. de magne.	Riedel Webber	Stripping	Bandeja	Res. Cons. Inmcomp.				
Norma INV	E-227	E-218, E-219	E-220	E-220	E-774	E-737	E-740	E-738	E-230	E-232	E-125 E-126	E-133
SELLO DE ARENA ASFALTO			12 % máx.	18 % máx.	4 mín.						N.P.	50 % mín.
TTO. SUPERFICIAL SIMPLE Y DOBLE	75 % mín.	40 % máx.	12 % máx.	18 % máx.			80 % mín.		35 % máx.	0.45 mín.		
LECHADA ASFALTICA		35 % máx.	12 % máx.	18 % máx.	4 mín.						N.P.	50 % mín.
MEZCLA ABIERTA EN FRÍO	75 % mín.	35 % máx. (base) 30 % máx. (rodadura)	12 % máx.	18 % máx.		95 % mín.			35 % máx.	0.45 mín.(rodadura)		
MEZCLA DENSA EN FRÍO -Agregado Grueso -Agregado Fino -Gradación Combinada	75 % mín.	40 % máx. (base) 30 % máx. (rodadura)	12 % máx.	18 % máx.				75 % mín.	35 % máx.	0.45 mín.	N.P.	50 % mín..
MEZCLA ABIERTA EN CALIENTE	75 % mín.	35 % máx.	12 % máx.	18 % máx.		95 % mín.			35 % máx.			
MEZCLA DENSA EN CALIENTE -Agregado Grueso -Agregado Fino -Gradación Combinada	75 % mín.	40 % máx. (base) 30 % máx. (rodadura)	12 % máx.	18 % máx.				75 % mín.	35 % máx.	0.45 mín.	N.P.	50 % mín.
RECICLADO DEL PAVIMENTO EXISTENTE (Material de adición)	50 % mín.	40 % máx.	12 % máx.	18 % máx.					35 % máx.		N.P.	30 % mín. en frío, 50 % mín. en caliente

El llenante mineral podrá provenir de los procesos de trituración y clasificación de los agregados pétreos o podrá ser de aporte como producto comercial, generalmente cal hidratada o cemento portland. Su peso unitario aparente, determinado por el ensayo de sedimentación en tolueno (norma de ensayo INV E-225), deberá encontrarse entre cinco y ocho décimas de gramo por centímetro cúbico (0.5 y 0.8 g/cm³) y su coeficiente de emulsibilidad (norma INV E-776) deberá ser inferior a seis décimas (0.6).

La mezcla de los agregados grueso y fino y el llenante mineral deberá ajustarse a las exigencias de la respectiva especificación, en cuanto a su granulometría.

400.2.2 Cemento asfáltico

El cemento asfáltico a emplear en los riegos de liga y en las mezclas asfálticas elaboradas en caliente será de penetración 60-70 u 80-100, según las características climáticas de la región y las condiciones de operación de la vía, tal como lo indica la Tabla No.400.2.

TABLA No.400.2

**TIPO DE CEMENTO ASFALTICO POR EMPLEAR
EN MEZCLAS EN CALIENTE**

TRANSITO DE DISEÑO 10 ⁶ EJES DE 80 kN	TEMPERATURA MEDIA ANUAL DE LA REGION		
	24 °C+	15-24°C	15°C-
5+	60-70	60-70	80-100
0.5 a 5	60-70	60-70 u 80-00	80-100
0.5 -	60-70	60-70 u 80-00	80-100

Los requisitos de calidad del cemento asfáltico son los que establece la Tabla No.400.3.

El cemento asfáltico podrá modificarse mediante la adición de activantes, rejuvenecedores, polímeros, asfaltos naturales o cualquier otro producto sancionado por la experiencia. En tales casos, las especificaciones particulares establecerán el tipo de adición y las especificaciones que deberán cumplir tanto el ligante modificado como las mezclas asfálticas resultantes. La dosificación y dispersión homogénea del producto de adición deberán tener la aprobación del Interventor.

TABLA No.400.3**ESPECIFICACIONES DEL CEMENTO ASFALTICO**

CARACTERISTICA	NORMA DE ENSAYO INV	60-70		80-100	
		MIN	MAX	MIN	MAX
PENETRACION (25°C, 100 g, 5 s) 0.1mm	E-706	60	70	80	100
INDICE DE PENETRACION	E-724	-1	+1	-1	+1
PERDIDA POR CALENTAMIENTO EN PELICULA DELGADA (163°C, 5 h) %	E-721	-	1.0	-	1.0
DUCTILIDAD (25 °C, 5 cm/mín) cm.	E-702	100	-	100	-
PENETRACION DEL RESIDUO LUEGO DE LA PERDIDA POR CALENTAMIENTO, EN % DE LA PENETRACION ORIGINAL %		75	-	75	-
SOLUBILIDAD EN TRICLOROETILENO, %	E-713	99	-	99	-
CONTENIDO DE AGUA, %	E-704	-	0.2	-	0.2

400.2.3 Emulsiones asfálticas

De acuerdo con la aplicación y según lo establezca la respectiva especificación, se utilizarán emulsiones catiónicas de rotura rápida, media o lenta, cuyas características básicas se presentan en la Tabla No.400.4.

400.2.4 Aditivos mejoradores de adherencia

En caso de que los requisitos de adhesividad indicados en la Tabla No.400.1 no sean satisfechos, no se permitirá el empleo del agregado, salvo que se incorpore un producto mejorador de adherencia de calidad reconocida, en una proporción que deberá ser aprobada por el Interventor.

400.3 EQUIPO

Todos los equipos empleados deberán ser compatibles con los procedimientos de construcción adoptados y requieren la aprobación previa del Interventor teniendo en cuenta que su capacidad y eficiencia se ajusten al programa de ejecución de las obras y al cumplimiento de las exigencias de calidad de la presente especificación y de la correspondiente a la respectiva partida de trabajo.

TABLA No. 400.4. ESPECIFICACIONES PARA EMULSIONES CATIONICAS

TIPOS DE EMULSIONES		ROTURA RAPIDA				ROTURA MEDIA		ROTURA LENTA					
		CRR - 1		CRR - 2		CRM		CRL - 0		CRL - 1		CRL - 1h	
		Mín	Máx	Mín	Máx	Mín	Máx	Mín	Máx	Mín	Máx	Mín	Máx
1. ENSAYO SOBRE EMULSIONES													
Viscosidad	E-763												
• Saybolt Furol a 25 C Seg		20	100						50		200		100
• Saybolt Furol a 50 C Seg				20	300	20	450						
Contenido de agua en volumen %	E-761		40		35		35		50		43		43
Estabilidad Almacenamiento	E-764												
• Sedimentacion a los 7 días %			5		5		5		10		5		5
Destilación	E-762												
• Contenido de Asfalto Residual %		60		65		60		40		57		57	
• Contenido de disolventes %			3		3		12	10	20				0
Tamizado	E-765												
• Retenido T 20 (850 µm)			0.1		0.1		0.1		0.1		0.1		0.1
Rotura	E-766	40		40									
• Diocilsulfosuccinato sódico %													
• Mezcla con con cemento %	E-770												2
Carga Partícula	E-767	POSITIVA		POSITIVA		POSITIVA		POSITIVA		POSITIVA		POSITIVA	
pH	E-768		6		6		6		6		6		6
Recubrimiento del agregado y resistencia al desplazamiento	E-769												
• Con agregado seco						Buena							
• Con agregado seco y acción del agua						Satisfactoria							
• Con agregado húmedo						Satisfactoria							
• Con agregado húmedo y acción del agua						Satisfactoria							
2. ENSAYOS SOBRE RESIDUO DE DESTILACION													
Penetración (25°C,100gr,5seg) 0.1 mm.	E706	60	100	60	100	100	250	200	300	60	100	60	100
		100	250	100	250					100	250		
Ductilidad (25°C,5cm/m) cm.	E702	40		40		40		40		40		40	
Solubilidad en tetracloruro de Carbono %	E713	97		97		97		97		97		97	

400.4. EJECUCION DE LOS TRABAJOS

400.4.1 Explotación de materiales y elaboración de agregados

Las fuentes de materiales, así como los procedimientos y equipos utilizados para la explotación de aquellas y para la elaboración de los agregados requeridos, deberán tener aprobación previa del Interventor, la cual no implica necesariamente la aceptación posterior de los agregados que el Constructor suministre o elabore de tales fuentes, ni lo exime de la responsabilidad de cumplir con todos los requisitos de cada especificación.

Los procedimientos y equipos de explotación, clasificación, trituración, lavado y el sistema de almacenamiento, deberán garantizar el suministro de un producto de características uniformes. Si el Constructor no cumple con estos requerimientos, el Interventor exigirá los cambios que considere necesarios.

Todos los trabajos de clasificación de agregados y en especial la separación de partículas de tamaño mayor que el máximo especificado para cada gradación, se deberán ejecutar en el sitio de explotación o elaboración y no se permitirá efectuarlos en la vía.

Siempre que las condiciones lo permitan, los suelos orgánicos existentes en la capa superior de las canteras deberán ser conservados para la posterior recuperación de las excavaciones y de la vegetación nativa. Al abandonar las canteras temporales, el Constructor remodelará el terreno para recuperar las características hidrológicas superficiales de ellas.

400.4.2 Fórmulas de trabajo para mezclas asfálticas, tratamientos superficiales y lechadas asfálticas.

Antes de iniciar el acopio de los materiales, el Constructor deberá suministrar, para verificación del Interventor, muestras de ellos y del producto bituminoso por emplear y de los eventuales aditivos, avaladas por los resultados de los ensayos de laboratorio que garanticen la conveniencia de emplearlos en el tratamiento o mezcla. Una vez el Interventor efectúe las comprobaciones que considere convenientes y dé su aprobación a los ingredientes, el Constructor definirá una "fórmula de trabajo" que obligatoriamente deberá cumplir las exigencias establecidas en la especificación correspondiente. En dicha fórmula se consignará la granulometría de cada uno de los agregados pétreos y las proporciones en ellos que deben mezclarse, junto con el llenante mineral, para obtener la gradación aprobada.

En el caso de mezclas y lechadas asfálticas deberán indicarse, además, el porcentaje de ligante bituminoso en relación con el peso de la mezcla, y el porcentaje de aditivo, respecto al peso del ligante asfáltico, cuando su

incorporación resulte necesaria. Si la mezcla es en frío y requiere la incorporación de agua, deberá indicarse la proporción de ésta.

En el caso de mezclas en caliente también deberán señalarse:

- Los tiempos requeridos para la mezcla de agregados en seco y para la mezcla de los agregados con el ligante bituminoso.
- Las temperaturas máxima y mínima de calentamiento previo de los agregados y el ligante. En ningún caso se introducirán en el mezclador agregados pétreos a una temperatura que sea superior a la del ligante en más de quince grados Celsius (15 °C).
- Las temperaturas máximas y mínimas al salir del mezclador. La temperatura máxima no deberá exceder de ciento ochenta grados Celsius (180 °C), salvo en las plantas del tipo tambor secador-mezclador, en las que no deberá exceder de ciento sesenta y cinco grados Celsius (165 °C).
- La temperatura mínima de la mezcla en la descarga de los elementos de transporte.
- La temperatura mínima de la mezcla al inicio y terminación de la compactación.

Cuando se trate del diseño de una mezcla reciclada en caliente, la fórmula deberá señalar:

- Proporciones en que deben mezclarse los materiales recuperados del pavimento y el agregado nuevo, así como la granulometría resultante de su mezcla por los tamices correspondientes a la franja granulométrica aprobada.
- Tipo y porcentaje de ligante bituminoso nuevo en relación con el peso de la mezcla.
- Porcentaje requerido de agente rejuvenecedor en relación con el peso del asfalto envejecido.
- Porcentaje requerido de aditivo mejorador de adherencia en relación con el peso del ligante bituminoso nuevo.

Así mismo, se deberán indicar:

- Las temperaturas máximas y mínimas de calentamiento previo de agregados, pavimento recuperado, asfalto nuevo y agente rejuvenecedor.

- La temperatura mínima de la mezcla en la descarga de los elementos de transporte.
- La temperatura mínima de la mezcla al comenzar y terminar la compactación en el sitio de la obra.

Cuando se trate de tratamientos superficiales, el Constructor deberá informar al Interventor las cantidades de ligante asfáltico y agregados pétreos para los distintos riegos, incluyendo la posible incorporación de aditivos.

La aprobación definitiva de la fórmula de trabajo por parte del Interventor no exime al Constructor de su plena responsabilidad de alcanzar, con base en ella, la calidad exigida por la respectiva especificación.

La fórmula aprobada sólo podrá modificarse durante la ejecución de los trabajos, si las circunstancias lo aconsejan y previo el visto bueno del Interventor.

400.4.3 Fase de experimentación en mezclas nuevas o recicladas, tratamientos y lechadas asfálticas

Antes de iniciar los trabajos, el Constructor emprenderá una fase de experimentación para verificar el estado de los equipos y determinar, en secciones de ensayo de ancho y longitud definidas de acuerdo con el Interventor, el método definitivo de preparación, transporte, colocación y compactación de la mezcla o tratamiento, de manera que se cumplan los requisitos de la respectiva especificación.

En el caso de la construcción de lechadas asfálticas, el proceso no incluirá la etapa de compactación.

El Interventor tomará muestras del tratamiento, lechada o mezcla, para determinar su conformidad con las condiciones especificadas que correspondan en cuanto a granulometría, dosificación, densidad y demás requisitos.

En caso de que el trabajo elaborado no se ajuste a dichas condiciones, el Constructor deberá efectuar inmediatamente las correcciones requeridas en los equipos y sistemas o, si llega a ser necesario, en la fórmula de trabajo, repitiendo las secciones de ensayo una vez efectuadas las correcciones.

El Interventor determinará si es aceptable la ejecución de los tramos de prueba como parte integrante de la obra en construcción.

En el caso de mezclas nuevas o recicladas, el Interventor establecerá, durante la fase de experimentación, correlaciones entre los métodos corrientes de control de la dosificación del ligante y de la densidad en el terreno y otros métodos rápidos de control, tales como los que emplean permeámetros o isótopos radiactivos.

En el caso de tratamientos superficiales y lechadas asfálticas se definirán en esta fase sus tiempos de rotura y curado, con el fin de que se puedan tomar las previsiones necesarias en el control del tránsito público.

400.5 CONDICIONES PARA EL RECIBO DE LOS TRABAJOS

400.5.1 Controles

Durante la ejecución de los trabajos, el Interventor adelantará los siguientes controles principales:

- Verificar el estado y funcionamiento de todo el equipo empleado por el Constructor.
- Comprobar que los materiales por utilizar cumplan todos los requisitos de calidad exigidos en el aparte 400.2 y en la respectiva especificación.
- Supervisar la correcta aplicación del método aceptado como resultado de la fase de experimentación, en cuanto a la elaboración y manejo de los agregados, así como la manufactura, transporte, colocación y compactación de los tratamientos y mezclas asfálticas.
- Ejecutar ensayos de control de mezcla, de densidad de las probetas de referencia, de densidad de la mezcla asfáltica compactada in situ, de extracción de asfalto y granulometría; así como control de las temperaturas de mezclado, descargue, extendido y compactación de las mezclas (los requisitos de temperatura con aplicables sólo a las mezclas elaboradas en caliente).
- Efectuar ensayos de control de mezcla, extracción de asfalto y granulometría en lechadas asfálticas.
- Ejecutar ensayos para verificar las dosificaciones de agregados y ligante en tratamientos superficiales, así como la granulometría de aquellos.
- Efectuar ensayos para verificar las dosificaciones de ligante en riegos de liga e imprimaciones.
- Vigilar la regularidad en la producción de los agregados y mezclas o lechadas asfálticas durante el período de ejecución de las obras.
- Efectuar pruebas para verificar la eficiencia de los productos mejoradores de adherencia, siempre que ellos se incorporen.
- Realizar las medidas necesarias para determinar espesores, levantar perfiles, medir la textura superficial y comprobar la uniformidad de la superficie, siempre que ello corresponda.

El Constructor rellenará con mezcla asfáltica, a su costa, todos los orificios realizados con el fin de medir densidades en el terreno y compactará el material de manera que su densidad cumpla con los requisitos indicados en la respectiva especificación.

También cubrirá, sin costo para el Instituto Nacional de Vías, las áreas en las que el Interventor efectúe verificaciones de la dosificación de riegos de imprimación y liga, tratamientos superficiales y lechadas asfálticas.

400.5.2 Condiciones específicas para el recibo y tolerancias

Tanto las condiciones de recibo como las tolerancias para las obras ejecutadas, se indican en las especificaciones correspondientes. Todos los ensayos y mediciones requeridas para el recibo de los trabajos especificados, estarán a cargo del Interventor.

Aquellas áreas donde los defectos de calidad y las irregularidades excedan las tolerancias, deberán ser corregidas por el Constructor, a su costa, de acuerdo con las instrucciones del Interventor y a satisfacción de éste.

400.6 MEDIDA

400.6.1 Ejecución de riegos de imprimación y liga, sellos de arena-asfalto, tratamientos superficiales y lechadas asfálticas.

La unidad de medida será el metro cuadrado (m^2), aproximado al entero, de todo trabajo ejecutado a satisfacción del Interventor, de acuerdo por lo exigido con la especificación respectiva.

El área se determinará multiplicando la longitud real, medida a lo largo del eje del trabajo, por el ancho especificado en los planos u ordenado por el Interventor. No se medirá ningún área por fuera de tales límites.

400.6.2 Ejecución de mezclas densas y abiertas en frío y en caliente y reciclado de pavimentos

La unidad de medida será el metro cúbico (m^3), aproximado al décimo de metro cúbico, de mezcla suministrada y compactada en obra a satisfacción del Interventor, de acuerdo con lo exigido por la especificación respectiva.

El volumen se determinará multiplicando la longitud real, medida a lo largo del eje del trabajo, por el ancho y espesor especificados en los planos u ordenados por el Interventor. No se medirá ningún volumen por fuera de tales límites.

400.6.3 Ejecución de bacheos con mezcla asfáltica

La unidad de medida será el metro cúbico (m^3), aproximado al décimo de metro cúbico, de bacheo con mezcla asfáltica ejecutado a satisfacción del Interventor, de acuerdo con lo exigido por la especificación respectiva.

El volumen se determinará multiplicando la superficie en donde el Interventor haya autorizado el trabajo, por el espesor compacto promedio en que se haya colocado la mezcla, de acuerdo con la especificación respectiva.

400.7 FORMA DE PAGO

400.7.1 Ejecución de riegos de imprimación y liga, sellos de arena-asfalto, tratamientos superficiales y lechadas asfálticas.

El pago se hará al respectivo precio unitario del contrato, por metro cuadrado, para toda obra ejecutada de acuerdo con la respectiva especificación y aceptada a satisfacción por el Interventor.

En los casos en que el trabajo incluya el empleo de agregados pétreos, el precio unitario deberá cubrir todos los costos de su adquisición, obtención de permisos y derechos de explotación o alquiler de fuentes de materiales y canteras; la obtención de licencias ambientales, las instalaciones provisionales, los costos de arreglo o construcción de las vías de acceso a las fuentes y canteras; la preparación de las zonas por explotar, así como todos los costos relacionados con la explotación, selección, trituración, eventual lavado, suministro de los materiales pétreos, desperdicios, cargues, transportes, descargues, clasificación, colocación, mezcla (en el caso de lechadas asfálticas) y compactación de los materiales utilizados, en los casos en que ello corresponda.

También, deberá incluir los costos de adecuación paisajística de las fuentes para recuperar las características hidrológicas superficiales al terminar su explotación, así como los costos de la definición de la fórmula de trabajo cuando se requiera; los de la fase de experimentación; la señalización preventiva de la vía y el ordenamiento del tránsito automotor durante la ejecución de los trabajos y el período posterior en que deba impedirse o controlarse, de acuerdo con las instrucciones del Interventor.

En relación con los explosivos, el Constructor deberá considerar dentro del respectivo precio unitario, todos los costos que implican su adquisición, transporte, escoltas, almacenamiento, vigilancia, manejo y control hasta el sitio e instante de utilización.

La preparación de la superficie existente, salvo el barrido y soplado, se considera incluida en el ítem referente a la ejecución de la capa a la cual corresponde dicha superficie y, por lo tanto, no habrá lugar a pago separado por este concepto, a no ser que dicho ítem no haga parte del mismo contrato, caso en el cual el Constructor deberá considerar el costo de la preparación de la superficie existente dentro del ítem objeto del pago.

En todos los casos, el precio deberá incluir el suministro en el sitio, almacenamiento, desperdicios y aplicación de los materiales bituminosos, agua y aditivos mejoradores de adherencia y de control de rotura que se requieran; la protección de todos los elementos aledaños a la zona de los trabajos y que sean susceptibles de ser manchados por riegos de asfalto, así como toda labor, mano de obra, equipo o material necesarios para la correcta ejecución de los trabajos especificados.

Se exceptúa el costo de suministro, almacenamiento, desperdicios y aplicación de materiales bituminosos en las paredes de la excavación y la superficie sobre la que ha de colocarse mezcla asfáltica en operaciones de bacheo, el cual deberá incluirse dentro del precio unitario de dicha mezcla.

400.7.2 Ejecución de mezclas abiertas y densas en frío y en caliente y bacheos con mezcla asfáltica

El pago se hará al respectivo precio unitario del contrato, por metro cúbico, para toda obra ejecutada de acuerdo con la respectiva especificación y aceptada a satisfacción por el Interventor.

El precio unitario deberá incluir todos los costos de adquisición, obtención de permisos y derechos de explotación o alquiler de fuentes de materiales y canteras; obtención de licencias ambientales para la explotación de los agregados y la elaboración de las mezclas; las instalaciones provisionales, los costos de arreglo o construcción de las vías de acceso a las fuentes y canteras; la preparación de las zonas por explotar, así como todos los costos relacionados con la explotación, selección, trituración, eventual lavado, suministro de los materiales pétreos, desperdicios, elaboración de las mezclas, cargues, transportes y descargues de agregados y mezclas; así como la colocación, nivelación y compactación de las mezclas elaboradas.

En el caso de mezclas en frío, el precio unitario deberá incluir, también, los costos de extracción, bombeo, transporte, suministro y aplicación del agua requerida, así como el curado de las mezclas compactadas.

El precio unitario deberá incluir, además, los costos de adecuación paisajística de las fuentes para recuperar las características hidrológicas superficiales al terminar su explotación, así como los costos de la definición de la fórmula de trabajo, de la fase de experimentación y la señalización preventiva de la vía y el ordenamiento del tránsito automotor durante la ejecución de los trabajos y el período adicional que fije el Interventor.

En relación con los explosivos, el Constructor deberá considerar dentro del respectivo precio unitario, todos los costos que implican su adquisición, transporte, escoltas, almacenamiento, vigilancia, manejo y control hasta el sitio e instante de utilización.

Con excepción del barrido y soplado de la superficie, se considera que la preparación de la superficie existente se encuentra incluida dentro del ítem referente a la ejecución de la capa a la cual corresponde dicha superficie y, por lo

tanto, no habrá lugar a pago separado por este concepto, a no ser que dicho ítem no haga parte del mismo contrato, caso en el cual el Constructor deberá considerar el costo de la preparación de la superficie existente dentro del ítem objeto del pago.

El precio unitario también deberá incluir el suministro y aplicación del asfalto para la pintura de adherencia en las juntas de pavimento y en las caras verticales y superficie sobre la cual se colocará mezcla asfáltica durante el relleno de las excavaciones para reparación del pavimento existente (bacheo) y, en general, todo costo relacionado con la correcta construcción de la capa respectiva.

Se excluyen del precio unitario el suministro y almacenamiento del producto asfáltico para la mezcla, el cual se pagará de acuerdo con la especificación respectiva. En caso de requerirse aditivos mejoradores de adherencia, su costo deberá estar incluido en el precio unitario de la mezcla.

Las excavaciones para la reparación del pavimento existente se pagarán de acuerdo con el Artículo 413.

400.7.3 Ejecución de reciclado de pavimentos asfálticos

El pago se hará al precio unitario del contrato, por metro cúbico, por toda obra ejecutada de acuerdo con la respectiva especificación y aceptada a satisfacción por el Interventor.

En los casos en que el trabajo requiera la incorporación de agregados pétreos nuevos, el precio unitario deberá incluir todos los costos de adquisición, obtención de permisos y derechos de explotación o alquiler de fuentes de materiales y canteras; obtención de licencias ambientales para la explotación de los agregados y la elaboración de las mezclas; las instalaciones provisionales, los costos de arreglo o construcción de las vías de acceso a las fuentes y canteras; la preparación de las zonas por explotar, así como todos los costos relacionados con la explotación, selección, trituración, eventual lavado, cargues, transporte, descargues y suministro de los agregados pétreos en el sitio de las obras y los eventuales desperdicios.

En el caso de reciclado de pavimentos en frío, el precio unitario deberá incluir todos los costos por concepto de cortar y disgregar las capas asfálticas y granulares. También, deberá incluir la extracción, bombeo, transporte, suministro, aplicación y mezcla del agua requerida, según se haya definido en la fórmula de trabajo, o la eventual aireación de la mezcla preparada; así como la aplicación y mezcla de la emulsión asfáltica, la extensión de la mezcla elaborada, su nivelación, compactación y el suministro y aplicación de la emulsión y arena requeridas para los riegos de curado; el retiro y disposición final de sobre tamaños y, en general, todo costo relacionado con la correcta ejecución del reciclado en frío del pavimento.

En el caso de reciclado de pavimentos en caliente, el precio unitario deberá incluir todos los costos por concepto de disgregar las capas asfálticas y granulares en el espesor indicado en los documentos del proyecto, así como su cargue y transporte

a la planta de mezcla, su trituración y clasificación y la disposición de desperdicios. Deberá incluir, además, todos los costos relacionados con la obtención y suministro del llenante mineral requerido de acuerdo con lo que establezca la fórmula de trabajo mencionada en el aparte 400.7.2 de este Artículo, así como su mezcla en la planta con los materiales reciclados.

El precio unitario del reciclado de pavimentos en caliente deberá incluir, también, todos los costos de suministro e incorporación de los mejoradores de adherencia que se requieran y los de incorporación del cemento asfáltico nuevo y de los agentes rejuvenecedores que sean necesarios para recuperar las propiedades del asfalto incluido en la mezcla disgregada; así como los correspondientes a cargues, almacenamiento, transportes, descargues, desperdicios, extensión y compactación de la mezcla reciclada; el suministro y aplicación del asfalto para la pintura de adherencia en las juntas del pavimento y en las caras verticales y superficie sobre la cual se colocará mezcla asfáltica reciclada en caliente durante el relleno de las excavaciones para reparación del pavimento existente (bacheo). Formarán parte del precio unitario, tanto de los reciclados en frío como en caliente, los costos de adecuación paisajística de las fuentes que se hayan explotado para la obtención de los agregados nuevos, de manera de recuperar las características hidrológicas superficiales al terminar su explotación, así como todos los costos relacionados con la señalización preventiva de la vía y el ordenamiento del tránsito automotor durante la ejecución de los trabajos y el período adicional que fije el Interventor.

En relación con los explosivos, resulta aplicable todo lo pertinente del numeral 400.7.2 del presente Artículo.

Se excluye del precio unitario el suministro del cemento asfáltico o la emulsión asfáltica, el cual se pagará de acuerdo con lo que establecen los Artículos 410 y 411, respectivamente, de las presentes especificaciones.

También se excluye el costo del suministro del agente rejuvenecedor del asfalto para el reciclado de mezclas en caliente, cuando éste se requiera, el cual se pagará de acuerdo con la especificación particular respectiva.

Las excavaciones requeridas para la reparación del pavimento existente, se pagarán de acuerdo con el Artículo 413 de las presentes especificaciones.

ANEXO C. ARTÍCULO 450

MEZCLA DENSA EN CALIENTE (CONCRETO ASFALTICO)

450.1 DESCRIPCION

Este trabajo consiste en la elaboración, transporte, colocación y compactación, de una o más capas de mezcla asfáltica de tipo denso, preparada en caliente, de acuerdo con esta especificación y de conformidad con los alineamientos, cotas, secciones y espesores indicados en los planos o determinados por el Interventor.

450.2 MATERIALES

450.2.1 Agregados pétreos y llenante mineral. Los agregados pétreos y el llenante mineral para la elaboración de mezclas densas en caliente (concreto asfáltico) deberán satisfacer los requisitos de calidad impuestos para ellos por el aparte 400.2.1 del Artículo 400.

El conjunto de agregado grueso, agregado fino y llenante mineral deberá ajustarse a alguna de las siguientes gradaciones:

TAMIZ		PORCENTAJE QUE PASA		
Normal	Alterno	MDC-1	MDC-2	MDC-3
25.0 mm	1"	100	-	-
19.0 mm	3/4"	80-100	100	-
12.5 mm	1/2"	67-85	80-100	-
9.5 mm	3/8"	60-77	70-88	100
4.75 mm	No.4	43-54	51-68	65-87
2.00 mm	No.10	29-45	38-52	43-61
425 µm	No.40	14-25	17-28	16-29
180 µm	No.80	8-17	8-17	9-19
75 µm	No.200	4-8	4-8	5-10

Para prevenir segregaciones y garantizar los niveles de compactación y resistencia exigidos por al presente especificación, el material que produzca el Constructor deberá dar lugar a una curva granulométrica uniforme, sensiblemente paralela a los límites de la franja por utilizar, sin saltos bruscos de la parte superior de un tamiz a la inferior del tamiz adyacente y viceversa.

En la construcción de bases asfálticas y bacheos, se empleará la gradación MDC-1. Para capas de rodadura, se empleará la gradación MDC-3, si el espesor compacto no supera tres centímetros (3 cm) y la MDC-2 para espesores

superiores. Para espesores mayores de cinco centímetros (5 cm), podrá emplearse también la gradación MDC-1.

450.2.2 Material bituminoso. El material bituminoso para elaborar la mezcla densa en caliente será cemento asfáltico del grado de penetración que corresponda, de acuerdo a las recomendaciones de la Tabla No.400.2 del Artículo 400. Su calidad deberá estar conforme a lo establecido en la Tabla No.400.3 del mismo Artículo.

450.2.3 Aditivos mejoradores de adherencia. Cuando se requieran, deberán ajustarse a lo descrito en el aparte 400.2.4 del Artículo 400 y en el Artículo 412 de las presentes especificaciones.

450.3 EQUIPO

Al respecto, se aplica lo indicado en el numeral 400.3 del Artículo 400. En relación con el detalle del equipo necesario para la ejecución de los trabajos, se tendrá en cuenta lo que se indica a continuación.

450.3.1 Equipo para la elaboración de los agregados triturados. Rige lo indica en el aparte 440.3.1 del Artículo 440.

450.3.2 Planta mezcladora. La mezcla de concreto asfáltico se fabricará en plantas adecuadas de tipo continuo o discontinuo, capaces de manejar simultáneamente en frío el número de agregados que exija la fórmula de trabajo adoptada.

Las plantas productoras de mezcla asfáltica deberán cumplir con lo establecido en la reglamentación vigente sobre protección y control de calidad del aire y para su funcionamiento se deberá presentar al Instituto Nacional de Vías, la correspondiente autorización expedida por la entidad nacional o regional encargada de otorgar tales permisos.

Las tolvas de agregados en frío deberán tener paredes resistentes y estar provistas de dispositivos de salida que puedan ser ajustados exactamente y mantenidos en cualquier posición. El número mínimo de tolvas será función del número de fracciones de agregados por emplear y deberá tener aprobación del Interventor.

En las plantas del tipo tambor secador-mezclador, el sistema de dosificación de agregados en frío deberá ser ponderal y tener en cuenta su humedad para corregir la dosificación en función de ella. En los demás tipos de plantas de aceptarán sistemas de dosificación de tipo volumétrico.

La planta estará dotada de un secador que permita el secado correcto de los agregados y su calentamiento a la temperatura adecuada para la fabricación de la mezcla. El sistema de extracción de polvo deberá evitar su emisión a la atmósfera o el vertido de lodos a cauces de agua o instalaciones sanitarias.

Las plantas que no sean del tipo tambor secador-mezclador, estarán dotadas, asimismo, de un sistema de clasificación de los agregados en caliente, de capacidad adecuada a la producción del mezclador, en un número de fracciones no inferior a tres (3) y de tolvas de almacenamiento de las mismas, cuyas paredes serán resistentes y de altura suficiente para evitar intercontaminaciones. Dichas tolvas en caliente estarán dotadas de un rebosadero, para evitar que el exceso de contenido se vierta en las contiguas o afecte el funcionamiento del sistema de clasificación; de un dispositivo de alarma, claramente perceptible por el operador, que avise cuando el nivel de la tolva baje del que proporcione el caudal calibrado y de un dispositivo para la toma de muestras de las fracciones almacenadas.

La instalación deberá estar provista de indicadores de la temperatura de los agregados, situados a la salida del secador y en las tolvas en caliente.

El sistema de almacenamiento, calefacción y alimentación del asfalto deberá permitir su recirculación y su calentamiento a la temperatura de empleo.

En el calentamiento del asfalto se emplearán, preferentemente, serpentines de aceite o vapor, evitándose en todo caso el contacto del ligante con elementos metálicos de la caldera que estén a temperatura muy superior a la de almacenamiento. Todas las tuberías, bombas, tanques, etc., deberán estar provistos de dispositivos calefactores o aislamientos. La descarga de retorno del ligante a los tanques de almacenamiento será siempre sumergida. Se dispondrán termómetros en lugares convenientes, para asegurar el control de la temperatura del ligante, especialmente en la boca de salida de éste al mezclador y en la entrada del tanque de almacenamiento. El sistema de circulación deberá estar provisto de una toma para el muestreo y comprobación de la calibración del dispositivo de dosificación.

En caso de que se incorporen aditivos a la mezcla, la instalación deberá poseer un sistema de dosificación exacta de los mismos.

La instalación estará dotada de sistemas independientes de almacenamiento y alimentación del llenante de recuperación y adición, los cuales deberán estar protegidos contra la humedad.

Las instalaciones de tipo discontinuo deberán estar provistas de dispositivos de dosificación por peso cuya exactitud sea superior al medio por ciento (0.5%). Los dispositivos de dosificación del llenante y ligante tendrán, como mínimo, una sensibilidad de medio kilogramo (0.5 kg). El ligante deberá ser distribuido uniformemente en el mezclador, y las válvulas que controlan su entrada no deberán permitir fugas ni goteos.

En las instalaciones de tipo continuo, las tolvas de agregados clasificados calientes deberán estar provistas de dispositivos de salida, que puedan ser ajustados exactamente y mantenidos en cualquier posición. Estos dispositivos deberán ser calibrados antes de iniciar la fabricación de cualquier tipo de mezcla, en condiciones reales de funcionamiento.

El sistema dosificador del ligante deberá disponer de dispositivos para su calibración a la temperatura y presión de trabajo. En las plantas de mezcla continua, deberá estar sincronizado con la alimentación de los agregados pétreos y el llenante mineral.

En las plantas continuas con tambor secador-mezclador se deberá garantizar la difusión homogénea del asfalto y que ésta se realice de manera que no exista ningún riesgo de contacto con la llama ni de someter al ligante a temperaturas inadecuadas. En las instalaciones de tipo continuo, el mezclador será de ejes gemelos.

Si la planta posee tolva de almacenamiento de la mezcla elaborada, su capacidad deberá garantizar el flujo normal de los vehículos de transporte.

450.3.3 Equipo para el transporte. Tanto los agregados como las mezclas se transportarán en volquetas debidamente acondicionadas para tal fin. La forma y altura del platón será tal, que durante el vertido en la terminadora, la volqueta sólo toque a ésta a través de los rodillos previstos para ello.

Las volquetas deberán estar siempre provistas de una lona o cobertor adecuado, debidamente asegurado, tanto para proteger los materiales que transporta, como para prevenir emisiones contaminantes.

450.3.4 Equipo para la extensión de la mezcla. La extensión y terminación de concretos asfálticos producidos en planta se hará con pavimentadoras autopropulsadas, de las mismas características que las descritas en el aparte 440.3.4 del Artículo 440.

450.3.5 Equipo de compactación. Se deberán utilizar compactadores autopropulsados de cilindros metálicos, estáticos o vibratorios, triciclos o tándem, de neumáticos o mixtos. El equipo de compactación será aprobado por el Interventor, a la vista de los resultados obtenidos en la fase de experimentación. Todos los compactadores deberán ser autopropulsados y estar dotados de inversores de marcha suaves; además, estarán dotados de dispositivos para la limpieza de las llantas o neumáticos durante la compactación y para mantenerlos húmedos en caso necesario.

Los compactadores de rodillos no deberán presentar surcos ni irregularidades. Los compactadores vibratorios dispondrán de dispositivos para eliminar la vibración al invertir la marcha, siendo aconsejable que el dispositivo sea automático. Los de neumáticos tendrán ruedas lisas, en número, tamaño y disposición tales, que permitan el traslape de las huellas delanteras y traseras y, en caso necesario, faldones de lona protectora contra el enfriamiento de los neumáticos.

Las presiones lineales estáticas o dinámicas, y las presiones de contacto de los diversos compactadores, serán las necesarias para conseguir la compacidad adecuada y homogénea de la mezcla en todo su espesor, pero sin producir roturas del agregado ni arrollamiento de la mezcla a las temperaturas de compactación.

450.3.6 Equipo accesorio. Estará constituido por elementos para limpieza, preferiblemente barredora o sopladora mecánica. Así mismo, se requieren herramientas menores para efectuar correcciones localizadas durante la extensión de la mezcla.

450.4 EJECUCION DE LOS TRABAJOS

450.4.1 Explotación de materiales y elaboración de agregados. Rige lo indicado en el aparte 400.4.1 del Artículo 400.

450.4.2 Diseño de la mezcla y obtención de la fórmula de trabajo. Rige todo lo que resulte aplicable del aparte 400.4.2 del Artículo 400.

Las mezclas densas en caliente se diseñarán, salvo justificación en contrario, siguiendo el método Marshall y aplicando los siguientes criterios:

CARACTERISTICAS	TRANSITO DE DISEÑO (N) Ejes equivalentes de 80 kN		
	>5 x 10 ⁶	5x10 ⁵ -5x10 ⁶	<5 x 10 ⁵
Compactación, golpes/cara	75	75	75
Estabilidad mínima, kg	750	650	500
Flujo, mm	2-3.5	2-4	2-4
Vacíos con aire:			
Capa de rodadura %	4-6	3-5	3-5
Base asfáltica %	4-8	3-8	3-8
Vacíos mínimos en agregados minerales:			
Gradación MDC-1 %	14	14	14
Gradación MDC-2 %	15	15	15
Gradación MDC-3 %	16	16	16

Además la relación llenante/ligante de la mezcla óptima deberá encontrarse cerca de los siguientes valores debiendo verificarse, sin embargo, que la concentración del llenante no supere el valor crítico, según la norma INV E-745

TEMPERATURA MEDIA ANUAL (Grados Celsius)	EJES EQUIVALENTES DE 80 kN	
	$\geq 5 \times 10^6$	$< 5 \times 10^6$
> 15	1.2	1.1
≤ 15	1.1	1.0

La fórmula de trabajo establecida en el laboratorio se ajustará con los resultados de las pruebas realizadas durante la fase de experimentación.

450.4.3 Preparación de la superficie existente. La mezcla no se extenderá hasta que se compruebe que la superficie sobre la cual se va a colocar tenga la densidad apropiada y las cotas indicadas en los planos o definidas por el Interventor. Todas las irregularidades que excedan de las tolerancias establecidas en la especificación respectiva, deberán ser corregidas de acuerdo con lo establecido en ella.

Si la extensión de la mezcla necesita riegos previos de imprimación o de liga, ellos se realizarán conforme lo establecen los Artículos 420 y 421, respectivamente, de las presentes especificaciones.

Antes de aplicar la mezcla, se verificará que haya ocurrido el curado del riego previo, no debiendo quedar restos de fluidificante ni de agua en la superficie. Si hubiera transcurrido mucho tiempo desde la aplicación del riego, se comprobará que su capacidad de liga con la mezcla no se haya mermado en forma perjudicial; si ello ha sucedido, el Constructor deberá efectuar un riego adicional de adherencia, a su costa, en la cuantía que fije el Interventor.

Las excavaciones para bacheo, así como las operaciones de relleno con los materiales adecuados para restablecer el nivel actual, se ejecutarán de acuerdo con las indicaciones del Artículo 413 para la excavación y de los Artículos que correspondan a los materiales empleados en el relleno de la misma.

450.4.4 Fase de experimentación Rige lo indicado en el aparte 400.4.3 del Artículo 400.

450.4.5 Elaboración de la mezcla. Los agregados se suministrarán fraccionados. El número de fracciones deberá ser tal que sea posible, con la instalación que se utilice, cumplir las tolerancias exigidas en la granulometría de la mezcla. Cada fracción será suficientemente homogénea y deberá poderse acopiar y manejar sin peligro de segregación, observando las precauciones que se detallan a continuación.

Cada fracción del agregado se acopiará separada de las demás para evitar intercontaminaciones. Si los acopios se disponen sobre el terreno natural, no se utilizarán los quince centímetros (15 cm) inferiores de los mismos. Los acopios se construirán por capas de espesor no superior a un metro y medio (1.5 m), y no por montones cónicos. Las cargas del material se colocarán adyacentes, tomando las medidas oportunas para evitar su segregación.

Cuando se detecten anomalías en el suministro, los agregados se acopiarán por separado, hasta confirmar su aceptabilidad. Esta misma medida se aplicará cuando se autorice el cambio de procedencia de un agregado.

La carga de las tolvas en frío se realizará de forma que éstas contengan entre el cincuenta por ciento (50%) y el cien por ciento (100%) de su capacidad, sin rebosar. En las operaciones de carga se tomarán las precauciones necesarias para evitar segregaciones o contaminaciones.

Las aberturas de salida de las tolvas en frío se regularán en forma tal, que la mezcla de todos los agregados se ajuste a la fórmula de obra de la alimentación en frío. El caudal total de esta mezcla en frío se regulará de acuerdo con la producción prevista, no debiendo ser ni superior ni inferior, lo que permitirá mantener el nivel de llenado de las tolvas en caliente a la altura de calibración.

Los agregados se calentarán antes de su mezcla con el asfalto. El secador se regulará de forma que la combustión sea completa, indicada por la ausencia de humo negro en el escape de la chimenea. Si el polvo recogido en los colectores cumple las condiciones exigidas al llenante y su utilización está prevista, se podrá introducir en la mezcla; en caso contrario, deberá eliminarse. El tiro de aire en el secador se deberá regular de forma adecuada, para que la cantidad y la granulometría del llenante recuperado sean uniformes. La dosificación del llenante de recuperación y/o el de aporte se hará de manera independiente de los agregados y entre sí.

En las plantas que no sean del tipo tambor secador-mezclador, deberá comprobarse que la unidad clasificadora en caliente proporcione a las tolvas en caliente agregados homogéneos; en caso contrario, se tomarán las medidas necesarias para corregir la heterogeneidad. Las tolvas en caliente de las plantas continuas deberán mantenerse por encima de su nivel mínimo de calibración, sin rebosar.

Los agregados preparados como se ha indicado anteriormente, y eventualmente el llenante mineral seco, se pesarán o medirán exactamente y se transportarán al mezclador en las proporciones determinadas en la fórmula de trabajo.

Si la instalación de fabricación de la mezcla es de tipo continuo, se introducirá en el mezclador al mismo tiempo, la cantidad de asfalto requerida, a la temperatura apropiada, manteniendo la compuerta de salida a la altura que proporcione el tiempo teórico de mezcla especificado. La tolva de descarga se abrirá intermitentemente para evitar segregaciones en la caída de la mezcla a la volqueta.

Si la instalación es de tipo discontinuo, después de haber introducido en el mezclador los agregados y el llenante, se agregará automáticamente el material bituminoso calculado para cada bachada, el cual deberá encontrarse a la temperatura adecuada y se continuará la operación de mezcla durante el tiempo especificado.

En ningún caso se introducirá en el mezclador el agregado caliente a una temperatura superior en más de quince grados Celsius (15°C) a la temperatura del asfalto.

En el momento de la mezcla, la temperatura del asfalto deberá ser tal, que su viscosidad se encuentre entre ciento cincuenta y trescientos centiStokes (150 cSt - 300 cSt), verificándose que no se produzcan escurrimientos a dicha temperatura.

En mezcladores de ejes gemelos, el volumen de materiales no será tan grande que sobrepase los extremos de las paletas, cuando éstas se encuentren en posición vertical, siendo recomendable que no superen los dos tercios ($2/3$) de su altura.

A la descarga del mezclador, todos los tamaños del agregado deberán estar uniformemente distribuidos en la mezcla y sus partículas total y homogéneamente cubiertas. La temperatura de la mezcla al salir del mezclador no excederá de la fijada durante la definición de la fórmula de trabajo.

Se rechazarán todas las mezclas heterogéneas, carbonizadas o sobrecalentadas, las mezclas con espuma, o las que presenten indicios de humedad. En este último caso, se retirarán los agregados de las correspondientes tolvas en caliente. También se rechazarán aquellas mezclas en las que la envuelta no sea perfecta.

450.4.6 Transporte de la mezcla. La mezcla se transportará a la obra en volquetas hasta una hora de día en que las operaciones de extensión y compactación se puedan realizar correctamente con luz solar. Sólo se permitirá el trabajo en horas de la noche si, a juicio del Interventor, existe una iluminación artificial que permita la extensión y compactación de manera adecuada.

Durante el transporte de la mezcla deberán tomarse las precauciones necesarias para que al descargarla sobre la máquina pavimentadora, su temperatura no sea inferior a la mínima que se determine como aceptable durante la fase de experimentación.

450.4.7 Extensión de la mezcla. La mezcla se extenderá con la máquina pavimentadora, de modo que se cumplan los alineamientos, anchos y espesores señalados en los planos o determinados por el Interventor.

A menos que se ordene otra cosa, la extensión comenzará a partir del borde de la calzada en las zonas por pavimentar con sección bombeada, o en el lado inferior en las secciones peraltadas. La mezcla se colocará en franjas del ancho apropiado para realizar el menor número de juntas longitudinales, y para conseguir la mayor continuidad de las operaciones de extendido, teniendo en cuenta el ancho de la sección, las necesidades del tránsito, las características de la pavimentadora y la producción de la planta.

La colocación de la mezcla se realizará con la mayor continuidad posible, verificando que la pavimentadora deje la superficie a las cotas previstas con el

objeto de no tener que corregir la capa extendida. En caso de trabajo intermitente, se comprobará que la temperatura de la mezcla que quede sin extender en la tolva o bajo la pavimentadora no baje de la especificada; de lo contrario, deberá ejecutarse una junta transversal. Tras la pavimentadora se deberá disponer un número suficiente de obreros especializados, agregando mezcla caliente y enrasándola, según se precise, con el fin de obtener una capa que, una vez compactada, se ajuste enteramente a las condiciones impuestas en esta especificación.

En los sitios en los que a juicio del Interventor no resulte posible el empleo de máquinas pavimentadoras, la mezcla podrá extenderse a mano. La mezcla se descargará fuera de la zona que se vaya a pavimentar, y distribuirá en los lugares correspondientes por medio de palas y rastrillos calientes, en una capa uniforme y de espesor tal que, una vez compactada, se ajuste a los planos o instrucciones del Interventor, con las tolerancias establecidas en la presente especificación.

No se permitirá la extensión y compactación de la mezcla en momentos de lluvia, ni cuando haya fundado temor de que ella ocurra o cuando la temperatura ambiente a la sombra y la del pavimento sean inferiores a cinco grados Celsius (5°C).

450.4.8 Compactación de la mezcla. La compactación deberá comenzar, una vez extendida la mezcla, a la temperatura más alta posible con que ella pueda soportar la carga a que se somete sin que se produzcan agrietamientos o desplazamientos indebidos.

La compactación deberá empezar por los bordes y avanzar gradualmente hacia el centro, excepto en las curvas peraltadas en donde el cilindrado avanzará del borde inferior al superior, paralelamente al eje de la vía y traslapando a cada paso en la forma aprobada por el Interventor, hasta que la superficie total haya sido compactada. Los rodillos deberán llevar su llanta motriz del lado cercano a la pavimentadora, excepto en los casos que autorice el Interventor, y sus cambios de dirección se harán sobre la mezcla ya compactada.

Se tendrá cuidado en el cilindrado para no desplazar los bordes de la mezcla extendida; aquellos que formarán los bordes exteriores del pavimento terminado, serán chaflanados ligeramente.

La compactación se deberá realizar de manera continua durante la jornada de trabajo y se complementará con el trabajo manual necesario para la corrección de todas las irregularidades que se puedan presentar. Se cuidará que los elementos de compactación estén siempre limpios y, si es preciso, húmedos. No se permitirán, sin embargo, excesos de agua.

La compactación se continuará mientras la mezcla se encuentre en condiciones de ser compactada hasta alcanzar la densidad especificada y se concluirá con un apisonado final que borre las huellas dejadas por los compactadores precedentes.

450.4.9 Juntas de trabajo. Resulta aplicable lo indicado en el aparte 440.4.9 del Artículo 440.

450.4.10 Pavimento sobre puentes y viaductos. Las losas de los puentes se pavimentarán con una mezcla densa en caliente de la calidad exigida para la capa de rodadura, previa aplicación del riego de liga mencionado en el aparte 450.4.3, "Preparación de la superficie existente", de esta especificación.

Durante la ejecución del riego de liga y de la pavimentación, el Constructor deberá defender con lonas, papel o similares, todas aquellas partes de los puentes que puedan ser alcanzadas por el material bituminoso. El Constructor será responsable por todo daño que causen las operaciones de sus equipos y, en consecuencia, los trabajos de reparación y limpieza correrán por su cuenta.

450.4.11 Bacheos. Al respecto, se aplica todo lo indicado en el aparte 440.4.11 del Artículo 440.

450.4.12 Apertura al tránsito. Alcanzada la densidad exigida, el tramo pavimentado podrá abrirse al tránsito tan pronto la capa alcance la temperatura ambiente.

450.4.13 Reparaciones. Rige lo especificado en el aparte 440.4.13 del Artículo 440.

450.5 CONDICIONES PARA EL RECIBO DE LOS TRABAJOS

450.5.1 Controles. Rige lo que resulte aplicable del aparte 400.5.1 del Artículo 400.

450.5.2 Condiciones específicas para el recibo y tolerancias

450.5.2.1 Calidad del cemento asfáltico. Al respecto, se deberán aplicar todas las indicaciones incluidas en el aparte 410.5 del Artículo 410 de las presentes especificaciones.

450.5.2.2 Calidad de los agregados pétreos y el llenante mineral. Deberán aplicarse todas las exigencias del aparte 440.5.2.3 del Artículo 440.

450.5.2.3 Composición de la mezcla

a. Contenido de asfalto

Al respecto, se aplicarán los mismos criterios establecidos en el aparte 440.5.2.4.a. de las presentes especificaciones.

b. Granulometría de los agregados

Sobre las muestras utilizadas para hallar el contenido de asfalto, se determinará la composición granulométrica de los agregados.

La curva granulométrica de cada ensayo individual deberá ser sensiblemente paralela a los límites de la franja adoptada, ajustándose a la fórmula de trabajo con las tolerancias que se indican a continuación, pero sin permitir que la curva se salga de la franja:

Porcentaje que pasa el tamiz de 4.75 mm (No.4) y mayores agregados $\pm 4\%$ sobre el peso seco de los agregados

Porcentaje que pasa por tamices de 2mm (No.10), de 425 μm (No.40) y de 180 μm (No.80) agregados $\pm 3\%$ sobre el peso seco de los agregados

Porcentaje que pasa el tamiz de 75 μm (No.200) agregados $\pm 1\%$ sobre el peso seco de los agregados

En el caso que los valores obtenidos excedan las tolerancias, pero no salgan de la franja, el Constructor deberá preparar en el laboratorio una mezcla con la gradación defectuosa y el porcentaje medio de asfalto de la mezcla elaborada con este agregado. Ella se someterá a las pruebas de valoración descritas en el aparte 450.4.2 de esta especificación. Si los requisitos allí indicados no se cumplen, se rechazará el tramo representado por esa muestra.

450.5.2.4 Calidad de la mezcla

a. Resistencia. Con un mínimo de dos (2) muestras se moldearán probetas (dos por muestra), para verificar en el laboratorio su resistencia en el ensayo Marshall (INV E-748).

La estabilidad media de las cuatro (4) probetas (E_m) deberá ser como mínimo, igual al noventa por ciento (90%) de la estabilidad de la mezcla de la fórmula de trabajo (E_t).

$$E_m \geq 0.9 E_t$$

Además, la estabilidad de cada probeta (E_i) deberá ser igual o superior a ochenta por ciento (80%) del valor medio de estabilidad, admitiéndose solo un valor individual por debajo de ese límite.

$$E_i \geq 0.8 E_m$$

El incumplimiento de alguna de estas exigencias acarrea el rechazo del tramo representado por las muestras.

d. Flujo. El flujo medio de las probetas sometidas al ensayo de estabilidad (F_m) deberá encontrarse entre el ochenta y cinco por ciento (85%) y el ciento quince por ciento (115%) del valor obtenido en la mezcla aprobada como fórmula de trabajo (F_t), pero no se permitirá que su valor se encuentre por fuera de los límites establecidos en el aparte 450.4.2.

$$0.85 F_t \leq F_m \leq 1.15 F_t$$

Si el flujo medio se encuentra dentro del rango establecido en el aparte 450.4.2, pero no satisface la exigencia recién indicada en relación con el valor obtenido al determinar la fórmula de trabajo, el Interventor decidirá, al compararlo con las estabilidades, si el tramo debe ser rechazado o aceptado.

450.5.2.5 Calidad del producto terminado. La capa terminada deberá presentar una superficie uniforme y ajustarse a las rasantes y pendientes establecidas. La distancia entre el eje del proyecto y el borde de la capa que se esté construyendo, excluyendo sus chaflanes, no podrá ser menor que la señalada en los planos o la determinada por el Interventor. La cota de cualquier punto de la mezcla densa compactada en capas de base o rodadura, no deberá variar en más de diez milímetros (10 mm) de la proyectada.

Además, el Interventor estará obligado a efectuar las siguientes verificaciones:

a. Compactación. Las determinaciones de densidad de la capa compactada se realizarán en una proporción de cuando menos una (1) por cada doscientos cincuenta metros cuadrados (250 m^2) y los tramos por aprobar se definirán sobre la base de un mínimo de seis (6) determinaciones de densidad. Los sitios para las mediciones se elegirán al azar.

La densidad media del tramo (D_m) deberá ser, cuando menos, el noventa y ocho por ciento (98%) de la media obtenida al compactar en el laboratorio con la técnica Marshall, las cuatro (4) probetas por jornada de trabajo (D_e), que se indicaron en el aparte 450.5.2.4.a. de esta especificación.

$$D_m \geq 0.98 D_e$$

Además, la densidad de cada testigo individual (D_i) deberá ser mayor o igual al noventa y siete por ciento (97%) de la densidad media de los testigos del tramo (D_m), admitiéndose un (1) solo valor defectuoso por tramo.

$$D_i \geq 0.97 D_m$$

El incumplimiento de alguno de estos dos requisitos implica el rechazo del tramo por parte del Interventor.

La toma de muestras testigo se hará de acuerdo con norma INV E-758 y las densidades se determinarán por alguno de los métodos indicados en las normas INV E-734, E-735 y E-746.

b. Espesor, lisura, textura, rugosidad y construcción de capas de renivelación

En relación con estos aspectos, resultan aplicables, en todo, los requisitos establecidos en los literales b., c., d., e. y f. respectivamente, del aparte 440.5.2.6 del Artículo 440 de estas especificaciones.

Todas las áreas de mezcla densa en caliente colocada y compactada, donde los defectos de calidad y terminación excedan las tolerancias de esta especificación, así como aquellas en que se presente retención de agua en la superficie, deberán ser corregidas por el Constructor, a su costa, de acuerdo con las instrucciones del Interventor y a plena satisfacción de éste.

450.6 MEDIDA

Rige lo descrito en el aparte 400.6.2 del Artículo 400. Para bacheos, se aplicará lo especificado en el aparte 400.6.3 del mismo Artículo.

450.7 FORMA DE PAGO

Rige lo descrito en el aparte 400.7.2 del Artículo 400.

ITEM DE PAGO

450.1 Mezcla densa en caliente tipo MDC-1	Metro cúbico (m ³)
450.2 Mezcla densa en caliente tipo MDC-2	Metro cúbico (m ³)
450.3 Mezcla densa en caliente tipo MDC-3	Metro cúbico (m ³)
450.4 Mezcla densa en caliente para bacheo	Metro cúbico (m ³)

ANEXO D. SEGURIDAD INDUSTRIAL

- No utilice imanes muy fuertes cerca del corazón o de la cabeza.
- No utilice imanes fuertes en niños pequeños.
- Empiece el tratamiento con imanes de poca o media fuerza.
- El imán no debe entrar en contacto directo con la piel en caso de quemaduras ni en heridas abiertas.
- Los imanes no son compatibles con los marcapasos, desfibriladores automáticos ni dispositivos eléctricos internos.
- Si tiene objetos metálicos implantados en su cuerpo, tenga cuidado con la utilización de imanes. Si nota molestias, deje de utilizarlos.
- No debería utilizar imanes en caso de embarazo.
- No debería aplicarse imanes fuertes en el abdomen después de una comida fuerte, ya que altera la producción de ácido y la movilidad gastrointestinal.
- La energía del polo Sur constituye un eficaz tratamiento capaz de resucitar células supuestamente agotadas y desvitalizadas, pero hay que complementar inmediatamente dichas aplicaciones con otras de energía del polo Norte.
- Si se produce agravamiento de heridas y/o dolencias, se debe a que no se utiliza el polo adecuado, nunca a un uso excesivo, aunque no debería aplicarse un imán cerca de la cabeza durante un periodo de tiempo prolongado.
- No debería tener imanes cerca de: su ordenador, disquetes del ordenador, tarjetas de crédito, cintas de vídeo, cintas de casete, y otros dispositivos que utilicen un sistema de grabación o lectura magnético, ya que puede perder la información almacenada.
- No ponga un imán en un microondas.
- No se ponga un imán sobre una herida abierta directamente, es decir, que el imán no entre en contacto directo con la herida.
- Si tiene problemas de corazón o de circulación consulte con su médico antes de utilizar un imán. No se aplique el polo SUR de un imán en zonas donde existan procesos infecciosos, tumorales o dolorosos. En estos casos aplicar el polo NORTE.

ANEXO E. ANÁLISIS DEL DIFRATOGRAMA DE RX DE LA ROCA IMÁN



LABORATORIO DE DIFRACCIÓN DE RAYOS-X

INF-078-04

Bucaramanga, Septiembre 30 de 2004

Dr.
RAMIRO SALAZAR
Escuela de Ingeniería Química
UIS/Presente

Ref: Informe de Resultados por DRX

Cordial saludo:

Por medio de la presente estoy enviando el resultado del análisis por Difracción de Rayos-X de una muestra de roca magnética correspondiente al proyecto de grado "Obtención, evaluación del concreto magnético y diseño de una planta para su elaboración a escala semi-industrial" elaborado por la estudiantes de Ingenierías Química, Sandra Liliana Gómez y Civil, Kelly Gómez.

Preparación de las muestras

Para este proceso se maceró la muestra en un mortero de ágata y el espécimen seleccionado de la muestra fue montado en un portamuestra de aluminio mediante la técnica de llenado lateral.

Condiciones de Medición de las Muestras

Voltaje	40(kV)
Corriente	20(mA)
Rendijas (Slits) DS	1.0°
RS	0.3mm
SS	1.0°
Velocidad de Barrido	3°/min
Muestreo	0.02°
Rango de Medición	2-70°
Radiación	CuK α
Monocromador	Grafito
Difractómetro	Rigaku modelo D-MAX-III/B

Base de Datos cristalográfica: Powder Diffraction File (PDF-2) del International Center for Diffraction Data (ICDD)

Identificación cualitativa:

La identificación cualitativa de las fases presentes en las muestras, se realizó mediante comparación de las reflexiones del perfil observado con las reflexiones de los perfiles de difracción reportados en la base de datos Powder Diffraction File (PDF-2) del International Center for Diffraction Data (ICDD), utilizando el software respectivo. En el proceso de identificación se aplicó el método de Hanawalt.

Página 1 de 3

Universidad Industrial de Santander, Escuela de Química, Laboratorio de Posgrado III
Edificio Camilo Torres, Bucaramanga, PBX 6344000 Ext. 22 26, TeleFax 6349069
Apartado Aéreo N° 678, Email: rayosx@uis.edu.co NIT: 890.201.213-4

Análisis cuantitativo:

Para el análisis cuantitativo se mezcló con la muestra una cantidad conocida de un patrón interno (Corundum). La medición se hizo a pasos dejando 2 segundos para muestreo en cada paso. Las demás condiciones de medición fueron las mismas utilizadas para el análisis cualitativo.

Los resultados fueron los siguientes:

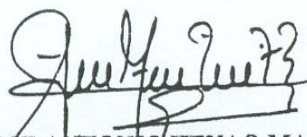
	FASE	No. TARJETA PDF-2	NOMBRE	% CUANTITATIVO
Cristalinos	SiO ₂	86-1629	Quartz	48.17%
	Fe ₂ O ₃	79-7	Hematite	31.44%
	Fe ₃ O ₄	86-1339	Magnetite	9.51%
	FeO(OH)	3-251	Goethite	9.70%
Amorfos				1.18%

Observación:

- En el difractograma se observa bandas anchas de baja intensidad que indican la presencia de material amorfo y por tal razón dificulta la asignación de fases. Por tanto, las fases reportadas corresponden a aquellas cuyas reflexiones principales (máxima intensidad) se ajustan al centro de la banda.

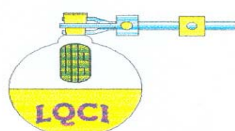
NOTA: Los resultados se relacionan únicamente con las muestras analizadas.

Cordialmente,



Dr. JOSE ANTONIO HENAO MARTINEZ
Director Laboratorio de Difracción de Rayos-X
Escuela de Química
E-mail: jahenao@uis.edu.co

ANEXO F. ANÁLISIS DEL MATERIAL LLENANTE



UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
ESCUELA DE QUÍMICA
LABORATORIO QUÍMICO DE CONSULTAS
INDUSTRIALES



REPORTE DE RESULTADOS

FECHA: Noviembre 11 de 2004 SOLICITUD No 18
NOMBRE DEL SOLICITANTE: AUGUSTO SALAZAR
NOMBRE DE LAS MUESTRAS: Mineral
No DE MUESTRAS: 1
MUESTRAS TOMADAS POR: El Solicitante
FECHA DE LLEGADA AL LABORATORIO: Noviembre 4 de 2004

RESULTADOS ANALISIS FISICOQUIMICO

PARAMETRO	UNIDADES	No 1	METODO / NORMA
Fe Total	%	61.16	Absorción Atómica/ SM 3500
Zn Total	%	0.78	Absorción Atómica/ SM 3500


Luz Yolanda Vargas Fiallo
Director Laboratorio Químico
de Consultas Industriales
Matrícula Profesional PQ.1144

NOTA: En caso de ser copia del resultado original se realizará la siguiente aclaración. COPI RESULTADO ORIGINAL.

Ciudad Universitaria - Edificio Camilo Torres / Laboratorio 225
Apartado Aereo 0678 - Conmutador : 6344000 Ext. 2465. Directo : 6349009
Telefax : 6349069
E-mail : labquim@uis.edu.com
Bucaramanga - Colombia

ANEXO G. FOTOS



Foto 1. Roca imán triturada utilizada como agregado para la mezcla asfáltica en caliente



Foto 2. Probetas realizadas para determinar el contenido óptimo de asfalto y determinar propiedades



Foto 3. Placa de pavimento ferromagnético hecha utilizando el método de Bruce Marshall de dimensiones Largo: 200 cm; Ancho: 28 cm; Alto: 3 cm



Foto 4. Ensayo para determinar la distancia máxima donde comienza la atracción entre las dos superficies (PF-IMANES), debido al campo magnético.



Foto 5. Visión interna de la llanta provista de imanes utilizada en las pruebas de velocidad.



Foto 6. Vista de prueba de velocidad en el pavimento ferromagnético con un ángulo de inclinación

ANEXO H. ENSAYOS CUALITATIVOS



Foto 7. Ensayo de adhesión entre las superficies PF-LLM con la llanta suspendida



Foto 8. Ensayo de adhesión con una llanta de moto cuyas dimensiones son 37.5 cm de diámetro y 9 cm de ancho.



Foto 6. Ensayo de adhesión entre PF-LLM en posición vertical (carro magnético de juguete de Pintumag Ltda.)

ANEXO I. Diseño de mezcla bituminosa por el método Marshall

Tabla 16. Diseño de mezcla bituminosa por el método Marshall																		
Mezcla No.	% de Asfalto	Espesor Probeta (in)	Peso (g)			Peso Específico			%Asfalto Absorbido	Volumen-%Total			Vacíos en Agregado o Mineral	% Asfalto Efectivo	Peso Unitario (lb/ft ³)	Estabilidad-lb		Flujo
			Seca en Aire	S.S.S. en Aire	En agua	"Bulk"	Máximo Teórico	Máximo Medido		Agregados	Vacíos con Aire	Asfalto Efectivo				Medida	Corregida	
a	b	c	d	e	f	g	H	i	j	k	l	M	n	o	P	q	r	S
						$\frac{d}{e-f}$			$\frac{(i-h)10^4}{i*h(100-b)}$	$\frac{(100-b)*g}{G_{agr}}$	$\left(1-\frac{g}{i}\right)100$	$100-k-l$	$100-k$	$\frac{b-j*(100-b)}{100}$	62.4			
1	4.5	2.51	1607.7	1611.2	1105	3.176										3017	2997.7	16.50
		2.58	1605.4	1618.4	1110	3.157										2713	2574.1	17.30
		2.51	1607.1	1704.0	1324	4.229										2846	2827.8	15.90
Promedio						3.166	3.344	3.465	1.10	81.94	8.63	9.43	18.06	3.45	197.5		2799.86	15.56
2	5.0	2.50	1608.4	1615.4	1120.	3.246										3341	3341.0	18.70
		2.46	1583.5	1602.4	1117	3.262										3564	3541.2	16.90
		2.49	1665.0	1738.1	1235	3.309										3264	3394.6	18.20
Promedio						3.254	3.298	3.332	0.322	83.78	2.34	13.88	16.22	4.70	203.0		3425.6	17.93
3	5.5	2.50	1609.6	1610.4	1116.5	3.258										2956	2956.0	17.40
		2.51	1590.9	1592.7	1101.4	3.238										2885	2866.5	22.60
		2.44	1619.4	1620.4	1122.6	3.253										2784	2895.4	23.40
Promedio						3.255	3.254	3.305	0.50	83.34	1.51	15.15	16.66	5.03	203.1		2906.6	21.13
4	6.0	2.42	1609.4	1610.1	1111.7	3.229										2500	2637.5	29.00
		2.39	1607.8	1608.6	1109.7	3.222										2612	2815.7	26.50
		2.44	1594.6	1595.1	1105.5	3.256										2632	2737.3	26.90
Promedio						3.225	3.211	3.274	0.633	82.15	1.50	16.35	17.85	5.40	201.2		2730.2	27.46
5	6.5	2.46	1599.4	1600.2	1102.1	3.211										2176	2241.3	28.60
		2.51	1596.0	1596.3	1101.1	3.223										2095	2081.6	28.10
		2.40	1625.2	1642.3	1224.3	3.888										1822	1949.5	30.80
						3.217	3.170	3.249	0.824	81.51	0.98	17.51	18.49	5.73	200.7		2090.8	29.16

ANEXO J. Diseño de mezcla bituminosa por el método Marshall

Tabla 22. Diseño de mezcla bituminosa por el método Marshall												
Mezcla No.	% de Asfalto	Espesor Probeta (in)	Peso (g)			Peso Específico		Volumen-%Total	Peso Unitario (lb/ft ³)	Estabilidad-Ib		Flujo
			Seca en Aire	S.S.S. en Aire	En agua	"Bulk"	Máximo Medido	Vacíos con Aire		Medida	Corregida	
a	b	c	d	e	f	g	i	l	P	q	r	S
						$\frac{d}{e - f}$		$\left(1 - \frac{g}{i}\right) 100$				
1	4,5	2,49	1600,8	1605,1	1108	3,220				1923,7	1923,7	14,8
		2,49	1612	1615,2	1125	3,288				2430	2430	16
		2,46	1607,9	1612,7	1119,1	3,257				2176,8	2227,64	14
Promedio						3,255	3,569	8,787	203,14		2193,78	14,93
2	5	2,39	1610,7	1614	1124	3,287				2470,5	2660,73	21
		2,46	1604,1	1607,9	1113,7	3,246				2035,1	2065,63	12
		2,23	1504,6	1505,8	1059,7	3,373				2541,37		
Promedio						3,302	3,538	6,672	206,04		2363,18	16,5
3	5,5	2,37	1598,6	1599,1	1122,9	3,357				2136,4	2328,68	22
		2,51	1663,9	1665	1162,2	3,309				2905,9	2905,9	21,8
		2,39	1596,3	1597,4	1117	3,323				2430	2617,11	16
Promedio						3,330	3,444	3,319	207,77		2617,23	19,93
4	6	2,42	1651,4	1654	1159	3,336				2421,4	2442,8	20,6
		2,39	1639,2	1645,3	1155,3	3,345				2416,1	2437,5	21,1
		2,44	1647,6	1650,7	1146,4	3,267				2396,3	2396,3	19,5
Promedio						3,316	3,376	1,78	206,9		2425,53	20,4