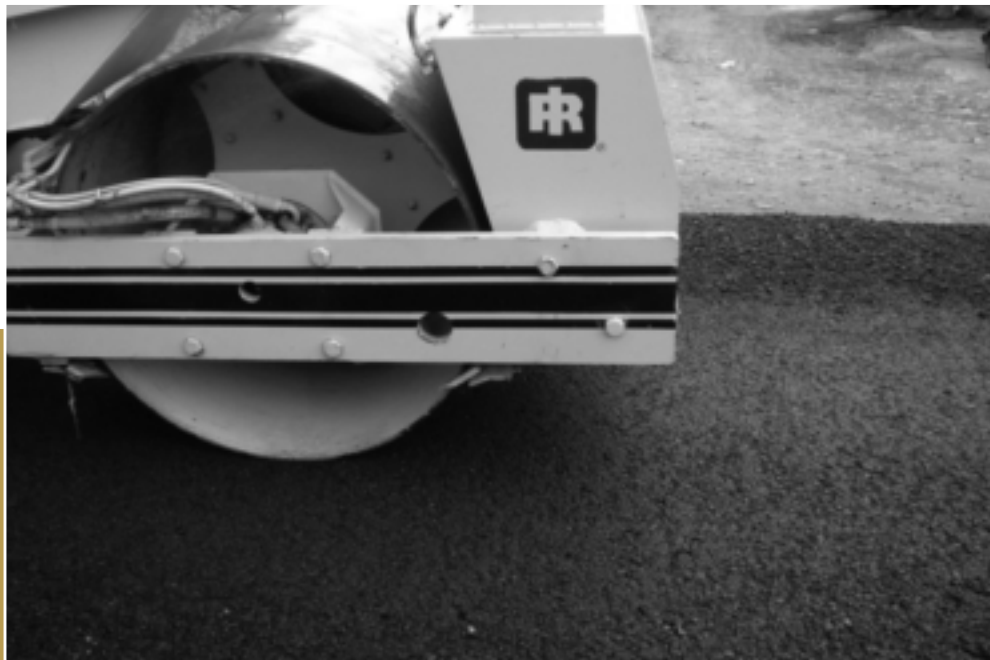


EFFECTO DE LA TEMPERATURA DE COMPACTACIÓN SOBRE EL MÓDULO RESILIENTE DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS

Pedro Limón Covarrubias, Ignacio Cremades Ibáñez, Rodrigo Miró Recasens y Paúl Garnica Anguas



“Premio Internacional a la Innovación en Carreteras Juan Antonio Fernández del Campo”

Presidente



D. JOSÉ LUIS ELVIRA MUÑOZ

Doctor Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos
Director Técnico de la Dirección General de Carreteras
del Ministerio de Fomento
Profesor Titular de la Universidad Politécnica de Madrid
Encomienda de la Orden del Mérito Civil, Medalla al
Mérito Profesional del C.I.C.C.P. y Medalla de Oro de
la Carretera



D. JOSÉ Mª MORERA BOSCH

Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos
Director General de la Dirección Autopistas España
de Abertis
Miembro del Comité Ejecutivo de A.S.E.T.A.



D. JUAN M. OROZCO Y OROZCO

Ingeniero Civil y Maestro en Mecánica de Suelos
Director General de Servicios Técnicos de la Secretaría
de Comunicaciones y Transportes de México
Académico de Número de la Academia de Ingeniería
de México

Vocales (relacionados alfabéticamente)



D. JORGE O. AGNUSDEI

Doctor en Ciencias Químicas
Presidente de la Comisión Permanente del Asfalto
de Argentina
Secretario Permanente de los Congresos
Ibero-Latinoamericanos del Asfalto



D. CÉSAR CAÑEDO-ARGÜELLES TORREJÓN

Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos
Presidente de Prointec, S.A.
Medalla de Honor y Medalla al Mérito Profesional del
Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos



D. RAFAEL IZQUIERDO DE BARTOLOMÉ

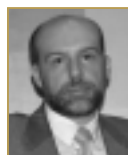
Doctor Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos y
Licenciado en Ciencias Económicas
Profesor Jean Monnet de la Unión Europea
Profesor Emérito de la Universidad Politécnica de
Madrid



D. JOSÉ MANUEL LOUREDA MANTIÑÁN

Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos
Consejero de Sacyr Vallehermoso y de Repsol
Medalla de Honor del Colegio de Ingenieros de
Caminos, Canales y Puertos

Secretario



D. JACOBO DÍAZ PINEDA

Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos
Secretario de la Fundación de la Asociación Española
de la Carretera
Premio Fundación Corell a la Investigación en
Seguridad Vial

Comité de Valoración

D. ALBERTO BARDESI ORÚE-ECHEVARRÍA

Subdirector de Asfaltos de Repsol YPF Lubricantes y Especialidades, S.A.

Dª ELENA DE LA PEÑA GONZÁLEZ

Subdirectora General Técnica de la Asociación Española de la Carretera

D. JUAN JOSÉ JARILLO RODRÍGUEZ

Subdirector de Planificación y Proyectos de Carreteras de la
Dirección General de Carreteras de la Consejería de Transportes
e Infraestructuras de la Comunidad de Madrid

D. CARLOS JOFRÉ IBÁÑEZ

Director Técnico del Instituto Español del Cemento y sus Aplicaciones

D. JOSÉ ANTONIO SOTO SÁNCHEZ

Director Técnico de la Cepsa Productos Asfálticos, S.A.

**Fallo del Jurado de la
II Edición del "Premio
Internacional a la
Innovación en Carreteras
Juan Antonio Fernández
del Campo", adoptado
en reunión celebrada en
Madrid, el día 13 de
octubre de 2008**

“El lunes, 13 de octubre de 2008, a las 12,30 horas, se reúnen en Madrid los miembros del Jurado de la II Edición del Premio Internacional a la Innovación en Carreteras *Juan Antonio Fernández del Campo*, actuando como Presidente D. José Luis Elvira Muñoz, y como Secretario D. Jacobo Díaz Pineda.

(...)

..., tras una intensa deliberación y por acuerdo unánime del Jurado, cuyos miembros han emitido su dictamen personalmente, se acuerda otorgar el galardón como mejor trabajo de innovación en carreteras presentado a la II Edición del Premio Internacional a la Innovación en Carreteras *Juan Antonio Fernández del Campo* al original que lleva por título ***Efecto de la Temperatura de Compactación sobre el Módulo Resiliente de las Mezclas Asfálticas***, y del que son autores ***D. Pedro Limón Covarrubias, D. Ignacio Cremades Ibáñez, D. Rodrigo Miró Recasens y D. Paúl Garnica Anguas***.

Asimismo, el Jurado acuerda reconocer con una Mención Especial el trabajo titulado ***Evaluación de la Seguridad Vial de Tramos de Carreteras Convencionales empleando Perfiles Continuos de Velocidad de Operación para la Determinación de la Consistencia de su Diseño Geométrico***, y del que son autores ***D. Alfredo García García y D. Francisco Javier Camacho Torregrosa***”.

TRADICIÓN E INNOVACIÓN HABLAN ESPAÑOL



Miguel Mª Muñoz Medina

*Presidente de la Fundación
de la Asociación Española
de la Carretera y del Comité
de Gestión del "Premio
Internacional a la Innovación
en Carreteras Juan Antonio
Fernández del Campo"*

Un premio a la "Innovación en Carreteras" puede parecer algo arrogante para una mayoría de quienes únicamente se limitan a transitarlas. Sin embargo, la renovación tecnológica en infraestructuras es indisociable no sólo de la ingeniería como profesión, sino del progreso mismo de las sociedades. Baste mencionar las diferencias evidentes entre las creaciones del pasado y las actuales, fiel reflejo de la creatividad intelectual que está en la base de toda innovación. Esta misma comparación vale para verificar el ritmo y profundidad de las transformaciones que sufre una sociedad determinada: una mayor innovación en las infraestructuras equivale a un mayor progreso económico y social. Así ha ocurrido en todos los tiempos y en todos los países.

Ahora que el mundo enfrenta una sombría encrucijada de incertidumbres, es el momento adecuado de apoyar decididamente la innovación y las infraestructuras. En todos los foros que ha sido posible, hemos defendido siempre que la inversión en carreteras es una opción coherente con el objetivo de una economía más productiva y competitiva. Por una parte, porque se trata de un gasto que asegura el retorno de un dividendo superior gracias, precisamente, a su enorme capacidad de transformación social. Por otra, porque la innovación es un concepto intrínseco a la propia ingeniería y a los ingenieros encargados de crear esas infraestructuras: es parte consustancial de los valores que los guían. En resumen, las infraestruc-

turas no son nunca un fin en sí mismas, son el medio para conseguir otros objetivos: mejorar la calidad de vida de los ciudadanos e incrementar la competitividad y prosperidad de un país.

Estas serían, por sí solas, muy buenas razones para instituir un Premio como el que nos ocupa, que además contribuye al desarrollo de la tecnología viaria, fomenta el estudio e investigación científica en materia de carreteras e incentiva la innovación en el sector. Pero hay otra: estrechar aún más los lazos entre todos los profesionales viarios hispanohablantes, convirtiéndose en referente tanto en España como en Latinoamérica, donde por desgracia son por lo general escasos los estímulos a la innovación en infraestructuras viarias.

Este Premio es también el reconocimiento a la figura de Juan Antonio Fernández del Campo y Cuevas. Para quienes le conocimos y gozamos de su amistad, aquel funesto lunes de abril de 2004 nos parece ayer. Aquel día, de repente, desapareció. Pero antes ya había logrado ser una leyenda viva de la ingeniería vial en España y en Latinoamérica. Su arrolladora personalidad, henchida de generosidad, fructificó en cuatro décadas de trayectoria profesional, donde ejerció su autoridad en materia de infraestructuras viarias como ingeniero, docente y empresario.

Juan Antonio impulsó la renovación de los “viejos puentes” y la construcción de otros nuevos entre la tradición y la innovación, entre España y Latinoamérica. Este es el espíritu del “Premio Internacional a la Innovación en Carreteras” que lleva su nombre y, sin duda, el mejor homenaje que nuestro maestro y amigo merece.

Es motivo de honda satisfacción para mí que el equipo formado por Pedro Limón Covarrubias, Ignacio Cremades Ibáñez, Rodrigo Miró Recasens y Paúl

Garnica Anguas, con su magnífico trabajo sobre el “Efecto de la temperatura de compactación sobre el módulo resiliente de las mezclas asfálticas”, se haya hecho merecedor de este Premio. Se reconoce así el trabajo de estos profesionales, a la par que los deseos de innovación de un país como México.

Además, los miembros del Jurado han otorgado una Mención Especial al estudio titulado “Evaluación de la seguridad vial de tramos de carreteras convencionales empleando perfiles continuos de velocidad de operación para la determinación de la consistencia de su diseño geométrico”, presentado por los profesores de la Universidad Politécnica de Valencia Alfredo García García y Francisco Javier Camacho Torregrosa. Mi enhorabuena también para estos profesionales.

Como Presidente de la Fundación de la Asociación Española de la Carretera, que comienza su andadura social con la entrega de este Premio, así como del Comité de Gestión del “Premio Internacional a la Innovación en Carreteras *Juan Antonio Fernández del Campo*”, no quiero finalizar estas líneas sin dedicar unas palabras de gratitud a cuantas instituciones y empresas han patrocinado y apoyado la creación y consolidación del certamen. Todos ellos han creído desde el principio en su idoneidad y estoy seguro de que su respaldo continuará en el futuro.

Mi agradecimiento expreso, pues, a Banco Caminos, Cepsa-Proas y Repsol YPF, patrocinadores; la Dirección General de Carreteras de la Consejería de Transportes e Infraestructuras de la Comunidad de Madrid, colaborador institucional; y Dragados, Oficemen (Agrupación de Fabricantes de Cemento de España), Acciona Infraestructuras, Eiffage Infraestructuras, Euroconsult, FCC Construcción, Ferrovial Agromán, Grupo Isolux Corsán, OHL y Sacyr, colaboradores empresariales.

No puedo concluir sin destacar el gran trabajo realizado por el Jurado de esta Segunda Edición, que ha estado presidido por José Luis Elvira Muñoz -Director Técnico de la Dirección General de Carreteras del Ministerio de Fomento-. A todos sus miembros, gracias por su esfuerzo y dedicación.

Gracias, una vez más, por la voluntad, inspiración y buen hacer de todos aquellos que han hecho posible esta Segunda Edición del “Premio Internacional a la Innovación en Carreteras *Juan Antonio Fernández del Campo*”.

En Madrid, a 26 de noviembre de 2008

LA MEDIDA DEL ESPÍRITU



José Luis Elvira Muñoz

*Presidente del Jurado de la
II Edición del "Premio
Internacional a la
Innovación en Carreteras
Juan Antonio Fernández
del Campo"*

Decía Aristóteles que la sabiduría reside, no sólo en poseer las nociones más exactas sobre las causas de las cosas, sino, sobre todo, en ser capaz de dar perfecta cuenta de ellas. Una concepción que, haciendo honor a la vigencia y actualidad del pensamiento aristotélico, se encuentra implícita en el origen del "Premio Internacional a la Innovación en Carreteras *Juan Antonio Fernández del Campo*".

Cuatro años después de la gestación de esta iniciativa, a la que dio nombre nuestro querido y añorado Juan Antonio Fernández del Campo y Cuevas, quienes hemos tenido el privilegio de participar activamente en la misma desde sus orígenes estamos convencidos de que el Premio ha logrado hacerse un hueco notable en el universo de la investigación sobre infraestructuras viarias.

Tal y como rezan sus Bases, el "Premio Internacional a la Innovación en Carreteras *Juan Antonio Fernández del Campo*" se propone contribuir al desarrollo de la tecnología viaria en todo el mundo, fomentando el análisis del fenómeno desde una perspectiva multidisciplinar y promoviendo la definición de estrategias innovadoras que coadyuven a la mejora continuada de la Carretera, en su más amplia concepción. Pero además, este Premio viene a colaborar en la ardua tarea de convertir el español en lengua científica internacionalmente reconocida y aceptada en el ámbito vial.

Tras una primera experiencia, de la mano entonces de la Asociación Española de la Carretera (AEC), la iniciativa superaba la prueba inicial con una magnífica calificación: los trabajos reconocidos en la Primera Edición, tanto el que se hacía acreedor del Premio como aquel que resultaba distinguido con una Mención Especial, no sólo reunían todos y cada uno de los criterios exigidos -imprescindible para su consideración-, sino que además se presentaban como claros exponentes de la máxima que en su día formulara el filósofo griego.

Saber cuál es el siguiente paso y llevarlo a cabo es otras de esas grandes verdades que se han dicho y se han escrito sobre las ideas de conocimiento y sabiduría. Y, en el caso del “Premio Internacional a la Innovación en Carreteras *Juan Antonio Fernández del Campo*”, sólo cabía una opción: continuar el certero camino que acababa de iniciarse y consolidar la misión primigenia con que fue gestado.

Llegaba así, en 2007, la II Edición de la convocatoria, esta vez de la mano de la Fundación de la Asociación Española de la Carretera (FAEC), que tomaba el testigo y el reto cuya materialización habían iniciado la Asociación y todas las instituciones públicas y privadas que confiaron en el éxito del proyecto, y que aún hoy siguen haciéndolo.

Veinticuatro trabajos de erudición presentados, sesenta y cinco investigadores de diez países distintos, varios miles de páginas escritas, millares de horas, incluso años de dedicación... Son sólo algunas cifras detrás de las que se hallan incalculables ilusiones, incontables momentos de desánimo ante las dificultades del camino e imponderables etapas de entusiasmo frente a cada nuevo progreso...

El 13 de octubre de 2008 el Jurado de la II Edición del “Premio Internacional a la Innovación en Carreteras *Juan Antonio Fernández del Campo*” se reunía en Madrid con el propósito de adoptar el fallo.

En términos generales, todos los trabajos que han optado al galardón destacan por su brillantez, su carácter innovador, su alto nivel científico y técnico... Pero hay uno que destaca con holgura en cuanto a los requisitos contemplados en las Bases: innovación, calidad, originalidad de las soluciones que contempla y amplias posibilidades de materialización práctica de sus conclusiones. Un trabajo que viene a poner de relieve esencialmente el notable esfuerzo investigador que México está propiciando y desarrollando en materia de Carreteras.

Efecto de la temperatura de compactación sobre el módulo resiliente de las mezclas asfálticas es su título, y sus autores Pedro Limón Covarrubias e Ignacio Cremades Ibáñez, del Departamento de Mezclas Asfálticas de la empresa mexicana Surfax; Paúl Garnica Anguas, del Instituto Mexicano del Transporte, y Rodrigo Miró Recasens, de la Universidad Politécnica de Cataluña.

A modo de resumen, y como se puede leer con detalle en las páginas de este volumen, en el trabajo se muestran dos aspectos importantes a considerar en la ejecución de una mezcla bituminosa. El primero es que los actuales sistemas de control de ejecución, basados en la medida de la densidad, no son suficientes, resultando más eficaz recurrir además a la medida de alguna propiedad mecánica, como puede ser el módulo resiliente. En segundo lugar, la investigación pone de manifiesto que mezclas con mejores propiedades *a priori*, compactadas a menor temperatura que la especificada, pueden llegar a tener un peor comportamiento que mezclas de menor calidad teórica, pero compactadas a una temperatura adecuada.

El Jurado ha otorgado también una Mención Especial al original titulado ***Evaluación de la seguridad vial de tramos de carreteras convencionales empleando perfiles continuos de velocidad de operación para la determi-***

nación de la consistencia de su diseño geométrico, del que son autores Alfredo García García y Francisco Javier Camacho Torregrosa, ambos de la Universidad Politécnica de Valencia.

Trabajos como éstos nos permiten afirmar que el “Premio Internacional a la Innovación en Carreteras *Juan Antonio Fernández del Campo*”, en su Segunda Convocatoria, ha logrado consolidarse como referencia de prestigio en el ámbito internacional de la investigación viaria.

Y como aval, la relevancia profesional de los miembros del Jurado, a quienes he tenido el honor de dirigir en el complejo proceso de selección de la Segunda Edición del Premio: Jorge O. Agnusdei, Presidente de la Comisión Permanente del Asfalto de Argentina; César Cañedo-Argüelles Torrejón, Presidente de Prointec, S.A; Rafael Izquierdo de Bartolomé, Profesor Emérito de la Universidad Politécnica de Madrid; José Manuel Loureda Mantiñán, Consejero de Sacyr Vallehermoso y de Repsol; José M^a Morera Bosch, Director General de la Dirección Autopistas España de Abertis; Juan M. Orozco y Orozco, Director General de Servicios Técnicos de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes de México, y Jacobo Díaz Pineda, Secretario de la Fundación de la Asociación Española de la Carretera.

Son muchos todavía los pasos a dar, amplio el camino que resta por recorrer para estimular el entusiasmo científico en el sector de la Carretera, alentar los procesos de innovación y poner en valor el talento... Principios que dibujan el escenario en el que el “Premio Internacional a la Innovación en Carreteras *Juan Antonio Fernández del Campo*” aspira a desenvolverse.

Y mientras esa situación más perfecta llega, el Premio continuará sembrando comunicación, amplitud de miras y concordia, en oposición al aislamiento,

la estrechez y la violencia contra las que siempre se manifestó Juan Antonio Fernández del Campo y Cuevas, para quien, como dijera San Agustín, “la sabiduría no es otra cosa que la medida del espíritu”.

En Madrid, a 26 de noviembre de 2008



EFECTO DE LA TEMPERATURA DE COMPACTACIÓN SOBRE EL MÓDULO RESILIENTE DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS

Autores:

Ing. Pedro Limón Covarrubias

SURFAX S.A. de C.V.

Departamento de Mezclas Asfálticas.

Ing. Ignacio Cremades Ibáñez

SURFAX S.A. de C.V.

Director Técnico.

Dr. Rodrigo Miró Recasens

Universidad Politécnica de Cataluña.

Dr. Paúl Garnica Anguas

Instituto Mexicano del Transporte.

Jefe de División de Laboratorios de Infraestructura.

Índice

Resumen	18
1 Introducción	19
2 Antecedentes	19
3 Justificación	21
3.1.- Calidad en la puesta en obra	21
3.1.1.- Transporte	21
3.1.2.- Extensión	22
3.1.3.- Compactación	22
3.1.4.- Control de calidad	23
3.2.- Justificación y descripción del ensayo de módulo resiliente	24
4 Objetivos	26
5 Experimentación	26
6 Resultados preliminares	27
6.1.- Agregado pétreo utilizado en la mezcla asfáltica	27
6.2.- Carta de viscosidad	28
6.3.- Granulometría utilizada	28
7 Resultado de módulos resilientes	29
8 Evaluación de vida previsible mediante el software Dispav 5	33
9 Conclusiones	39
10 Bibliografía	40
Agradecimientos	41

RESUMEN

En el presente trabajo se estudia la influencia que tiene la temperatura de compactación en la vida útil de los pavimentos, mediante el ensayo de módulo resiliente.

En este trabajo se evalúan los módulos resilientes de un tipo de mezcla que contiene el mismo agregado, granulometría, contenido de asfalto, tipo de compactación y energía de compactación; variando solo el asfalto y la temperatura de compactación.

Se determinan las densidades y módulos resilientes de las probetas compactadas con diferentes asfaltos y diferentes temperaturas de compactación.

Posteriormente se propone una estructura de pavimento, y con la ayuda del software DISPAV-5 y con los módulos resilientes obtenidos para cada mezcla, se determina el número de ejes equivalentes que resiste la estructura de pavimento propuesta, con cada tipo de asfalto y temperatura de compactación.

Se demostrará que al reducir la temperatura de compactación, se mantiene la densidad de la mezcla compactada en un rango aceptable, pero la vida esperada en la estructura de pavimento disminuye notablemente.

Se demostrará como una mezcla asfáltica con mejor desempeño, compactada a menor temperatura de la especificada, puede llegar a obtener comportamientos mecánicos iguales o inferiores, a los de una mezcla asfáltica con un menor desempeño teórico, pero compactada a una temperatura adecuada.

Se destaca en este trabajo, la gran importancia que tiene la temperatura de compactación, y la poca importancia que se le da al momento de construcción de un pavimento.

1.- INTRODUCCIÓN

Las mezclas asfálticas utilizadas en la construcción de carreteras deben conseguir determinadas características estructurales y funcionales requeridas en un pavimento flexible para garantizar su resistencia, durabilidad, confort y seguridad durante el periodo de diseño.

El control de calidad sobre el producto fabricado suele realizarse mediante el ensayo Marshall, extrayendo una muestra de la planta asfáltica y determinando su resistencia a las deformaciones plásticas. Sin embargo, la calidad final del producto de la mezcla extendida y compactada, solo se controla mediante la extracción de testigos de obra, para la determinación de su densidad y comparación respecto a su densidad Marshall patrón.

Durante el proceso de transporte, extendido y compactación pueden producirse fallos y deterioros, como: escurrimiento del asfalto, segregación del agregado grueso, trituration del material y enfriamiento de la mezcla; y que pueden influir en la calidad final de la mezcla y consecuentemente en su comportamiento.

De los factores citados que pueden producirse durante el transporte, extendido y compactación de la mezcla asfáltica, solo se estudia la influencia que tiene la temperatura de compactación en su desempeño.

En esta investigación se obtendrán módulos resilientes de probetas fabricadas con diferentes tipos de asfalto y compactadas a diferentes temperaturas, con la finalidad de comprobar la influencia de la temperatura de compactación en su comportamiento mecánico. Ya que para la aceptación o rechazo de una carpeta asfáltica, en la actualidad se limita principalmente a asegurar que la densidad de la mezcla asfáltica compactada sea como mínimo el 95% de la densidad promedio de las probetas elaboradas en el laboratorio. Además no existe un control sobre la temperatura a la que se compactan las mezclas asfálticas, ya que solo se menciona que la compactación debe concluirse antes de que la mezcla alcance una temperatura de 85° C. Este criterio de aceptación es objeto de controversias debido a que se ha demostrado a través de varias investigaciones, que el cumplimiento de la densidad, no garantiza el buen comportamiento de la mezcla asfáltica.

2.- ANTECEDENTES

México como productor de petróleo y a su vez por la altísima cantidad de cemento asfáltico que produce, ha convertido a las mezclas asfálticas en la principal opción para la pavimentación de caminos.

Los concretos asfálticos son mezclas elaboradas por peso en plantas, en donde se calientan los agregados y asfalto, para posteriormente mezclarse.

Para el diseño de las mezclas asfálticas, el método más usado en México es el Marshall (1943), el cual determina el óptimo de asfalto para una combinación específica de agregados. Este método poco a poco ha venido decayendo en su uso a nivel mundial, ya que tiene poca correlación con las propiedades comúnmente requeridas para evaluar el fallo y el comportamiento de una mezcla asfáltica.

El proceso que se inicia desde el diseño de mezcla hasta su compactación en el campo, debe ser monitoreado y controlado por el personal responsable de su ejecución. Sin embargo los esfuerzos y las habilidades del inspector resultan ser más evidentes en la colocación de la mezcla asfáltica en la calzada, que en cualquier otro aspecto de la construcción de pavimentos asfálticos.

Con relación a los controles de calidad que se realizan en el proceso de colocación y compactación de la mezcla, la normativa mexicana para la aprobación o rechazo de una carpeta asfáltica en caliente, se limita principalmente a asegurar la densidad de la mezcla asfáltica compactada sea como mínimo el 95% de la densidad promedio de las probetas elaboradas en el laboratorio y el pro-

ceso de compactación debe concluirse antes que la mezcla alcance una temperatura de 85° C.

Este criterio de aceptación es objeto de controversias debido a que se ha demostrado a través de investigaciones, que su cumplimiento no garantiza los criterios que se establecen en la norma referente a los parámetros mecánicos de estabilidad, flujo, cohesión ó algún otro parámetro mecánico, que debe tener la mezcla compactada.

Tomando en cuenta la naturaleza de la mezcla asfáltica por su condición de material viscoso; propiedad que se introduce en la mezcla por la presencia del cemento asfáltico, resulta de suma importancia controlar y verificar de modo permanente durante todo el proceso la temperatura de la mezcla, debido a que el asfalto es un material termoplástico, por lo que su consistencia varía en mayor o menor grado con la temperatura.

Utilizando en esta investigación un método de prueba como es el ensayo de módulo resiliente, capaz de dar información valiosa acerca del comportamiento mecánico de mezclas asfálticas compactadas a diferentes temperaturas; se espera demostrar a través de la elaboración de gráficas de módulos a diferentes temperaturas y con diferentes asfaltos, la importancia que tiene compactar las mezclas asfálticas en caliente a una temperatura adecuada.

3.- JUSTIFICACIÓN

Son tantas variables que intervienen y que hay que controlar, tanto en el proceso de diseño de mezclas como en el proceso de construcción de una carpeta asfáltica que es obligación de los investigadores proporcionar herramientas de fácil manejo para el ingeniero y el constructor, que permitan verificar sobre la marcha, la correcta ejecución de los trabajos de fabricación de mezclas asfálticas y sobre todo de construcción de pavimentos, que garantice en todo momento el cumplimiento de las especificaciones mexicanas vigentes.

3.1.- Calidad en la puesta en obra

Las etapas incluidas en la puesta en obra de la mezcla asfáltica son el transporte de la misma, su extensión sobre la superficie preparada y su compactación.

Durante el transporte, debe cuidarse que los camiones lleven protegida la mezcla con una lona, ya que es importantísimo que la temperatura de la mezcla disminuya lo menos posible.

Así como que los tiempos entre descarga, extensión y compactación sea lo más corto posible, para evitar el enfriamiento de la mezcla.

La preparación de la superficie existente exige que se compruebe la regularidad superficial. Si la super-

ficie está constituida por una mezcla asfáltica, se debe ejecutar un riego de adherencia, si es granular o tratado con aglomerantes hidráulicos, se ejecuta un riego de imprimación.

Se toman las medidas de control correspondientes al riego aplicado: verificar el plazo de rotura o de curado del mismo, que no queden restos de fluidificante o de agua en la superficie y que mantenga su capacidad de adherencia si ha transcurrido mucho tiempo desde su aplicación.

3.1.1.- Transporte

Es la etapa en que la mezcla se traslada de la central de la fabricación a la extendedora, por medio de camiones. Es inevitable el enfriamiento de la mezcla por efecto de la temperatura ambiente y del viento. Sin embargo, este efecto se reduce colocando una lona sobre la caja de camión logrando que solo se enfríe la zona superficial, aunque se debe evaluar las zonas climáticas de cada caso para determinar las distancias máximas posibles. Debe verificarse que la temperatura de la mezcla en el momento de la descarga no sea inferior a la especificada en la fórmula de trabajo.

Es importante evitar la segregación de la mezcla durante la carga y la descarga de los camiones, y para ello se debe mantener una altura mínima

de descarga y evitar la formación de pilas cónicas de material, haciendo que el camión se mueva lentamente o esparciendo la mezcla lateralmente en la caja.



Figura 1.- Ilustración del traslado de la mezcla al lugar de obra.

3.1.2.- Extensión

Normalmente el camión descarga la mezcla sobre la tolva de una extendidora y ésta se distribuye sobre la superficie a través de cintas y compuertas que regulan la salida del material.

La extensión habitualmente se realiza en franjas longitudinales, calculando el ancho de las franjas de modo tal que se realice el menor número de juntas posibles. La extendidora se regula para que la capa extendida

resulte lisa y uniforme sin segregaciones ni arrastres y con un espesor tal que, una vez compactada, se ajuste a la rasante y a la sección transversal indicada en los planos con las tolerancias admitidas.



Figura 2.- Ilustración del extendido de una mezcla asfáltica.

3.1.3.- Compactación

Una vez extendida la mezcla pasan los compactadores, que pueden ser neumáticos, lisos, con o sin vibración, y se eligen en función del tipo y espesor de la mezcla. Se propone un plan de compactación que debe ser aprobado por el director de la obra, de acuerdo a los resultados de un tramo de prueba. En esta oportunidad el director puede ordenar o modificar la fórmula de trabajo, cambiar la forma de empleo de algún equipamiento o reemplazo.

Durante la compactación se espera que la mezcla sea compactada a la temperatura que se estableció de trabajo anteriormente en laboratorio, para que la mezcla asfáltica ya colocada tenga las propiedades mecánicas que se esperan de ella.

El Instituto del Asfalto recomienda un rango de temperatura para compactar entre 163°C - 85°C , pero recomienda que se deberá iniciar la compactación a la temperatura establecida en laboratorio.

Así mismo las especificaciones de la FP-92 (Federal Highway Projects), establecen que no deberá continuarse la compactación cuando la mezcla alcance una temperatura inferior a 79°C .

Como se puede observar el rango de temperatura en el que se debe de compactar es muy amplio, la cual no asegura el comportamiento óptimo de la mezcla; es por ello, que en este trabajo se demostrará la importancia que tiene la temperatura de compactación en el comportamiento mecánico de la mezcla asfáltica.

Para poder conseguir la densidad necesaria que suele expresarse como un porcentaje de la densidad Marshall de referencia, es de suma importancia que la temperatura de la mezcla se mantenga elevada, para que sea posible su densificación, y que la mezcla adquiera sus propiedades mecánicas adecuadas.



Figura 3.- Ilustración de compactación de una mezcla asfáltica.

La compactación debe realizarse de manera continua y sistemática, si la mezcla ha sido extendida en franjas, al compactador cada una de éstas se debe superponer la zona de compactación al menos quince centímetros.

Debe mantenerse limpios los elementos de compactación y en lo posible húmedos. Los cambios de dirección de los compactadores deben hacerse sobre la superficie ya compactada y los cambios de sentido se hacen con mucha suavidad.

3.1.4.- Control de calidad

El control del producto terminado se lleva a cabo sobre el espesor, el acabado y la compactación

de la mezcla, evaluando las tres características por las capas aisladas y por lotes:

- a) Espesor: se extraen testigos aleatoriamente situados y se determina su espesor. La empresa puede realizar un control previo comprobando el espesor con un vástago graduado, inmediatamente detrás de los compactadores cuando la capa aún esta caliente. Siempre que la capa inferior este bien definida y sea resistente al punzonamiento, este método permite realizar muchas mediciones.



Figura 4.- Ilustración de la extracción de testigos de obra.

- b) Regularidad superficial: el acabado se realiza generalmente con un equipo para medir índice de perfil.
- c) Compacidad: La compacidad de la capa se evalúa comparando la densidad de un testigo extraído con la de una probeta de referencia. En mezclas densas, la densidad media del lote no deberá ser inferior al 95% de la densidad promedio de las briquetas elaboradas en el laboratorio.

3.3.- Justificación y descripción del ensayo de módulo resiliente

Para conocer el deterioro que se produce en una estructura de pavimento cuando esta sometido al paso de cargas y a los agentes climáticos, es necesario conocer los parámetros que caracterizan a la mezcla asfáltica y definir sus límites de fallo, tanto por fatiga, como por fisuración térmica o deformación plástica. Por tanto es importante saber que ensayo debe utilizarse para caracterizar la mezcla y que análisis se debe realizar a partir de los datos obtenidos.

Generalmente, estos parámetros son los datos básicos utilizados en los modelos teóricos que intentan reproducir el comportamiento estructural de un pavimento. De acuerdo al grado de sofisticación del

modelo, variará el tipo de información necesaria a obtener mediante los diferentes ensayos. La elección del tipo de ensayo para determinar las características de una mezcla asfáltica resultará de un balance entre precisión obtenida con el mismo y la factibilidad de su empleo, con el fin de obtener un modelo tan representativo como sea posible del comportamiento en campo del pavimento; pero a la vez de fácil aplicación considerando la disponibilidad de tiempo, recursos económicos y equipamiento.

Algunos investigadores, como Von Quintus, Scherocman y Hughes coinciden según sus experiencias, en que los valores típicos de diseño de una mezcla, tales como los obtenidos con los ensayos Marshall o Hveem, tienen una pobre correlación con las propiedades comúnmente requeridas para evaluar el fallo y el comportamiento de una mezcla asfáltica colocada en campo, que suelen ser fluencia, resistencia a tracción indirecta, fatiga y deformación permanente.

Sería ideal contar con un ensayo capaz de inducir un estado de tensiones a las probetas, similar al que se produce en la capa real. Roque y Buttlar esquematizan en la siguiente figura, el estado de tensiones provocado por una carga simple en la estructura de un pavimento, donde se distinguen cuatro casos.

Estados de esfuerzos:

- 1.- Compresión triaxial en la superficie e inmediatamente bajo la rueda.
- 2.- Tracción longitudinal y transversal combinado con compresión vertical en la parte inferior de la capa asfáltica debajo de la rueda.
- 3.- Tracción longitudinal o transversal en la superficie a una cierta distancia de la carga.
- 4.- Compresión longitudinal o transversal en el fondo de la capa asfáltica a una cierta distancia de la carga.

Existen ensayos que representan alguno de estos cuatro estados, pero no hay uno que reúna todos. Sin embargo, tampoco es necesario analizar todas las situaciones, pues la experiencia ya ha determinado que la zona más crítica de tensiones se produce en la fibra inferior de la capa asfáltica, bajo la carga.

El ensayo de tracción indirecta con carga repetida (modulo resiliente) reproduce este estado de tensión crítica para una mezcla asfáltica y la utilización de este ensayo para este trabajo, determina las características necesarias para determinar el comportamiento mecánico de las mezclas asfálticas compactadas a diferentes temperaturas.

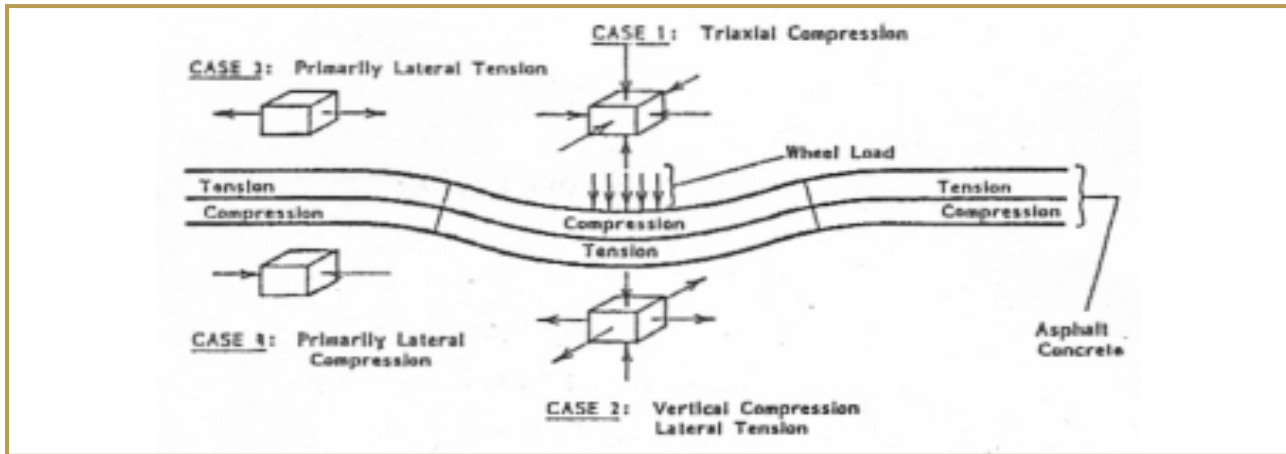


Figura 5.- Estado de tensiones en un pavimento bajo una carga simple.

4.- OBJETIVOS

- 1.- Demostrar la importancia que tiene la temperatura de compactación en las propiedades mecánicas de la mezcla asfáltica y en su tiempo estimado de vida.
- 2.- Además evidenciar la pobreza de exigencias que existen en el control de calidad del producto terminado (como es el caso de la mezcla asfáltica compactada), como son la densidad de testigos y la temperatura mínima que debe tener la mezcla al momento de terminar la compactación.
- 3.- Dar a conocer un método de diseño y control de calidad como es el de módulo resiliente, que permite evaluar y controlar parámetros de las mezclas asfálticas. Este método de ensayo es útil, sencillo y económico.

5.- EXPERIMENTACIÓN

En el trabajo se utilizaron especificaciones mexicanas para asfaltos, agregados pétreos, granulometrías y dosificaciones del contenido de asfalto.

Se usaron asfaltos mexicanos PG-70, PG-76 y PG-82. El agregado pétreo usado es de la zona del Oeste

de México. El contenido óptimo de asfalto de acuerdo a las especificaciones Mexicanas es de 6.5%.

Las mezclas fueron curadas en horno durante dos horas antes de la compactación. La compactación fue realizada con el equipo Marshall, dando 75 golpes por lado.

A cada mezcla se le obtuvo su módulo resiliente, densidad y porcentaje de vacíos, para posteriormente demostrar y correlacionar mediante gráficos.

Los módulos resilientes fueron obtenidos con respecto a la norma ASTM-4123. Las muestras fueron ensayadas a 20° C, a una frecuencia de 0.5 Hz y la amplitud del pulso de carga fue de 15% de la resistencia a tracción del material.

La densidad de cada muestra fue obtenida con respecto a la norma AASHTO T-166.

Por último mediante la ayuda de una estructura de pavimento propuesta y el programa DISPAV-5, se introdujeron los módulos de cada mezcla; y así demostrar como el decremento en la temperatura de compactación, reduce considerablemente la vida útil del pavimento.

6.- RESULTADOS PRELIMINARES

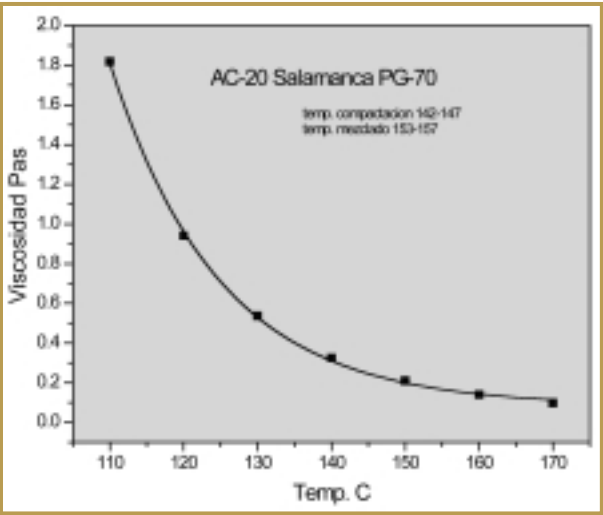
6.1.- Agregado pétreo utilizado en la mezcla asfáltica (Tabla 1)

Descripción de ensayo	Resultado obtenido del agregado	Especificación de la norma mexicana
Desgaste de los Ángeles	13.1%	30.0% máx.
Partículas alargadas	13.8%	35.0% máx.
Partículas lajeadas	18.1%	35.0% máx.
Partículas trituradas	92.5%	N.A.
Absorción de agregado grueso	1.9%	N.A.
Densidad de agregado grueso	2.7gr/cm ³	2.4gr/cm ³ mín.
Equivalente de arena	68%	50.0% mín.

Tabla 1.- Características del agregado pétreo.

6.2.- Carta de viscosidad

AC-20 SALAMANCA (PG-70)



Gráfica 1.- Carta de viscosidad del asfalto no modificado.

Para los asfaltos modificados (PG-76, PG-82), no se les realizo carta de viscosidad-temperatura, ya que todavía no existe un rango donde colocarlos.

Sin embargo por la experiencia que se ha tenido en campo, se determinaron las temperaturas de mezclado y compactación de lo asfaltos modificados.

PG-76: Temp. de mezclado 165° C, Temp. de compactación 155° C.

PG-82: Temp. de mezclado 170° C, Temp. de compactación 160° C.

Estas temperaturas de mezclado y compactación indicadas en cada asfalto, son tanto para el asfalto no modificado, como para los asfaltos modificados.

6.3.- Granulometría utilizada

TAMAÑO MÁXIMO NOMINAL DE 3/4" (GRANULOMETRÍA CENTRADA)

DESIGNACIÓN DE MALLA	PORCENTAJES ESTABLECIDOS "SELECCIONADO"	PORCENTAJE QUE PASA
1"	100	100
3/4"	100	100
1/2"	90-100	95
3/8"	76-90	83
1/2"	56-69	62
Nº 4	45-59	52
Nº 10	25-35	30
Nº 20	15-22	18
Nº 40	11-16	13
Nº 60	8-13	10
Nº 100	5-10	7
Nº 200	2-6	4

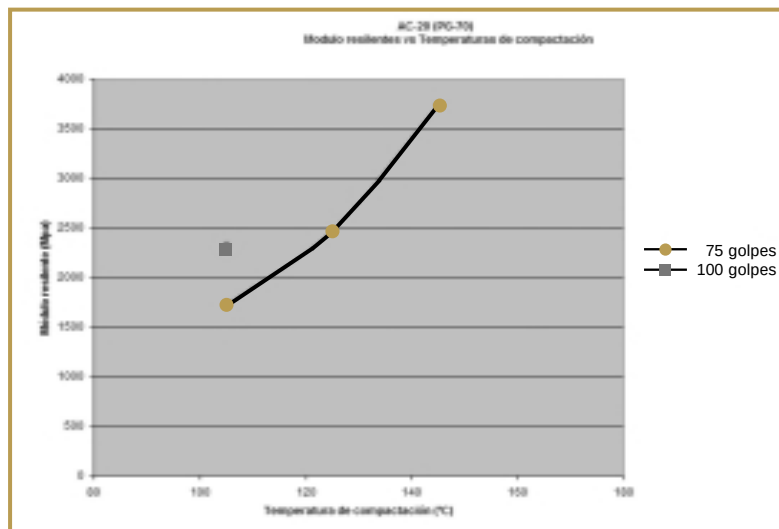
Tabla 2.- Especificaciones de granulometría mexicana.

7.- RESULTADO DE MÓDULOS RESILIENTES

AC-20 (PG-70)

Temperatura de compactación (°C)	Nº golpes	Densidad (gr/cm³)	%Compactación Marshall	%Vacíos	Módulo Resiliente (Mpa)
105	75	2.2877	98.43	4.75	1729
105	100	2.3078	99.3	3.92	2334
125	75	2.3093	99.36	3.85	2476
145	75	2.324	100	3.24	3741

Tabla 3.- Módulos resilientes del asfalto no modificado (PG-70).

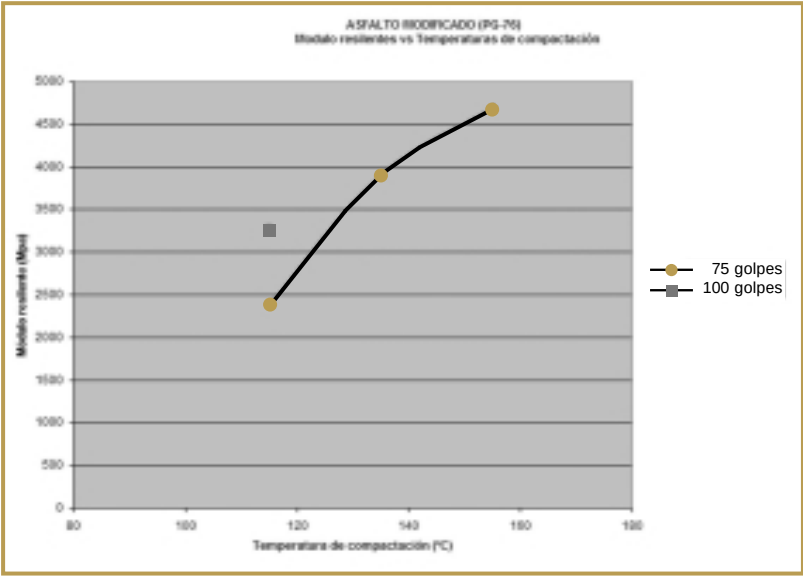


Gráfica 2.- Módulo resiliente vs Temperatura de compactación (PG-70).

ASFALTO MODIFICADO (PG-76)

Temperatura de compactación (°C)	Nº golpes	Densidad (gr/cm³)	%Compactación Marshall	%Vacíos	Módulo Resiliente (Mpa)
115	75	2.2508	96.8	6.29	2399
115	100	2.2634	97.39	5.77	3289
135	75	2.2875	98.42	4.76	3923
155	75	2.3131	99.53	3.7	4696

Tabla 4.- Módulos resilientes del asfalto modificado (PG-76).

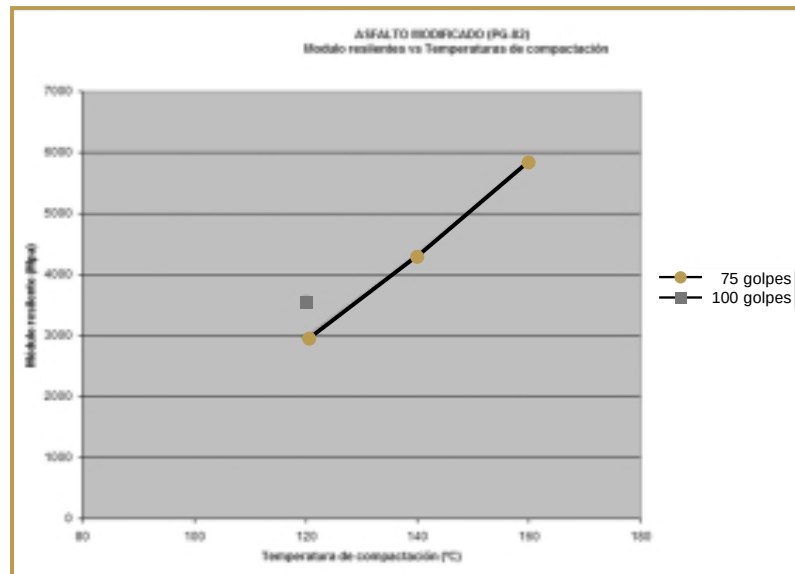


Gráfica 3.- Módulo resiliente vs Temperatura de compactación (PG-76).

ASFALTO MODIFICADO (PG-82)

Temperatura de compactación (°C)	Nº golpes	Densidad (gr/cm³)	%Compactación Marshall	%Vacíos	Módulo Resiliente (Mpa)
120	75	2.2474	96.7	6.43	2969
120	100	2.2596	97.22	5.92	3592
140	75	2.2952	98.76	4.44	4323
160	75	2.3052	99.2	4.029	5858

Tabla 5.- Módulos resilientes del asfalto modificado (PG-82).



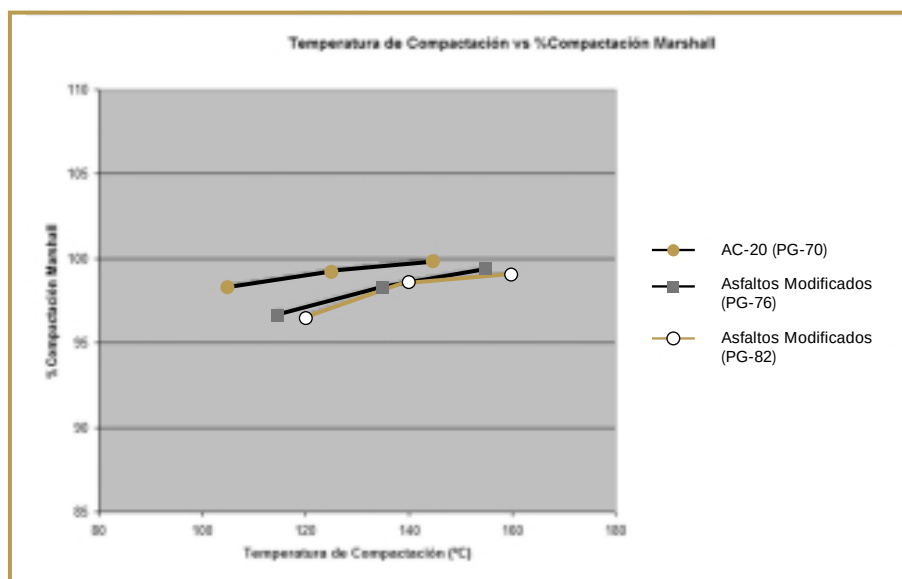
Gráfica 4.- Módulo resiliente vs Temperatura de compactación (PG-82).

En las graficas se observa claramente la ganancia que se tiene en el módulo resiliente al colocar una mezcla con asfalto modificado.

También se puede apreciar que en los tres tipos de mezclas, modificadas y no modificada, al ir disminuyendo la temperatura de compactación, el módulo resiliente disminuye notablemente. El incremento de energía de compactación no asegura que la mezcla obtenga un módulo adecuado; ya que si se compacta con mayor energía de compactación, pero

con temperatura inferior a la óptima, el incremento del módulo es despreciable.

El porcentaje de compactación Marshall se mantiene en el rango aceptable, ya que es mayor del 95% que es el que pide la norma actual. Esto demuestra que el control de calidad en campo a través de densidades de corazones es deficiente, porque no garantiza el buen desempeño de la carpeta de concreto asfáltico, como lo puede demostrar un ensayo mecánico, en este caso el ensayo de módulo resiliente.



Gráfica 5.- % Compactación Marshall vs Temperatura de compactación.

8.- EVALUACIÓN DE VIDA PREVISIBLE MEDIANTE EL SOFTWARE DISPAV 5

Para la evaluación de la vida estructural de las mezclas asfálticas, se propuso una estructura de pavimento que es la siguiente:

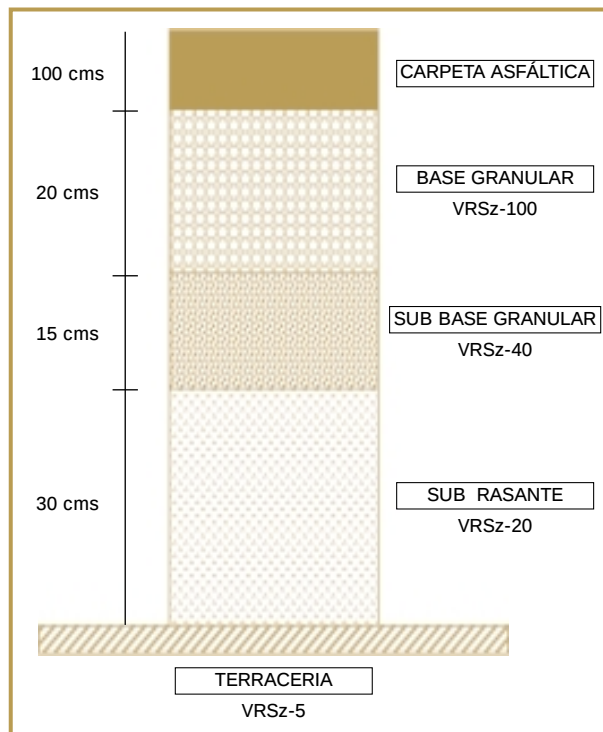


Figura 6.- Estructura de pavimento propuesta para el cálculo de ejes equivalentes.

Con la ayuda del software DISPAV-5 se determinaron los ejes equivalentes que puede soportar la estructura a la fatiga, en el cual solo se varía los módulos resilientes de las mezclas asfálticas mostrados anteriormente.

En el programa DISPAV-5 se decidió por una carretera de altas especificaciones, la cual fallaría cuando tuviera un agrietamiento moderado.

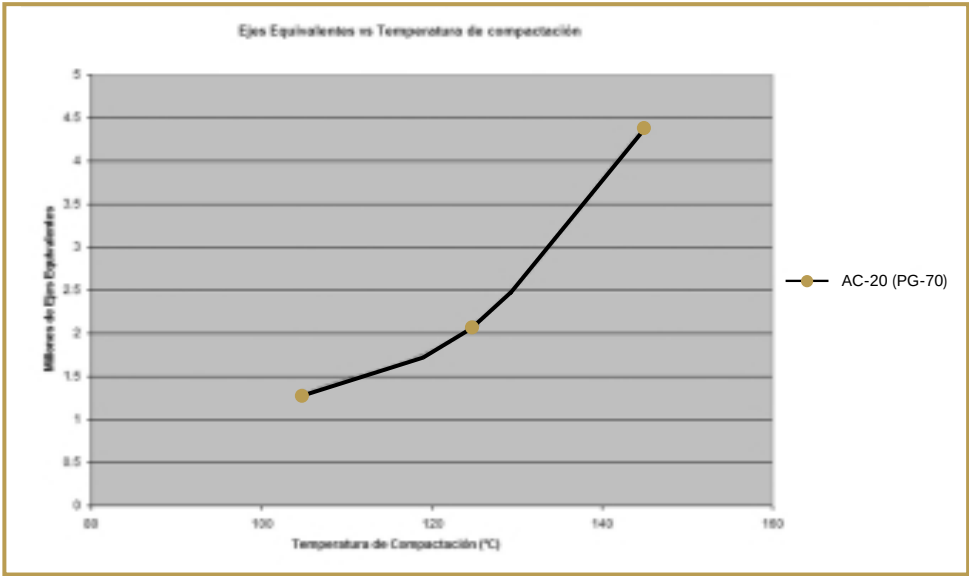
Además se estableció un nivel de confianza del 85 % para el cálculo de la vida previsible (Ejes equivalentes de 8.2 Ton).

Los valores de coeficiente de Poisson para todas las capas y de los módulos resilientes de las capas granulares fueron dados por el programa, dependiendo de su VRS y la característica de la capa.

AC-20 (PG-70)

Temperatura de Compactación (°C)	Módulo Resiliente (Mpa)	Millones de Ejes Equivalentes
105	1729	1.3
125	2476	2.1
145	3741	4.4

Tabla 6.- Ejes equivalentes del asfalto no modificado (PG-70).

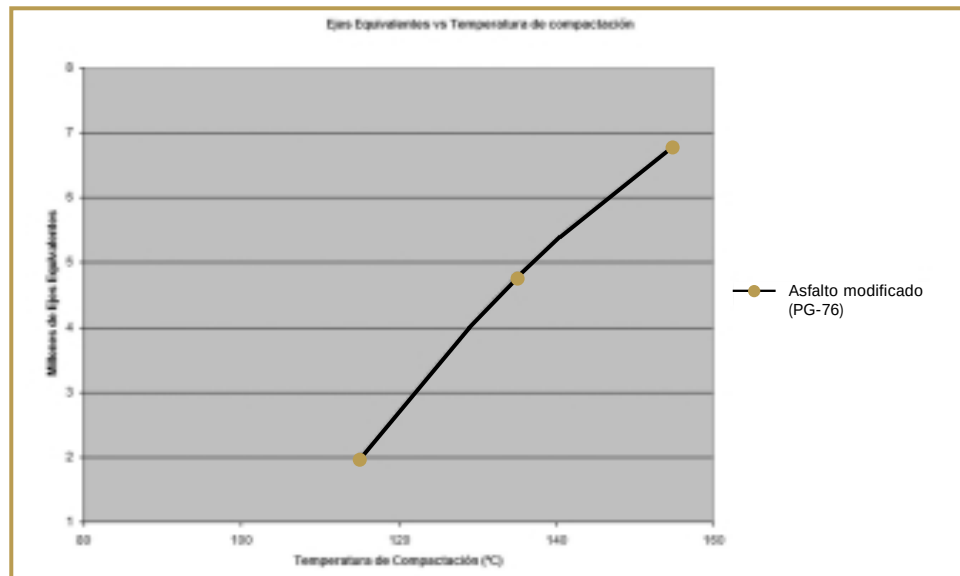


Gráfica 6.- Ejes equivalentes vs Temperatura de compactación (PG-70).

ASFALTO MODIFICADO (PG-76)

Temperatura de Compactación (°C)	Módulo Resiliente (Mpa)	Millones de Ejes Equivalentes
115	2399	2.0
135	3923	4.8
155	4696	6.8

Tabla 7.- Ejes equivalentes del asfalto modificado (PG-76).

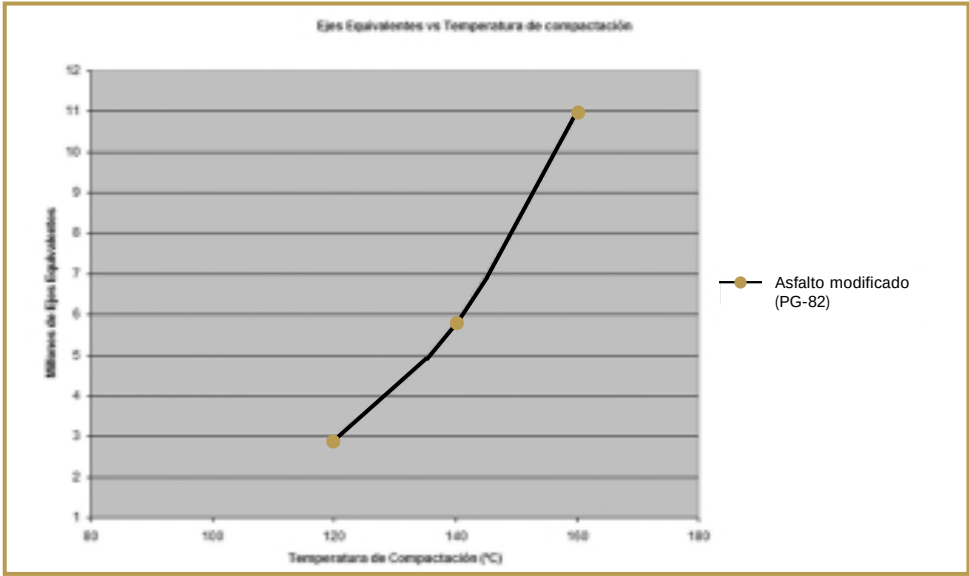


Gráfica 7.- Ejes equivalentes vs Temperatura de compactación (PG-76).

ASFALTO MODIFICADO (PG-82)

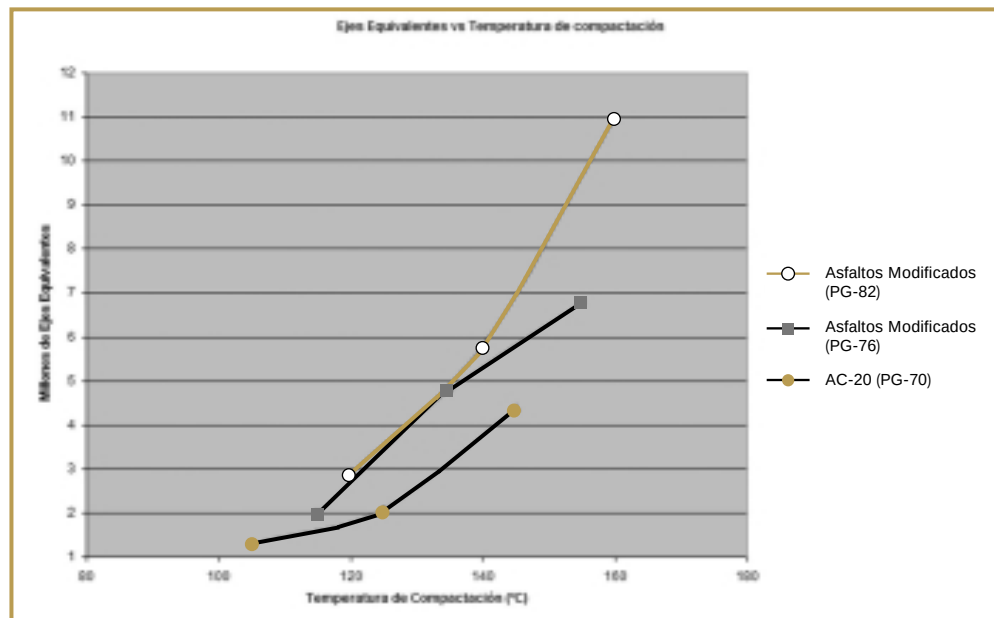
Temperatura de Compactación (°C)	Módulo Resiliente (Mpa)	Millones de Ejes Equivalentes
120	2969	2.9
140	4323	5.8
160	5858	11.0

Tabla 8.- Ejes equivalentes del asfalto modificado (PG-82).

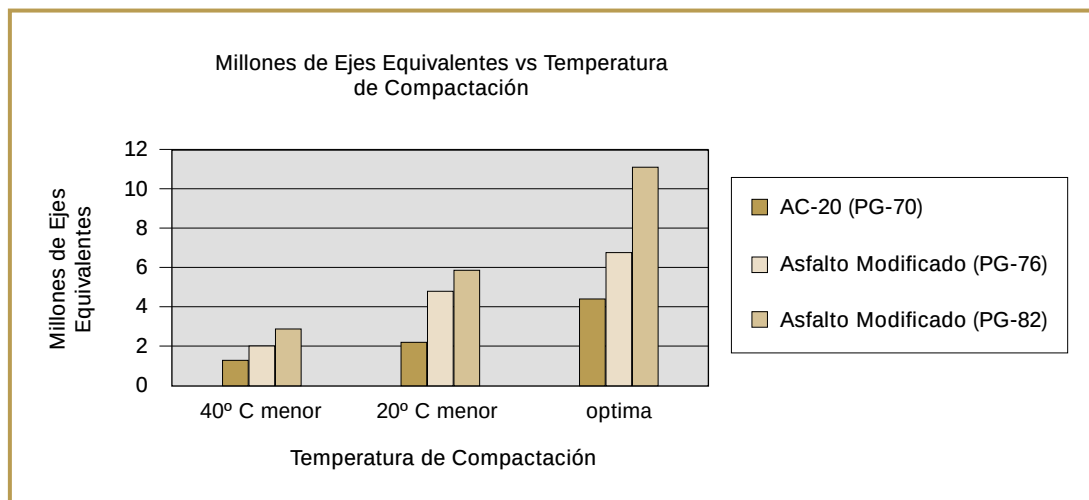


Gráfica 8.- Ejes equivalentes vs Temperatura de compactación (PG-82).

GRÁFICA COMPARATIVA ENTRE TIPOS DE ASFALTO - TEMPERATURAS DE COMPACTACIÓN - EJES EQUIVALENTES



Gráfica 9.- Tipo de Asfalto vs Ejes equivalentes vs Temperatura de compactación.



Gráfica 10.- Comparación de Tipo de asfaltos vs Temperatura de compactación vs Ejes equivalentes.

El numero de ejes que soporta una mezcla asfáltica antes de sufrir un agrietamiento moderado esta influenciado por el tipo de asfalto con el que esta hecha la mezcla como se observa en los resultados. Cuando el asfalto con el que esta hecha la mezcla tiene mejores características, el desempeño o vida de la carpeta de concreto asfáltico será mejor, como se puede apreciar con las mezclas hechas con asfalto modificado PG-82.

Es interesante resaltar que la temperatura de compactación tiene tanta o mayor importancia que el tipo de asfalto, como se ven en todos los gráficos una mezcla con asfalto modificado compactada a temperatura inferior a la óptima llega comportarse igual o peor que una mezcla con asfalto convencional.

Todas las mezclas tanto con asfalto modificado como no modificado van disminuyendo su desempeño conforme se compactan a menor temperatura.

9.- CONCLUSIONES

En el presente trabajo se puede ver la gran influencia que tiene la temperatura de compactación en el módulo resiliente de las mezclas asfálticas.

En todos los asfaltos se observa como al ir reduciendo la temperatura de compactación el módulo disminuye notablemente.

La energía de compactación es un parámetro importante como se observó en el trabajo, al incrementar la energía de compactación aumentaba el módulo resiliente. Sin embargo si se compacta a bajas temperaturas y con mayor energía de compactación, el aumento del módulo resiliente no es tan significativo como se quisiera.

En un futuro se estudiara más la influencia que se tiene entre los parámetros energía de compactación –temperatura de compactación– módulo resiliente.

Los ejes equivalentes disminuyeron notablemente al disminuir la temperatura de compactación. Aquí se puede verificar que la vida de una carpeta asfáltica esta relacionada directamente a la temperatura de compactación.

En los resultados se resalta como algunas mezclas asfálticas pierden más del 60% de su resistencia a ejes equivalentes conforme se compactan a menor temperatura.

En la última gráfica se puede ver claramente que una mezcla asfáltica modificada permite incrementar los ejes equivalentes, siempre y cuando sea compactada a una temperatura óptima, ya que si se compacta a temperaturas inferiores tendría comportamientos iguales o menores a los de una mezcla asfáltica no modificada.

Es importante resaltar como se puede estar invirtiendo en una mezcla asfáltica modificada que da características mecánicas (ejes equivalentes) inferiores a las que debería de tener, por una compactación a temperaturas menores a la óptima.

En todas las mezclas asfálticas se observó que cumplen con los parámetros de porcentaje mínimo de compactación Marshall que es del 95% y con la temperatura final mínima de compactación de 85° C.

Es por ello que se debe analizar cuidadosamente si el sistema de control de calidad de las mezclas asfálticas compactadas en campo es el mejor, como es el caso de la densidad de corazones de obra.

El ensayo de módulo resiliente ó tracción indirecta sería un excelente método de control de calidad de mezclas asfálticas compactadas en campo, ya que daría una información más concreta acerca del comportamiento que tiene la mezcla.

10.- BIBLIOGRAFÍA

- Tesis Doctoral *“Aseguramiento de la calidad de las mezclas bituminosas mediante la aplicación del ensayo de tracción indirecta en el control de su ejecución”*. Adriana Martínez y Félix Pérez. Barcelona, España. 2002.
- Tesina. *“Efecto de equipo y procedimiento de medida en la determinación del módulo resiliente y resistencia a tracción indirecta de las mezclas bituminosas”*. Javier Moreno Rubio y Adriana Martínez. Barcelona, España. 2005.
- *“Influencia de la temperatura de compactación en los parámetros de estabilidad – flujo de las mezclas asfálticas en caliente”*. 3er Simposio Venezolano del asfalto. Ing. Vanesa Mora Cristante. 2006.
- *“Efectos de la temperatura de compactación en la resistencia al flujo plástico”*. Ministerio de obras públicas del transporte, vivienda y desarrollo urbano. Alejandro Salazar Meléndez. San Salvador, Republica del Salvador.
- SUPERPAVE *“Antecedentes y métodos de ensayos asfálticos y mezclas asfálticas”*. ASPHALT INSTITUTE. 1998.
- Performance Tests for Hot Mix Asphalt (HMA). ASTM. STP 1469
- Placement and Compaction of Asphalt Mixture. F.T. Wagner. ASTM. STP 829. 1982
- Software Dispav-5 del Instituto de Ingeniería de la UNAM

AGRADECIMIENTOS

Al Instituto Mexicano del Transporte (IMT), en especial al Ing. Alfonso Pérez e Ing. Guadalupe Itandehui Martínez, por proporcionar el equipo, así como por la ayuda durante la realización de los ensayos de módulos resilientes.

Al personal de laboratorio de pavimentos de SURFAX Dr. Mauricio Centeno, Ing. Omar López Aranda, Ing. Israel Sandoval, Ing. Ángel Carrete, Tec. Ignacio Ramírez y Tec. Miguel Alvarado, por la ayuda en los análisis de asfaltos, agregados y realización de probetas.

A la empresa Asfaltos Guadalajara, por el apoyo y la facilitación del agregado pétreo.

Editado en Madrid,
26 de noviembre de 2008

Subvencionado por:

