

**ASISTENCIA TÉCNICA EN EL LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS, DE LA
CORPORACIÓN PARA LA INVESTIGACIÓN Y EL DESARROLLO EN ASFALTOS EN
EL SECTOR TRANSPORTE E INDUSTRIAL – CORASFALTOS**

**ELABORACIÓN Y ANÁLISIS DE UNA BASE DE DATOS CON RESULTADOS DE
ENSAYOS DINÁMICOS**



HUGO NÚÑEZ LOBO

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
BUCARAMANGA**

2008

**ASISTENCIA TÉCNICA EN EL LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS, DE LA
CORPORACIÓN PARA LA INVESTIGACIÓN Y EL DESARROLLO EN ASFALTOS EN
EL SECTOR TRANSPORTE E INDUSTRIAL – CORASFALTOS**

**ELABORACIÓN Y ANÁLISIS DE UNA BASE DE DATOS CON RESULTADOS DE
ENSAYOS DINÁMICOS**

Proyecto de Grado para optar por el Título de

Ingeniero Civil

HUGO NÚÑEZ LOBO

CÓD. 21 - 2020745

Director del Proyecto:

Ing. PhD. EDUARDO CASTAÑEDA

Tutor del Proyecto:

Ing. Esp. JHON WILSON CORREA AVELLO

Profesional Técnico CORASFALTOS

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER

FACULTAD DE INGENIERIAS FISICO-MECÁNICAS

ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL

BUCARAMANGA

2008

CONTENIDO

	Pág.
LISTA DE TABLAS.....	vii
LISTA DE GRÁFICAS	viii
LISTA DE ECUACIONES.....	x
GLOSARIO.....	xi
RESUMEN	xiii
ABSTRACT	xiv
INTRODUCCIÓN.....	1
1. OBJETIVOS.....	2
1.1 OBJETIVO GENERAL.....	2
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	2
2. INFORME PRÁCTICA EMPRESARIAL	3
2.1 ENSAYOS Y CAPACITACIONES INCLUIDOS EN EL PROGRAMA DE FORMACIÓN	4
3. MARCO TEÓRICO	16
3.1 CARACTERIZACIÓN DINÁMICA DE MEZCLAS ASFÁLTICAS	16
3.1.1 Conceptos básicos.....	16
3.1.2 Ensayos utilizados	22
3.2 LOS ASFALTOS COLOMBIANOS	28
3.2.1 Características Físicas.....	29
3.3 MEZCLAS DENSAS EN CALIENTE.....	36
4. ELABORACIÓN DE LA BASE DE DATOS	38

5.	ANÁLISIS DE DATOS	46
5.1	MÓDULO DINÁMICO ITSM.....	46
5.1.1	Curvas de tendencia.....	46
5.1.2	Análisis estadístico	52
5.2	FATIGA A ESFUERZO CONTROLADO ITFT	56
5.2.1	Curvas de tendencia.....	56
6.	CONCLUSIONES.....	62
7.	RECOMENDACIONES.....	64
8.	ANEXOS	65
	<i>ANEXO A - ILUSTRACIÓN DE RESULTADOS DE ENSAYO ITSM EQUIPO NAT.</i>	<i>65</i>
	<i>ANEXO B - ILUSTRACIÓN DE RESULTADOS DE ENSAYO ITFT EQUIPO NAT.</i>	<i>66</i>
	<i>ANEXO C – CD CON LA BASE DE DATOS EN MICROSOFT OFFICE ACCESS 2007®.....</i>	<i>67</i>
	<i>ANEXO D – GALERÍA FOTOGRÁFICA EQUIPO NAT.</i>	<i>68</i>
	BIBLIOGRAFÍA	72
	INFOGRAFÍA	75

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Características físicas cemento asfáltico de Barrancabermeja.....	30
Tabla 2. Características físicas cemento asfáltico de Apiay.	31
Tabla 3. Especificaciones INVIAS para cementos asfálticos.	32
Tabla 4. Especificaciones para cementos asfálticos.	33
Tabla 5. Especificaciones para cementos asfálticos.	35
Tabla 6. Clasificación de los asfaltos producidos por ECOPETROL.	36
Tabla 7. Especificación franjas granulométricas para mezclas en caliente.	37
Tabla 8. Módulo dinámico a 20 °C a partir de las ecuaciones de ajuste.....	52
Tabla 9. Estadística Descriptiva: Módulo Dinámico a 5 °C, 25 °C y 40 °C; 60/70, MDC-1, 10 Hz. 53	53
Tabla 10. Estimación del intervalo de confianza la media poblacional (Módulo dinámico) utilizando la distribución t Student con dos colas.	55
Tabla 11. Ecuaciones de ajuste para las condiciones seleccionadas.	60

LISTA DE GRÁFICAS

	Pág.
Figura 1. Esfuerzos directamente bajo una carga de rueda	16
Figura 2. Esfuerzo y deformación unitaria invertidos	17
Figura 3. Pulso de carga ensayo ITSM.....	24
Figura 4. Pulso de deformación ensayo ITSM.....	25
Figura 5. Aspecto del archivo “Anexo C.accdb”.....	39
Figura 6. Organización de la información en la base de datos.....	40
Figura 7. Tabla “Índice” de la base de datos.....	41
Figura 8. Tabla “Ensayos” de la base de datos.....	41
Figura 9. Ejemplo Consulta “ITSM 60/70 MDC-1 10Hz” de la base de datos.....	42
Figura 10. Ejemplo Informe “ITSM 60/70 MDC-1 10Hz” de la base de datos.....	42
Figura 11. Agregar información a la tabla “Índice”.....	44
Figura 12. Agregar información a la tabla “ITSM” o “ITFT”.....	44
Figura 13. Icono para exportar información de la Base de datos a una hoja de cálculo en Excel ®.	45
Figura 14. Gráfica de Módulo Dinámico contra Temperatura, usando asfalto 60/70, mezcla tipo MDC-1 y frecuencia de 2,5 Hz.....	47
Figura 15. Gráfica de Módulo Dinámico contra Temperatura, usando asfalto 60/70, mezcla tipo MDC-1 y frecuencia de 7,5 Hz.....	47
Figura 16. Gráfica de Módulo Dinámico contra Temperatura, usando asfalto 60/70, mezcla tipo MDC-1 y frecuencia de 10 Hz.....	48
Figura 17. Gráfica de Módulo Dinámico contra Temperatura, usando asfalto 60/70, mezcla tipo MDC-2 y frecuencia de 2,5 Hz.....	48

Figura 18. Gráfica de Módulo Dinámico contra Temperatura, usando asfalto 60/70, mezcla tipo MDC-2 y frecuencia de 7,5 Hz.	49
Figura 19. Gráfica de Módulo Dinámico contra Temperatura, usando asfalto 60/70, mezcla tipo MDC-2 y frecuencia de 10 Hz.	49
Figura 20. Gráfica de Módulo Dinámico contra Temperatura, usando asfalto 80/100, mezcla tipo MDC-1 y frecuencia de 10 Hz.	50
Figura 21. Gráfica de Módulo Dinámico contra Temperatura, usando asfalto 80/100, mezcla tipo MDC-2 y frecuencia de 2,5 Hz.	50
Figura 22. Gráfica de Módulo Dinámico contra Temperatura, usando asfalto 80/100, mezcla tipo MDC-2 y frecuencia de 10 Hz.	51
Figura 23. Gráfica de Deformación contra Ciclos de falla, usando asfalto 60/70, mezcla tipo MDC-1 y frecuencia de 2,5 Hz.....	56
Figura 24. Gráfica de Deformación contra Ciclos de falla, usando asfalto 60/70, mezcla tipo MDC-1 y frecuencia de 10 Hz.....	57
Figura 25. Gráfica de Deformación contra Ciclos de falla, usando asfalto 60/70, mezcla tipo MDC-2 y frecuencia de 2,5 Hz.....	57
Figura 26. Gráfica de Deformación contra Ciclos de falla, usando asfalto 60/70, mezcla tipo MDC-2 y frecuencia de 10 Hz.....	58
Figura 27. Gráfica de Deformación contra Ciclos de falla, usando asfalto 80/100, mezcla tipo MDC-1 y frecuencia de 2,5 Hz.	58
Figura 28. Gráfica de Deformación contra Ciclos de falla, usando asfalto 80/100, mezcla tipo MDC-2 y frecuencia de 2,5 Hz.	59

LISTA DE ECUACIONES

	Pág.
Ecuación 1. Esfuerzo de compresión.....	17
Ecuación 2. Deformación unitaria.	18
Ecuación 3. Módulo complejo.	19
Ecuación 4. Componente real del módulo complejo.....	19
Ecuación 5. Componente imaginaria del módulo complejo.	19
Ecuación 6. Valor absoluto del módulo complejo.	19
Ecuación 7. Angulo de fase.	19
Ecuación 8. Módulo secante.....	20
Ecuación 9. Intervalo de confianza para estimar la media poblacional – muestras pequeñas.	55

GLOSARIO

AGREGADOS MINERALES: material que compone la mayor proporción tanto en volumen, peso y resistencia a una mezcla asfáltica.

COMPACTADOR GIRATORIO: dispositivo utilizado en la compactación de especímenes en la metodología Superpave. Sus principales características son la simulación de la compactación en campo por medio de amasado a una presión constante y el registro de la altura a medida que sucede la compactación.

DISEÑO MARSHALL: metodología de diseño de mezclas asfálticas más utilizada en el mundo, que debido a su tipo de compactación, por impacto, no simula procedimientos de campo y puede influir en la resistencia del espécimen por fractura de agregados.

ESPÉCIMEN: mezcla asfáltica densificada con el aparato de compactación Marshall o el Compactador Giratorio el cual es sometido a diferentes pruebas.

FATIGA: es la reducción en la resistencia de un material bajo cargas repetidas cuando se compara a la resistencia bajo carga una sola carga.

GMM: ensayo que se realiza a la mezcla asfáltica para determinar el peso específico máximo de la misma.

MÓDULO COMPLEJO: Relación entre el esfuerzo y la deformación para un material visco-elástico lineal sometido a una carga con forma de onda sinusoidal.

MÓDULO DE RIGIDEZ: Es el valor absoluto del módulo complejo (E^*) o el valor del módulo secante.

MÓDULO SECANTE: Es la relación entre el esfuerzo y la deformación en un tiempo de carga, t , para un material sujeto a una rata de carga a deformación controlada.

NAT: sigla en inglés que indica Nottingham Asphalt Tester. Equipo de ensayo en el cual se llevan a cabo las pruebas de caracterización dinámica de cada mezcla.

PORCENTAJE DE VACÍOS EN LOS AGREGADOS MINERALES: los VAM, vacíos en agregado mineral, es la cantidad de material compuesto por el volumen de aire y el volumen de asfalto efectivo.

PORCENTAJE DE ASFALTO: es la suma del valor del asfalto efectivo más el ligante absorbido por el agregado.

PORCENTAJE DE VACÍOS LLENOS DE ASFALTO: indica el porcentaje de los VAM que contienen asfalto.

PORCENTAJE DE TOTAL DE VACÍOS EN LA MEZCLA: VTM, es el volumen total de vacíos de aire expresado como porcentaje del volumen BULK de la mezcla compactada de pavimento.

VISCOSIDAD: resistencia que ofrece un fluido a la deformación, debida básicamente al rozamiento interno de las partículas.

RESUMEN

TITULO: Asistencia técnica en el laboratorio de suelos y pavimentos, de la corporación para la investigación y el desarrollo en asfaltos en el sector transporte e industrial – CORASFALTOS. *

AUTOR: HUGO NÚÑEZ LOBO**

PALABRAS CLAVES: Ensayos dinámicos, Módulo dinámico, Fatiga a esfuerzo controlado, Asfaltos colombianos, Mezclas asfálticas, Base de datos, análisis estadístico.

De acuerdo al convenio de práctica empresarial establecido entre CORASFALTOS y la Universidad Industrial de Santander (UIS), se requirió llevar a cabo un proyecto de investigación. Una vez terminado, la información se almacenó en una base de datos para servir como futura referencia todos aquellos interesados en el tema. Este proyecto fue elaborado con los resultados de ensayos dinámicos, específicamente, el ensayo de Módulo de Rigidez por Tensión Indirecta (ITSM), y el de fatiga por Tensión Indirecta (ITFT). Estos dos ensayos se realizaron en el Nottingham Asphalt Tester (NAT) ubicado en CORASFALTOS. Los datos y resultados conseguidos y utilizados en el estudio fueron obtenidos desde el año 2004 hasta la fecha. El estudio se limitó a mezclas asfálticas tipo MDC-1 y MDC-2 elaboradas con asfaltos convencionales colombianos 60/70 y 80/100. El rango de ensayo para frecuencia es 2.5, 7.5 y 10 Hz. a temperaturas de 5, 25 and 40 °C. Con cada una de las condiciones o parámetros específicos, se han elaborado gráficas para el análisis con diferentes combinaciones. Las personas interesadas podrán acceder a la información de la base de datos utilizando el tipo de asfalto, el tipo de mezcla y/o diferentes parámetros de ensayo.

De todas las mezclas asfálticas estudiadas, se observó que la mezcla tipo MDC-2 con asfalto 60/70 fue la más solicitada para ensayos ITSM a una frecuencia de 10Hz. Por ello, hubo suficiente información para determinar un valor promedio de módulo de rigidez significativo para este tipo de partículas de mezcla y un intervalo de confianza para temperaturas de 5, 25 and 40 °C.

* Proyecto de Grado

** Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Director: Ph.D. Eduardo Castañeda
Codirector: Ing. Esp. Jhon Wilson Correa

ABSTRACT

TITLE: Technical attendance in the soils and pavements laboratory, of the corporation for the investigation and the development in asphalts in the transportation and industrial sector – CORASFALTOS. *

AUTHOR: HUGO NÚÑEZ LOBO**

KEY WORDS: Dynamic tests, Dynamic Modulus, Controlled loading fatigue, Colombian asphalts, Asphalt mixtures, Database, statistical analysis.

In accordance with the established internship agreement between CORASFALTOS and the Universidad Industrial de Santander (UIS), it was required to carry out a research project. Once completed, the information from the project was stored in a database for future reference to all the interested in the subject matter. This research particular project presented was elaborated on the results of dynamic testing, specifically, Indirect Tension Stiffness Modulus Test (ITSM), and Indirect Tension Fatigue Test (ITFT). These two tests were conducted on the Nottingham Asphalt Tester (NAT) located in CORASFALTOS. The data/results obtained and utilized in the study covers only the years 2004 to the present. The study was limited only to asphalt mix types MDC-1 and MDC-2 with Colombian conventional asphalts 60/70 and 80/100. The test range for frequency is 2.5, 7.5 and 10 Hz, at temperatures of 5, 25 and 40 °C. With each of the specific conditions or parameters, graphs have been created for different combination of relationships for analysis. Persons interested will be able to query the information from the database by utilizing the asphalt type, asphalt mix types, and/or different test parameters.

Out of all the asphalt mix types in the study, asphalt mix type MDC-2 with asphalt 60/70 seemed to be the most requested for ITSM testing at a frequency of 10 Hz. Thus, there was sufficient information to determine a significant average value of stiffness modulus for this particular asphalt mix type and an interval of confidence for temperature of 5, 25 and 40 °C.

* Project of Grade

** Faculty of Physiomechanical Engineerings. School of Civil Engineering. Director: Ph.D. Eduardo Castañeda. Codirector: Ing. Esp. Jhon Wilson Correa

INTRODUCCIÓN

Las mezclas asfálticas densas en caliente son las más utilizadas en el país debido a que es una tecnología adquirida y asentada por un largo periodo, convirtiéndose tentativamente en mezclas de ventajas significativas. Es de gran importancia conocer datos estadísticos acerca del comportamiento dinámico que presentan las mezclas elaboradas con asfaltos colombianos, pues aunque en la fase de prediseño de una estructura de pavimento no se tiene certeza de los materiales que se van a utilizar para la construcción de la obra, se quiere obtener un predimensionamiento de la carpeta asfáltica muy cercano al que se va a conseguir finalmente.

El objetivo del trabajo es la elaboración de una base de datos con resultados de ensayos dinámicos sobre mezclas asfálticas de todo el país y el posterior análisis de esta información utilizando herramientas estadísticas. Para este fin se van a tomar resultados de ensayos realizados en CORASFALTOS con el equipo NAT desde el año 2004 hasta la fecha.

Esta investigación se limita al estudio de mezclas tipo MDC-1 y MDC-2 elaboradas con asfaltos convencionales 80/100 y 60/70 provenientes del Complejo Industrial de Barrancabermeja y de la Planta de Asfalto de Apiay, ensayadas a frecuencias de 2.5, 7.5 y 10 Hz y a temperaturas de 5, 25 y 40 °C.

La confiabilidad de los resultados inferidos a partir del análisis estadístico depende en gran medida de la cantidad de datos que se puedan recolectar para cada tipo de combinación asfalto-tipo de mezcla-frecuencia. Aun así, la base de datos quedará disponible para continuar adicionando información, a medida que más muestras sean ensayadas, y de este modo obtener estadísticos confiables de las características dinámicas de mezclas elaboradas con asfaltos colombianos.

Además de la utilidad en el prediseño de estructuras de pavimento, la base de datos a realizar puede servir como punto de partida para futuras investigaciones que requieran este tipo de información; y para la academia puede servir de apoyo en el planteamiento y la resolución de problemas en la asignatura Diseño de Pavimentos.

1. OBJETIVOS

1.1 OBJETIVO GENERAL

Realizar ensayos de agregados, asfaltos y mezclas asfálticas de acuerdo con las normas técnicas nacionales y/o internacionales con el fin de obtener resultados confiables.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar ensayos de acuerdo a lo establecido en las normas de referencia y los procedimientos de laboratorio.
- Analizar y evaluar los resultados que se están obteniendo para asegurar la calidad de los mismos.
- Elaboración de una base de datos con resultados de ensayos dinámicos realizados en la corporación sobre muestras con asfaltos colombianos convencionales.
- Hacer un análisis gráfico de los resultados obtenidos en la base de datos, para los ensayos de módulo dinámico y fatiga a esfuerzo controlado.
- Realizar análisis estadístico con los resultados de ensayo que presenten la cantidad mínima de datos para que la inferencia, bajo los parámetros que se establezcan, sea significativa.

2. INFORME PRÁCTICA EMPRESARIAL

CORASFALTOS es una entidad mixta de carácter civil, sin ánimo de lucro, que propende por la integración, difusión y mejoramiento del conocimiento sobre los asfaltos y los materiales empleados en la construcción de infraestructura vial. Brinda soporte para satisfacer las necesidades tecnológicas en asfaltos y/o pavimentos a los sectores industrial, estatal y educativo.

CORASFALTOS cuenta con el Laboratorio de Asfaltos y Mezclas Asfálticas que opera en el parque Tecnológico de Guatiguará, sede de investigaciones de la UIS. En esta área localizada en las instalaciones de CORASFALTOS se desarrollan las pruebas y trabajos relacionados con la evaluación y caracterización fisicoquímica y fisicomecánica de productos y mezclas asfálticas.

Para cumplir su misión, CORASFALTOS realiza alianzas y convenios que permitan, entre otras secciones, la participación de estudiantes en los proyectos que se adelantan y/o en los servicios especializados que brinda la Corporación.

Para este fin CORASFALTOS solicitó un estudiante de último semestre de Ingeniería Civil, cuya función será la realización de ensayos de laboratorio a través del cargo de Técnico de Laboratorio.

La práctica empresarial se realiza en el marco del convenio de Prácticas Empresariales entre la Corporación para la Investigación y el Desarrollo en Asfaltos en el Sector Transporte e Industrial -CORASFALTOS- y la Universidad Industrial de Santander; se desarrollará en la sede de la Corporación, ubicada en la sede UIS Guatiguará en Piedecuesta, en el horario de oficina establecido por esta.

El trabajo, que se realiza bajo el cargo de Técnico de Laboratorio, incluye las siguientes responsabilidades:

- Responsabilidad por equipos
- Responsabilidad por información
- Responsabilidad en la Toma de Decisiones
- Responsabilidad por el Sistema de Calidad
- Responsabilidad en el desempeño de ensayo
- Responsabilidad por los métodos de ensayo y/o calibración utilizados
- Responsabilidad por el ambiente de trabajo
- Otras responsabilidades Globales

2.1 ENSAYOS Y CAPACITACIONES INCLUIDOS EN EL PROGRAMA DE FORMACIÓN

CORASFALTOS se certificó con el Sistema de de Gestión de Calidad ISO 9000: 2000 para la “Prestación de Servicios de Laboratorio y Fabricación de Aditivo para mezclas asfálticas”.

El Laboratorio de Ensayos para Asfaltos y Mezclas Asfálticas de CORASFALTOS cumpliendo con los requerimientos, del Sistema Nacional de Normalización, Certificación y Metrología, descritos en el Decreto 2269 del 1993 y en la resolución 08728 de 2001, renovó su ACREDITACION ante la Superintendencia de Industria y Comercio (SIC) de acuerdo con los lineamientos de la norma NTC ISO/EC-17025:2001, el 8 Junio de 2005 según resolución 12821.

Para dar cabal cumplimiento a esta normatividad el Sistema de Gestión de La Calidad de CORASFALTOS establece unas competencias para los encargados de realizar los ensayos de laboratorio en función de su perfil y la correspondencia con el tipo de ensayo. Además de esto, en aras de fortalecer la cultura de mejora continua, se ha elaborado un programa de formación, que no solo incluye el aprendizaje de los ensayos, sino también, capacitaciones en temas afines.

A continuación se mencionan los ensayos en los que se recibió capacitación durante el desarrollo de la práctica y una breve descripción de cada uno de ellos; vale la pena mencionar que los ensayos se realizaron siguiendo las directrices establecidas en el Manual de Calidad tales como: realizar los ensayos de acuerdo a lo establecido en las normas de referencia y los procedimientos de laboratorio, registrando en forma clara y ordenada los datos obtenidos de los ensayos y colaborando en la realización del informe de ensayo, si fuese necesario y cumpliendo a cabalidad con las políticas establecidas por la organización para la protección física y confidencialidad de la información de los clientes.

- **Determinación del peso específico aparente y peso unitario de mezclas asfálticas – BULK empleando especímenes saturados con superficie seca**

INV E-733

El método permite determinar el peso aparente de mezclas asfálticas, lo cual es útil para calcular el porcentaje de vacíos, la compactación y el peso unitario de mezclas asfálticas densas.

- **Determinación del peso específico teórico máximo de mezclas asfálticas – GMM/RICE**

INV E-735

Por medio de esta norma se determina el peso específico teórico máximo de mezclas asfálticas para pavimentos, sueltas o sin compactar, mediante la relación o comparación de un volumen de mezcla a una temperatura dada con respecto a un volumen igual de agua a la misma temperatura.

- **Extracción cuantitativa de asfalto a partir de mezclas asfálticas – método de extracción por centrifuga**

INV E-732 (ASTM D 2172)

La prueba consiste en extraer el asfalto de las mezclas asfálticas por medio de un solvente, utilizando una centrifuga a 3000 rpm. El contenido de asfalto se calcula por la diferencia de peso del agregado extraído, del contenido de humedad, y del material mineral en el extracto. El contenido de asfalto se expresa como porcentaje en peso de la mezcla libre de humedad.

- **Análisis granulométrico de agregados gruesos y finos**

INV E-213

Mediante este ensayo se determina la distribución de los tamaños de las partículas de una cantidad de muestra seca del árido, por separación a través de una serie de tamices dispuestos sucesivamente de mayor a menor abertura de malla.

- **Análisis granulométrico de suelos por tamizado**

INV E-123

El análisis granulométrico tiene por objeto la determinación cuantitativa de tamaños de partículas de suelo por separación a través de una serie de tamices dispuestos sucesivamente de mayor a menor abertura de malla.

- **Relaciones de humedad-masa unitaria seca en los suelos (ensayo modificado de compactación)**

INV E-142

Este método se emplea para determinar la relación entre la humedad y el peso unitario seco de los suelos compactados en un molde de 102 o 152 mm de diámetro y altura de 116 mm, con collar de extensión de 60 mm de altura (el uso del tipo de molde depende del tamaño de partícula de la muestra). Las capas de suelo se compactan con un martillo de 10 Lbs. y una energía de 55 golpes por capa. El procedimiento se repite para contenidos de humedad diferentes, estableciendo la cantidad de agua necesaria para que el suelo alcance un valor máximo de compactación o densidad, con la cual se deberá trabajar en campo.

- **Relación de Soporte del Suelo en el Laboratorio (CBR de Laboratorio)**

INV E-148

El ensayo se realiza normalmente sobre suelo preparado en el laboratorio con condiciones óptimas de humedad y densidad. El procedimiento consiste en la preparación de especímenes cilíndricos en moldes de 152 mm de diámetro y 177 mm de altura, provisto de un collar suplementario y una placa de base inferior. El material preparado se va colocando en capas y se compacta con el martillo de PROCTOR Modificado, con energías de 12, 26 y 55 golpes por capa. Finalizada la compactación se sobreponen pesas de 4 Kg., simulando el efecto de las capas soportadas en el pavimento. Para evaluar el efecto de saturación en campo, los moldes se someten a inmersión durante 4 días. Transcurrido este periodo, se falla cada molde a una velocidad de 1,27 mm/min, comparando la carga necesitada para penetrar la muestra 0,1 y 0,2 pulgadas con cargas patrones. Dicha relación refleja la capacidad de soporte de la subrasante.

- **Determinación del límite líquido de los suelos**

INV E-125

El suelo corresponde a una muestra tamizada sobre el tamiz No. 40 al cual se le adiciona agua con el fin de colocarlo sobre la cazuela de Casagrande, con rotaciones de la cazuela o golpes superiores o inferiores a 25, el punto de humedad en el cual se considera que el suelo está entre estado líquido y plástico.

- **Límite plástico e índice de plasticidad**

- INV E-126**

- Consiste en determinar la humedad más baja con la que pueden formarse cilindros de suelo de unos 3 mm de diámetro, sin que dichos cilindros se desmoronen. El índice de plasticidad corresponderá a la diferencia entre el límite líquido y plástico.

- **Determinación de peso específico de los suelos y del llenante mineral**

- INV E-128**

- Este método se utiliza para determinar el peso específico de los suelos y del llenante mineral (filler) por medio de un picnómetro, siendo este la relación entre el peso en el aire de un cierto volumen de sólidos a una temperatura dada y el peso en el aire del mismo volumen de agua destilada, a la misma temperatura.

- **Determinación de peso específico y absorción del agregado grueso**

- INV E-223**

- Con este ensayo se determina el peso específico aparente y nominal del material grueso mayor o igual al tamiz No.4. Se define como peso específico aparente la relación entre el peso en el aire del sólido y el peso del agua correspondiente a su volumen aparente; y el peso específico nominal es la relación entre el peso en el aire del sólido y el peso del agua correspondiente a su volumen nominal.

- **Determinación de peso específico y absorción de agregados finos**

INV E-222

Con este ensayo se determina el peso específico aparente y nominal del material fino menor al tamiz No.4. Se define como peso específico aparente la relación entre el peso en el aire del sólido y el peso del agua correspondiente a su volumen aparente; y el peso específico nominal es la relación entre el peso en el aire del sólido y el peso del agua correspondiente a su volumen nominal.

- **Concentración crítica del llenante mineral en mezclas de concreto asfáltico**

INV E-745

Con este procedimiento se determina la concentración crítica de material que pasa el tamiz No.200 (llenante mineral) en una mezcla de llenante-asfalto, el valor hallado debe ser mayor que la concentración en volumen del llenante en una determinada mezcla asfáltica, por lo tanto, se debe comparar el valor obtenido con lo hallado en el diseño Marshall. El propósito de este ensayo es evitar problemas de rigidez en el pavimento que conlleven a una eventual figuración de la mezcla al paso de las cargas.

- **Masa unitaria aparente (densidad aparente) del llenante mineral en tolueno**

INV E-225

Por medio de esta norma se determina el peso unitario aparente de un material llenante por sedimentación empleando como medio líquido el Tolueno. Este parámetro es una medida relativa del grado de finura del llenante ensayado.

- **Porcentaje de caras fracturadas en los agregados**

INV E- 227

Este ensayo determina el porcentaje en peso del material que presente una o más caras fracturadas de las muestras de agregados pétreos, esta propiedad es requerida para dar mayor resistencia a los materiales al ser compactados y sometidos a cargas de tráfico. En mezclas asfálticas es un requerimiento muy importante para su aceptación en obra.

- **Índice de aplanamiento y de alargamiento de los agregados para carreteras**

INV E-230

Con este ensayo se determinan los índices de alargamiento y de aplanamiento de los agregados que se van a emplear en la construcción de carreteras. A través de este ensayo se puede determinar la cantidad de partículas alargadas y planas no deseables en una mezcla asfáltica, ya que pueden generar fracturas en la mezclas al paso de las cargas.

- **Método para determinar partículas planas, alargadas, o planas y alargadas en agregados gruesos**

INV E-240

Se mide partículas individuales de agregado de una fracción de tamaño específico de tamiz para determinar las relaciones de ancho/espesor, longitud/ancho ó longitud/espesor. En algunos usos de construcción las partículas planas o alargadas de agregados, pueden interferir en la compactación y dificultar la colocación de material.

- **Resistencia al desgaste de los agregados de tamaños menores de 37,5 mm (1 1/2") por medio de la máquina de los ángeles**

INV E-218

La realización de este ensayo tiene como finalidad, determinar la resistencia al desgaste de agregados naturales o triturados empleando la máquina de Los Ángeles. Los

materiales después de ser desgastados al finalizar el ensayo, se lavan por el tamiz No. 12 y por diferencia de pesos con la cantidad de material cargado originalmente, se determina el porcentaje de desgaste de los materiales pétreos.

- **Equivalente de arena de suelos y agregados finos**

- INV E-133**

- Con este ensayo se determina la proporción relativa del contenido de polvo fino nocivo o material arcilloso en los agregados finos. Es un procedimiento que se puede utilizar para lograr una correlación rápida en campo.

- **Valor de azul de metileno en agregados finos y en llenante mineral**

- INV E-235**

- Con esta prueba se determina la presencia de elementos arcillosos en los materiales finos, como arenas naturales o de trituración, polvos minerales, entre otros, empleados en la construcción de pavimentos. El método se basa en las propiedades de adsorción de las arcillas y su consiguiente efecto decolorante sobre las soluciones acuosas de azul de metileno. El azul de metileno es adsorbido preferentemente por las arcillas, materiales orgánicos y los hidróxidos de hierro, por lo tanto al ser más alto el índice de azul de metileno, mayor es la actividad superficial y fisicoquímica de estos materiales.

- **Adhesividad de los ligantes bituminosos a los agregados finos (método Riedel-Weber)**

- INV E-774**

- Con esta prueba se determina la adhesividad de los ligantes asfálticos respecto de un área natural o de trituración, para tal fin se somete la mezcla agregado-ligante a la acción de soluciones de carbonato sódico de diferentes concentraciones.

- **Evaluación de la susceptibilidad al agua de las mezclas asfálticas compactadas utilizando la prueba de tracción indirecta – TSR**

INV E-725

Mediante esta prueba se busca determinar la susceptibilidad a la humedad de la mezcla asfáltica analizada, determinando la compatibilidad y afinidad entre el agregado y el ligante. El ensayo se desarrolla preparando al menos seis probetas con un porcentaje de vacíos entre el 6 – 8%, separando en dos grupos la mitad de ellas para un acondicionamiento y saturación, para luego proceder a realizar el ensayo de tracción indirecta a los dos grupos (seca y húmedas) y así calcular el TSR como el porcentaje entre el grupo de las húmedas sobre las secas.

- **Resistencia de mezclas asfálticas en caliente empleando el aparato Marshall**

INV E-748

Se toman las dimensiones y los pesos necesarios para determinar el peso específico aparente BULK y el porcentaje de vacíos, por último las briquetas son puestas en un baño de agua a 60°C por un periodo de 30 a 40 minutos, de donde son llevadas a la máquina de ensayo Marshall en donde se determina su estabilidad y flujo. Con este ensayo se determina la resistencia a la deformación plástica de mezclas asfálticas sometidas a cargas de compresión.

- **Efecto del agua sobre la cohesión de mezclas asfálticas compactadas (ensayo de Inmersión-Compresión)**

INV E-738

Por medio de esta norma se determina la pérdida de cohesión que se produce por la acción del agua sobre las mezclas asfálticas compactadas, preparados con cementos asfálticos. Se obtiene un índice de la resistencia conservada o de la resistencia a la

compresión simple entre probetas curadas al aire y probetas sometidas a la acción del agua.

Además de los ensayos de laboratorio se realizaron varias salidas a campo, en el desarrollo de estas se recibió capacitación en los siguientes ensayos:

- **Medida de la deflexión de un pavimento empleando la viga Benkelman**

- INV E-795**

- Consiste en determinar simultáneamente con una viga Benkelman la deflexión recuperable y el radio de curvatura de una superficie, producidos por una carga estática. A tal fin se utiliza un camión donde la carga, tamaño de las llantas, espaciamiento entre ruedas duales, y presión de inflado están normalizados.

- **Índice de rugosidad internacional – equipo MERLIN**

- INV E-790**

- Por medio de este ensayo se determina la rugosidad superficial de una sección de pavimento, mediante el IRI (International Roughness Index ó Índice Internacional de Rugosidad). Para este efecto se utiliza el Equipo MERLIN (perfilómetro de carreteras). Para el cálculo del IRI se hace la medición del perfil longitudinal de las huellas; cada giro de la rueda se genera una medida, y al acumulado de estas mediciones se les aplica un análisis estadístico por medio del cual se determina la rugosidad de la sección de pavimento.

- **Método para determinar el ahuellamiento**

- INV E-789**

Este método permite hacer una estimación de la profundidad del ahuellamiento en la superficie de pavimentos asfálticos, fenómeno que se manifiesta como una depresión longitudinal en la sección transversal y que se localiza en las zonas por donde circula la mayor parte del tránsito (huellas).

Como se mencionó antes, el programa de formación incluye capacitaciones en temas relacionados con los pavimentos y los materiales usados en su construcción. Las capacitaciones recibidas fueron:

- **Tecnología y química del asfalto**

Ing. Qco. Msc. Luis Sanabria

- **Reología del asfalto**

Ing. Qca. Msc. Ph.D. Larissa Chiman

- **Ensayos de laboratorio para asfaltos – práctica**

Ing. Qca. Msc. Ph.D. Larissa Chiman, Qco. Leonardo Jaimes

- **Metrología básica**

Centro Industrial de Mantenimiento Integral Regional Santander- SENA

- **Fundamentos del proceso de estabilización de suelos**

Ing. Qca. Msc. Ph.D. Larissa Chiman

- **Metodología de diseño Marshall para mezclas asfálticas**

Ing. Esp. Xavier Cuellar

- **Nuevas tecnologías y tendencias en asfaltos, sus mezclas, y pavimentos flexibles**

Ing. Qca. Msc. Ph.D. Larissa Chiman

- **Auscultación de pavimentos**

Ing. Esp. Jhon Wilson Correa

- **Protección radiológica**

M.Sc. Físico. Telmo Bravo R.

Por último, se tuvo la oportunidad de asistir a la Tercera Semana Técnica del Asfalto, compuesta por el **Tercer Seminario Latinoamericano del Asfalto** y las **Sextas Jornadas Internacionales del Asfalto**, organizadas por CORASFALTOS y la Asociación Latinoamericana del Asfalto – ALA. Allí se pudo compartir conocimientos y experiencias de la Ingeniería Vial con importantes investigadores, profesionales, constructores e industriales de diferentes continentes.

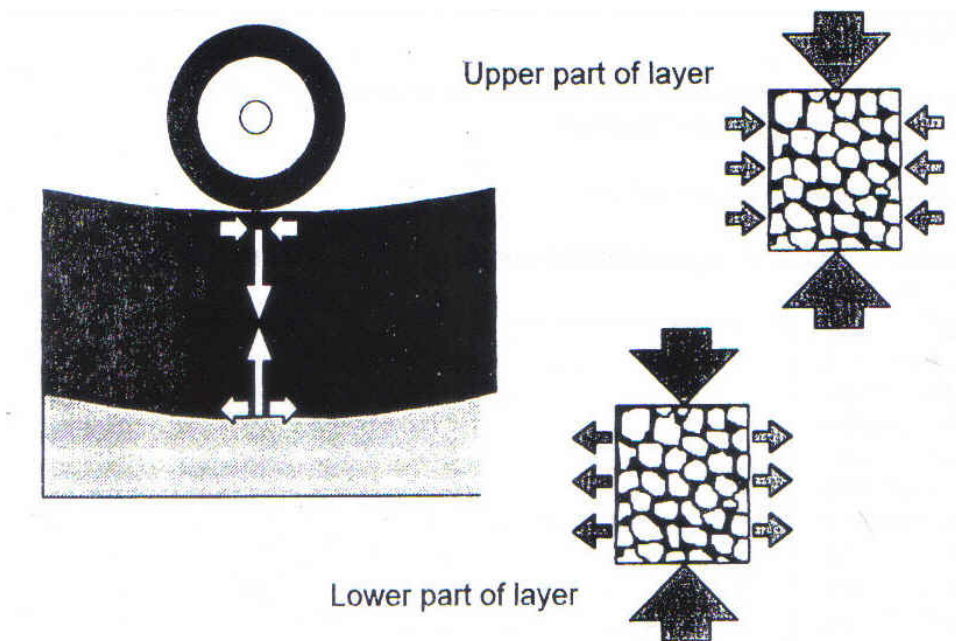
3. MARCO TEÓRICO

3.1 CARACTERIZACIÓN DINÁMICA DE MEZCLAS ASFÁLTICAS

3.1.1 Conceptos básicos

Esfuerzos debidos a una carga de rueda. La figura 1 es un diagrama simplificado de los principales esfuerzos que ocurren en una capa asfáltica directamente bajo una carga de rueda. En dirección vertical el esfuerzo es a compresión y, debido a que la capa actúa como una viga cargada, habrá también esfuerzos horizontales. En la parte superior de la capa, directamente bajo la rueda, el esfuerzo horizontal será a compresión. En la parte inferior de la capa el esfuerzo horizontal, directamente bajo la rueda, será a tensión.¹

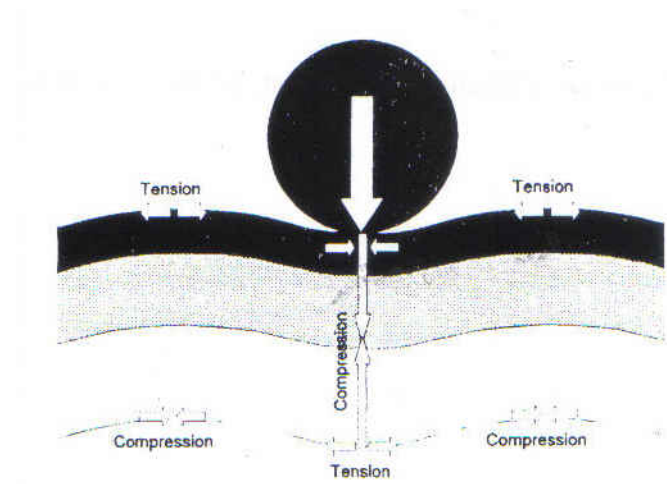
Figura 1. Esfuerzos directamente bajo una carga de rueda



¹ UNIVERSITY OF NOTTINGHAM. NAT Course Notes. Parte del Manual de Usuario del Equipo NAT de CORASFALTOS. p7.

La figura 2 muestra que cuando la rueda se mueve a lo largo del pavimento el esfuerzo se invierte, de modo que los esfuerzos horizontales alternan entre compresión y tensión. La deformación unitaria en el material también cambiará de manera similar.²

Figura 2. Esfuerzo y deformación unitaria invertidos



NAT Course Notes, University of Nottingham – Page 7

Esfuerzo y deformación unitaria. El esfuerzo es igual a la carga dividida por el área sobre la cual esta es aplicada. Se tiene un bloque cilíndrico de material con sección transversal de área A , el cual es sometido a una carga de compresión W . El esfuerzo de compresión resultante (σ) en el material está dado por la siguiente ecuación:

Ecuación 1. Esfuerzo de compresión.

$$\sigma = \frac{W}{A}$$

² UNIVERSITY OF NOTTINGHAM. NAT Course Notes. Parte del Manual de Usuario del Equipo NAT de CORASFALTOS. p7.

Un bloque de material el cual está sometido a un esfuerzo a compresión (σ), la longitud original del bloque es l (mm) y se deforma d (mm).

La deformación unitaria (ε) es la deformación dividida entre la longitud original.

Ecuación 2. Deformación unitaria.

$$\varepsilon = \frac{\text{deformación}}{\text{Longitud _ Original}} = \frac{d}{l}$$

Además de la deformación unitaria vertical también hay deformación unitaria perpendicular a la dirección de aplicación del esfuerzo, el cual causa un cambio en el área de la sección transversal del bloque. Esta deformación unitaria debería ser medida para la determinación precisa del módulo de rigidez. La relación entre esta deformación unitaria indirecta y la deformación unitaria en la dirección de aplicación del esfuerzo es conocida como “relación de Poisson”.

Módulo complejo.³ Relación entre el esfuerzo y la deformación para un material visco-elástico lineal sometido a una carga con forma de onda sinusoidal en un tiempo, t , aplicando un esfuerzo $\sigma \cdot \text{sen}(\omega \cdot t)$ resulta en una deformación $\varepsilon \cdot \text{sen}(\omega \cdot (t - \Phi))$ que tiene un ángulo de desfase, Φ , con respecto al esfuerzo.

La amplitud de la deformación y el ángulo de desfase son funciones de la frecuencia, ω , y la temperatura de ensayo, Θ .

La relación esfuerzo deformación define el módulo complejo E^* como:

³ COMITE EUROPÉEN DE NORMALISATION. EUROPEAN STANDARD. Bituminous Mixtures – Test methods for hot mix asphalt – Part 26: Stiffness. Ref. No. EN 12697-26: 2004: E. English version. Bruselas: CEN Julio de 2004. p7.

Ecuación 3. Módulo complejo.

$$E^* = |E^*| \cdot (\cos(\phi) + i \cdot \text{sen}(\phi))$$

El módulo complejo está conformado por una componente real E1 y una componente imaginaria E2.

Ecuación 4. Componente real del módulo complejo.

$$E_1 = |E^*| \cdot \cos(\phi)$$

Ecuación 5. Componente imaginaria del módulo complejo.

$$E_2 = |E^*| \cdot \text{sen}(\phi)$$

El valor absoluto del módulo complejo $|E^*|$ y el ángulo de fase ϕ .

Ecuación 6. Valor absoluto del módulo complejo.

$$|E^*| = \sqrt{E_1^2 + E_2^2}$$

Ecuación 7. Angulo de fase.

$$\phi = \arctan\left(\frac{E_2}{E_1}\right)$$

La segunda caracterización se usa más a menudo en la práctica. En cálculos lineales elásticos por ejemplo el módulo E^* es generalmente usado como valor de entrada para el Módulo de Young.

Para materiales puramente elásticos el ángulo de fase es cero y entonces el módulo complejo se reduce al Módulo de Young. Esto sucede cuando materiales bituminosos están a temperaturas muy bajas ($\Phi \leq -20^\circ$). Entonces el módulo complejo alcanza su más alto valor posible notado E_∞ .

Módulo de rigidez. Es el valor absoluto del módulo complejo (E^*) o el valor del módulo secante.

Módulo secante. Es la relación entre el esfuerzo y la deformación en un tiempo de carga, t , para un material sujeto a una rata de carga a deformación controlada.

Ecuación 8. Módulo secante.

$$E(t) = \frac{\sigma(t)}{\varepsilon(t)}$$

Con esfuerzo, $\sigma(t)$, y deformación, $\varepsilon(t)$, en un tiempo t .

El módulo de rigidez es la propiedad más importante de una mezcla asfáltica, puesto que provee información acerca de cuánto se deformará el material bajo la acción de una carga dada y su relación con el fisuramiento por fatiga, la deformación permanente y la capacidad de distribuir cargas.

El módulo de rigidez de una mezcla depende de la temperatura y de la velocidad con que es aplicado el esfuerzo. A altas temperaturas y largos tiempos de aplicación de cargas la rigidez es baja, y a bajas temperaturas y tiempos de aplicación de carga cortos la rigidez es alta. Las propiedades viscosas del bitumen dominan en la región de baja rigidez, y las propiedades elásticas dominan en la región de alta rigidez. Bajo condiciones intermedias, los materiales bituminosos exhiben una combinación de propiedades viscosas y elásticas.

Los factores que tienen influencia en el módulo de rigidez, en la condición de baja temperatura y tiempos de aplicación de carga cortos, son principalmente la rigidez del bitumen junto a un factor tal como los vacíos en agregado mineral, VMA, que caracterice las proporciones volumétricas. En la condición de alta temperatura y tiempos de aplicación de carga largos, contribuyen al módulo de rigidez factores como la forma, la gradación y el confinamiento de los agregados.⁴

Fatiga en mezclas asfálticas. El proceso de fatiga puede ser definido como un proceso permanente, localizado y progresivo de cambio de las condiciones estructurales de un material sometido a tensiones repetidas, y consecuentemente deformaciones inducidas, y que en el caso de las mezclas asfálticas culmina con la aparición de fisuras y grietas que conducen a la rotura total después de un número suficiente de reiteraciones.

Según la norma europea de referencia⁵, la fatiga es la reducción en la resistencia de un material bajo cargas repetidas cuando se compara a la resistencia bajo carga una sola carga. A continuación se enlistan algunas otras definiciones contenidas en dicha norma.

⁴ UNIVERSITY OF NOTTINGHAM. NAT Course Notes. Parte del Manual de Usuario del Equipo NAT de CORASFALTOS. p15.

⁵ COMITE EUROPÉEN DE NORMALISATION. EUROPEAN STANDARD. Bituminous Mixtures – Test methods for hot mix asphalt – Part 24: Resistance to fatigue. Ref. No. EN 12697-24: 2004: E. English version. Bruselas: CEN Mayo de 2004. P8-9.

Criterio convencional de falla (desplazamiento constante). Número de aplicaciones de carga, $N_{f/50}$, cuando el módulo complejo de rigidez ha disminuido a la mitad de su valor inicial.

Módulo complejo de rigidez inicial. Módulo complejo de rigidez, $S_{mix,0}$, después de 100 aplicaciones de carga.

Criterio convencional de fatiga (fuerza constante). Cuando el desplazamiento de un espécimen bajo fuerza constante se ha incrementado al doble de su valor al inicio del ensayo.

Vida a la fatiga de un espécimen. Número de ciclos $N_{i,j,k}$ correspondientes con el criterio convencional de falla a las condiciones de ensayo k (temperatura, frecuencia y modo de carga).

3.1.2 Ensayos utilizados

Las mezclas asfálticas pueden ser caracterizadas con base en la rigidez, como guía al desempeño relativo en el pavimento, para obtener datos que permitan estimar el comportamiento de la estructura y juzgar los resultados de ensayo de acuerdo a las especificaciones establecidas para mezclas asfálticas.

Los ensayos de módulo dinámico complejo y módulo resiliente son usados para medir el módulo de elasticidad. En ambos ensayos se aplican cargas repetidas a un espécimen y

se miden los desplazamientos. Estos valores son medidos en los especímenes ya sea por compresión uniaxial o por tensión indirecta. El valor del módulo se calcula como la relación entre el esfuerzo y la deformación recuperable (resiliente) bajo condiciones de carga repetida. El ensayo de módulo complejo usa una onda de carga sinusoidal mientras que el ensayo de módulo resiliente usa una onda de carga cuadrada.

Gran parte de las mediciones de rigidez actuales son obtenidas usando una versión del ensayo de tensión indirecta bajo carga repetida (ensayo diametral). Este ensayo se lleva a cabo para un rango de temperaturas, y se muestra en una gráfica la relación entre el módulo y la temperatura.⁶

Módulo dinámico (INV E-754). El ensayo de módulo de rigidez por tensión indirecta (Indirect Tension Stiffness Modulus, ITSM) es un método, no destructivo y relativamente rápido, de medir el módulo de rigidez de un material. Una carga a compresión es aplicada a lo largo del diámetro vertical de un espécimen cilíndrico induciendo un esfuerzo de tensión (y una deformación unitaria) a lo largo del diámetro horizontal. El módulo de rigidez es una función de la carga vertical, la deformación horizontal, la relación de Poisson y las dimensiones del espécimen. La velocidad del pulso de carga es generalmente más baja que la asociada al movimiento del tráfico. A pesar de que el tiempo del pulso de carga podría ser tan bajo como 50 o 60 milisegundos, el tiempo pico recomendado es de 124 milisegundos.

⁶ NATIONAL ASPHALT PAVEMENT ASSOCIATION (NAPA), NATIONAL CENTER FOR ASPHALT TECHNOLOGY (NCAT). Hot Mix Asphalt Materials, Mixture Design and Construction. Segunda Edición 1996. p286.

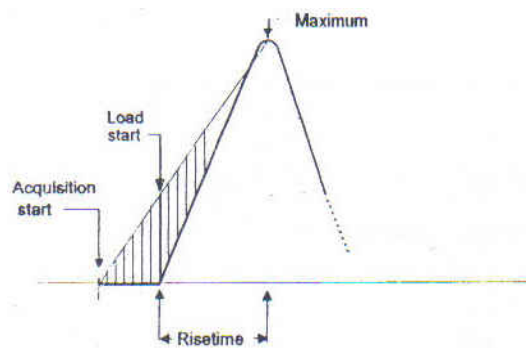
Se he encontrado que el ensayo ITSM es rápido y práctico, pero debe prestarse especial atención a la temperatura del material bajo ensayo, puesto que un cambio de 1° C podría causar una variación en el módulo de rigidez de hasta un 10 por ciento.⁷

En el Anexo A se muestra el formato que arroja el equipo NAT para el reporte de resultados del ensayo ITSM.

Durante el ensayo el espécimen es sometido a cinco pulsos de carga. El operador selecciona un tiempo pico para un pulso de carga y una deformación horizontal, y el software automáticamente ajusta tiempo y carga para alcanzar esos objetivos.

Durante el ensayo ITSM en el NAT, los pulsos de carga y deformación son capturados por el sistema de adquisición de datos. Cada pulso de carga (Figura 3) es analizado por el software para determinar el máximo valor de carga y el intervalo de tiempo entre el inicio del pulso de carga y el punto en el cual la máxima carga ocurra (tiempo pico).

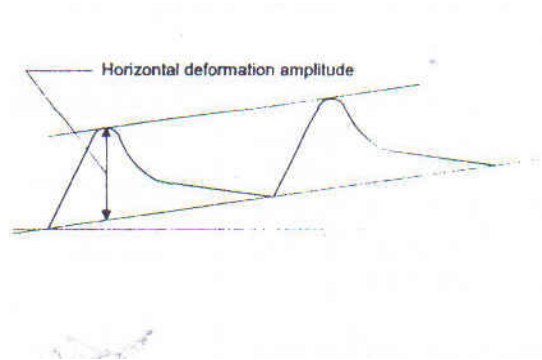
Figura 3. Pulso de carga ensayo ITSM.



⁷ UNIVERSITY OF NOTTINGHAM. NAT Course Notes. Parte del Manual de Usuario del Equipo NAT de CORASFALTOS. p16.

El pulso de deformación es analizado para determinar la amplitud de la onda de deformación como se observa en la figura 4.

Figura 4. Pulso de deformación ensayo ITSM.



NAT Course Notes, University of Nottingham – Page 17

El ensayo consiste en aplicar un esfuerzo de compresión axial sinusoidal (medio seno inverso) a un espécimen de concreto asfáltico a una temperatura y frecuencia de carga dados. Se mide la respuesta resultante recuperable de la deformación axial del espécimen y se calcula el módulo dinámico.

El ensayo ITSM es una prueba no destructiva, por lo que los especímenes pueden ser utilizados luego para la evaluación de deformación permanente o el ensayo de fatiga.

Los valores de módulo dinámico pueden emplearse tanto para el diseño de la mezcla asfáltica para pavimento como para el diseño del espesor de la capa de pavimento asfáltico.

Normalmente los valores de módulos dinámicos de la mezcla asfáltica se determinan a 5°C, 25°C y 40 °C y se grafican y comparan con una curva maestra obtenida por un centro de investigación reconocido por ejemplo, el Asphalt Institute (A.I.).⁸

La curva maestra es una gráfica que se realiza con los valores de módulos dinámicos registrados a las tres temperaturas de ensayo y muestra el comportamiento de las mezclas.

Resistencia a la fatiga (prEN 12697-24: 2004). La fatiga puede ser definida como el fenómeno de fractura bajo esfuerzo repetido o fluctuante teniendo un valor máximo generalmente menor que la resistencia a la tensión del material.⁹

La figura 1 muestra los esfuerzos en una capa asfáltica bajo una carga de rueda, así como una vista exagerada de los efectos del esfuerzo a tensión. En contraste a los esfuerzos verticales a compresión, los cuales actúan principalmente sobre el esqueleto de agregados, el esfuerzo a tensión actúa principalmente sobre el asfalto (o el mortero de asfalto-finos) el cual liga las partículas de agregados. Cuanto más grande la rigidez y mayor el número de puntos de contacto entre agregados, mas alta la rigidez de la mezcla y más baja la deformación unitaria por tensión para un cierto esfuerzo.¹⁰

⁸ CORPORACIÓN PARA LA INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO EN ASFALTOS EN EL SECTOR TRANSPORTE E INDUSTRIAL, CORASFALTOS. Proyecto de Investigación, Transferencia y Desarrollo de Tecnología para La Construcción de una Planta de Modificación de Asfaltos Utilizados en Pavimentación. Bucaramanga: CORASFALTOS, 2004. p50.

⁹ UNIVERSITY OF NOTTINGHAM. NAT Course Notes. Parte del Manual de Usuario del Equipo NAT de CORASFALTOS. p24.

¹⁰ Ibid. p24.

La figura 2 muestra en más detalle cómo los esfuerzos y las deformaciones en la parte superior e inferior de la capa asfáltica varían con las pasadas de la carga de rueda. Se puede observar que el esfuerzo (y la deformación) varían entre la tensión y la compresión. Con el paso continuo del tráfico, las repeticiones continuas de deformación por tensión resultarán eventualmente en el inicio de una fisura. Con el tráfico a futuro, la fisura se extenderá a través de la capa y eventualmente el pavimento fallará. Por esto, la vida a la fatiga puede ser dividida en dos fases: la vida hasta el inicio de la fisura y la vida desde el inicio de la fisura hasta la falla completa debido al fisuramiento por fatiga.¹¹

Debe notarse que, aunque el máximo esfuerzo a tensión ocurrirá en la parte inferior de la capa, las fisuras se pueden propagar más desde la parte superior hacia la parte inferior en lugar que desde la parte inferior hacia la parte superior de la capa.

Si la capa asfáltica es relativamente delgada entonces, cuanto más alto sea el módulo de rigidez, más bajas serán las deformaciones en la parte superior e inferior de la capa para una carga de rueda dada. Si la capa asfáltica es delgada entonces el material hace una contribución relativamente pequeña a la resistencia estructural de todo el pavimento.

El ensayo de Fatiga por tensión indirecta (Indirect Tensile Fatigue Test, ITFT) es aplicable a especímenes cilíndricos que tengan un espesor entre 30 y 75 mm y un diámetro nominal de 100 mm. Los resultados deben considerarse solo para indicar el inicio de la ruptura en mezclas bituminosas. El procedimiento consiste en someter la mezcla a cargas repetidas hasta que ésta falle por fatiga. Se considera la falla de un espécimen al punto en el cual hay 9 mm de deformación en el tope de la barra de carga.

¹¹ UNIVERSITY OF NOTTINGHAM. NAT Course Notes. Parte del Manual de Usuario del Equipo NAT de CORASFALTOS. p24.

En el Anexo B se muestra el formato que arroja el equipo NAT para el reporte de resultados del ensayo ITFT.

Normalmente se construye una gráfica para mostrar el comportamiento de la evolución de la deformación a la fatiga, y apreciar cuál de los ligantes es más susceptible bajo las mismas condiciones de esfuerzo y frecuencia de carga que otros ligantes, sin embargo, se debe conocer el comportamiento de la mezcla simulando el peso de los ejes de carga, mediante el ensayo de ley de fatiga.

3.2 LOS ASFALTOS COLOMBIANOS

Los asfaltos son constituidos por la fracción más pesada obtenida de la destilación al vacío del crudo reducido (fondos de la destilación atmosférica del petróleo). Normalmente son hidrocarburos pesados, solubles de color oscuro, y pueden ser líquidos o sólidos.

El uso principal de los asfaltos es la construcción y conservación de vías, para la elaboración de bases o carpetas de pavimentos. Pueden aplicarse de diferentes formas tales como emulsiones asfálticas, asfaltos líquidos o directamente como cemento asfáltico.

En general se puede afirmar que los crudos utilizados son de características apropiadas para obtener materiales asfálticos de calidad satisfactoria y que las especificaciones de

calidad de los asfaltos colombianos son las mismas que se aplican a los asfaltos norteamericanos.

ECOPETROL produce cementos asfálticos en las refinerías de Barrancabermeja y Apiay, hasta allí son transportados los diferentes crudos utilizando los oleoductos y carrotanques.

Aunque son productos estables, debe tenerse cuidado al calentarlos a temperaturas cercanas a 450 °F (232.2 °C) debido a que los vapores emitidos pueden hacer combustión en presencia de llama. Para su manejo deben aplicarse todas las medidas de seguridad establecidas para manipulación de materiales a altas temperaturas.

3.2.1 Características Físicas

Las propiedades de los cementos asfálticos vienen estipuladas por las pruebas de penetración, punto de inflamación y punto de ablandamiento, las cuales han sido complementadas con la medida de otras características mediante estudios específicos realizados por la Universidad del Cauca, a través de la Facultad de Ingeniería Civil y el Instituto Colombiano del Petróleo ICP.

- Asfalto del Complejo Industrial de Barrancabermeja

El asfalto proviene de la mezcla de fondo de vacío de base nafténica y fondos de vacío de base intermedia, ajustando la penetración, punto de ablandamiento y punto de ignición, mediante la adición de distintas cantidades de gasóleo de los mismos crudos.¹²

¹² Instituto Colombiano del Petróleo – ECOPETROL. Cartilla Práctica para el Manejo de los Asfaltos Colombianos. 1999. P22.

En la tabla 1 se muestran las principales características físicas promedio de este asfalto.

Tabla 1. Características físicas cemento asfáltico de Barrancabermeja.

ENSAYO	MÉTODO DE ENSAYO ASTM	VALORES PROMEDIO
Peso específico a 25 °C / 25 °C	D 70	1,0141
Penetración a 25 °C, 100 g 5 s	D 5	64,75
Punto de inflamación	D 92	335
Ductilidad a 25 °C, 5 cm/min	D 113	+100
Punto de ablandamiento	D 36	45,20
Viscosidad cinemática a 135 °C, min, cSt	D 2170	303,01
Viscosidad absoluta a 60 °C, P	D 2171	1370,64
Equivalente Heptano-Xileno	NLT - 135	5-10
EFEECTO DEL MEZCLADO EN PLANTA		
Ensayo al horno en película delgada	D 1754	
Penetración a 25 °C, 100 g 5 s		36,33
Punto de ablandamiento		50,60
Viscosidad absoluta a 60 °C, P		3313,11
Punto de ablandamiento		0,63

INSTITUTO COLOMBIANO DEL PETROLEO – ECOPEL. Cartilla practica para el manejo de los asfaltos colombianos. 1999.

- Planta de Asfalto de Apiay

El asfalto producido en Apiay se obtiene a partir de una mezcla de los crudos Castilla (65%) y Apiay (35%) provenientes de dicha región. Desde el inicio de su producción, en el año de 1989, se han venido realizando ajustes en la operación de la planta con el propósito de ofrecer un producto homogéneo y de calidad acorde a las exigencias del mercado.¹³

En la tabla 2 se muestran las principales características físicas promedio de este asfalto.

Tabla 2. Características físicas cemento asfáltico de Apiay.

ENSAYO	MÉTODO DE ENSAYO ASTM	VALORES PROMEDIO
Peso específico a 25 °C / 25 °C	D 70	1,026
Penetración a 25 °C, 100 g 5 s	D 5	60,13
Punto de inflamación	D 92	291
Ductilidad a 25 °C, 5 cm/min	D 113	+100
Punto de ablandamiento	D 36	47,55
Viscosidad cinemática a 135 °C, min, cSt	D 2170	272,84
Viscosidad absoluta a 60 °C, P	D 2171	1691,8
Equivalente Heptano-Xileno	NLT - 135	25-30

¹³ Instituto Colombiano del Petróleo – ECOPEPETROL. Cartilla Práctica para el Manejo de los Asfaltos Colombianos. 1999. p24.

EFECTO DEL MEZCLADO EN PLANTA		
Ensayo al horno en película delgada	D 1754	
Penetración a 25 °C, 100 g 5 s		33,6
Punto de ablandamiento		53,00
Viscosidad absoluta a 60 °C, P		6134,09
Punto de ablandamiento		1,14

INSTITUTO COLOMBIANO DEL PETROLEO – ECOPELROL. Cartilla practica para el manejo de los asfaltos colombianos. 1999.

Especificaciones. En nuestro país los asfaltos que se utilizan como ligantes en las mezclas en caliente, se encuentran dentro de las exigencias de calidad dadas por el Instituto Nacional de Vías, basadas en el ensayo de Penetración a 25°C (ver tabla 3).

Tabla 3. Especificaciones INVIAS para cementos asfálticos.

Especificación	INV E -400 / 410					
	Características	NORMA INV	80/100		60/70	
			Mín.	Máx.	Mín.	Máx.
Penetración a 25 °C, 100 g, 5 s (0,1 mm)	E - 706	80	100	60	70	
Índice de Penetración	E - 724	-1	+1	-1	+1	
Pérdida por calentamiento en película delgada a 163 °C, 5 h (%)	E - 721	-	1,0	-	1,0	
Ductilidad a 25 °C, 5 cm/min, (cm)	E - 702	100	-	100	-	

Penetración al 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

INV – 400 / 410

La Norma de referencia ASTM D 1437, clasifica los asfaltos con base en el ensayo de Penetración a 25°C (ver tabla 4).

Tabla 4. Especificaciones para cementos asfálticos.

Producto: Asfalto 80/100				
Grado	Asfalto Líquido			
Referencia	ASTM D 1437			
Actualización	Marzo 1, 2005			
Características	Unidades	Métodos	Mínimo	Máximo
Ductilidad a 25 °C, 5 cm/min	cm	D 113	100	-
Penetración a 25 °C, 100 g 5 s	mm/10	D 5	80	100
Punto de ablandamiento	°C	D 36	42	53
Punto de inflamación	°C	D 92	232	-
Solubilidad en Tricloroetileno	g/100g	D 2042	99	-
Pérdida de masa	g/100	D 2872	-	1,0

Producto: Asfalto 60/70				
Grado	Asfalto Líquido			
Referencia	ASTM D 1437			
Actualización	Marzo 1, 2005			
Características	Unidades	Métodos	Mínimo	Máximo
Ductilidad a 25 °C, 5 cm/min	cm	D 113	100	-
Penetración a 25 °C, 100 g 5 s	mm/10	D 5	60	70
Punto de ablandamiento	°C	D 36	45	55
Punto de inflamación	°C	D 92	232	-
Solubilidad en Tricloroetileno	g/100g	D 2042	99	-
Pérdida de masa	g/100	D 2872	-	1,0

ASTM D 1437

La Norma ASTM D 3381, clasifica los asfaltos de acuerdo a sus valores de viscosidad absoluta, a 60°C y cinemática, a 135°C, tanto para el asfalto original como para el asfalto envejecido mediante el ensayo de película delgada (tabla 5).

Tabla 5. Especificaciones para cementos asfálticos.

Grado de Viscosidad					
Referencia	ASTM D 3381				
	AC-2.5	AC-5	AC-10	AC-20	AC-40
Viscosidad a 60 °C, P	250 +/- 50	500 +/- 100	1000 +/- 200	2000 +/- 400	4000 +/- 800
Viscosidad a 135 °C, min, cSt	80	11	150	210	300
Penetración a 25 °C, 100 g, 5 s, 0,1 mm	200	120	70	40	20
Punto de inflamación, copa abierta de Cleaveland, °F (°C)	325 (163)	350 (177)	425 (219)	450 (232)	450 (232)
Solubilidad en Tricloroetileno, min. % Análisis al residuo de lámina delgada	99,0	99,0	99,0	99,0	99,0
Viscosidad a 25 °C, máx., P	1250	2500	5000	10000	20000
Ductilidad a 25 °C, cm/min. Mín., cm	100*	100	50	20	10

* Si la ductilidad a 25°C está por debajo de 100 cm, el material se aceptará si la ductilidad a 15,5°C es mínimo de 100 cm a una velocidad de 5 cm/min.

ASTM D 3381

En la tabla 6 se puede observar la clasificación de los asfaltos producidos en Apiay y Barrancabermeja, según las normas antes mencionadas.

Tabla 6. Clasificación de los asfaltos producidos por ECOPETROL.

ESPECIFICACIÓN	ASFALTO PROVENIENTE DE REFINERÍA	
	BARRANCABERMEJA	APIAY
INV - 400	60 - 70	60 - 70
ASTM D 1437	60 - 70	60 - 70
ASTM D 3381	AC - 10	AC - 20

INSTITUTO COLOMBIANO DEL PETROLEO – ECOPETROL. Cartilla practica para el manejo de los asfaltos colombianos. 1999.

3.3 MEZCLAS DENSAS EN CALIENTE

La granulometría del agregado obtenido mediante la combinación de distintas fracciones, incluido el llenante mineral, deberá estar comprendida en algunas de las franjas fijadas en la tabla 450.2 del artículo 450-07.

El análisis granulométrico se deberá efectuar de acuerdo con la norma INV E-213.

Tabla 7. Especificación franjas granulométricas para mezclas en caliente.

TAMIZ		TIPO DE MEZCLA		
mm	U.S. Standard	MDC-1	MDC-2	MDC-3
37,5	1 ½"			
25,0	1 "	100		
19,0	¾ "	80 - 95	100	
12,5	½ "	67 - 85	80 - 95	
9,5	⅜ "	60 - 77	70 - 88	100
4,75	No. 4	43 - 59	49 - 65	65 - 87
2,00	No. 10	29 - 45	29 - 45	43 - 61
0,425	No. 40	14 - 25	14 - 25	16 - 29
0,180	No. 80	8 - 17	8 - 17	9 - 19
0,075	No. 200	4 - 8	4 - 8	5 - 10

Artículo 450-07 MEZCLAS ASFALTICAS EN CALIENTE. 2007.

4. ELABORACIÓN DE LA BASE DE DATOS

El objetivo planteado fue la elaboración de una base de datos con información de resultados de ensayos dinámicos que pudiese resultar útil tanto para la Universidad como para CORASFALTOS.

A la Universidad va a servir como base para alimentar presentes y futuras investigaciones y, además, como material académico, pues puede ser usada para la realización de problemas en la clase Diseño de Pavimentos. Para CORASFALTOS es de gran utilidad debido a que la base de datos se va a seguir alimentando para llegar a tener cantidad suficiente de información que permita hacer estimaciones sobre el comportamiento de las propiedades dinámicas de las mezclas elaboradas con asfaltos colombianos a partir de datos estadísticos confiables; información de gran interés para la industria del asfalto en el país, pues esto permite que el prediseño de los pavimentos tenga resultados más próximos a los reales, además, actualmente no se cuenta con datos de este tipo que contemplen mezclas de todo el territorio nacional.

En la investigación bibliográfica que se realizó para la elaboración de este trabajo, se encontró el artículo *“Caracterización Dinámica de Mezclas Asfálticas MDC-2, Mediante Módulo Dinámico Resiliente por Tensión Indirecta”* de Hermes Vacca, Mariana Ortiz y Javier Ortiz, adscritos a la Pontificia Universidad Javeriana y cuyo alcance se limita a mezclas que se hayan producido o controlado en el área de la ciudad de Bogotá.¹⁴

¹⁴ VACCA, Hermes; ORTIZ, Mariana; ORTIZ, Javier. Caracterización Dinámica de Mezclas Asfálticas MDC-2, Mediante Módulo Dinámico Resiliente por Tensión Indirecta. Pontificia Universidad Javeriana - Santa Fe de Bogotá. En: 4AS. JORNADAS INTERNACIONALES DEL ASFALTO. (2004: Cartagena de Indias). Memorias, 2004. +1 CD (CD-ROM).

No hay antecedentes de un esfuerzo por caracterizar las mezclas asfálticas de todo el país elaboradas con asfaltos convencionales. Aunque la información sea escasa, es un buen punto de partida para investigaciones futuras.

Para llevar a cabo este propósito, se tuvieron a disposición los archivos digitales (en formato “.doc”) de los informes y reportes de resultados de todos los ensayos realizados en CORASFALTOS desde el año 2004.

Como se definió en los objetivos, el trabajo se centra en los ensayos dinámicos realizados con el equipo NAT, específicamente en los ensayos de Módulo Dinámico ITSM y Fatiga a Esfuerzo Controlado ITFT, regidos por las normas europeas prNE 12697-26 y prNE 12697-24 respectivamente.

Tras hacer revisión de todos los informes y reportes de resultados, se seleccionaron los correspondientes a estos dos ensayos para construir la base de datos. Se seleccionó el entorno de Microsoft Access 2007 ® como el apropiado para la elaboración de la misma.

El archivo de ACCES ® puede ser consultado en el CD Anexo C bajo ese mismo nombre: “Anexo C.accdb” y será fácilmente identificable como se muestra en la siguiente figura.

Figura 5. Aspecto del archivo “Anexo C.accdb”.



La información en la base de datos se organizó en forma de Tablas, Consultas e informes como muestra la figura 6.

Figura 6. Organización de la información en la base de datos.

Código	Asfalto	Mezcla	Frecuencia, Hz
C-016-1	60/70	MDC-1	10
C-016-1	60/70	MDC-1	10
C-016-1	60/70	MDC-1	10
C-016-1	60/70	MDC-1	10
C-016-1	60/70	MDC-1	10
C-016-1	60/70	MDC-1	10
C-016-1	60/70	MDC-1	10
C-016-1	60/70	MDC-1	10
C-016-1	60/70	MDC-1	10
C-016-1	60/70	MDC-1	10

Se construyó una tabla llamada “Índice” con un listado por código de las muestras ensayadas, el tipo de ensayo que se realizó a cada una de ellas y otra información de relevancia.

Cabe anotar que, en esta misma tabla, el valor de porcentaje de asfalto, de las muestras para las cuales se suministró esta información, aparece referenciado en la columna “OBSERVACIONES”.

Figura 7. Tabla “Índice” de la base de datos.

Índice					
CODIGO MUESTRA	ENSAYO	ASFALTO	OBSERVACIONES	COMPACTACIÓN	
C-001-1	ITSM	60/70	MDC-2	SGC	
C-001-2	ITSM	60/70	MDC-1	SGC	
C-002	ITSM	AC-20	MDC-1; 4,5% de asfalto AC-20	MARSHALL	
C-003	ITSM	60/70	MDC-2	SGC	
C-003	ITFT	60/70	MDC-2	SGC	
C-004	ITSM	60/70	MDC-2	SGC	

Otra tabla llamada “Ensayos” relaciona los ensayos bajo análisis, las normas de referencia, entre otros.

Figura 8. Tabla “Ensayos” de la base de datos.

ITFT Ensayos						
ENSAYO	NORMA	ADICIONAL	EQUIP	INCERT	NIVEL DE C	UNIDAD
Fatiga a esfuerzo controlado ITFT	prNE 12697-24	ITST	NAT	5,0E+05	95	ciclos de carga
Modulo Dinámico ITSM	prNE 12697-26	IC-TY	NAT	1,1E+00	95	%
*						

Toda la información correspondiente al ensayo de Módulo dinámico ITSM se introdujo en una tabla llamada “ITSM: Tabla”, y la información correspondiente a Fatiga ITFT se almacenó en la tabla “ITFT: Tabla”, y se procedió a filtrar la información a través de las herramientas conocidas como “Consultas”, y la información de las consultas se presenta de un modo más amable por medio de “Informes”. En las figuras 9 e 10 se presentan ejemplos de una Consulta y de un Informe tipo.

Figura 9. Ejemplo Consulta “ITSM 60/70 MDC-1 10Hz” de la base de datos.

ITSM 60/70 MDC-1 10Hz						
Id	Código	Asfalto	Mezcla	Frecuencia,	Núc	
85	C-013-1	60/70	MDC-1	10	A1	
87	C-013-1	60/70	MDC-1	10	B1	
89	C-013-1	60/70	MDC-1	10	C1	

Figura 10. Ejemplo Informe “ITSM 60/70 MDC-1 10Hz” de la base de datos.

ITSM 60/70 MDC-1 10Hz						
Código	Asfalto	Mezcla	Frecuencia, Hz	Núcleo	Temperatura, °C	Promedio, MPa
C-013-1	60/70	MDC-1	10	A1	15	7697
C-013-1	60/70	MDC-1	10	B1	25	3300

Como alcance de este trabajo se define que solo se van a incluir mezclas elaboradas con asfaltos convencionales colombianos 60/70 y 80/100 de la refinería de Barrancabermeja y de la Planta de Apiay, por ello se seleccionaron aquellos registros que correspondían a muestras con asfaltos convencionales. Se descartaron las mezclas elaboradas con asfaltos modificados o aditivados debido a que no se cuenta información precisa acerca de las proporciones, tipos y características de los modificadores utilizados. Debe aclararse que, debido a la poca información con relación al sitio de origen de los asfaltos utilizados, no es posible hacer diferencia entre el asfalto 60/70 de Barrancabermeja y el de Apiay, por lo que la clasificación se hará como asfalto 60/70 y asfalto 80/100 sin importar la procedencia del mismo.

Los filtros utilizados en las consultas se definieron de la siguiente manera: en un primer nivel de filtro se dividió la información en dos grupos, las mezclas con asfalto 60/70 y las mezclas con asfalto 80/100; en el siguiente nivel se dividió cada grupo por el tipo de gradación de la mezcla, según lo definido por la especificación INVIAS Artículo 450-07 en mezclas MDC-1 y MDC-2; luego, se subdividió por las frecuencias utilizadas en el ensayo, a saber 2,5 Hz., 7,5 Hz. y 10 Hz.

Cada una de estas divisiones se filtró con una Consulta, y a cada una le corresponde un informe; esto se hizo tanto para el ensayo ITSM como para ITFT.

El porcentaje de vacíos se encuentra en la columna "VTM" de todas las tablas de la base de datos, cuando se tiene el valor del mismo.

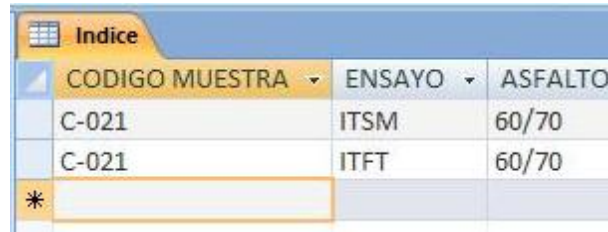
La base de datos se sumará al archivo digital de CORASFALTOS y se seguirá alimentando con los ensayos que se vayan realizando, con lo que irá aumentando el alcance y la confiabilidad de las inferencias que se puedan hacer a partir de esta.

Cuando nueva información vaya a ser agregada a la base de datos, deberá consignarse en la Tabla "Índice" la información general del ensayo, y los resultados se introducirán a través de la Tabla ITSM si se trata de Módulos Dinámicos, o la Tabla ITFT si es Fatiga a Esfuerzo Controlado.

Las consultas se actualizarán automáticamente filtrando la información con los criterios prefijados.

Para añadir información en la Tabla "Índice", se debe introducir la información a partir de la última fila de la primera columna (CODIGO MUESTRA).

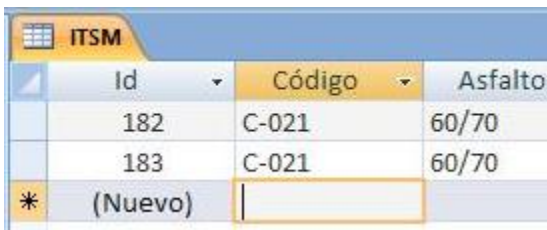
Figura 11. Agregar información a la tabla “Índice”.



CODIGO MUESTRA	ENSAYO	ASFALTO
C-021	ITSM	60/70
C-021	ITFT	60/70
*		

Para añadir información a las tablas ITSM o ITFT se debe empezar a introducir en la última fila de la segunda columna (Código).

Figura 12. Agregar información a la tabla “ITSM” o “ITFT”.

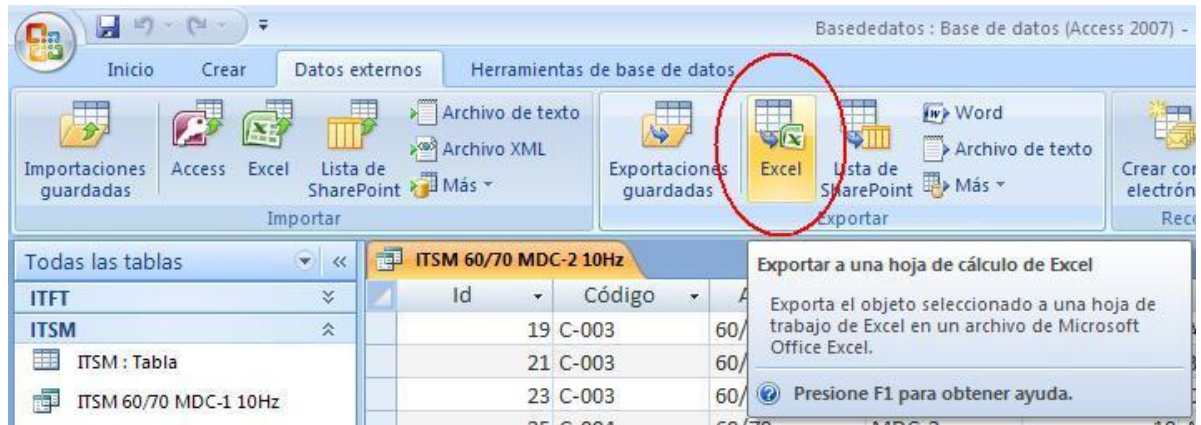


Id	Código	Asfalto
182	C-021	60/70
183	C-021	60/70
*(Nuevo)		

La información contenida en las Tablas y en las Consultas de la Base de datos permite tratamientos y filtros adicionales para realizar consultas deseadas. Además, esta información es fácilmente exportable a hojas de cálculo de Microsoft Excel ® para su análisis gráfico como ajustes, tendencias y comparaciones entre grupos, etc.

Para exportar datos a Microsoft Excel ® se abre la Tabla o la Consulta que se quiere exportar en Microsoft Access ® (pueden aplicarse filtros); siguiendo en Access ® se va al menú “Datos externos” y se hace click en el icono que se muestra en la gráfica.

Figura 13. Icono para exportar información de la Base de datos a una hoja de cálculo en Excel ®.



Luego se siguen los pasos sencillos del asistente para configurar las características que se le van a dar a la hoja de cálculo.

5. ANÁLISIS DE DATOS

5.1 MÓDULO DINÁMICO ITSM

Para analizar la variación del módulo dinámico con la temperatura se usó la información recopilada en la base de datos correspondiente a ensayos ITSM y, por medio de filtros, se dividieron los datos de modo que se pudiese obtener una tendencia en el comportamiento dinámico de la mezcla asfáltica en función del tipo de asfalto, tipo de mezcla y frecuencia utilizados en cada ensayo.

Primero se realizaron curvas de tendencia y luego se hizo un análisis estadístico tanto descriptivo como inferencial para las condiciones en las que se encontró una cantidad suficiente de datos para cada propósito.

5.1.1 Curvas de tendencia

A continuación se presentan las gráficas de Módulo Dinámico contra temperatura para las diferentes condiciones. Para algunas de las condiciones no se obtuvieron datos, por lo que no hay información para estas solicitudes.

Se seleccionó una ecuación de tipo exponencial para analizar la tendencia de los datos por ser esta la que mejor ajuste proporciona al realizar la regresión lineal.

Figura 14. Gráfica de Módulo Dinámico contra Temperatura, usando asfalto 60/70, mezcla tipo MDC-1 y frecuencia de 2,5 Hz.

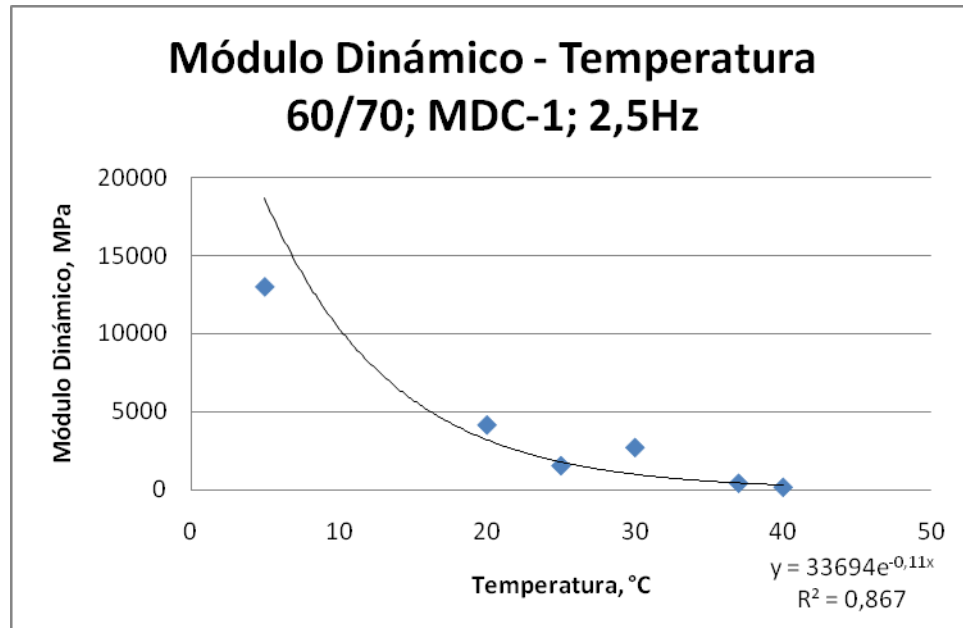


Figura 15. Gráfica de Módulo Dinámico contra Temperatura, usando asfalto 60/70, mezcla tipo MDC-1 y frecuencia de 7,5 Hz.

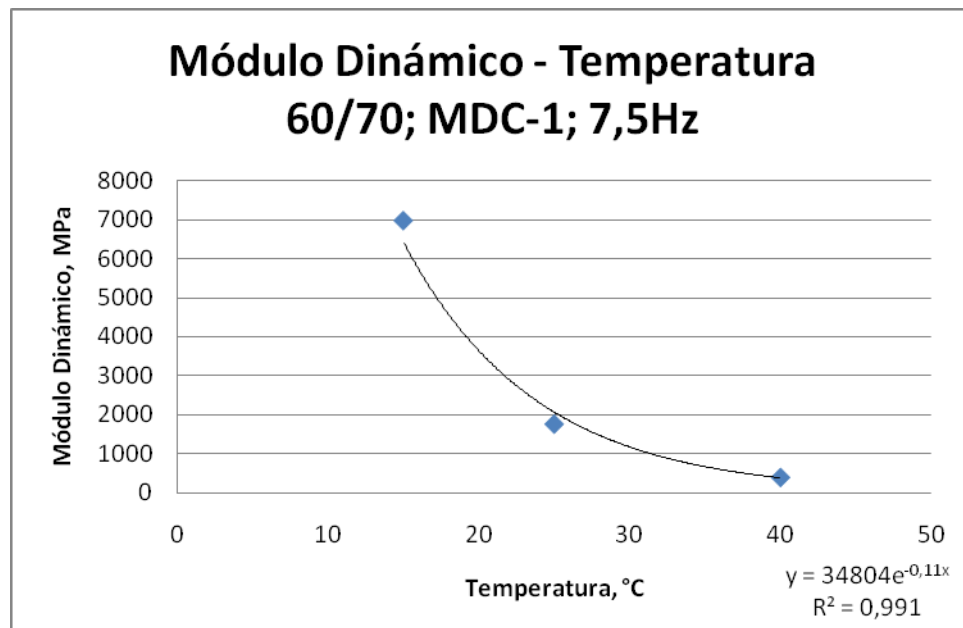


Figura 16. Gráfica de Módulo Dinámico contra Temperatura, usando asfalto 60/70, mezcla tipo MDC-1 y frecuencia de 10 Hz.

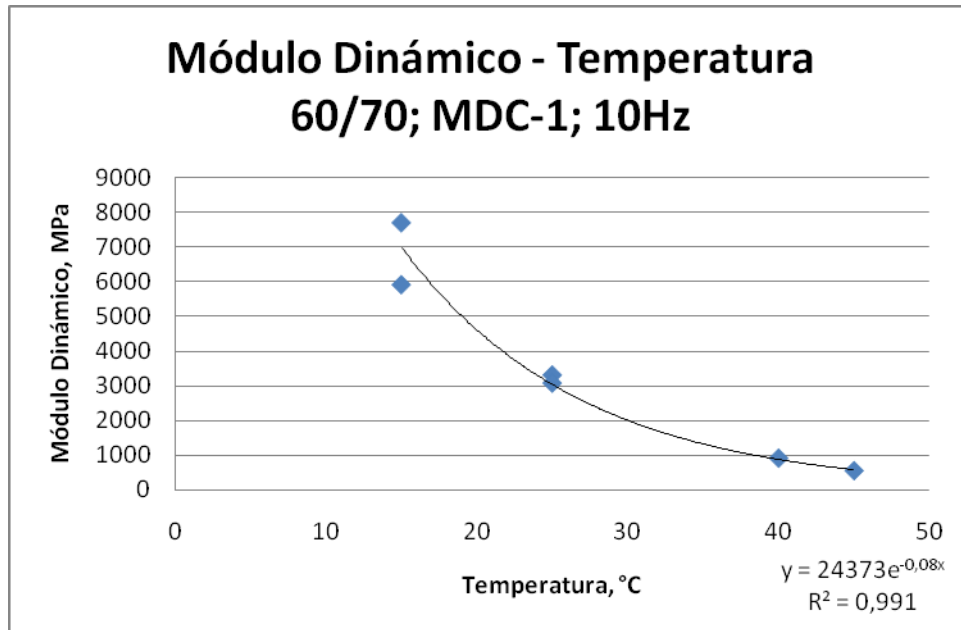


Figura 17. Gráfica de Módulo Dinámico contra Temperatura, usando asfalto 60/70, mezcla tipo MDC-2 y frecuencia de 2,5 Hz.

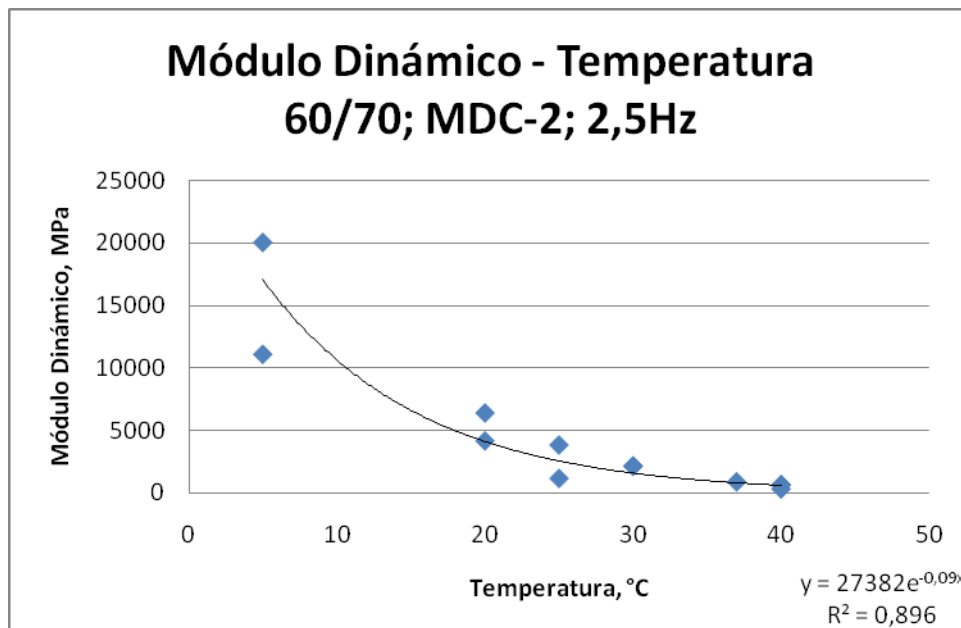


Figura 18. Gráfica de Módulo Dinámico contra Temperatura, usando asfalto 60/70, mezcla tipo MDC-2 y frecuencia de 7,5 Hz.

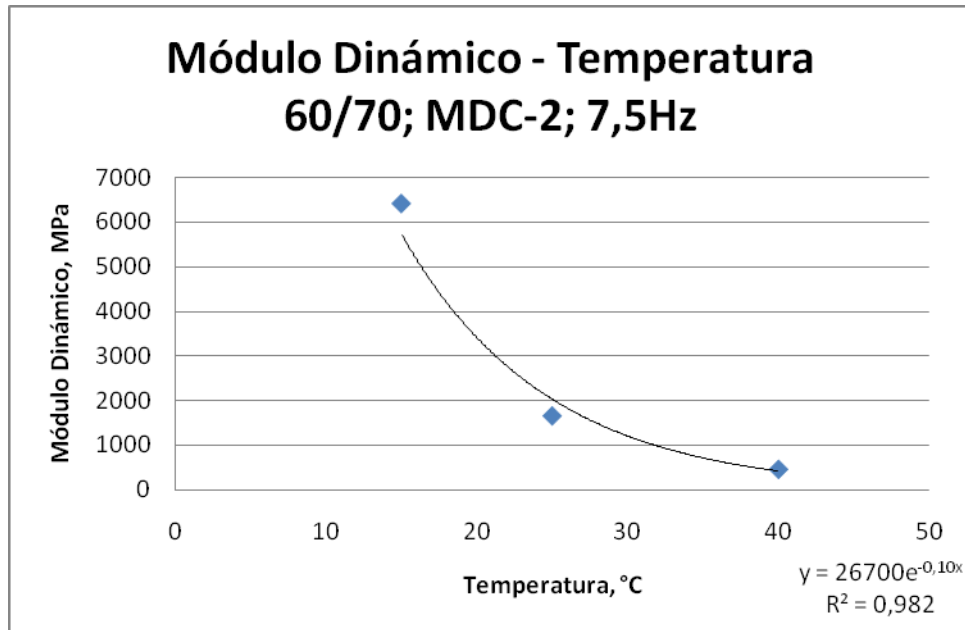


Figura 19. Gráfica de Módulo Dinámico contra Temperatura, usando asfalto 60/70, mezcla tipo MDC-2 y frecuencia de 10 Hz.

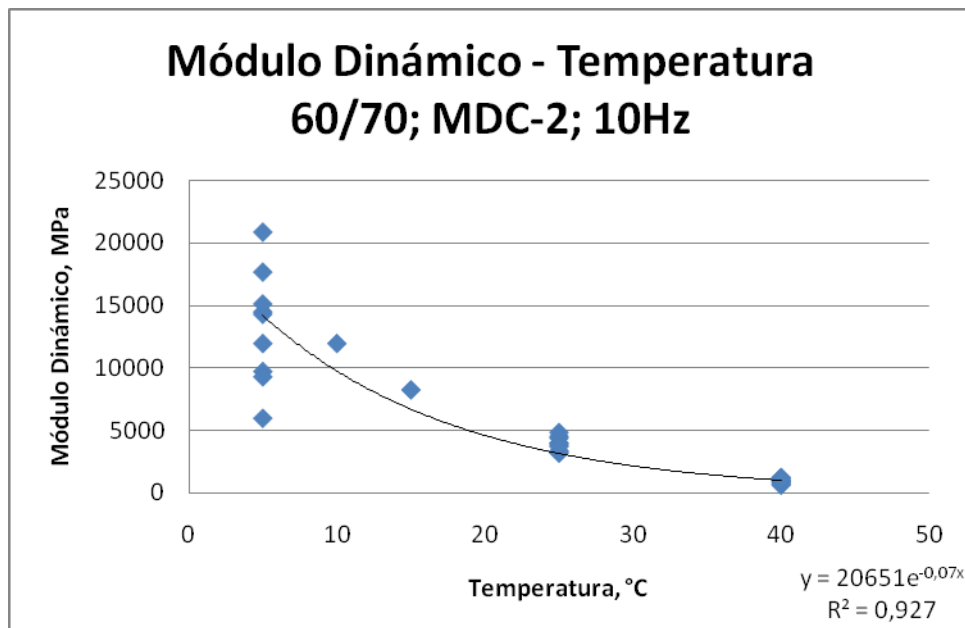


Figura 20. Gráfica de Módulo Dinámico contra Temperatura, usando asfalto 80/100, mezcla tipo MDC-1 y frecuencia de 10 Hz.

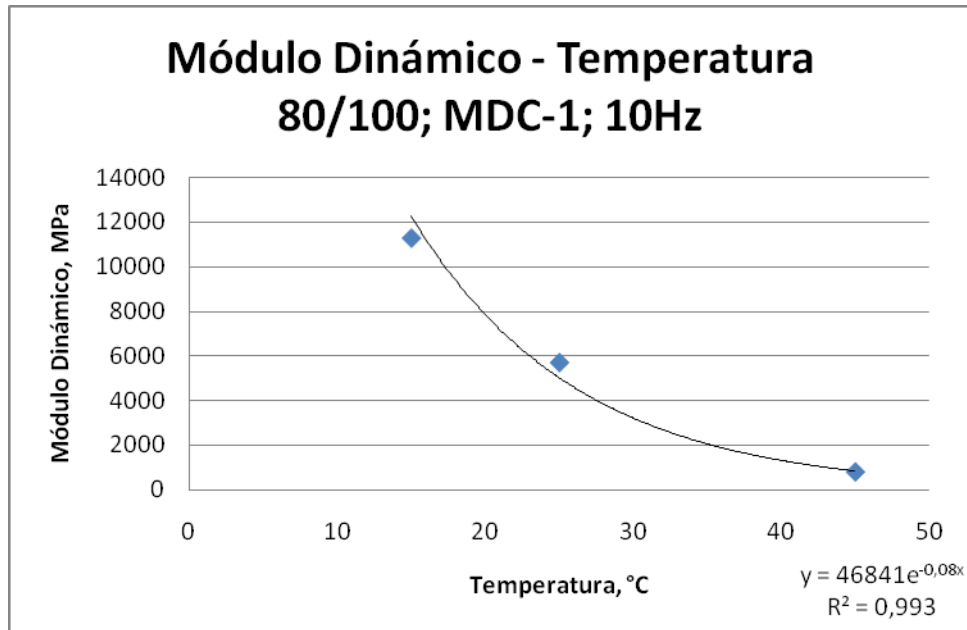


Figura 21. Gráfica de Módulo Dinámico contra Temperatura, usando asfalto 80/100, mezcla tipo MDC-2 y frecuencia de 2,5 Hz.

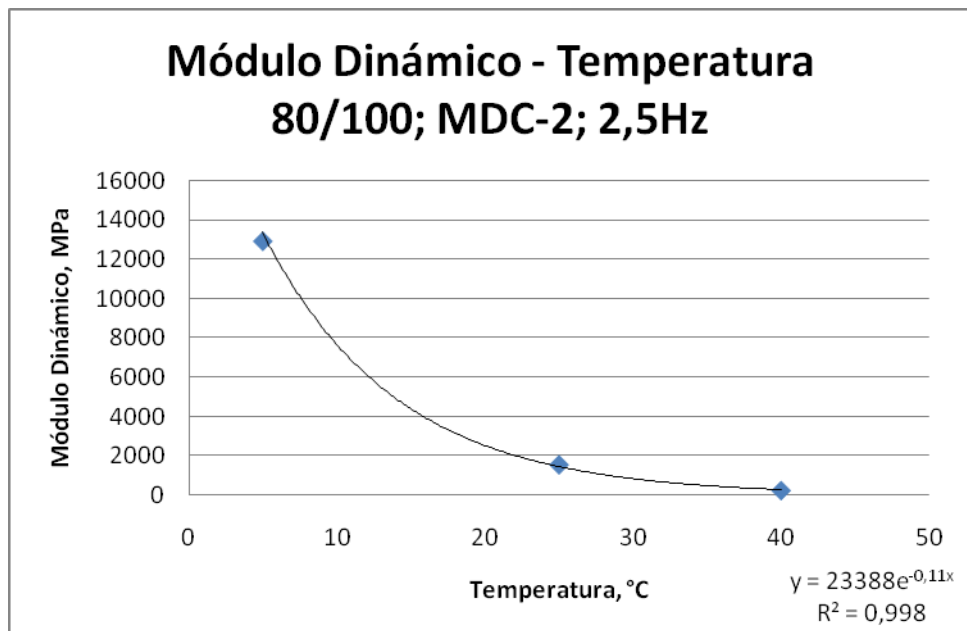
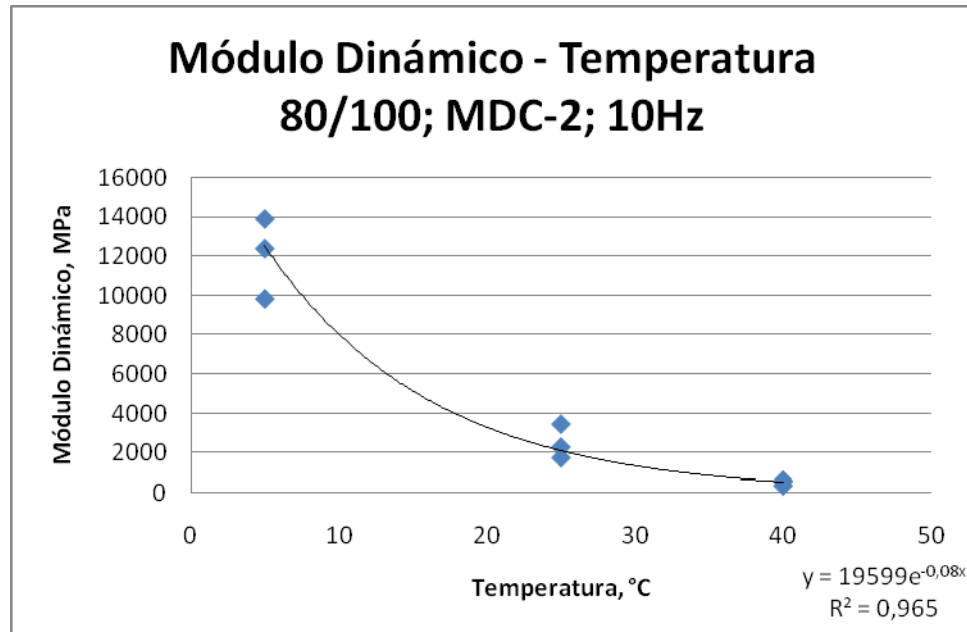


Figura 22. Gráfica de Módulo Dinámico contra Temperatura, usando asfalto 80/100, mezcla tipo MDC-2 y frecuencia de 10 Hz.



Los parámetros fisicomecánicos de las muestras mostradas en cada gráfica que son similares son los siguientes: tipo de asfalto, tipo de mezcla, frecuencia y temperatura de ensayo. Otros parámetros como el contenido de asfalto o porcentaje de vacíos, que tienen gran influencia en el desempeño de la mezcla, no se han podido establecer como criterio debido a que no se cuenta con información acerca de ellos.

El módulo dinámico a 20°C es un dato útil, como valor de entrada, en varias metodologías para el diseño de estructuras de pavimento. Las ecuaciones de ajuste obtenidas de las curvas de tendencia para las diferentes condiciones permiten el cálculo de este valor.

Vale la pena aclarar que la única condición para la que hay suficiente información es para las mezclas elaboradas con asfalto 60/70, MDC-2 y 10 Hz. Para ese caso, el módulo dinámico a 20°C resulta ser de 5092 MPa.

Tabla 8. Módulo dinámico a 20 °C a partir de las ecuaciones de ajuste.

ASFALTO	MEZCLA	FRECUENCIA	ECUACIÓN	MÓDULO 20°C, MPa
60/70	MDC-1	2,5 Hz	$y=33694e^{-0,11x}$	3733
		7,5 Hz	$y=34804e^{-0,11x}$	3856
		10 Hz	$y=24373e^{-0,08x}$	4921
	MDC-2	2,5 Hz	$y=27382e^{-0,09x}$	4526
		7,5 Hz	$y=26700e^{-0,10x}$	3613
		10 Hz	$y=20651e^{-0,07x}$	5092
80/100	MDC-1	2,5 Hz	-	-
		7,5 Hz	-	-
		10 Hz	$y=46841e^{-0,08x}$	9457
	MDC-2	2,5 Hz	$y=23388e^{-0,11x}$	2591
		7,5 Hz	-	-
		10 Hz	$y=19599e^{-0,08x}$	3957

5.1.2 Análisis estadístico

Para realizar un análisis estadístico relevante es necesario tener una cantidad mínima de datos. Aunque el número de ensayos registrados en la base de datos es grande, al filtrar la información se tiene poca información en cada uno de los subgrupos obtenidos.

Solo se obtuvo una cantidad significativa de datos para el grupo conformado por las condiciones: asfalto 60/70, Mezcla MDC-1 y Frecuencia 10 Hz. Para este grupo se realizó análisis estadístico del Módulo dinámico para temperaturas de 5 °C, 25 °C y 40 °C.

Estadística Descriptiva. Se obtuvieron medidas de tendencia central y de dispersión tales como la media, la varianza, desviación estándar, coeficiente de variación, entre otros, que se relacionan en la siguiente tabla:

Tabla 9. Estadística Descriptiva: Módulo Dinámico a 5 °C, 25 °C y 40 °C; 60/70, MDC-1, 10 Hz.

		Módulo Dinámico, MPa		
Temperatura		5 °C	25 °C	40 °C
Media	x	13247	3879	919
Varianza	s ²	20866418	306718	42269
DS	s	4568	554	206
CV	CV=(S/X)*100	34	14	22
n		9	10	9
Mínimo		5948	3153	585
Máximo		20861	4813	1203
Rango		14913	1660	618

De los resultados anteriores se obtiene que el módulo dinámico para una mezcla MDC-2 con asfalto convencional 60/70 y ensayada a una frecuencia de 10 Hz. tiene una media de 13247 MPa a 5°C, 3879 MPa a 25°C y 919 MPa a 40°C; con desviaciones estándar de 4568 MPa, 554 MPa y 206 MPa respectivamente.

Estadística Inferencial. Las variaciones en los resultados de ensayos de materiales utilizados en la construcción de pavimentos dependen de los equipos y procedimientos de ensayo y de los mismos materiales.

Con un buen control sobre estas variables, tal como el exigido por las especificaciones técnicas vigentes, se puede garantizar una variación baja en las propiedades de los materiales.

Se ha observado que propiedades de las mezclas asfálticas tales como gradación de los agregados, contenido de asfalto, densidad vacíos totales en la mezcla, estabilidad y flujo y muchas otras, siguen una distribución normal.¹⁵

Conociendo que estas propiedades están normalmente distribuidas pueden utilizarse pruebas que sigan esta distribución para hacer predicciones estadísticas.

La distribución t Student puede ser utilizada cuando: la muestra es pequeña, la desviación estándar de la población es desconocida y la población es normal o casi normal.¹⁶

Las condiciones antes mencionadas se cumplen para este caso (muestra pequeña menos de 30 observaciones) por lo que puede utilizarse la distribución t Student para el cálculo del intervalo de confianza para estimar la media poblacional.

¹⁵ NATIONAL ASPHALT PAVEMENT ASSOCIATION (NAPA), NATIONAL CENTER FOR ASPHALT TECHNOLOGY (NCAT). Hot Mix Asphalt Materials, Mixture Design and Construction. 1996. p390.

¹⁶ WEBSTER, Allen. Estadística Aplicada a los Negocios y a la Economía, Tercera Edición. Santa Fe de Bogotá: McGraw-Hill Interamericana, S.A., 2000. ISBN: 0-256-22554-0. p176.

Ecuación 9. Intervalo de confianza para estimar la media poblacional – muestras pequeñas.

$$I.C.\mu = \bar{X} \pm (t)(s_x) = \bar{X} \pm t \frac{s}{\sqrt{n}}$$

Los resultados para un intervalo de confianza del 95% se consignan en la siguiente tabla:

Tabla 10. Estimación del intervalo de confianza la media poblacional (Módulo dinámico) utilizando la distribución t Student con dos colas.

		Módulo Dinámico, Mpa		
Temperatura		5 °C	25 °C	40 °C
I.C.S.	$x+(t*s/\sqrt{n})$	16758	4275	1077
Media	x	13247	3879	919
I.C.I.	$x-(t*s/\sqrt{n})$	9736	3483	761

$\alpha=0,05; \alpha/2=0,025$

Se infiere entonces que para una mezcla MDC-2 con asfalto convencional 60/70 y ensayada a una frecuencia de 10 Hz. el módulo dinámico se encuentra en el intervalo de 16758 a 9736 MPa con una confiabilidad del 95% para una temperatura de 5°C; a los 25° de temperatura el intervalo va de 4275 a 3483 MPa con una confiabilidad del 95%; y de 1077 a 761 MPa a una temperatura de 40°C también con una confiabilidad del 95%.

5.2 FATIGA A ESFUERZO CONTROLADO ITFT

5.2.1 Curvas de tendencia

A continuación se presentan las gráficas de Deformación unitaria contra Ciclos de falla para las diferentes condiciones. Las gráficas se presentan en escala doble logarítmica. La temperatura de ensayo es de 20 °C.

Figura 23. Gráfica de Deformación contra Ciclos de falla, usando asfalto 60/70, mezcla tipo MDC-1 y frecuencia de 2,5 Hz.

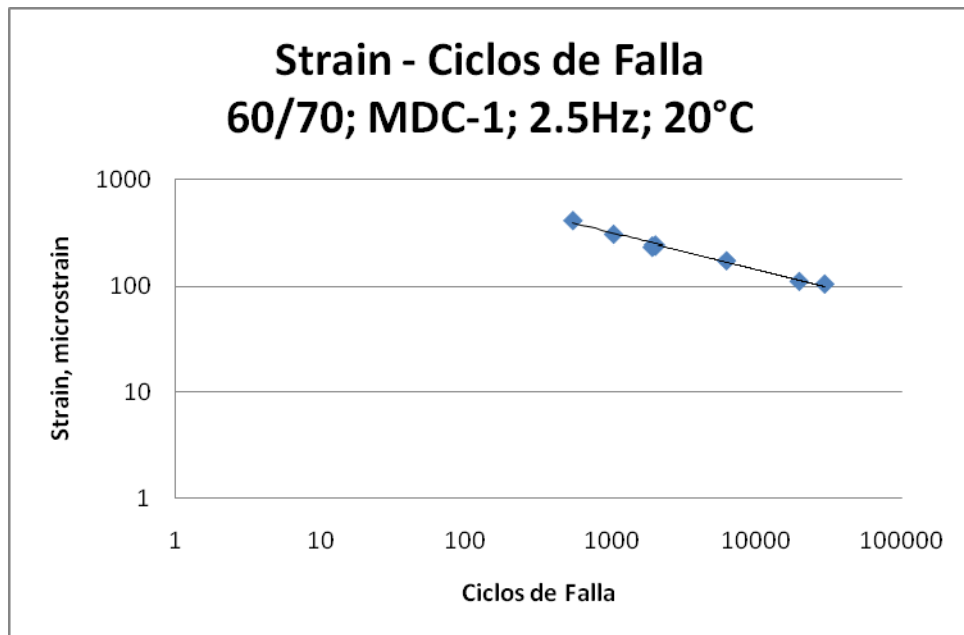


Figura 24. Gráfica de Deformación contra Ciclos de falla, usando asfalto 60/70, mezcla tipo MDC-1 y frecuencia de 10 Hz.

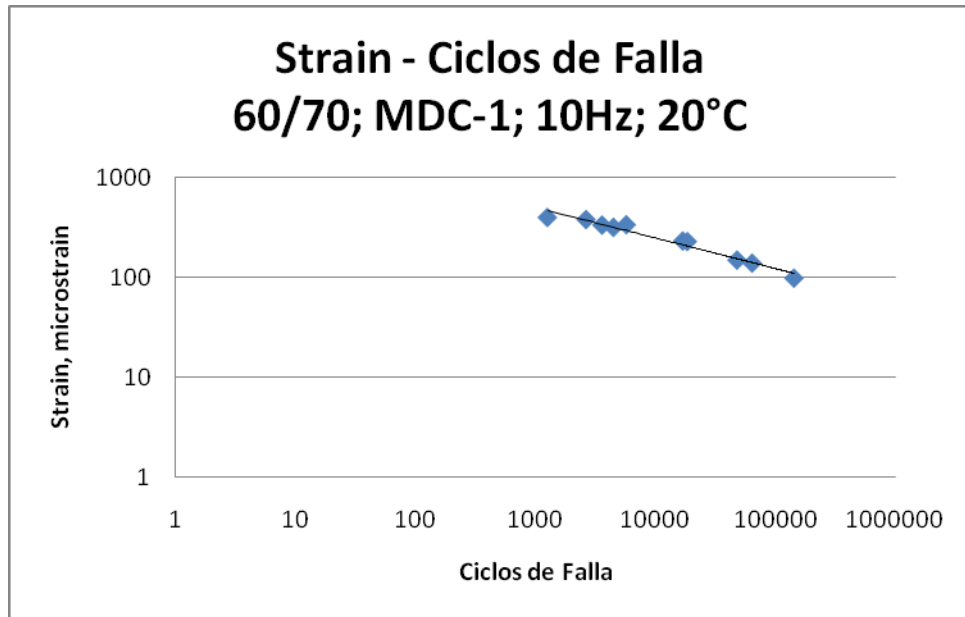


Figura 25. Gráfica de Deformación contra Ciclos de falla, usando asfalto 60/70, mezcla tipo MDC-2 y frecuencia de 2,5 Hz.

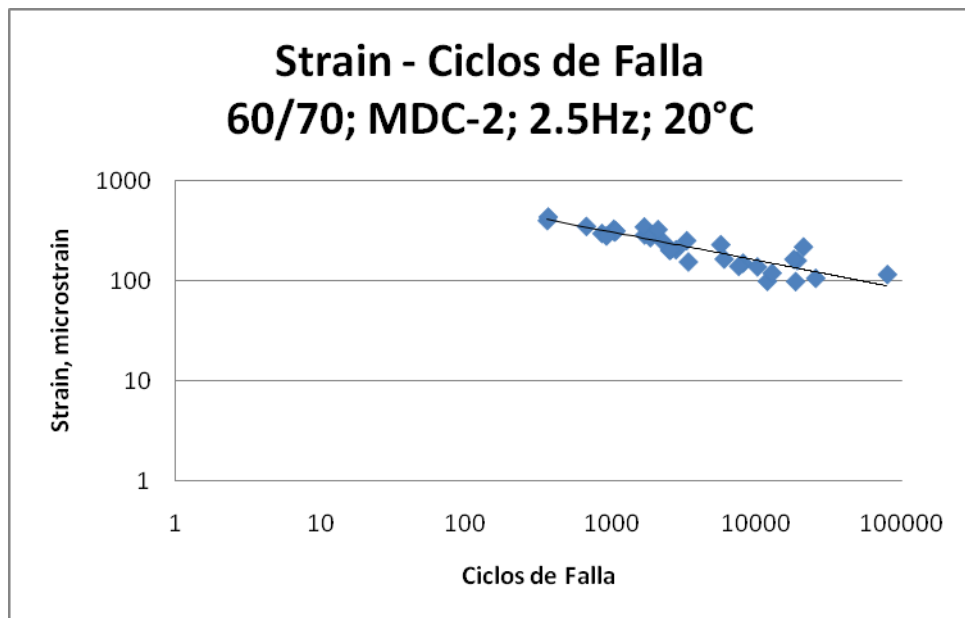


Figura 26. Gráfica de Deformación contra Ciclos de falla, usando asfalto 60/70, mezcla tipo MDC-2 y frecuencia de 10 Hz.

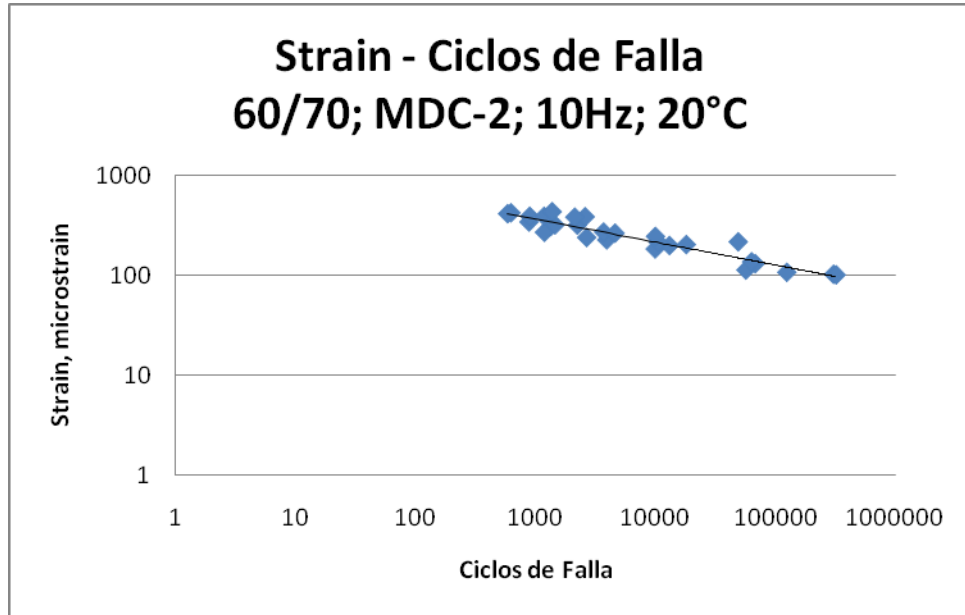


Figura 27. Gráfica de Deformación contra Ciclos de falla, usando asfalto 80/100, mezcla tipo MDC-1 y frecuencia de 2,5 Hz.

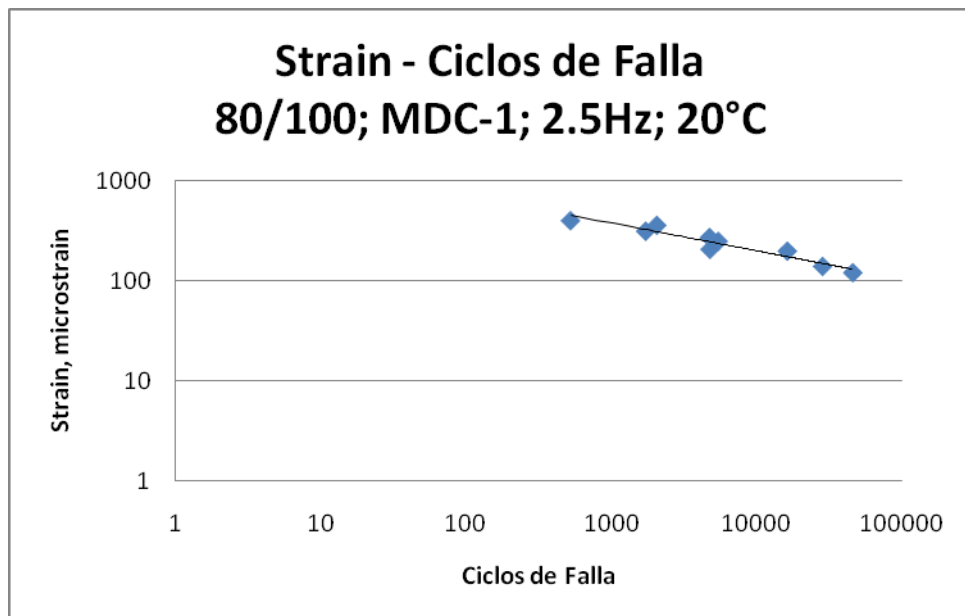
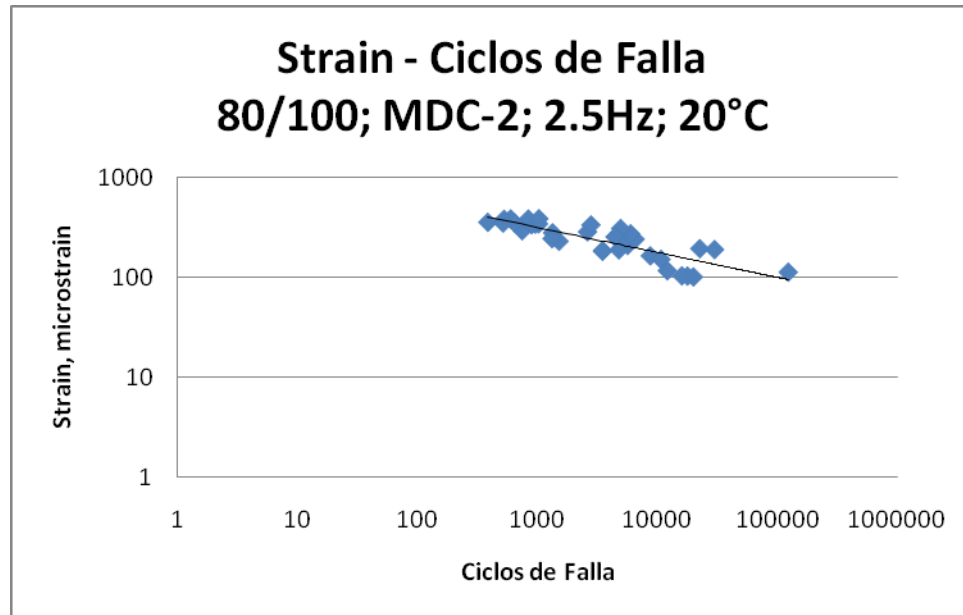


Figura 28. Gráfica de Deformación contra Ciclos de falla, usando asfalto 80/100, mezcla tipo MDC-2 y frecuencia de 2,5 Hz.



En la tabla 11 se muestran las ecuaciones de ajuste obtenidas de las curvas de tendencia para las diferentes condiciones según la ecuación 10.

Tabla 11. Ecuaciones de ajuste para las condiciones seleccionadas.

ASFALTO	MEZCLA	FRECUENCIA	ECUACIÓN
60/70	MDC-1	2,5 Hz	$y = -0,335x + 3,502$
		10 Hz	$y = -0,306x + 3,616$
	MDC-2	2,5 Hz	$y = -0,281x + 3,329$
		10 Hz	$y = -0,228x + 3,246$
80/100	MDC-1	2,5 Hz	$y = -0,276x + 3,402$
		10 Hz	-
	MDC-2	2,5 Hz	$y = -0,254x + 3,265$
		10 Hz	-

Ecuación 10. Ajuste curva Strain-Ciclos de Falla.

$$\text{Log}(y) = a \text{Log}(x) + b$$

Donde:

y = Strain (μs)

x = Número de ciclos de falla

a, b = Constantes del material

Aunque no se cuenta con una cantidad considerable de muestras en ninguno de los grupos, se puede hacer alguna comparación entre las mezclas 60/70, MDC-2, 2,5 Hz. y 80/100, MDC-2, 2,5 Hz., en donde permanecen constantes tanto la frecuencia como el tipo de mezcla y se varía el tipo de asfalto.

Se puede observar que la pendiente de las mezclas preparadas con asfalto 60/70 es menor que la pendiente de las mezclas preparadas con asfalto 80/100, por lo que se puede inferir que con asfalto 60/70 se obtiene una mayor resistencia a la fatiga.

6. CONCLUSIONES

La práctica empresarial brindó la oportunidad de trabajar en un laboratorio acreditado (S.I.C.) y certificado (ICONTEC), adquiriendo conocimiento especializado en un área específica, que consolida la línea de investigación y trabajo en la carrera profesional.

Se consiguieron habilidades, con fundamento científico, para realizar diversos ensayos sobre suelos, agregados y mezclas asfálticas adquiriendo criterio práctico para la toma de decisiones al participar en un grupo interdisciplinario de un centro de investigación desarrollo e innovación (I+D+I) certificado por el Instituto Panamericano de Carreteras y validado como entidad correspondiente por la Sociedad Colombiana de Ingenieros.

Se elaboró una base de datos en la cual se almacenó información referente a la caracterización dinámica de mezclas asfálticas.

Ha sido posible conocer parte del comportamiento dinámico de las mezclas asfálticas elaboradas con asfaltos convencionales colombianos.

El análisis gráfico de resultados ha permitido deducir tendencias de comportamiento de las mezclas asfálticas tanto para módulo dinámico como para fatiga a esfuerzo controlado.

A través del análisis estadístico de los resultados de módulo dinámico se han obtenido medidas de tendencia central y de dispersión así como la estimación de intervalos de confianza.

La desviación estándar del valor de módulo dinámico aumenta a medida que la temperatura disminuye.

Se constató la relevancia que tiene el modelo de base de datos propuesto para estimar las características dinámicas de las mezclas asfálticas colombianas. Aunque el trabajo desarrollado es el comienzo de consolidación de resultados y sustento al modelo propuesto, se requiere continuar alimentando la base de datos para no tener que recurrir a nomogramas u otros métodos de estimación actualmente utilizados, que han sido desarrollados en otros países para sus propios materiales.

7. RECOMENDACIONES

Los análisis que se pueden inferir a través de la información contenida en la base de datos son de gran importancia. La confiabilidad de estos análisis depende de la cantidad de datos almacenados y de la calidad de la información que allí se encuentre. Se debe continuar con el almacenamiento de datos para así, a largo plazo, poder contar con información valiosa acerca del comportamiento dinámico de mezclas asfálticas elaboradas con materiales colombianos.

Debido a que, para la realización de los ensayos, no es necesario tener toda la caracterización de los materiales empleados y las relaciones volumétricas con que fue elaborada la mezcla, el cliente no provee esta información. Sería de gran utilidad solicitar al cliente alguna información básica que permitiese dar mayor soporte a los resultados obtenidos. La información adicional a ser solicitada sería la procedencia y el tipo de asfalto utilizado, la procedencia de los agregados, los contenidos de asfalto y llenante de la mezcla y la localización de la vía.

Para garantizar el registro efectivo de esta información se recomienda la creación de un formato que haga parte de la documentación del Sistema de Gestión de La Calidad. Este formato sería opcional, solo en caso de que cliente proveyera la información adicional, y se llenaría al momento de hacer la recepción de las muestras.

8. ANEXOS

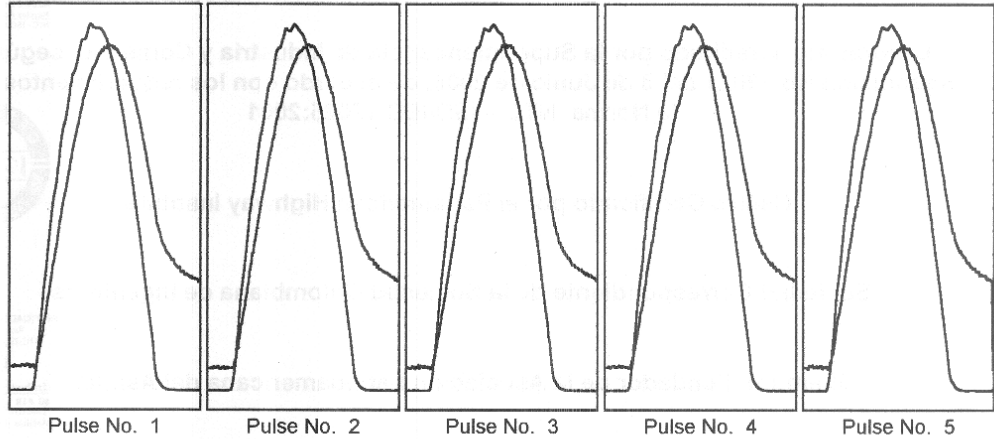
ANEXO A - ILUSTRACIÓN DE RESULTADOS DE ENSAYO ITSM EQUIPO NAT.

INDIRECT TENSILE STIFFNESS MODULUS TEST

(Stiffness modulus test to DD213)

Date: 21:10:2006
 Operator: Ing. Sergio Cifuentes
 Specimen ref: G-186-06-03 B12
 Target (actual) test temperature: 5°C (5.0°)
 Specimen diameter: 100 mms
 Specimen thickness: 55 mms
 Poisson's ratio: 0.25
 Target risetime: 124 m.secs
 Target horiz defm: 5 microns

CORASFALTOS
 Luis Enrique Sanabria
 Director Ejecutivo
 Sergio Cifuentes Mosquera
 Ing. Jefe de Laboratorio
 Telefonos: 6550806-6551399
 e-mail: info@corasfaltos.com



Pulse No.	Vertical force (kN)	Horiz Stress (kPa)	Load area factor		Horiz defm (microns)		Rise Time (m.secs)		Stiffness modulus (MPa) 2nd diameter	
			Target	Actual	Target	Actual	Target	Actual	Measured	Adjusted
1	4.19	484.5	0.60	0.62	5.0	5.0	124	119.0	7963	8074
2	4.19	485.4	0.60	0.65	5.0	5.0	124	130.0	7869	8160
3	4.19	485.1	0.60	0.66	5.0	5.0	124	131.0	7931	8242
4	4.18	483.8	0.60	0.67	5.0	5.0	124	133.0	7858	8202
5	4.18	484.4	0.60	0.66	5.0	5.0	124	132.0	7873	8202
Mean	4.19	484.6	0.60	0.65	5.0	5.0	124	129.0	7899	8176

ANEXO B - ILUSTRACIÓN DE RESULTADOS DE ENSAYO ITFT EQUIPO NAT.

Indirect Tensile Fatigue Test

07-10-2006
 Ing. Sergio Cifuentes
 G-186-06-02 B12

20 Temperature (°C)
 100 Diameter (mm)
 55 Thickness (mm)
 400 Horizontal Stress
 124 Risetime

Pulses	V.defm	H.stress	Risetime
10	0.42	399.7	116
10	0.42	399.7	116
20	0.50	401.5	132
20	0.50	401.5	132
30	0.56	400.6	119
30	0.56	400.6	119
40	0.59	400.6	137
40	0.59	400.6	137
50	0.61	398.3	119
50	0.61	398.3	119
60	0.63	403.4	127
60	0.63	403.4	127
70	0.66	401.8	127
70	0.66	401.8	127
80	0.68	401.1	123
80	0.68	401.1	123
90	0.70	399.3	135
90	0.70	399.3	135
100	0.73	398.9	120
100	0.73	398.9	120
110	0.76	401.0	124
120	0.77	401.8	137
130	0.79	400.5	123
140	0.79	398.7	118
150	0.82	399.3	122
160	0.82	399.3	135
170	0.83	398.5	119
180	0.84	398.8	121
190	0.84	399.5	121
200	0.88	401.2	123
200	0.88	401.2	123
210	0.90	400.9	121
220	0.90	400.2	119
230	0.92	398.4	119
240	0.93	399.7	135
250	0.94	397.2	115
260	0.96	401.6	119
270	0.97	399.9	123
280	0.98	399.4	121

ANEXO C – CD CON LA BASE DE DATOS EN MICROSOFT OFFICE ACCESS 2007®.

ANEXO D – GALERÍA FOTOGRÁFICA EQUIPO NAT.

Fotografía 1. Vista general del Nottingham Asphalt Tester, NAT.



Fotografía 2. Ejecución de ensayo ITSM.



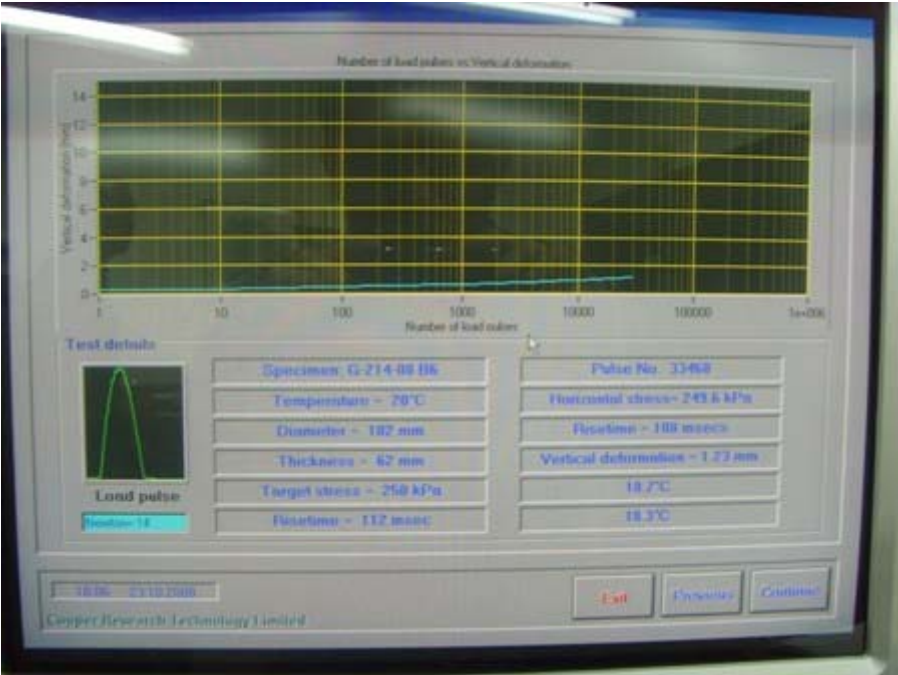
Fotografía 3. Despliegue de datos durante el ensayo ITSM.



Fotografía 4. Ejecución de ensayo ITFT.



Fotografía 5. Despliegue de datos durante el ensayo ITFT.



BIBLIOGRAFÍA

CORPORACIÓN PARA LA INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO EN ASFALTOS EN EL SECTOR TRANSPORTE E INDUSTRIAL, CORASFALTOS. Manual de Gestión de La Calidad: Manual de Funciones y Responsabilidades. CORASFALTOS, 2004.

UNIVERSITY OF NOTTINGHAM. NAT Course Notes. Parte del Manual de Usuario del Equipo NAT de CORASFALTOS. p3-4, 7, 15-17, 24-25.

COMITE EUROPÉEN DE NORMALISATION. EUROPEAN STANDARD. Bituminous Mixtures – Test methods for hot mix asphalt – Part 26: Stiffness. Ref. No. EN 12697-26: 2004: E. English version. Bruselas: CEN Julio de 2004. p7-15, 26-33.

COMITE EUROPÉEN DE NORMALISATION. EUROPEAN STANDARD. Bituminous Mixtures – Test methods for hot mix asphalt – Part 24: Resistance to fatigue. Ref. No. EN 12697-24: 2004: E. English version. Bruselas: CEN Mayo de 2004. p8-9, 19, 21, 51-58.

NATIONAL ASPHALT PAVEMENT ASSOCIATION (NAPA), NATIONAL CENTER FOR ASPHALT TECHNOLOGY (NCAT). Hot Mix Asphalt Materials, Mixture Design and Construction. Segunda Edición, 1996. p286, 390-391.

CORPORACIÓN PARA LA INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO EN ASFALTOS EN EL SECTOR TRANSPORTE E INDUSTRIAL, CORASFALTOS. Proyecto de Investigación, Transferencia y Desarrollo de Tecnología para La Construcción de una Planta de

Modificación de Asfaltos Utilizados en Pavimentación. Bucaramanga: CORASFALTOS, 2004. p50-54

MONISHMITH, C. L. Fatigue on Asphalt Paving Mixtures. 1ST ANNUAL STREET AND HIGHWAY CONFERENCE, UNIVERSITY OF NEVADA, U.S.A. 1966.

Instituto Colombiano del Petróleo – ECOPETROL. Cartilla Práctica para el Manejo de los Asfaltos Colombianos. 1999. p21-25, 33-34.

VACCA, Hermes; ORTIZ, Mariana; ORTIZ, Javier. Caracterización Dinámica de Mezclas Asfálticas MDC-2, Mediante Módulo Dinámico Resiliente por Tensión Indirecta. Pontificia Universidad Javeriana - Santa Fe de Bogotá. p11-12. En: 4AS. JORNADAS INTERNACIONALES DEL ASFALTO. (2004: Cartagena de Indias). Memorias, 2004. +1 CD (CD-ROM).

WEBSTER, Allen. Estadística Aplicada a los Negocios y a la Economía, Tercera Edición. Santa Fe de Bogotá: McGraw-Hill Interamericana, S.A., 2000. ISBN: 0-256-22554-0. p41, 47-51, 176-178.

INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS. Normas Técnicas de Ensayos para Carreteras. Bogotá: INVIAS, 2007. (INV E-733, INV E-735, INV E-732, INV E-213, INV E-123, INV E-142, INV E-148, INV E-125, INV E-126, INV E-128, INV E-223, INV E-222, INV E-745, INV E-225, INV E- 227, INV E-230, INV E-240, INV E-218, INV E-133, INV E-235, INV E-774, INV E-725, INV E-748, INV E-738, INV E-795, INV E-790, INV E-789, INV E-754)

INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS. Especificaciones de materiales para Carreteras. Bogotá: INVIAS, 2007. (Artículo-400-07, Artículo-450-07)

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. Compendio Normas Técnicas Colombianas Sobre Documentación: presentación y elaboración de trabajos y tesis de grado. Bogotá: ICONTEC, 2006. (NTC1486; NTC1487; NTC1160; NTC1308; NTC1307).

INFOGRAFÍA

PRODUCTOS Y SERVICIOS. CATALOGO: ASFALTOS. En la Página Web de Ecopetrol:
<http://www.ecopetrol.gov.co/contenido.aspx?catID=222&conID=37385> , 2008.