

COMPARACIONES DE LAS PROPIEDADES DEL CONCRETO
ASFALTICO MEDIDAS A TRAVES DE LAS PRUEBAS MARSHALL,
HVEEM, TENSION INDIRECTA, Y PROPAGACION DE ONDAS

Rafael F. Pezo y Jesús Nieto

Center for Geotechnical and Highway Materials Research
The University of Texas at El Paso, El Paso, Texas 79968

RESUMEN

Este artículo describe una investigación experimental conducida en el *Center for Geotechnical and Highway Materials Research* con el propósito de comparar varias propiedades del concreto asfáltico. En los Estados Unidos, la prueba de estabilidad de Marshall es muy utilizada. Sin embargo, varios estados como Texas, California, Nevada, Washington, y otros más prefieren utilizar la prueba de estabilidad de Hveem. Esto refleja la no-existencia de un conceso. En los países latinoamericanos, la prueba de Marshall es todavía muy popular, y aunque se espera que la prueba de Hveem sea considerada como una prueba alternativa a la de Marshall, otras pruebas como la de la tensión indirecta y la de propagación de ondas son introducidas también como pruebas de respaldo.

ANTECEDENTES

La caracterización del concreto asfáltico se la hace a través de mediciones e interpretaciones de sus respuestas correspondientes a distintas cargas, deformaciones, y/o acciones del medio ambiente. Actualmente, las pruebas que se usan son empíricas, aunque investigaciones recientes tienden a recomendar el uso de pruebas que permitan la obtención y estimación de las propiedades mecánicas fundamentales.

Pruebas empíricas como las pruebas de estabilidad de Marshall y de Hveem son muy usadas; sin embargo, cuando las condiciones de campo están fuera de las condiciones para las cuales estas pruebas fueron desarrolladas, sus resultados y la interpretación de éstos son altamente cuestionables.

El rendimiento del concreto asfáltico es dependiente de las propiedades de la mezcla, y no tanto de las propiedades individuales de sus componentes (asfalto o agregado). Desafortunadamente, en la actualidad las pruebas de las mezclas no garantizan el rendimiento del material. En un intento por remediar esta situación, el gobierno estadounidense patrocina en la actualidad dos proyectos de investigación de considerable envergadura:

1. "NCHRP PROJECT 9-6" que tiene como objetivo el desarrollo de un sistema analítico de la mezcla asfalto-agregado (AAMAS).
2. "Strategic Highway Research Program, SHRP" que tiene como objetivo el desarrollo de especificaciones para el asfalto basadas en su rendimiento, un más extensivo estudio de AAMAS, y el mejoramiento del proceso de diseño y análisis estructural de los pavimentos flexibles.

Sin embargo, pasará mucho tiempo hasta que las recomendaciones de AAMAS y SHRP sean aprobadas y puestas en vigencias por las agencias de vialidad y caminos. Y por lo tanto, esto significa que hemos de seguir dependiendo por un buen largo tiempo de las pruebas ya establecidas.

OBJETIVO

Esta investigación fue conducida con el propósito de comparar las propiedades mecánicas del concreto asfáltico medidas a través de cuatro diferentes pruebas de laboratorio. Estas son: (1) la prueba de estabilidad de Marshall, (2) la prueba de estabilidad de Hveem, (3) la prueba de tensión indirecta, y (4) la prueba de propagación de ondas. Se incluye a continuación, una muy breve descripción de estas pruebas.

LA PRUEBA DE ESTABILIDAD DE MARSHALL

Esta prueba que fue desarrollada por el *Corps of Engineers* en los cuarenta tiene como propósito medir la resistencia del concreto asfáltico compactado en laboratorio bajo una pre-determinada energía de compactación. Su procedimiento envuelve la aplicación de una carga de compresión a una muestra cilíndrica de 10.16 cm de diámetro por 6.35 cm de alto a través de una cama semi-circular a una razón de 5 cm/min. La temperatura de la muestra debe ser 60 grados Celsius para que esta prueba se lleve a cabo. (Vea figura 1)

La estabilidad Marshall es la máxima carga que la muestra resiste antes de fallar, y está asociado con el valor de flujo que es la deformación total vertical de la muestra (en 0.25 mm) correspondiente a la carga máxima.

Una propiedad que se usa es el índice de rigidez Marshall, que es definido como el cociente de la estabilidad Marshall y el valor de flujo. Este valor, aunque empírico, permite la estimación de la calidad de las mezclas. Pero aunque un valor alto de este índice implica que el material es rígido, y por ende, más resistente a la deformación, su relación con el rendimiento del material no ha sido definida.

Por más detalles de esta prueba, el lector puede referirse al método de prueba "Resistencia al Flujo Plástico de Mezclas Bituminosas Usando el Aparato de Marshall, AASHTO T 245-82. (AASHTO Materials Part II, 1986).

LA PRUEBA DE ESTABILIDAD DE HVEEM

Esta prueba fue desarrollada por CALTRANS. Esta es empírica, en el cual se mide la fricción interna del concreto asfáltico. Como se reconoce que la resistencia o estabilidad de la mezcla incluye tanto la cohesión como la fricción interna, el cohesiometro es muchas veces utilizado.

La prueba de Hveem consiste en la aplicación de una carga vertical a una muestra con las mismas dimensiones y temperaturas usadas en la prueba de Marshall. Los valores de estabilidad pueden variar entre los 0 y 100 (e.g., la estabilidad del agua es 0, y la del acero es 100). Una membrana de caucho provee de una presión de confinamiento que suple la cohesión que fuera proveída por el asfalto. Por ello es que este aparato es relativamente insensible a las características del asfalto, pero sí indicativo de las características del agregado. (Vea figura 2)

El valor de estabilidad (S) se lo determina así:

$$S = \frac{22.2}{\frac{P_h D_2}{(P_v - P_h)} + 0.222} \quad (1)$$

donde, (P_v) es la presión vertical, (P_h) es la presión horizontal inducida, y (D_2) es el desplazamiento de la muestra. Por más detalles de esta prueba, el lector puede referirse al método de prueba "Resistencia al Flujo Plástico de Mezclas Bituminosas Usando el Aparato de Hveem, AASHTO T 246-82. (AASHTO Materials Part II, 1986). En la actualidad, uno de cuatro estados de la unión americana utiliza este método de pruebas.

LA PRUEBA DE TENSION INDIRECTA

Esta prueba consiste en la aplicación de una carga de compresión a una muestra cilíndrica en una posición paralela y a lo largo de un plano diametral vertical. Esta configuración permite que exista una relativa distribución uniforme de esfuerzos de tensión perpendiculares a la dirección de aplicación y a lo largo del plano diametral vertical, que causa últimamente la falla de la muestra y su división a lo largo de este plano. (Vea figura 3)

Una faja de 1.27 cm de ancho es usada en pruebas con muestras de 10.16 cm de ancho. La ecuación que se usa para determinar el esfuerzo máximo de tensión se basa en la suposición de que la mezcla es homogénea, isotrópica y elástica. La resistencia máxima horizontal de tensión (σ_x) al centro de la muestra se determina de la siguiente manera:

$$\sigma_x = 2 P_m / \pi d h \quad (2)$$

donde (P_m) es la carga máxima aplicada a la muestra, y (d) y (h) son el diámetro y el espesor de la muestra, respectivamente.

Por más detalles de esta prueba, el lector puede referirse al método de prueba "Resistencia de la Tensión Indirecta de Muestras Cilíndricas de Concreto, ASTM D 4123 (1992 Annual Book of ASTM Standards).

LA PRUEBA DE PROPAGACION DE ONDAS

Aunque esta prueba todavía no está reconocida por la AASHTO, la aplicación del principio de propagación de ondas se considera muy útil por dos razones poderosas. La primera es que esta prueba no es una prueba destructiva, y la segunda es que esta prueba permite la determinación del módulo de elasticidad de la muestra (obviamente, bajo las hipótesis de la teoría de elasticidad).

Existe una gran variedad de maneras de aplicar estos conceptos. Como sea, el método utilizado en esta investigación es el de tiempo de recorrido de las ondas longitudinales que son generadas a través de un aparato denominado "V-meter". Este tiene dos sensores, uno que manda la señal a cierta frecuencia (25 MHz), mientras que el otro recibe la señal transmitida. (Vea figura 1.d)

Como esta prueba no es destructiva, ésta se puede utilizar con todas las muestras antes de que se realice cualquiera de las pruebas destructivas. El V-meter arroja el tiempo de recorrido de la onda a través del material, y con la siguiente fórmula se determina el módulo de elasticidad (E):

$$E = (h/t)^2 \gamma / g \quad (3)$$

donde h es el espesor de la muestra, t es el tiempo de recorrido de la onda longitudinal, γ es la densidad de la muestra, y g es la aceleración de la gravedad.

PROGRAMA EXPERIMENTAL

Con el fin de demarcar claramente esta investigación, se decidió usar un solo tipo de asfalto (Chevron AC-20), y un solo tipo de agregado, que según su granulometría es clasificado como tipo "D". También se decidió fijar una temperatura (60 grados Celsius) de las muestras al momento de ser probadas.

Los siguientes factores a investigar se establecieron: (1) contenido de asfalto, (2) edad, (3) volumen de vacíos, y (4) las propiedades de las muestras medidas a través de las mencionadas pruebas de laboratorio.

Específicamente, se prepararon muestras de 4%, 5% y 6% de contenido de asfalto en relación al peso total de la muestra. Además, todas las muestras se habrían de preparar de una misma forma. Para ello, se decidió utilizar el equipo Marshall con el fin de garantizar que todas las muestras fueran preparadas bajo una misma energía de compactación (35 golpes de lado y lado). En todos los casos, tres muestras "cuasi-idénticas" fueron probadas al mismo tiempo con el fin de minimizar los errores asociados a las mediciones.

Además las muestras serían probadas cuando éstas tengan una misma edad con el fin de evitar la inclusión de errores en nuestras comparaciones debido al efecto de tixotropía y otros más relacionados al tiempo de las muestras. Las pruebas se ejecutaron principalmente a los 8 y 28 días de edad de las muestras (experimento #1). En el caso de las pruebas de propagación de ondas, como éstas no son destructivas, más mediciones se realizaron (experimento #2).

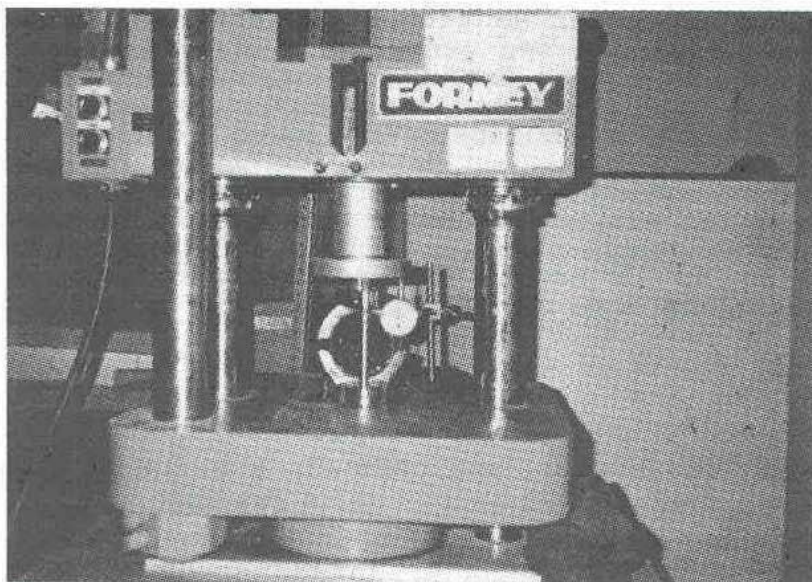


Figura 1. La Prueba de Estabilidad de Marshall en Proceso

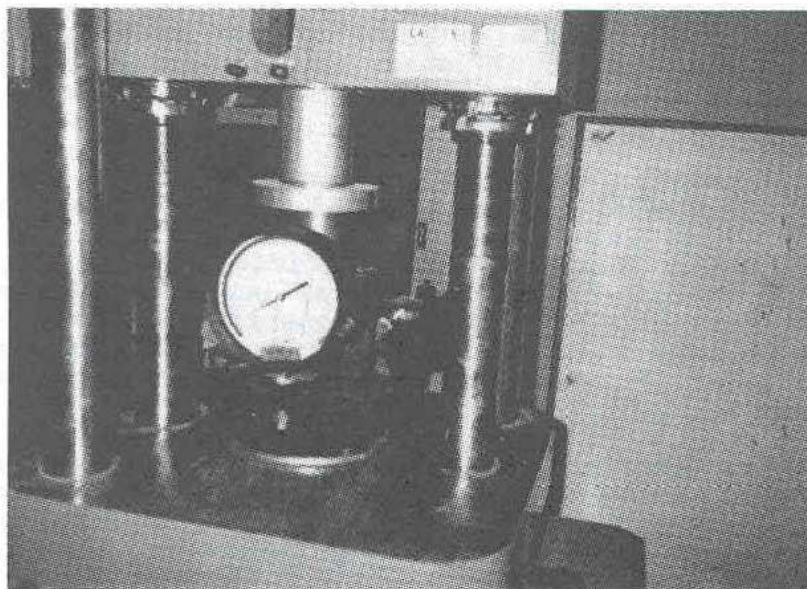


Figura 2. La Prueba de Estabilidad de Hveem en Proceso

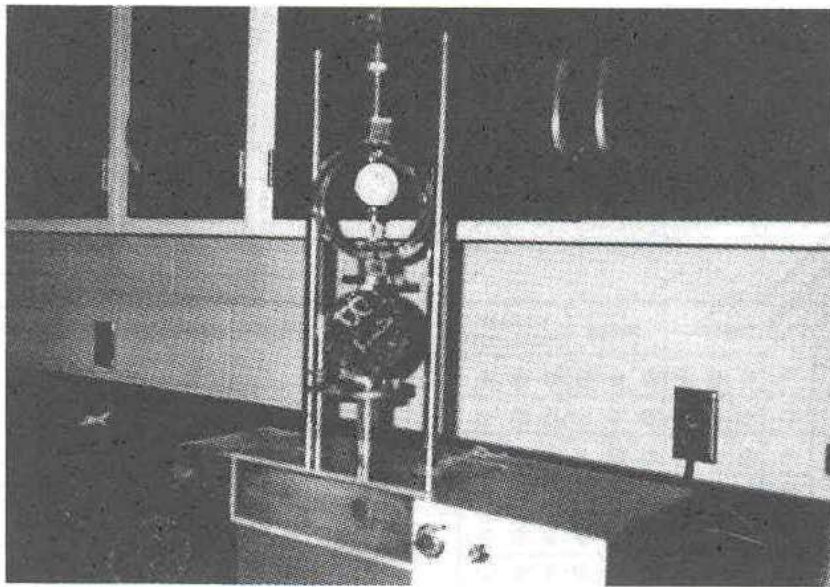


Figura 3. La Prueba de Tensión Indirecta en Proceso



Figura 4. El Equipo Utilizado en la Prueba de Propagación de Ondas

En todo momento, el mismo operador estuvo involucrado en el proceso de preparación y ejecución de todas las pruebas. De este modo, variaciones asociadas al operador fueron en lo posible eliminadas. A continuación se muestran el diseño de los experimentos #1 y #2.

EXPERIMENTO 81

[illegible]

EXPERIMENTO 02

		PROPAGACION DE ONDAS		
		4%	5%	6%
PRUEBA DE LABORATORIO	3	● ● ● ●	● ● ● ●	● ● ● ●
CONTENIDO DE ASFALTO	6	● ● ● ●	● ● ● ●	● ● ● ●
EDAD DE LA MUESTRA	9	● ● ● ●	● ● ● ●	● ● ● ●
	12	● ● ● ●	● ● ● ●	● ● ● ●
	28	● ● ● ●	● ● ● ●	● ● ● ●

RESULTADOS DEL EXPERIMENTO #1

Los resultados de las pruebas de estabilidad de Marshall, Hveem y Tensión Indirecta se presentan a continuación. Vale recalcar que todos los resultados que aquí se presentan son los promedios de 3 muestras de características iguales (e.g., densidad, contenido de asfalto y edad) que fueron tratadas y probadas bajo las mismas condiciones.

Las figuras 5.a y 5.b muestran los resultados obtenidos de las pruebas de estabilidad de Marshall a los 8 y 28 días de edad de las muestras. Aquí se muestran los diagramas entre la carga diametral y la deformación diametral correspondientes a las muestras de 4%, 5% y 6% de contenido de asfalto.

Las figuras 6.a y 6.b muestran los resultados obtenidos a través de las pruebas de estabilidad de Hveem a los 8 y 28 días de edad de las muestras. Aquí, las variaciones del valor de estabilidad de Hveem respecto al esfuerzo axial correspondientes a las muestras de 4%, 5% y 6% de contenido de asfalto son presentadas.

Una síntesis de los resultados obtenidos en el experimento #1 es presentada en la Tabla 1. Aquí se incluyen el contenido de asfalto, edad, y volumen de vacíos de las muestras. La densidad de las muestras no varió mucho (2.1-2.2 gr/cm³) y por ello es que esta propiedad no se la incluye en la Tabla 1.

Adicionalmente, los resultados promedio obtenidos y corregidos por la estabilidad de Marshall, valor de flujo, índice de rigidez, estabilidad Hveem y la resistencia a la tensión indirecta de las muestras también se incluyen en esta Tabla 1.

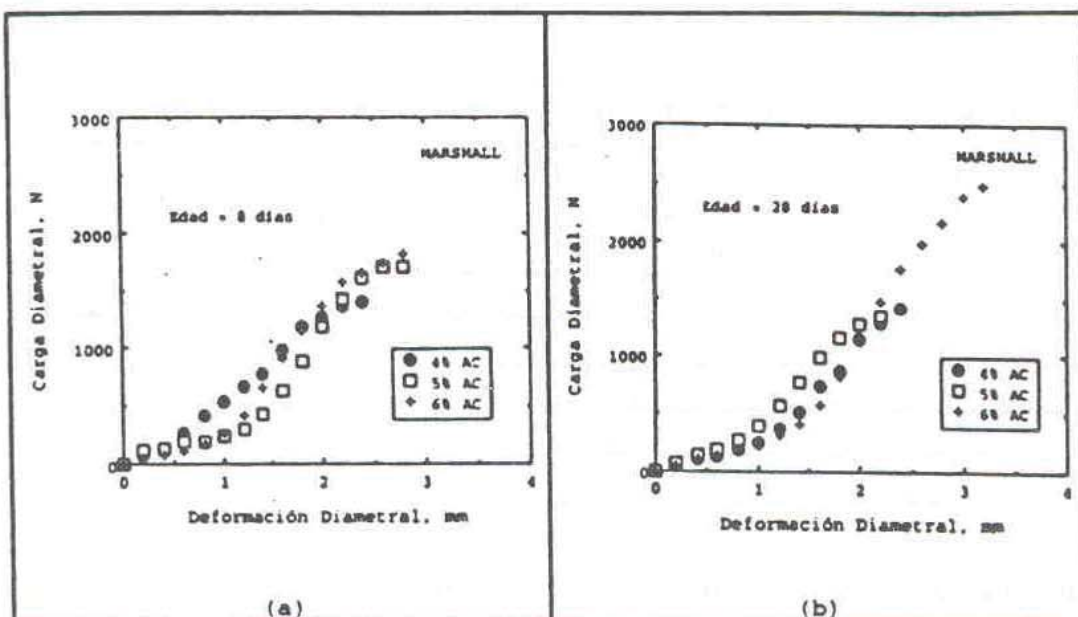


Figura 5. Resultados de la Prueba de Estabilidad de Marshall de las muestras de 4%, 5% y 6% de contenido de asfalto. Se muestra en (a) los resultados de las muestras de 8 días de edad; y en (b) de 28 días de edad.

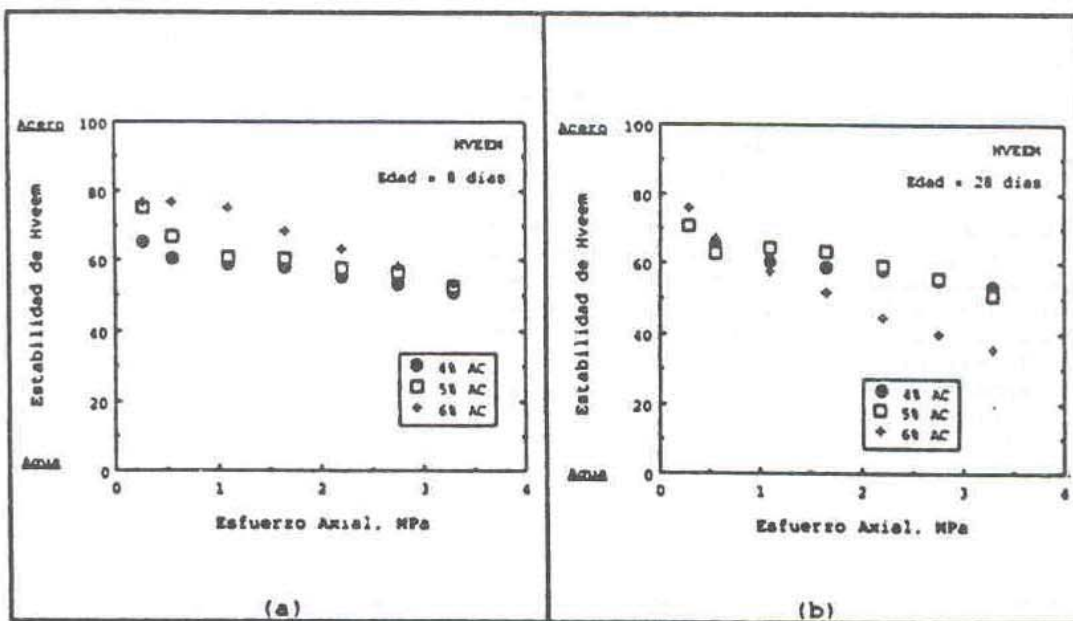


Figura 6. Resultados de la Prueba de Estabilidad de Hveem de las muestras de 4%, 5% y 6% de contenido de asfalto. Se muestra en (a) los resultados de las muestras de 8 días de edad; y en (b) de 28 días de edad.

TABLA 1. SINTESIS DE LOS RESULTADOS DEL EXPERIMENTO #1

Contenido de Asfalto (%)	Edad (días)	Volumen de Vacíos (%)	Estabilidad Marshall Corregida (N)	Valor de Flujo	Indice de Rigidez	Estabilidad Hveem Corregida (2.76 MPa)	Máxima Tensión Indirecta (KPa)
4	8	13	1.470	10	147	48.6	12.8
4	28	13	1.540	11	140	53.5	13.0
5	8	10	1.800	10	180	56.4	14.5
5	28	10	1.450	9	161	55.9	20.0
6	8	10	2.130	11	194	58.6	28.2
6	28	10	2.310	13	178	40.0	23.6

DISCUSION SOBRE LOS RESULTADOS DEL EXPERIMENTO #1

Vale recalcar que las propiedades de resistencia (e.g., estabilidad Marshall, estabilidad de Hveem, y tensión indirecta) se muestran un tanto bajas, comparándolas con los valores usuales en diseño. La razón de ésto recae en la compactación de las muestras, como se puede notar claramente en los valores de volúmenes de vacío. No obstante, la utilidad de estos resultados se manifiesta fuerte, ya que el propósito de esta investigación no fue la de diseñar una mezcla de concreto asfáltico con los materiales utilizados, sino más bien, como el título de este artículo indica, el de comparar sus propiedades medidas a través de distintas pruebas de laboratorio. Y por ello, mucha atención se le dió a la homogeneidad en la preparación de las muestras y en la ejecución de las pruebas de laboratorio.

Desde el punto de vista aplicativo de estas pruebas, la siguiente figura 7 fue desarrollada. Si se desearía determinar un óptimo contenido de asfalto, dado el tipo de asfalto y agregado usados, las gráficas que incluye la figura 7 son usadas. Esto es, la variación del volumen de vacíos, la estabilidad de Marshall, el valor de flujo, el índice de rigidez, la estabilidad de Hveem y la resistencia a la tensión indirecta respecto al contenido de asfalto de las muestras. Sin embargo, se requeriría preparar muchas muestras más con un contenido de asfalto de 6.5% y 7%; para posteriormente probarlas y así definir con mejor claridad el diseño óptimo.

De todas maneras, con los datos disponibles se puede observar que el contenido de asfalto de 6% arroja las mejores propiedades mecánicas. Razones: menor volumen de vacíos, mayor estabilidad de Marshall, aceptable valor de flujo, mayor índice de rigidez y mayor resistencia a la tensión indirecta (aun cuando no se comprenda la razón por la cual se registró una baja estabilidad de Hveem a los 28 días).

Posteriormente, se decidió realizar un análisis estadístico de correlaciones para poder determinar y/o verificar la existencia o no de correlaciones entre estas propiedades. Para ello, se utilizó el programa SAS "Statistical Analysis Software."

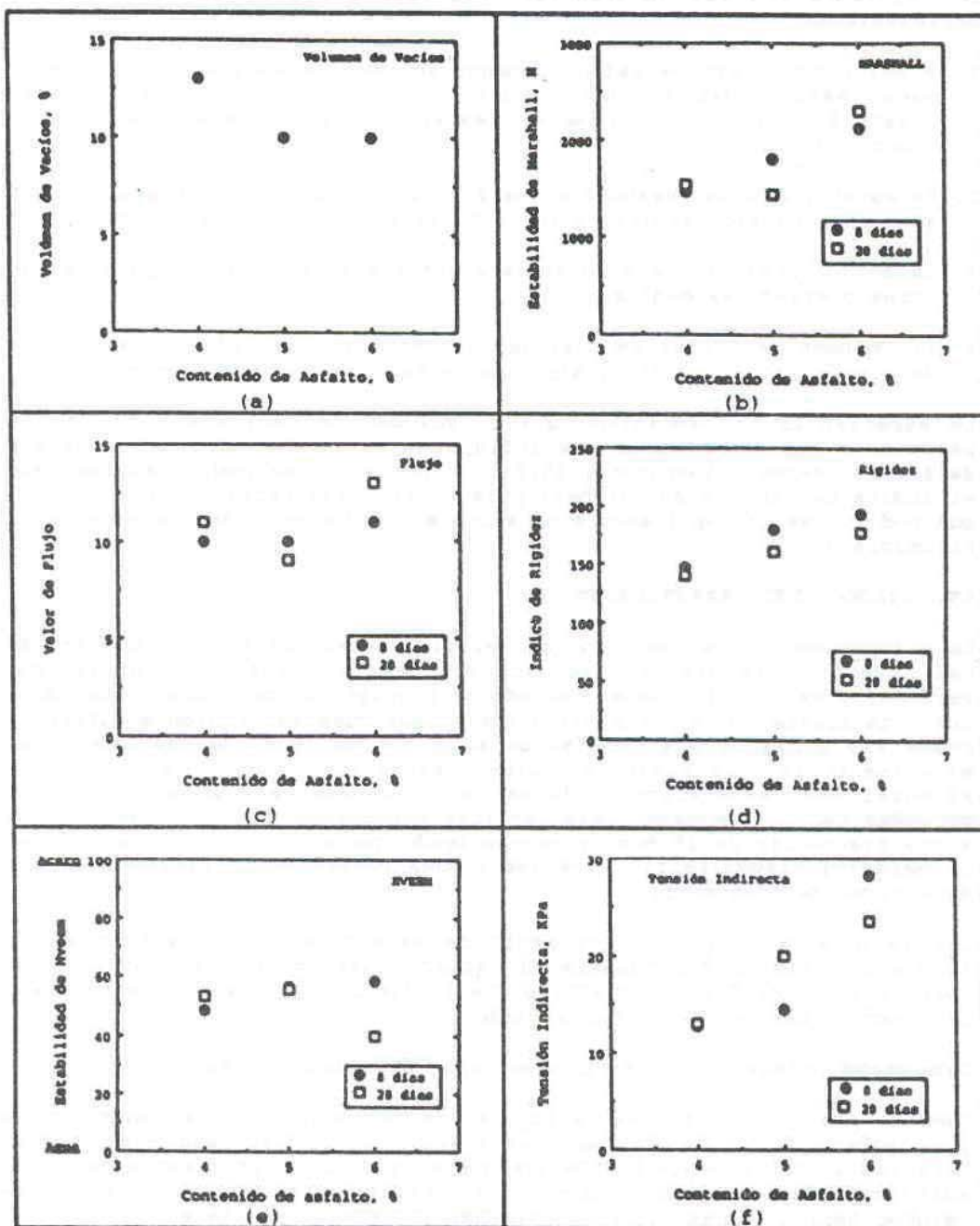


Figura 7. Influencia del Contenido de Asfalto sobre Varias Propiedades del Concreto Asfáltico Estudiado. Las Propiedades mostradas son: (a) volumen de vacíos, (b) estabilidad de Marshall, (c) valor de flujo, (d) índice de rigidez, (e) estabilidad de Hveem, y (f) resistencia a la tensión indirecta.

Lo siguiente son las inferencias obtenidas a través del análisis de correlaciones:

1. A mayor contenido de asfalto, menor volumen de vacíos (corr -0.86), mayor estabilidad Marshall (corr 0.87), mayor índice de rigidez Marshall (corr 0.90), y mayor resistencia a la tensión indirecta (corr 0.91).
2. La estabilidad de Marshall no está relacionada a la de Hveem, aunque algo a la tensión indirecta (corr 0.74) y al flujo (corr 0.80).
3. La estabilidad de Hveem no aparece correlacionada con ninguna de las otras propiedades medidas.
4. El volumen de vacíos se muestra altamente relacionado con el índice de rigidez (corr -0.86) y algo con la tensión indirecta (corr -0.7).

La experiencia ha demostrado que el volumen de vacíos es uno de los parámetros más importantes que influye en el rendimiento del concreto asfáltico (Asphalt Institute, 1978). Y por ello, se podría estimar que el índice de rigidez de Marshall y la tensión indirecta son propiedades que podrían estar explicando algo sobre el rendimiento de los materiales bituminosos.

RESULTADOS DEL EXPERIMENTO #2

Este experimento fue conducido con el fin de evaluar el cambio a través del tiempo de la rigidez (módulo) del concreto asfáltico utilizado. Para ello, se usó el V-meter (método de propagación de ondas). Debido a que esta prueba no es destructiva las mismas muestras fueron monitoradas desde sus 3 días a sus 28 días de edad. Y de igual manera que en el experimento #1, las muestras fueron puestas al horno por 2 horas para alcanzar una temperatura uniforme de 60 grados Celsius antes de ser probadas con el V-meter. Vale recalcar nuevamente que el V-meter opera a una frecuencia de 25 MHz, y reconociendo que el concreto asfáltico es un material viscoelástico, los resultados corresponden estrictamente a este nivel de frecuencia.

Los resultados obtenidos por medio de esta prueba se muestran en la figura 8. Figura 8.a muestra la variación del módulo a través de un corto período de tiempo; mientras que la figura 8.b presenta esta misma información pero en forma normalizada.

DISCUSION SOBRE LOS RESULTADOS DEL EXPERIMENTO #2

Como se puede constatar en la figura 8.a, el módulo de las muestras se fue incrementando con el paso del tiempo (en la temprana edad de las muestras). Por ejemplo se observa que el módulo de la muestra de 5% de asfalto aumentó de 12.9 GPa en su tercer día a 14.6 GPa en su veintiochoavo día; es decir, su rigidez incrementó un 13% en tan solo 25 días. Similares proporciones son también observadas en los resultados obtenidos con las otras muestras. Por este motivo se decidió normalizar los resultados, tal como se muestra en la figura 8.b; normalización que se la realizó dividiendo el módulo medido en un tiempo i (E_i) sobre el módulo base medido en el tercer día de las muestras (E_o).

Mientras que la figura 8.a muestra claramente un incremento en el módulo de las muestras de 4%, 5% y 6% de contenido de asfalto, la figura 8.b muestra este aumento en forma más elocuente, sin la consideración del contenido de asfalto de las muestras.

El corolario de estos resultados está en el uso potencial de este método para evaluar el nivel de envejecimiento de un determinado concreto asfáltico, ya que se sabe que el aumento de su rigidez (módulo) depende del tipo y del proceso de oxidación del asfalto utilizado.

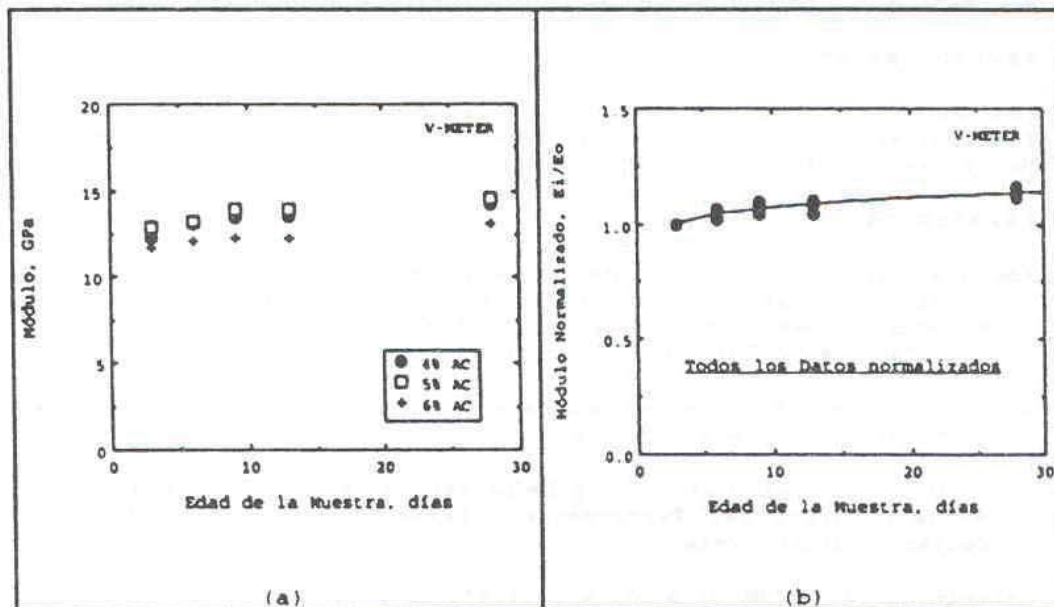


Figura 8. Variación del Módulo de las Muestras de Concreto Asfáltico Monitoreadas durante sus Primeros 28 días. Se muestra en (a) la magnitud de la variación del módulo de las muestras con 4%, 5% y 6% de contenido de asfalto; y en (b) la misma variación del módulo pero en una forma normalizada.

RESUMEN

Este artículo documenta una investigación sobre ciertas propiedades del concreto asfáltico medidas a través de varias pruebas de laboratorio. Las pruebas de estabilidad de Marshall y Hveem, tensión indirecta y propagación de ondas fueron realizadas sobre muestras de un contenido de asfalto del 4%, 5% y 6%. Los resultados obtenidos a través de las tres primeras pruebas fueron comparados entre si. De esta comparación lo más relevante fue:

1. Que la estabilidad de Marshall no estuvo relacionada al valor de estabilidad de Hveem; y esta última no se mostró relacionada con ninguna de las demás propiedades medidas.
2. Que el volumen de vacíos se mostró altamente relacionado con el índice de rigidez y en menor grado con la tensión indirecta.

Los resultados obtenidos de la prueba de propagación de ondas mostraron un gran potencial. La aplicación de este método en el monitoreo del envejecimiento del concreto asfáltico se muestra muy propicia; ya que, a través de la medición del módulo del material a diferentes intervalos de tiempo sus tendencias rigidizantes son ciertamente definidas.

Finalmente se ha de comentar que tanto las pruebas de estabilidad de Marshall y de Hveem tienen sus días contados. Con el avance de la tecnología, nuevas y mejores pruebas para la caracterización de los materiales bituminosos serán utilizados. Y esto puede conllevar a la obtención de mejores diseños de mezclas asfálticas y a una mejor estimación del rendimiento y de la vida útil de estos materiales.

RECONOCIMIENTOS

Los autores desean expresar su agradecimiento al Departamento de Transportes del estado de Texas (Texas DOT) y a la Universidad de Texas de El Paso (UTEP) por el apoyo y asistencia recibidos.

REFERENCIAS

- American Association of State Highway and Transportation Officials, (1986) *"Standard Specifications for Transportation Materials and Methods of Sampling and Testing, AASHTO Materials, Tests Part I & II,"* Catorceava Edición, Washington D.C.
- American Society for Testing and Materials, (1992) *"1992 Annual Book of ASTM Standards,"* Washington D.C.
- Britton, S. C., Bynum Jr., D., y Ledbetter, W. B., (1971) *"Evaluation of Asphalt Structural Performance,"* Texas Transportation Institute, College Station, Texas.
- Herubin, C. A., y Marotta, T. W., (1987) *"Basic Construction Materials, Methods and Testing,"* Tercera Edición, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey
- Roberts, F. L., Kandhal, P. S., Brown, E. R., Lee, D., y Kennedy, T. W., (1991) *"Hot Mix Asphalt Materials, Mixture, Design, and Construction,"* NAPA Education Foundation, Primera Edición, Lanham, Maryland.
- The Asphalt Institute, (1978) *"Asphalt Paving Manual - Manual Series No. 8,"* Tercera Edición, College Park, Maryland.
- The Asphalt Institute, (1983) *"Asphalt Technology and Construction Practices - Instructor's Guide,"* Educational Series No. 1, Segunda Edición, College Park, Maryland.