

ÚLTIMOS AVANCES DE SUPERPAVE: BUSCANDO UN ENSAYO QUE ACOMPañE AL MÉTODO

M. W. Witzak, Ph.D.¹ & A. Sotil, M.Sc.²

RESUMEN EJECUTIVO

En los EE.UU., desde 1994 se difundió una nueva metodología de diseño de mezclas asfálticas denominada Superpave (Superior Performance Asphalt Pavements). Este método abandona por completo los procedimientos empíricos usados hasta ese momento como el de Marshall o Hveem, y se enfoca en las propiedades fundamentales de los ligantes y las mezclas asfálticas.

Parte del nuevo procedimiento incluye un nuevo sistema de clasificación de ligantes denominada *Performance-Grade PG* y también un nuevo método de compactación de las probetas, usando el Compactador Giratorio Superpave. Se pensó que con estas modificaciones, entre otras, se conseguiría prevenir fallas prematuras y conseguir mezclas mucho mas confiables.

Sin embargo, los resultados iniciales en centros de ensayos no fueron alentadores. Las estructuras fallaron prematura y drásticamente. Es ahí donde se pone énfasis en la necesidad de complementar el método con un ensayo de confirmación o también llamado Ensayo Simple de Comportamiento (*Simple Performance Test, SPT*).

En los últimos años, Arizona State University ha estado encargada de desarrollar este ensayo, las especificaciones, los equipos necesarios y las guías de usuario requeridas para su implementación.

En el Perú, lamentablemente estamos aún lejos de llegar a implementar esta nueva tecnología. Aún se usan métodos empíricos de mediados del siglo XX y una clasificación de ligantes que cada vez es dejada de lado por países del primer mundo e inclusive por países en vías de desarrollo. El método recientemente fue presentado a la comunidad científica peruana, aunque no se mencionaron los últimos avances que son básicos para la apropiada implementación del método.

Esta ponencia tiene el objetivo de complementar la información sobre el Superpave, mostrando los últimos avances de este método, incluyendo la teoría y práctica de los tres ensayos que actualmente son los candidatos finales para convertirse en la SPT que complementa a Superpave: el Módulo Dinámico E*, y los denominados Tiempo de Flujo y Número de Flujo. Además se presenta la manera como se prevé la SPT sea usada, tanto en el diseño de las mezclas asfálticas, así como también como una herramienta básica en el control de calidad de la obra.

Se espera que en el más corto plazo posible esta metodología pueda ser transferida e implementada al Perú, ya que al igual que con lo que está pasando con el diseño de pavimentos, la comunidad científica mundial cada día abandona los métodos empíricos y confía más en los métodos mecanísticos y mecanísticos-empíricos basados en conceptos mas teóricos y en propiedades fundamentales de los materiales. El seguir usando métodos empíricos representará para el Perú el desperdicio de los pocos recursos que tenemos, ya que las obras de infraestructural vial no serán confiables y representarán para la nación gastos recurrentes que pueden ser evitados si es que existe la decisión y el deseo de implementar e invertir en una metodología que esta mas acorde con las necesidades del mercado actual.

¹ Professor, Department of Civil and Environmental Engineering, Arizona State University.

² Graduate Research Associate, Department of Civil and Environmental Engineering, Arizona State University.

ÚLTIMOS AVANCES DE SUPERPAVE: BUSCANDO UN ENSAYO QUE ACOMPañE AL MÉTODO

M. W. Witzczak, Ph.D. & A. Sotil, M.Sc.

HISTORIA DEL SUPERPAVE

En los últimos años, tanto la carga que llevan los vehículos como la cantidad de estos ha aumentado de manera exponencial en los EE.UU., Europa y en el mundo entero. Tan significativo es el incremento de la carga en el comportamiento de los pavimentos, que tan solo por aumentar la carga máxima legal en una 10%, se produjo un aumento del 40 al 50% en los esfuerzos acarreados por la estructura (1). Ante estos problemas, los materiales convencionales y los métodos de diseño usados hasta el momento empezaron a producir fallas prematuras o estructuras que no duraban el tiempo esperado. Los métodos de Marshall y Hveem, tradicionalmente usados y desarrollados en la primera mitad del siglo XX demostraban que ya habían cumplido su ciclo.

Por eso, el Congreso de los EE.UU. autorizó en 1987 la creación de un programa que evalúe y proporcione recomendaciones para mejorar las carreteras e infraestructura vial de los EE.UU. en general. El Programa Estratégico de Investigación de Carreteras (Strategic Highway Research Program, SHRP) fue encargado, dentro de varias responsabilidades, de producir un método nuevo de diseño que esté acorde con las necesidades del mercado actual y que no se descontinúe en el futuro.

Así en 1994, SHRP produce el Pavimento de Comportamiento Superior, conocido en sus siglas en inglés como Superpave (Superior Performance Asphalt Pavements). El método de diseño volumétrico Superpave fue desarrollado como un sistema de diseño completo para mezclas asfálticas, que se adecua a los requerimientos únicos de tráfico, clima y estructura del pavimento de cada proyecto (2). En los 10 años de la era Superpave, todos los estados en EE.UU. (a excepción de California) han implementado diferentes partes del nuevo método, como la nueva clasificación de ligantes (Performance-Grade, PG) o el método de diseño volumétrico.

El método de diseño Superpave para mezclas asfálticas consiste en tres fases (2):

- Selección de Materiales para el ligante y el agregado
- Mezcla del Agregado
- Análisis volumétrico en probetas compactadas usando el Compactador Giratorio.

Sin embargo, actualmente el método no incluye un ensayo que ayude a determinar si la mezcla es apropiada o no para las condiciones específicas del proyecto, ya que sólo está basado en el análisis volumétrico realizado durante el mezclado. Existe una lista de ensayos sugeridos para hacer comparaciones, pero no existe “el ensayo” que esté ligado explícitamente al método Superpave, como el ensayo de estabilidad y flujo lo están para el método de Marshall.

Fue resaltada la necesidad de un ensayo simple para evaluar el probable comportamiento de las mezclas en el campo, cuando los primeros resultados de ensayos como en WestTrack, Nevada (Proyecto 9-7 del Programa de Investigación de Carreteras de Cooperación Nacional o NCHRP, *National Cooperative Highway Research Program*) y otras secciones en todo el país, diseñadas con Superpave, empezaron a salir a la luz. En Westtrack, por ejemplo, se observó que las mezclas fallaron prematuramente y de manera drástica. Los asentamientos permanentes (*rutting*) estaban muy marcados, llegando a

limites extremadamente altos, no aceptados en una carretera interestatal por el peligro hacia los usuarios. Es por eso que la industria señaló la necesidad de desarrollar ese Ensayo Simple de Comportamiento (Simple Performance Test, SPT) que acompañe a los esfuerzos iniciales de SHRP y su producto Superpave.

En 1996, la Administración Federal de Carreteras (Federal Highway Administration, FHWA) dispuso fondos para encontrar esa “SPT”. Esta SPT tendría como objetivo el medir una propiedad fundamental de la mezcla asfáltica que sería luego relacionada con modelos mecánicos-empíricos que calculen las fallas de los pavimentos como el asentamiento o el agrietamiento longitudinal o por fatiga. Usando los valores de la SPT, se crearía una serie de tablas de guía para que el ingeniero pueda determinar si su mezcla cumple o no con las especificaciones deseadas bajo las condiciones de clima y tráfico relacionadas con su proyecto. Del mismo modo, FHWA calculo que la SPT podría servir como una herramienta que facilite el control de calidad durante la construcción de los pavimentos (*Quality Control and Assurance*).

Así, la FHWA contrató a la Universidad de Maryland en College Park para desarrollar todas las especificaciones necesarias, tablas de guía y criterio para esta SPT que eventualmente acompañaría al método Superpave. El proyecto se continuó en 1999, con el nombre de Proyecto NCHRP 9-19: “Gestión de Modelos de Comportamiento y Apoyo a Superpave” (*Superpave Support and Performance Models Management*) y se traslado a Arizona State University donde actualmente se encuentra en la fase final (3).

CONDICIONES ACTUALES EN EL PERU

Actualmente, el método de diseño de mezclas asfálticas más usado es el de Marshall desarrollado en la primera mitad del siglo XX, para condiciones muy distintas a las del Perú. Las condiciones climáticas y geográficas del Perú por la sola presencia de la cordillera de los Andes hacen que desde ya se realice una extrapolación al método empírico de Marshall. Más aún, el tráfico vehicular ha cambiado radicalmente en los 70 años de existencia del método. Conocer las cargas a los que los pavimentos están realmente expuestos es sumamente difícil, debido a la irresponsabilidad de los choferes que sobrepasan el límite legal máximo. Y si a esto se le suma la condición del parque automotor, se tiene como resultado que el método de Marshall esta siendo usado para condiciones totalmente diferentes para las que fue concebido. El resultado lógico es estructuras que fallan prematuramente, que conllevan a invertir fondos adicionales para mantener las carreteras, y un gasto continuo de rehabilitación para mantenerlas en un estado aceptable.

La implementación del método Superpave en el Perú, a 10 años de su presentación en la comunidad científica mundial, es aún un proyecto. Ni siquiera se ha implementado el nuevo sistema de clasificación de ligantes denominado *Performance-Grade PG* que se basa en las temperaturas máximas y mínimas de la región en la que el pavimento se ha de usar. En el Perú, los ligantes aún son clasificados usando el antiguo método de Penetración (PEN) y en algunos casos el de viscosidad (AC o AR). Parte de la demora en implementar esta nueva tecnología tiene que ver con el alto costo inicial y en el desinterés de las autoridades respectivas.

Estudios iniciales con Superpave han empezado a aparecer en la comunidad científica peruana (4), pero hay aún un largo camino por recorrer.

OBJETIVO DE LA PONENCIA

El objetivo principal de la ponencia es presentar los últimos avances en el método de diseño volumétrico de mezclas asfálticas Superpave, que ha estado en circulación en los EE.UU. desde 1994 y que aún no ha sido transferida al Perú.

Recientes proyectos de investigación en los EE.UU. están buscando el Ensayo Simple de Comportamiento (Simple Performance Test, SPT) que ha de acompañar a Superpave, como los ensayos de estabilidad y flujo lo hicieron con Marshall. Esta ponencia se enfoca en presentar a la comunidad peruana los últimos tres ensayos candidatos a convertirse en esta SPT, y se explica brevemente la teoría y la manera en que estos ensayos se realizan en el laboratorio y como es que éstas se implementarían en el diseño de mezclas asfálticas y en el control de calidad durante la construcción de los pavimentos.

En parte, la demora que Superpave ha sufrido para despegar internacionalmente (y llegar al Perú) es precisamente la falta de ese ensayo complementario al método, en especial después de los desastrosos resultados obtenidos inicialmente en ensayos a escala natural, como en WesTrack (Nevada). Pero ahora que el proyecto encargado de buscar ese ensayo está en su fase final, ya es tiempo para que el Perú empiece a implementar este sistema.

Esfuerzos iniciales deben concentrarse en implementar el sistema de clasificación de ligantes *Performance-Grade (PG)* que está basado en las condiciones climáticas de cada región. Luego se deben adquirir los equipos necesarios para la preparación y acondicionamiento de las probetas asfálticas (compactador giratorio, cortadoras, hornos de envejecimiento, etc.), y finalmente las máquinas necesarias para realizar la SPT que está por ser determinada próximamente. Mientras tanto, es necesario capacitar a nuestros profesionales en estos ensayos y éste es el motivo principal para elaborar esta ponencia.

DESCRIPCIÓN DE LA PONENCIA

Las siguientes secciones de esta ponencia han sido divididas de la siguiente manera:

- Definición del Ensayo Simple de Comportamiento (SPT)
- Resultados Iniciales del Proyecto NCHRP 9-19 encargado de encontrar esta SPT
- Teoría de las Tres Candidatas Finales a convertirse en SPT
- Preparación de las Probetas y Acondicionamiento para los Ensayos Candidatos
- Potencial Uso de la SPT en el Diseño de Mezclas Asfálticas
- Resumen, Conclusiones y Recomendaciones

DEFINICIÓN DEL ENSAYO SIMPLE DE COMPORTAMIENTO (3)

La definición exacta de la SPT es la siguiente:

“La SPT es un ensayo que de manera precisa y confiable mide una característica o parámetro de la mezcla asfáltica que tiene una excelente correlación con los valores medidos de una falla del pavimento (por ejemplo, asentamiento permanente y agrietamientos) que se mantiene en una gran diversidad de rangos de tráfico y condiciones climáticas.”

De esta manera, no es necesario que la SPT prediga el comportamiento de la mezcla asfáltica durante toda la vida útil del pavimento, pero los resultados deben permitir determinar la habilidad de la mezcla para resistir agrietamientos y asentamientos permanentes bajo condiciones específicas.

RESULTADOS INICIALES DEL PROYECTO NCHRP 9-19: BÚSQUEDA DEL ENSAYO SIMPLE DE COMPORTAMIENTO (3)

Expectativas de la Industria

Al inicio del proyecto, el equipo de investigación de ASU distribuyó encuestas a ingenieros de todas las agencias estatales de transportes de los EE.UU., así como también a los ingenieros más representativos de la industria privada, en la cual se les preguntaban lo siguiente:

- 1) ¿Cuál es la falla del pavimento que debería tener mayor correlación con la SPT?
- 2) ¿Cuánto estarían los ingenieros dispuestos a gastar para implementar el equipo necesario para la SPT y cuanto debería este ensayo demorarse en realizar?
- 3) ¿Qué usos de la SPT ve como los más importantes?

Con respecto a la primera pregunta, las fallas de los pavimentos fueron reducidas a tres opciones, y el promedio de los resultados de todos los encuestados fueron los siguientes (considerando que “1” significa que es importantísimo que la SPT este correlacionada con la falla, “2” significa que la correlación es moderadamente importante y “3” no es importante):

Asentamiento Permanente: 1.1

Agrietamiento por Fatiga: 1.8

Agrietamiento Térmico: 2.2

Al mismo tiempo, se encontró que la industria, en promedio, estaba dispuesta a realizar una inversión inicial para implementar esta tecnología por aproximadamente US\$ 36,800 y esperaban que el tiempo del ensayo no exceda 8.6 horas.

Finalmente, los encuestados le dieron mayor importancia a la capacidad de la SPT para identificar mezclas de comportamiento inferior (9.3 / 10) y de proveer predicciones de las fallas en el campo de manera confiable (8.4 / 10). La tabla 1, tomada del Reporte NCHRP 465 (3), señala la relación completa de los resultados a la tercera pregunta.

Lista Inicial de Ensayos a ser Evaluados

En un estudio preliminar, se concluyó que no existía un SPT “único y perfecto” para todos los tipos de fallas, condiciones climáticas y de tráfico (5). Por este motivo, el equipo de investigación evaluó de una serie variada de ensayos que se creía cumplían con la descripción de SPT provista anteriormente. Ya que las dos fallas más importantes en la encuesta fueron el asentamiento permanente y el agrietamiento por fatiga, la lista de ensayos fue dividida con respecto a cada falla. La lista es presentada a continuación:

- a) Ensayos Candidatos para SPT con respecto a Asentamiento Permanente
 - Módulo Dinámico Triaxial (E*)
 - Módulo Dinámico Cortante o Tangencial – Máquina Cortante Superpave
 - Módulo Dinámico Cortante Quasi-Directo – Máquina Cortante en Campo
 - Módulo Elástico – Ensayo de Propagación de Ondas Ultrasónicas
 - Módulo Dinámico calculado de Regresiones No-Lineales
 - Resistencia a Esfuerzos Tangenciales Triaxiales
 - Deformación Permanente con Cargas Repetitivas Tangenciales Simples
 - Escurrimiento Plástico Estático Triaxial (Tiempo de Flujo)
 - Asentamiento Permanente por Cargas Repetitivas Triaxiales (Número de Flujo)

Tabla 1. Resultados de la Encuesta sobre la Importancia de los Diferentes Factores considerados en el Análisis de Usos de la SPT

Categorías de los Usos de la SPT	Importancia Relativa de la Categoría	Usos de la SPT	Nota Promedio
Confiabilidad del Ensayo	62	Confiabilidad en Identificar Mezclas Inferiores	9.3
		Confiabilidad para Predecir Fallas	8.4
		Sensibilidad del Resultado del Ensayo	8.1
Factores del Ensayo	38	Variabilidad de los Resultados	8.0
		Aplicabilidad para el uso de Testigos	7.3
		Tiempo de Preparación de Probetas	7.2
		Tiempo de Ensayo	7.1
		Costos de Mantenimiento y Reparación	6.9
		Tamaño de la Probeta	6.8
		Costo de la Inversión Inicial	6.8
		Requerimientos para la Calibración	6.3
		Dificultad de la Reducción de Datos	5.8
		Movilidad del Equipo	5.6

b) Ensayos Candidatos para SPT con respecto a Agrietamiento por Fatiga

- Módulo Dinámico Triaxial (E*)
- Tensión Indirecta
- Resistencia a la Tensión Indirecta
- Módulo Resiliente en Tensión Indirecta
- Fatiga en Tensión Indirecta
- Escurrimiento Plástico en Tensión Indirecta

En esta primera etapa del Proyecto NCHRP 9-19, un extenso programa de ensayos fue realizado en cada una de estas candidatas usando mezclas de tres centros de ensayo a escala real en los EE.UU.: MnRoad (Minnesota), WesTrack (Nevada) y ALF (Virginia). Cinco mezclas estaban disponibles para MnRoad (Cell 16, 17, 18, 20, y 22). Datos completos sobre esta ensayo pueden encontrarse en las Referencias 3 y 6.

Ocho mezclas estaban disponibles de WesTrack y los datos completos de este ensayo pueden ser encontrados en las Referencias 3 y 7. Sin embargo, solo 6 fueron usadas porque fue demostrado que las otras dos proporcionaban resultados completamente erróneos, o simplemente la colección de datos había sido incorrecta.

Finalmente, las mezclas provenientes del Centro de Ensayos Acelerados (*Accelerated Loading Facility – ALF*) de la FHWA fueron 11 (divididas en 4 para fatiga y 7 para asentamiento permanente). Diferente a las otras secciones (MnRoad era una carretera interestatal y WesTrack era un centro de ensayos a escala natural de forma oval), FHWA-ALF era un centro en donde pequeñas secciones de mezclas asfálticas eran evaluadas a altas temperaturas usando un simulador que proveía cargas de ida y de regreso para acelerar el deterioro del material. Detalles y datos completos sobre este centro de ensayos pueden ser encontrados en la Referencias 3 y 8.

Los resultados de los diversos ensayos fueron entonces relacionados con las medidas de asentamientos permanentes y agrietamientos por fatiga medidas en los centros de ensayo y las correlaciones entre éstos fueron evaluadas estadísticamente por separado, con relación a las dos fallas evaluadas, dándole una mayor importancia a los asentamientos permanentes, como dictó la encuesta arriba mencionada. La Figura 1 muestra un ejemplo de estas correlaciones, donde se observa el asentamiento permanente después de 10,000 repeticiones de la carga de 10,000 lb. en FHWA-ALF, comparado con el resultado del ensayo no-confinado de E^* a 130°F (54.4°C) . Se puede observar que la correlación fue bastante alta (coeficiente de determinación, $R^2 = 0.82$ y error relativo $Se/Sy = 0.46$). Los resultados variaron con el centro de ensayos y con los candidatos a SPT usados (3).

Reducción de Ensayos a los Candidatos Finales

Basados en los resultados de las diversas correlaciones construídas con todos los ensayos, el equipo de investigación del Proyecto 9-19 construyó una tabla en donde calificó subjetivamente a los ensayos candidatos con relación al asentamiento permanente (ya que era la falla que tenía mayor importancia para los encuestados). Así, se estableció que los tres ensayos con mayor importancia serían los candidatos finales para terminar con el proyecto. Estos ensayos fueron los siguientes:

- Módulo Dinámico Triaxial (E^*)
- Escurrimiento Plástico Estático Triaxial (Tiempo de Flujo)
- Asentamiento Permanente por Cargas Repetitivas Triaxiales (Número de Flujo)

Con respecto al agrietamiento por fatiga, el equipo de investigación recomendó la continuación del estudio usando sólo dos ensayos:

- Módulo Dinámico Triaxial (E^*) a bajas temperaturas.
- Escurrimiento Plástico en Tensión Indirecta

E^* fue recomendada porque también es válido para el asentamiento permanente y además porque es un factor fundamental en la Nueva Guía de Diseño de Pavimentos Nuevos y Rehabilitados del 2002 (2002-DG) desarrollada bajo el Proyecto NCHRP 1-37^a (9). Del mismo modo, el ensayo de Escurrimiento Plástico en Tensión Indirecta está también implementada en la 2002-DG y por eso este ensayo fue recomendado para la continuación del proyecto, aunque no con el énfasis puesto en los tres candidatos relacionados con el asentamiento permanente.

Los candidatos finales serían expuestos a validaciones más extensas, usando datos de otras locaciones y tipos de mezcla. Una vez que se haya encontrado ese ensayo SPT, el equipo de investigación se embarcaría en crear guías del usuario y tablas de criterio para guiar al ingeniero durante el diseño de la mezcla y el control de calidad de la obra.

TEORIA DE LOS ENSAYOS CANDIDATOS FINALES PARA EL SUPERPAVE SPT Y SUS PARÁMETROS MEDIDOS EN EL LABORATORIO(3)

La siguiente sección esta dedicada brevemente a la teoría detrás de los 3 ensayos elegidos para convertirse en el Ensayo Simple de Comportamiento (SPT) que acompañará a la metodología Superpave (enfocada al asentamiento permanente), así como también a los valores que son medidos durante de los ensayos y analizados para construir las correlaciones con los asentamientos permanentes.

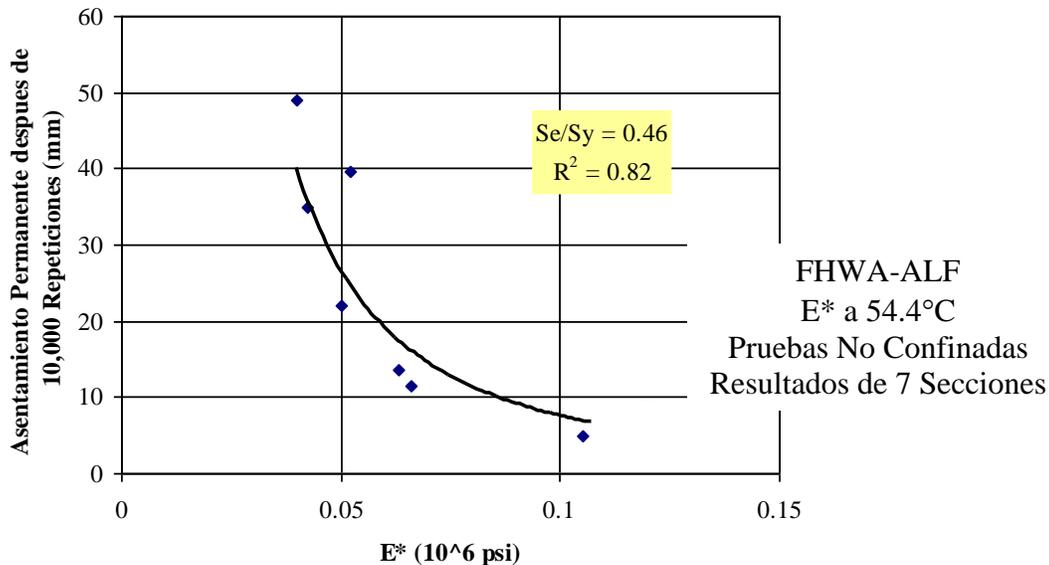


Figura 1. Ejemplo de la Correlación entre Asentamiento Permanente y Ensayo Candidato a SPT (específicamente E*)

Módulo Dinámico Triaxial (E*)

Estandarizado en 1979 bajo la denominación ASTM D3497 “Método Standard para el Ensayo del Módulo Dinámico de Mezclas de Concreto Asfáltico”, el ensayo de E* consiste en aplicar una carga de compresión uniaxial sinusoidal (mitad del seno o en inglés *haversine*) a una probeta cilíndrica confinada o no-confinada, como se observa en la Figura 2. La relación entre el esfuerzo y la deformación bajo este tipo de carga para materiales visco-elásticos es definida por un número complejo llamado el módulo complejo (E*) y su valor absoluto, |E*|, es “módulo dinámico”. Matemáticamente, |E*| se define a su vez, como el máximo esfuerzo dinámico (σ_0) dividido por la deformación axial recuperable (ϵ_0):

$$|E^*| = \sigma_0 / \epsilon_0$$

Las porciones real e imaginaria del módulo complejo pueden ser escritas así:

$$E^* = E' + iE''$$

E' normalmente es denominada como el componente elástico o de almacenamiento del módulo complejo; mientras que E'' es llamado el módulo de pérdida o viscoso. El ángulo de fase, ϕ , es el ángulo por el cual ϵ_0 está atrasado con respecto a σ_0 . Este parámetro es un indicador de las propiedades viscosas del material evaluado. Matemáticamente, éste se expresa de la siguiente manera:

$$E^* = |E^*| \cos \phi + i |E^*| \sin \phi$$

$$\phi = t_i / t_p \times (360)$$

donde:

t_i = tiempo de demora entre un ciclo de esfuerzo y deformación

t_p = tiempo por un ciclo de esfuerzo

i = número imaginario

Para un material puramente elástico, $\phi = 0^\circ$, y el módulo complejo (E*) sería el valor absoluto, o el módulo dinámico. Para un material puramente viscoso, $\phi = 90^\circ$.

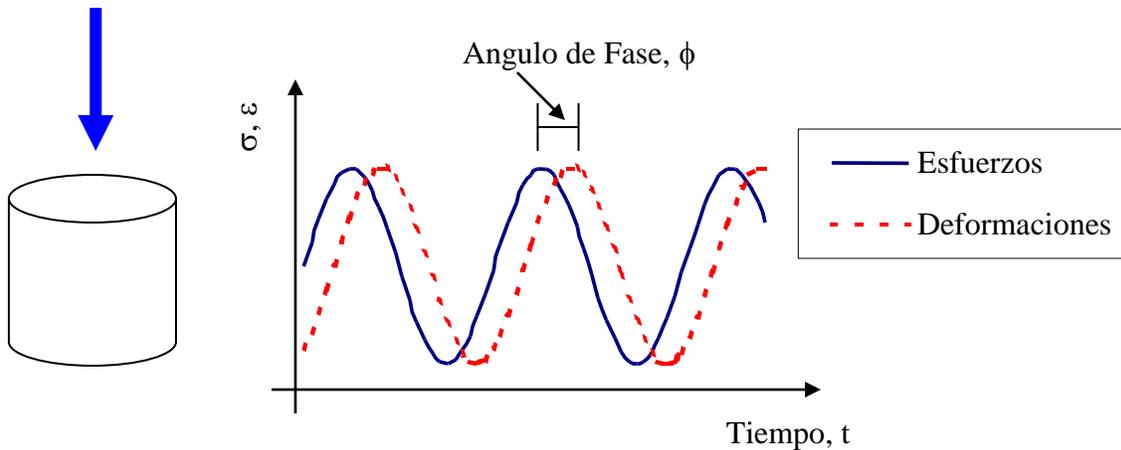


Figura 2. Modo de Carga (Mitad del Seno / Haversine) en el Ensayo de E^*

Escurrecimiento Plástico Estático Triaxial (Tiempo de Flujo)

El módulo E^* de un material es una importante propiedad que relaciona la deformación y el esfuerzo se usa para predecir fallas de los pavimentos. Sin embargo, para materiales visco-elásticos es más ventajoso usar el término “Compliance” o $D(t)$. Este término no es más que el recíproco del módulo, y su mayor ventaja es que permite la separación de los componentes de las deformaciones dependientes y no dependientes del tiempo.

En un ensayo de escurrecimiento plástico con fuerzas de compresión estáticas, lo que se mide es la relación total de la deformación y el tiempo bajo condiciones confinadas o no confinadas. El ensayo de escurrecimiento plástico estático provee suficiente información para determinar los componentes instantáneos elásticos (recuperables) y plásticos (no recuperables), así como también los componentes visco-elásticos y visco-plásticos de la respuesta del material (que son dependientes del tiempo). La Figura 3 muestra una relación típica entre el valor total calculado de $D(t)$ y el tiempo de carga. Como se puede observar, $D(t)$ puede ser dividido en tres zonas:

- 1) La zona primaria – porción en la cual el grado de aumento de la deformación disminuye con el tiempo de carga.
- 2) La zona secundaria – porción en la cual el grado de aumento de la deformación es constante con respecto al tiempo de carga.
- 3) La zona terciaria – porción en la cual el grado de aumento de la deformación incrementa con el tiempo de carga.

Idealmente, el gran incremento en el valor $D(t)$ ocurre a un volumen constante dentro de la zona terciaria. El punto de comienzo de la zona de deformación terciaria es definido como el Tiempo de Flujo, el cual mostró ser un parámetro muy significativo a la hora evaluar la resistencia de una mezcla asfáltica en contra del asentamiento permanente (10). El Tiempo de Flujo también es visto como el punto mínimo de la relación entre la derivada de $D(t)$ y el tiempo de carga (Figura 4). Por eso, el Tiempo de Flujo, F_T , se define como el tiempo en el cual la deformación cortante comienza bajo volumen constante.

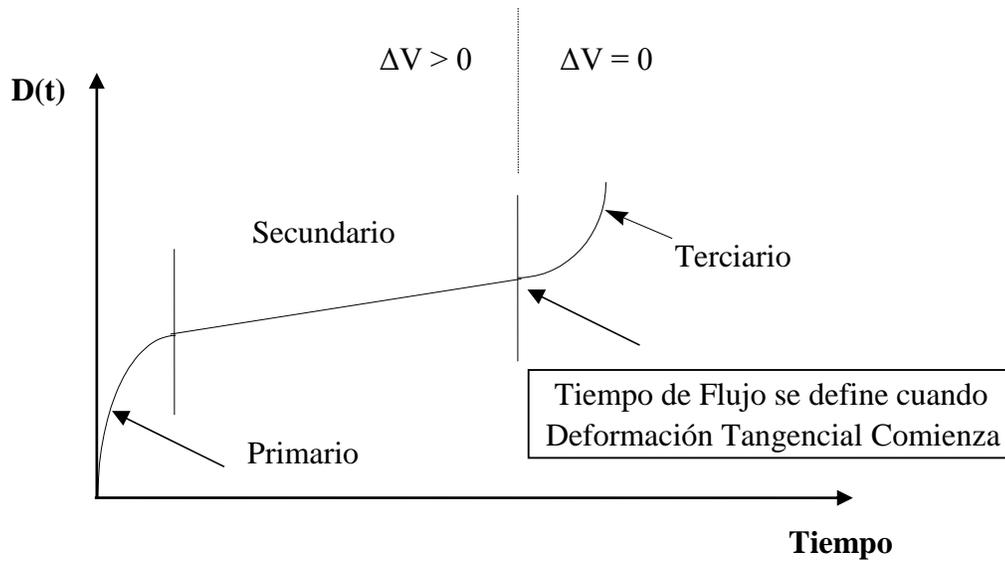


Figura 3. Típico Resultado entre el valor *Compliance* o $D(t)$ y el Tiempo de Carga

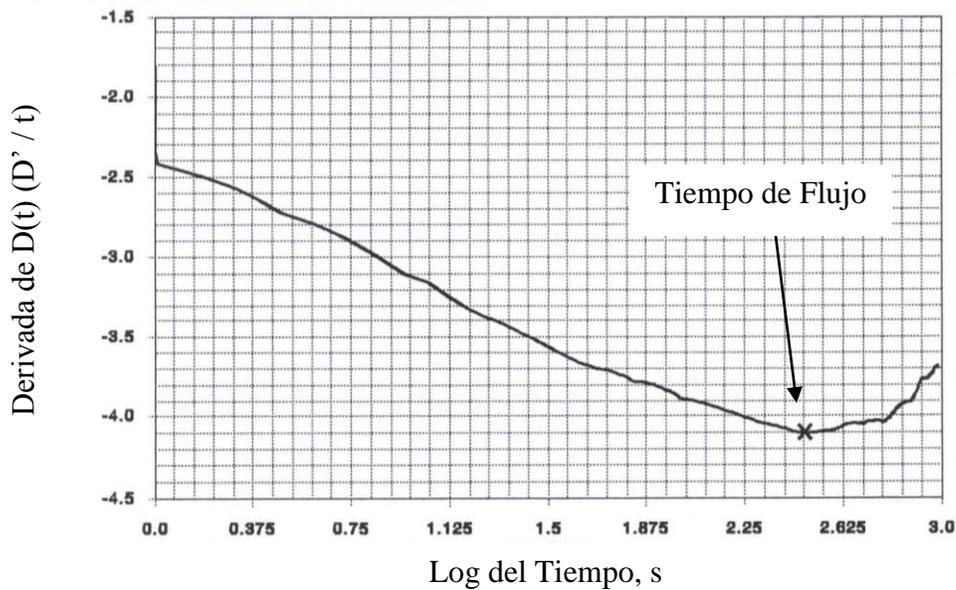


Figura 4. Relación entre la Derivada de Compliance vs. Tiempo de Carga en Escala Log-Log para un Ensayo de Tiempo de Flujo

En general, funciones potenciales son usadas para modelar la zona secundaria de la Curva de Escurrecimiento de $D(t)$, como se observa en la Figura 5.

$$D' = D(t) - D_o = a t^m$$

Donde: D' = Componente visco-elástico de Compliance en cualquier momento

$D(t)$ = Compliance Total en cualquier momento

D_o = Compliance Instantáneo

t = Tiempo de Carga

a, m = Coeficientes de Regresión No-Lineal

Los valores “a” y “m” son generalmente conocidos como los parámetros de $D(t)$. Estos parámetros son indicadores generales del comportamiento de asentamientos permanentes de las mezclas asfálticas. Así, para un valor alto de “a”, el valor $D(t)$ será más grande, el módulo será más bajo, y más grande el asentamiento permanente. Mientras tanto, para un valor constante de “a”, un incremento en el término “m” (la pendiente), significará un mayor asentamiento permanente.

Asentamiento Permanente por Cargas Repetitivas Triaxiales (Número de Flujo)

Otra forma de medir los asentamientos permanentes es aplicar a la probeta asfáltica miles de repeticiones equivalentes y medir la deformación permanente acumulada en función al número de repeticiones. La carga aplicada es un pulso de medio seno por 0.1 s, y luego se deja reposar por 0.9 s, aplicado generalmente por 3 horas o por 10,000 repeticiones.

Los resultados del ensayo con cargas repetitivas son presentados en términos de la deformación permanente acumulada (ϵ_p) versus el número de repeticiones. La relación es similar al obtenido en el Ensayo del Tiempo de Flujo y una relación típica es presentada en la Figura 6. Así, la relación también puede ser dividida en tres zonas (primaria, secundaria y terciaria) y el Número de Flujo, F_N , se define como la repetición en la cual comienza el flujo terciario. La Figura 7 muestra la relación de la Figura 6 pero en escala log-log. Del mismo modo que se hizo con el Tiempo de Flujo, la zona secundaria es normalmente representada con una función potencial, como se indica:

$$\epsilon_p = a N^b$$

La intersección “a” representa la ϵ_p después de la primera repetición $N = 1$, mientras la pendiente “b” representa el grado de cambio de la ϵ_p en función de los ciclos de cargas ($\log [N]$). Ambos valores ignoran la zona terciaria y dependen en la combinación de materiales y condiciones del ensayo.

Además de calcular los valores “a” y “b”, se calculan otros tres parámetros que pueden ser correlacionados con el asentamiento permanente: módulo resiliente (E_R), y coeficiente de deformación (ϵ_p / ϵ_r).

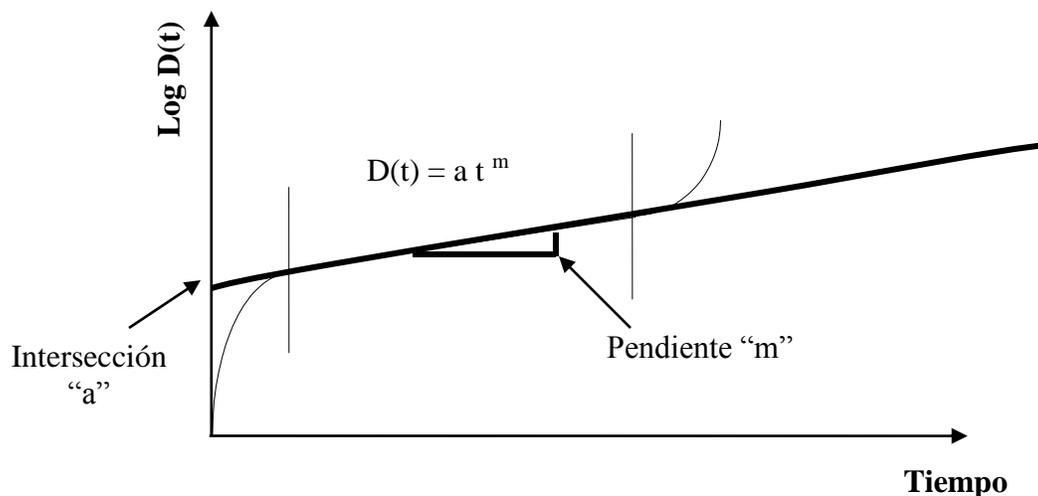


Figura 5. Coeficientes de Regresión No-Lineal “a” y “m” obtenidos en la Zona Secundaria de la Relación del Log (Compliance) y Log (Tiempo de Carga)

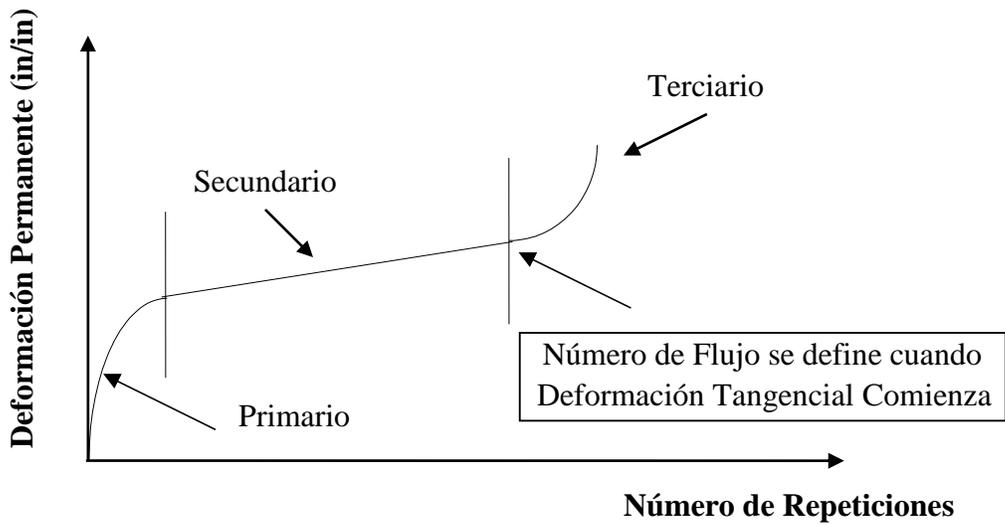


Figura 6. Típico Relación entre la Deformación Plástica Acumulada Total y el Número de Repeticiones

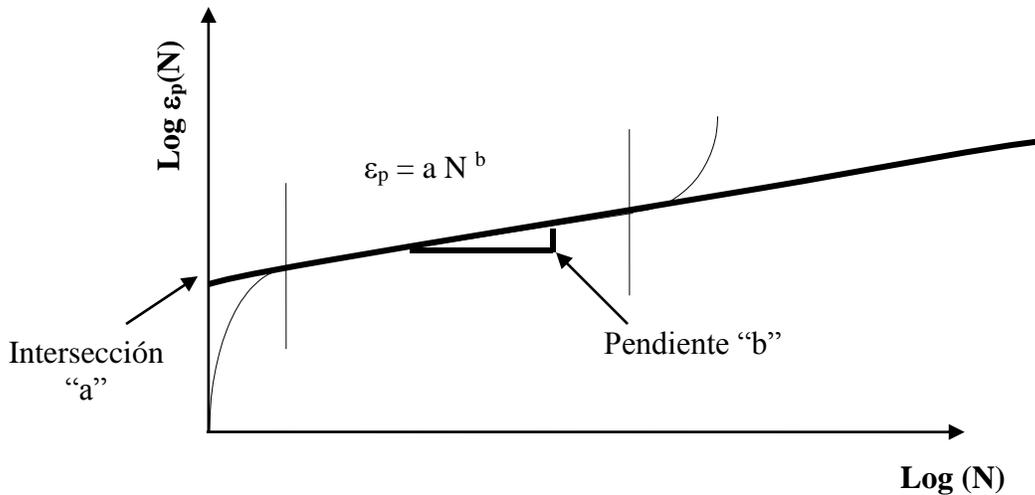


Figura 7. Coeficientes de Regresión No-Lineal "a" y "b" en Escala log-log

PREPARACIÓN DE LAS PROBETAS Y ACONDICIONAMIENTO PARA LOS ENSAYOS CANDIDATAS

En orden de realizar cualquiera de los tres ensayos candidatos, se recomienda seguir las especificaciones UMD 9808: "Método de Preparación de Probetas Triaxiales" (11). En ella se especifica que el espacio de vacíos de las probetas así como otras propiedades volumétricas (el contenido de ligante, la gradación, etc.) deben ser lo más cercano posible a las propiedades medidas en el pavimento después de haber sido colocada y compactada.

Antes de compactar las probetas, estas deben ser envejecidas a una temperatura de 135°F por 4 horas para simular las características de la mezcla después de haber sido colocada y compactada en el campo. Este envejecimiento de corto plazo (Short-term Aging) debe ser llevado a cabo siguiendo las especificaciones de AASHTO PP2: “Práctica Standard para Envejecimiento de Corto y Largo Plazo de Mezclas Asfálticas”.

Luego, las probetas deben compactarse siguiendo la especificación Superpave (2, 4), usando ensayos de consistencia del ligante y la relación de viscosidad-temperatura resultante. Para la compactación debe usarse un Compactador Giratorio, el cual tiene un molde de 150-mm de diámetro y 160-mm de altura, y que simula la compactación llevada a cabo en el campo. Luego se corta la mezcla compactada a unas dimensiones consideradas ideales para realizar los diversos ensayos. Estos valores ideales fueron determinados en un estudio realizado por el equipo de investigación del proyecto NCHRP 9-19 (12). Las dimensiones que resultaron de este estudio fueron un diámetro de 100-mm cortados desde el centro del molde, y 150-mm de altura, que resulta después de cortar 5-mm de la parte superior e inferior del molde.

Una vez que las probetas son cortadas a las dimensiones ideales, se tiene que volver a medir el espacio de vacíos. El límite de aceptación o rechazo de cada probeta está entre +/-0.5% del promedio de espacio de vacíos medidos en el campo.

A continuación se enumeran las condiciones específicas de cada ensayo.

Módulo Dinámico Triaxial (E*)

Este ensayo normalmente se realiza usando una combinación de 4 ó 5 temperaturas y 5 ó 6 frecuencias a distintos niveles de confinamiento, para simular en lo más posible las distintas condiciones experimentadas por las mezclas en el campo. Normalmente, estas se usan entre 2 a 3 réplicas por mezcla asfáltica, dependiendo de la precisión de los resultados deseados, y de la disponibilidad de material y fondos.

Una máquina servo-hidráulica debe ser usada para cargar las probetas y tanto el módulo dinámico como el ángulo de fase deben ser medidos al aplicar la carga compresiva sinusoidal (mitad del seno o *haversine*). El equipo, en general, debe tener la capacidad de proveer temperaturas tan frías como -15°C y tan calientes como 60°C.

Las deformaciones son medidas usando instrumentos electromecánicos llamados Transductores Diferenciales Linealmente Variables (*LVDT, Linear Variable Differential Transducers*). La instrumentación usada es la desarrollada por el equipo de investigación de la ASU (13). Los LVDT's deben ser asegurados en su lugar usando piezas metálicas pegadas a las probetas con epoxy comercial de 5 minutos, distantes entre sí 100-mm y 25-mm de la parte superior e inferior de la probeta. Varas guías son añadidas para que la probeta mantenga su alineación a altas temperaturas. Una probeta lista para ser examinada es mostrada en la Figura 8.

Típicamente, cada probeta se ensaya a 0.1, 0.5, 1, 5, 10 y 25 Hz y a -10, 4.4, 21.1, 37.8, y 54.4 °C (30 resultados de E*). Las temperaturas durante el ensayo deben ser cambiadas de manera ascendente y las frecuencias de manera descendente para causar el mínimo daño a los ensayos subsiguientes. A bajas temperaturas y frecuencias altas, el material se comporta más rígidamente que a altas temperaturas y frecuencias bajas.

La carga sinusoidal debe ser variada con la temperatura de tal manera que el comportamiento de la probeta se mantenga dentro de un rango lineal. La máxima deformación acumulada total no debe sobrepasar las 1500 micro-deformaciones.

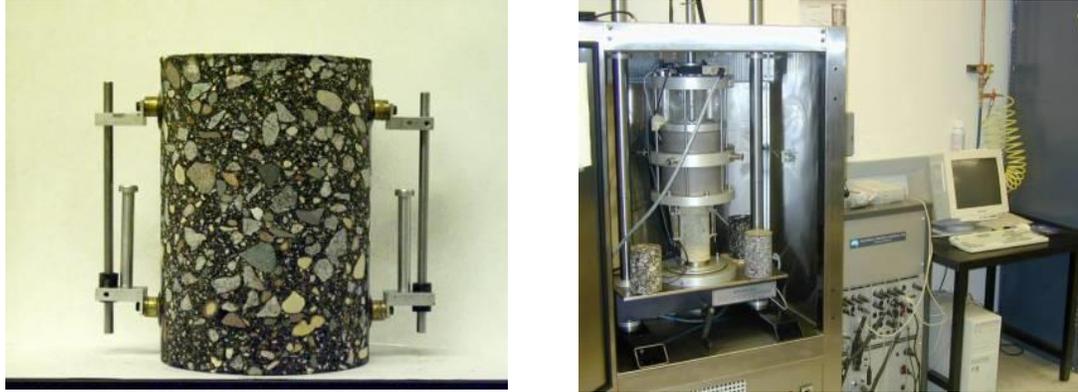


Figura 8. (Izq.) Instrumentación Típica para Ensayo SPT (Der.) Típica Configuración de Ensayos Confinados

La experiencia adquirida por el equipo de investigación de la ASU durante el proyecto NCHRP 9-19 y otros proyectos completados al mismo tiempo ha indicado que si se limitan las deformaciones iniciales durante el ensayo a 25 Hz en cada temperatura a valores alrededor de 20 a 25 micro-deformaciones, entonces el límite máximo de 1500 micro-deformaciones no tiene porque ser superado (14, 15, 16).

Los niveles de confinamiento pueden variar entre 0 y 275 kPa dependiendo del material, los objetivos de la investigación y la capacidad de proveer confinamiento o no. Para estos ensayos se requiere de una celda de confinamiento como se distingue en la Figura 8 y además se recomienda cubrir la probeta con una membrana de látex como refuerzo.

Los datos de E^* obtenidos son analizados y de estos se construye una Curva Maestra (CM) basándose en el Principio de Superposición del Efecto de la Temperatura y el Tiempo sobre E^* . La CM sigue una función sigmoideal, y es construida teniendo como referencia los resultados de E^* a 21.1°C. Los resultados E^* a -10, 4.4, 37.8, y 54.4 °C son entonces desplazados de tal manera que en conjunto forman una curva sigmoideal, que representa la relación entre E^* y el tiempo de carga (Figura 9a y 9b). Paralelamente, se construye una relación entre la temperatura y los factores de desplazamiento usados para construir la CM (Figura 9c). Esta relación representa a su vez la interacción entre E^* y la temperatura. Ambas relaciones son necesarias para la descripción completa de la mezcla asfáltica. Para determinar la curva sigmoideal apropiada y la relación de la temperatura con los factores de desplazamiento, se hace uso de la función MS Excel Solver®, con la cual se realiza una optimización no-lineal de los factores que describen ambas funciones (8, 13, 14). La función sigmoideal que representa a la CM de E^* es la que sigue:

$$\log(E^*) = \delta + \frac{\alpha}{1 + e^{\beta + \gamma(\log t_r)}}$$

donde:

E^* = Módulo Dinámico

t_r = Tiempo de Carga a la Temperatura de Referencia (21.1°C)

δ = Mínimo Valor de E^* .

$\delta + \alpha$ = Máximo Valor de E^* .

β, γ = Parámetros que describe la forma de la función Sigmoideal

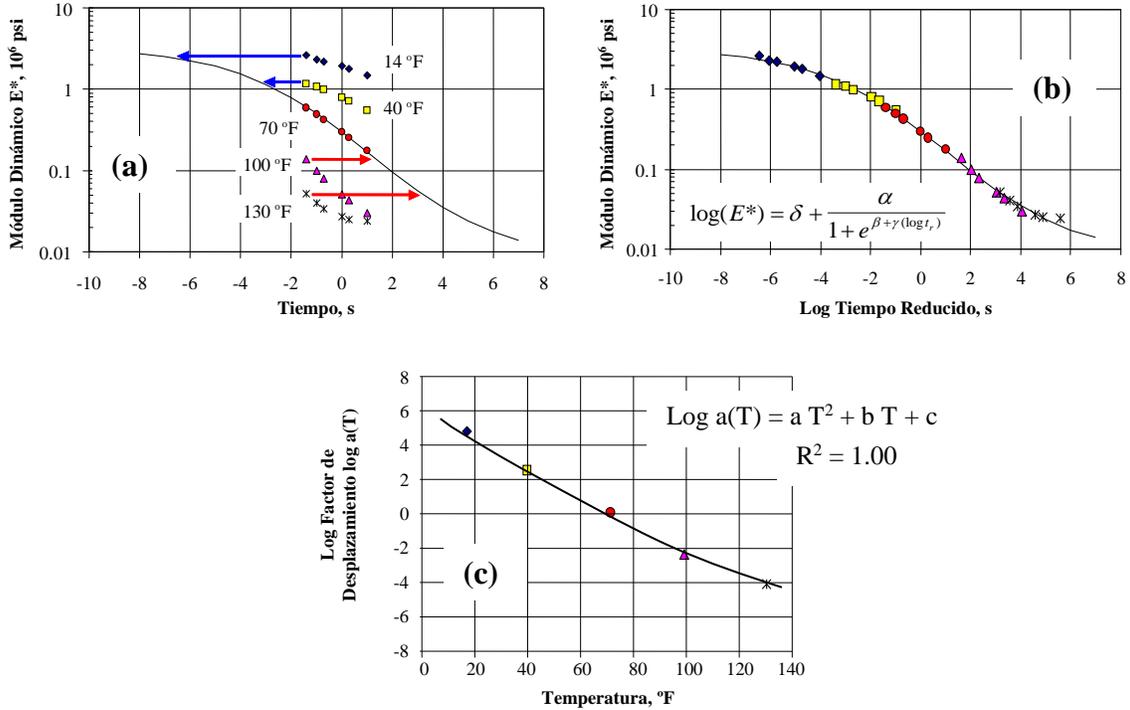


Figura 9. Ejemplo de una Curva Maestra Sigmoidal de E^* y la relación de Factores de Desplazamiento con la Temperatura (a) E^* vs. Tiempo a Temperaturas Variadas (b) Curva Maestra Sigmoidal de E^* (c) Factores de Desplazamiento $a(T)$ vs. Temperatura

Mientras que la siguiente función representa la relación entre la temperatura y los factores de desplazamiento.

$$t_r = \frac{t}{a(T)}$$

o expresado de otra manera

$$\log(t_r) = \log(t) - \log[a(T)]$$

donde:

t_r = tiempo de carga a la temperatura de referencia (21.1°C).

t = tiempo de carga a la temperatura de interés

$a(T)$ = Factor de Desplazamiento en función de la Temperatura

T = Temperatura deseada

Una vez construida esta Curva Maestra, se puede predecir E^* a cualquier combinación de temperatura y frecuencia y esos valores pueden ser usados en la predicción de fallas como el asentamiento permanente y el agrietamiento por fatiga o por efectos térmicos siguiendo modelos mecánicos-empíricos. Es bajo este principio que la 2002-DG consideró a E^* como un factor sumamente relevante y lo incluyó como el parámetro principal para la caracterización de las mezclas asfálticas. Esto, acompañado por el hecho que E^* también es un factor discriminante para el agrietamiento por fatiga, puede inclinar la balanza para que E^* se convierta en la SPT del Superpave en el corto plazo. Como se mencionó antes, el proyecto está en la fase final y las conclusiones estarán muy próximas a ser publicadas.

Ensayos de Tiempo de Flujo y Número de Flujo

Para estos ensayos la preparación de las probetas es exactamente la misma a la de E^* , solo cambia el modo de carga. Las probetas mantienen las mismas dimensiones que para el módulo dinámico E^* y pueden ser realizadas con o sin confinamiento y con cargas uniaxiales de hasta 5,500 lb. (24,900 N).

Las deformaciones son medidas mediante seis LVDT's, dos de los cuales están montados verticalmente y diametralmente opuestos como se observa en la Figura 8 (similar a E^*), y los cuatro restantes son LVDT's radiales colocados en los lados opuestos de dos líneas perpendiculares que se cruzan en el centro de la probeta.

Además se colocan en la parte superior e inferior de la probeta membranas de látex finas lubricadas para evitar la fricción de la superficie lo más posible (lo mismo se realiza para el ensayo de E^*). Las temperaturas usadas son generalmente altas para acelerar el comienzo de la zona terciaria; y para mantener consistencia con E^* , los ensayos se realizan normalmente a 37.8 y 54.4°C con un límite de aceptación de temperatura entre +/- 0.5°C. En la Figura 10, se observa en detalle la probeta lista para el ensayo y la colocación de los LVDT radiales para los ensayos confinados y no confinados.

En proyectos también realizados por el equipo de investigación de ASU con probetas no convencionales (mezclas asfálticas modificadas con caucho proveniente de llantas) se ha confirmado que ambos ensayos tienen una gran potencial para describir el asentamiento permanente de una mezcla dada. Sin embargo, también se observó que existen problemas de replicabilidad de los ensayos; así dos réplicas de la misma mezcla pueden dar valores de F_N y F_T muy distintos (17, 18, 19).

Trabajos de investigación publicados durante el desarrollo del proyecto NCHRP 9-19 también mostraron que existe una correlación entre el Número de Flujo y el Tiempo de Flujo (20, 21). Así, mientras la correlación entre el asentamiento permanente es mejor con los resultados del Ensayo del Tiempo de Flujo, realizar el Ensayo del Número de Flujo resultó ser más rápida. Así que lo que se prevé es recomendar realizar ensayos de Numero de Flujo y luego correlacionarlo con el Tiempo de Flujo que provee mejores predicciones de asentamientos permanentes.

En un intento por encontrar un método para proveer una guía al usuario de cómo usar sus resultados de F_N y/o F_T y relacionarlos con asentamientos permanentes, usando mezclas de siete centros de ensayos en los EE.UU., se encontró que para cada centro las relaciones SPT-Falla eran muy apropiadas. Sin embargo cuando se quiso encontrar una relación universal, la correlación disminuyó considerablemente, inclusive mejor que lo encontrado hasta el momento con E^* (21).

Sin embargo, la poca confiabilidad que aún está presente en la replicabilidad del ensayo y el hecho que aún no se ha encontrado una relación universal para estos ensayos, señala la necesidad para un estudio aún más profundo del ensayo antes de recomendarla como la SPT. Se demostró que el ensayo provee mejores resultados que E^* , y el mismo hecho que mida deformaciones permanentes tiene mayor sentido para correlacionarlo con la falla, y por eso se percibe que en el largo plazo una de los dos ensayos (o uno usando la correlación con el otro) se convierta en el SPT de Superpave.

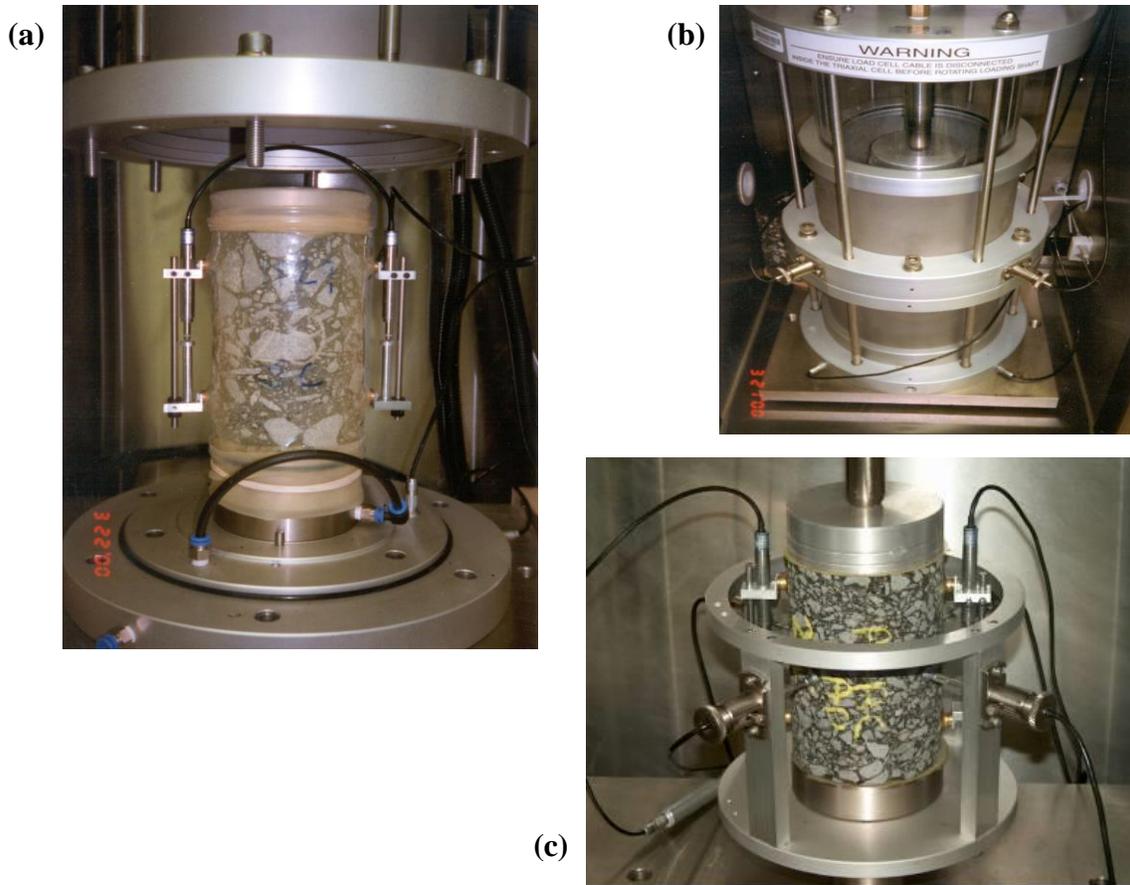


Figura 10. (a) Detalle la probeta lista para Ensayo SPT y Colocación de los LVDT radiales para los Ensayos (b) Confinados y (c) No-Confinados.

POTENCIAL USO DE LA SPT EN EL DISEÑO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS Y EN EL CONTROL DE CALIDAD DE LA CONSTRUCCION

La FHWA de EE.UU. proyecto que la SPT que se encontrara tuviera por lo menos dos usos básicos en beneficio de los usuarios (léase agencias publicas y empresas privadas que usan y usaran el Superpave).

Primero, el ensayo a ser encontrado será usado como “El Ensayo de Comprobación” o el denominado Ensayo Simple de Comportamiento de las mezclas asfálticas que acompañe a la metodología de diseño volumétrico Superpave. Como tal, el usuario tendría la capacidad de indicar las condiciones climatológicas del proyecto, la cantidad de trafico que se prevé reciba la estructura y el límite o criterio de falla del pavimento según a su experiencia o códigos estatales, regional y/o nacionales. Bajo estas condiciones, se podría determinar cual es ese valor de SPT (E^* , F_T , o F_N) que a lo más permita el límite de falla determinado por el usuario.

De esta manera, se puede tomar una probeta de la mezcla asfáltica diseñada con Superpave (como se hace hasta ahora), hacer un ensayo de SPT y evaluar si el valor encontrado a las condiciones especificadas de frecuencia y temperatura es mayor o menor

al especificado como mínimo. Si el valor sobrepasa los límites de SPT, entonces la mezcla se rechaza y se requiere hacer otra mezcla; o de lo contrario se acepta la mezcla y se dispone a construir la estructura. La Figura 11 muestra un esquema de cómo podría ser usada la SPT en la aceptación o rechazo de mezclas Superpave (ejemplo con E*).

El otro uso potencial de la SPT es como una herramienta de control de calidad al momento de la construcción. Así por ejemplo, si se sabe el nivel de falla (por ejemplo asentamiento permanente) deseado y el valor de SPT correspondiente, entonces se pueden tomar mezclas asfálticas del camión distribuidor, compactar las probetas in-situ y ensayarlas con la SPT a distintos niveles de espacios de vacíos, incluyendo el obtenido después de la colocación y la compactación del material. Se comparan los resultados de E* con aquel que determina la deformación máxima deseada por el ingeniero y se pueden aplicar penas o bonos si es que se violaron o cumplieron las especificaciones de diseño, respectivamente. La Figura 12 contiene un esquema de cómo podría usarse la SPT como herramienta de control de calidad.

El hecho que los ensayos toman características fundamentales de las mezclas asfálticas (E*), o parámetros que pueden ser relacionados con estas (F_T y F_N) hacen que su aplicación sea universal y no tenga las limitaciones de haber sido diseñadas con datos de un lugar específico (como los métodos Marshall y Hveem). Con un esfuerzo inicial, tanto E* como el Tiempo y Numero de Flujo podría ser implementados en el Perú, juntamente con la metodología ya conocida de Superpave (clasificación de ligantes y método volumétrico de diseño).

RESUMEN, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Resumen de la Ponencia

Esta ponencia se ha embarcado en proveer una breve reseña histórica del método de diseño de mezclas asfálticas Superpave, desde el momento de su concepción hasta los últimos avances desarrollados bajo el Proyecto NCHRP 9-19 encargado de encontrar el ensayo que acompañe al método y verifique la validez de las mezclas actualmente diseñadas, con el objetivo de impedir fallas prematuras como las observadas en secciones construidas poco después de la difusión del método.

En el Perú, actualmente estamos aun lejos de llegar a implementar esta nueva tecnología. Aún se usan métodos empíricos de mediados del siglo XX y una clasificación de ligantes que cada vez es dejada de lado por países del primer mundo e inclusive por países en vías de desarrollo. Esfuerzos iniciales han sido realizados ya en el Perú, y lo que se desea con esta ponencia es seguir con la difusión del método, incluyendo los últimos detalles y resultados de las investigaciones que se están llevando a cabo para mejorar el método.

Dentro de estos últimos resultados se encuentra el desarrollo de un ensayo que acompañe al método y verifique que las mezclas sean apropiadas y resistentes a las fallas más típicas como lo son los asentamientos permanentes (*rutting*) y el agrietamiento por fatiga (*fatigue cracking*). En la ponencia, se explica un poco de la historia detrás de la investigación, lo que los usuarios en EEUU esperan del nuevo ensayo, y la teoría detrás de las tres candidatas finales a convertirse en el Ensayo Simple de Comportamiento (*Simple Performance Test, SPT*).

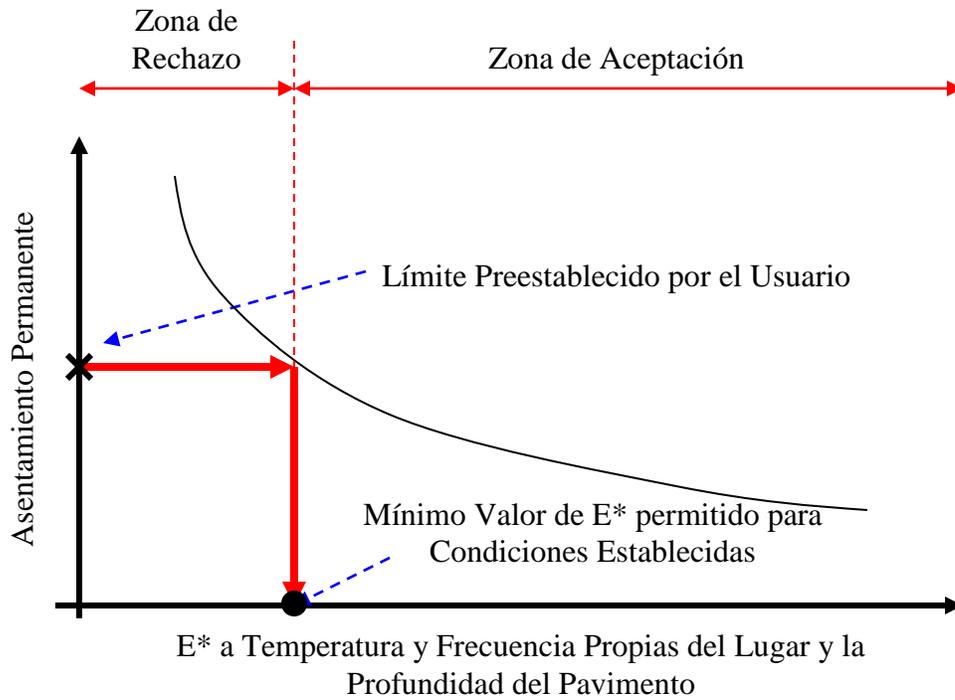


Figura 11. Esquema de Uso de la SPT en la Aceptación o Rechazo de una Mezcla Asfáltica diseñada con Método Superpave

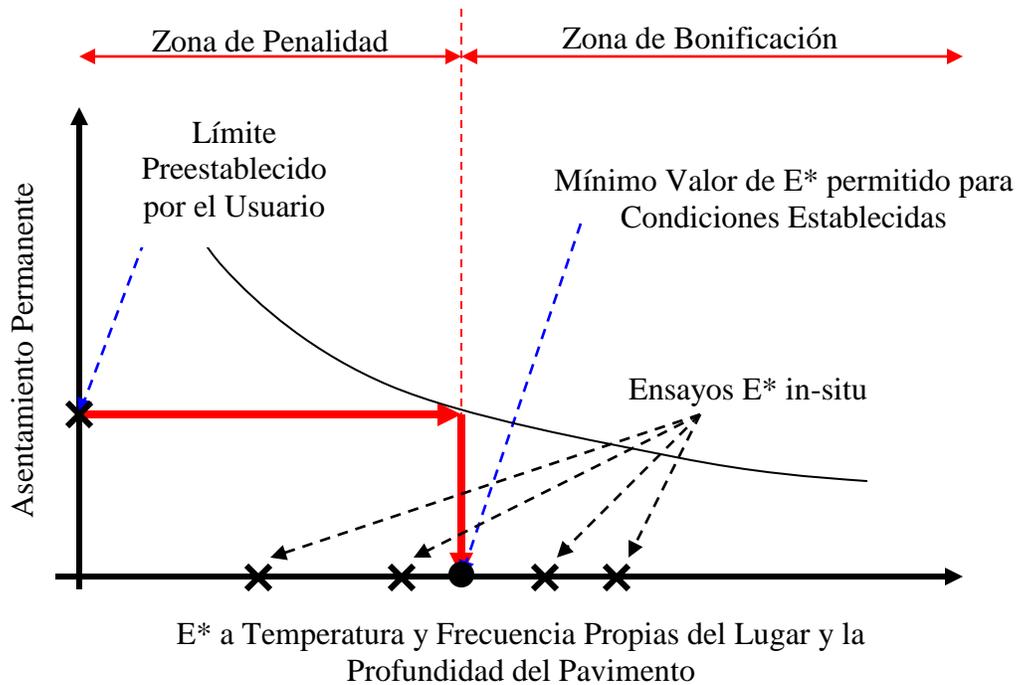


Figura 12. Esquema de Uso de la SPT como Herramienta de Control de Calidad de la Construcción de Pavimentos

Los ensayos son el Modulo Dinámico E*, el Ecurrimiento Plástico Estático Triaxial (también llamado Tiempo de Flujo, F_T) y el Asentamiento Permanente por Cargas Repetitivas Triaxiales (o Número de Flujo, F_N). Se explico una breve teoría de los ensayos, así como también como las probetas deben ser preparadas y acondicionadas para realizar los ensayos. Se dio una explicación breve de los equipos, instrumentación y procedimientos a seguir.

Finalmente, se mostró como es que esta SPT sería usada en el diseño de pavimentos. La FHWA proyecto que esta SPT no solo serviría para determinar si una mezcla es aceptable o no después de haber sido diseñada con Superpave, sino que también podría ser usada como una herramienta de control de calidad que sirva para brindar bonos o multas a las empresas encargadas del proyecto si es que cumplieron o violaron las especificaciones del proyecto, respectivamente.

Conclusiones

De reportes y estudios de investigación publicados durante el desarrollo del Proyecto NCHRP 9-19, se ha observado que de los tres ensayos candidatos a ser SPT, es el ensayo de E* el que tiene la mayor probabilidad a convertirse en el corto plazo en la SPT. Esto se prevee por la correlación existente entre E* y el asentamiento permanente y el agrietamiento por fatiga, y además porque E* está ya implementada en la Nueva Guía de Diseño de Pavimentos Nuevos y Rehabilitados del 2002 desarrollada bajo el Proyecto NCHRP 1-37A. Al tener a E* como la SPT, se podrían unir las metodologías de diseño de mezclas asfálticas y de estructuras de pavimentos, algo que en la actualidad se realiza completamente por separados. Unir ambos conceptos es vital para la larga vida de las carreteras ya que una estructura depende de la buena calidad de la mezcla, y el comportamiento de la mezcla depende de las características estructurales del pavimento. Así la FHWA ya se ha embarcado en un proyecto que une ambos conceptos bajo el título del proyecto NCHRP 9-33: Un Manual de Diseño para Mezclas Asfálticas (*A Mix Design Manual for Hot Mix Asphalt*), que une los resultados de los proyectos NCHRP 9-19 y NCHRP 1-37A.

En el largo plazo, sin embargo se calcula que sean los ensayos del Número de Flujo y/o Tiempo de Flujo los que se conviertan en la SPT de la Superpave, debido a que las correlaciones son mayores que las provistas por E*. Sin embargo, actualmente estos ensayos tienen problemas de replicabilidad y además no ha sido posible encontrar una relación universal entre F_T/F_N y el asentamiento permanente. Es probable que se requieran investigaciones más profundas antes de implementar estos ensayos como SPT.

Recomendaciones

La implementación del método Superpave debe empezarse lo antes posible en el Perú, para poder diseñar las carreteras y vías de comunicación del país en una manera confiable, segura y saludable económicamente hablando. El uso del método empírico de Marshall pone en riesgo cualquier proyecto o construcción debido al alto grado de incertidumbre que se tiene por las numerosas extrapolaciones que hacen al método.

En el Perú, los pasos a seguir para una apropiada implementación del método son los siguientes:

- Implementación del Nuevo Sistema de Clasificación de Ligantes (Performance-Grade PG) en reemplazo de la clasificación por Penetración y Viscosidad.
- Adquisición de los equipos y máquinas necesarias para realizar los ensayos necesarios. Por ejemplo se necesitan Compactadores Giratorios Superpave, Cortadoras, Hornos de Envejecimiento de Corto y Largo Plazo, Equipo de Ensayo de Ligantes, Maquinas de Ensayos Universales Triaxiales, entre otras.
- Capacitación de Profesionales en la teoría y la práctica de los ensayos elaboradas para Superpave (las originales y las nuevas).

Estos avances deben ir de la mano con la implementación de la Nueva Guía de Diseño del 2002 (2002-DG) desarrollado en el proyecto NCHRP 1-37A. Esto es aun más imperativo si es que E*, como se prevee, se convierta en la SPT. Sin la capacidad de ensayar la rigidez E* en probetas de mezclas asfálticas, estaríamos limitándonos en el diseño de mezclas asfálticas al igual que en el diseño de pavimentos nuevos y rehabilitados.

REFERENCIAS

1. National Highway Institute, U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration, *Reference Manual. Volume 1 – HMA Pavement Evaluation and Rehabilitation*. Applied Pavement Technology, Inc, Champaign, IL, 2001
2. Kennedy, T.W., Huber G.A., Harrigan, E.T., Cominsky, R.J., Hughes, C.S., Von quintus, H., y Moulthrop J.S. *Superior Performing Asphalt Pavements (Superpave): The Product of the SHRP Asphalt Research Program*. Report No. SHRP-A-410. Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C., 1994.
3. Witczak, M. W., Kaloush, K. E., Pellinen, T., El-Basyouny, M., & Von Quintus, H. *Simple Performance Test for Superpave Mix Design*. NCHRP Report 465. Transportation Research Board. National Research Council. Washington D.C., 2002.
4. Minaya S. y Ordóñez A., *Superpave y SMA: Nuevas Tecnologías para Solucionar los Problemas del país*. Libro de Ponencias del Primer Congreso Internacional de la Construcción y Gerencia. Lima, Perú, 2002
5. *Preliminary Recommendations for the Simple Performance Test*. Interim Task C Report, FHWA Contract DTFH61-95-C-00100. University of Maryland, College Park, MD, 1998.
6. <http://mnroad.dot.state.mn.us/research/Mnresearch.asp>. Minnesota Road Research Section website. Minnesota Department of Transportation.
7. www.westrack.com. The WesTrack Project website. Nevada Automotive Test Center.
8. http://www.tfhr.gov/****/about/ptf.htm. Turner-Fairbanks Highway Research Center website.
9. National Cooperative Highway Research Program. *2002 Design Guide. Design of New and Rehabilitated Pavement Structures*. Draft Final Document. Part 2. Design Inputs. 2003.
10. Hafez, I. *Development of a Simplified Asphalt mix Stability Procedure for Use in Superpave Volumetric Mix Design*. Ph.D. Dissertation, Civil Engineering Department, University of Maryland, College Park, MD, 1997.

11. *Method for Preparation of Triaxial Specimens (Test Protocol UMD 9808)*. Superpave Models Team Inter-Laboratory Testing Manual. University of Maryland, College Park, MD, 1998.
12. Witczak, M.W., R. Bonaquist, H. von Quintus, and K. Kaloush. *Specimen Geometry and Aggregate Size Lab Test Study*. NCHRP Project 9-19, Task C. Team Report SLS-3, Arizona State University, Tempe, AZ, 1999.
13. Kaloush, K.E., Mirza, M.W., Uzan, J. and Witczak, M.W., Specimen Instrumentation Techniques for Permanent Deformation Testing of Asphalt Mixtures. Journal of Testing and Evaluation, ASTM, West Conshohocken, PA, September, 2001.
14. Pellinen, T.K., *Investigation of the Use of Dynamic Modulus As An Indicator of Hot-Mix Asphalt Performance*. Ph.D Dissertation, Department of Civil and Environmental Engineering, Arizona Sate University, Tempe, AZ, 2001.
15. Sotil, A., *Material Characterization of Asphalt Rubber Mixtures using the Dynamic Modulus Test*. Master's Thesis, Department of Civil and Environmental Engineering, Arizona Sate University, Tempe, AZ, 2003.
16. Sotil A., Carlson D.D., Way G.B., Kaloush K.E., Quispe S.E., y Sotil A. *Evaluación del Caucho Asfalto usando la Prueba del Módulo Dinámico, E**. Libro de Ponencias del Primer Congreso Internacional de la Construcción y Gerencia. Lima, Perú, 2002
17. Kaloush, K.E., Zborowski, A.J., Sotil, A., Abojaradeh, M., y Way G.B., *Material Characteristics of Asphalt Rubber Mixtures*. Proceedings Asphalt Rubber 2003 Conference, ISBN 85-903997-1-0, p129-145, Brasilia, Brazil, December 2003.
18. Kaloush, K.E., Zborowski, A.J., y Sotil, A., *Performance Evaluation of Asphalt Rubber Mixtures in Alberta*. Final Project Report, Department of Civil and Environmental Engineering, Arizona Sate University, Tempe, AZ, 2003
19. Kaloush, K.E., Zborowski, A.J., Sotil, A., Abojaradeh, M., y Way G.B., *Performance Evaluation of Arizona Asphalt Rubber Mixtures using Advanced Dynamic Material Characterization Tests*. Final Project Report, Department of Civil and Environmental Engineering, Arizona Sate University, Tempe, AZ, 2002.
20. Sullivan, B.W., *Development of Flow Number and Flow Time Candidate Simple Performance Test for Asphalt Mixtures*. Master's Thesis, Department of Civil and Environmental Engineering, Arizona Sate University, Tempe, AZ, 2002.
21. Quayum, M.M., *Investigations for Using the Repeated Load Permanent Deformation Test in a Design Criteria for Asphalt Mixtures*. Master's Thesis, Department of Civil and Environmental Engineering, Arizona Sate University, Tempe, AZ, 2004