

“SUPERPAVE Y SMA: MÉTODOS MECANÍSTICOS EN LA INGENIERÍA DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS”

Abel Ordóñez Huamán - Silene Minaya González
Instituto de Investigación de la Facultad de Ingeniería Civil

RESUMEN

Las mezclas asfálticas en los EE.UU. han sido diseñados mediante procedimientos típicamente empíricos basados en ensayos de laboratorio, esto significaba que la experiencia era necesaria para correlacionar los análisis de laboratorio y el comportamiento del pavimento en el campo. Sin embargo, aún con el seguimiento estricto de los procedimientos y criterios de diseño, el comportamiento adecuado no estaba asegurado. El Método Superpave es un producto de la Strategic Highway Research Program, SHRP creado por el Congreso Americano en el año 1987, con un presupuesto inicial de 150 millones de dólares para investigar el comportamiento de las mezclas asfálticas, la duración de las vías, así como el desarrollo de métodos basados en especificaciones que relacionen los análisis de laboratorio con el comportamiento en el campo. El Superpave está siendo implementado por agencias americanas para reemplazar los métodos Marshall y Hveem (actualmente usados en el Perú). El Superpave optimiza la resistencia de la mezcla a las deformaciones permanentes, agrietamiento por fatiga y el agrietamiento producido por bajas temperaturas. En los inicios de 1960 la industria europea del asfalto reconoció la necesidad de pavimentos resistentes a las deformaciones permanentes y daños en el pavimento sometido a tráfico pesado y bajas temperaturas. En respuesta a ello, los contratistas desarrollaron el Stone Mastic Asphalt, SMA mezcla de granulometría incompleta con un contenido mayor de agregado grueso, mineral de filler y cemento asfáltico así como menor cantidad de agregado fino y arena. La mezcla tuvo un suceso en Alemania y su uso se expandió a toda Europa y actualmente a EE.UU. y Canadá. El artículo presenta los resultados de investigaciones en la Universidad Nacional de Ingeniería para la aplicación del Superpave y el SMA en el Perú.

ABSTRACT

In U.S. Asphalt mixtures have typically been designed with empirical laboratory design procedures, meaning that field experience is required to determine if the laboratory analysis correlates with pavement performance. However, even with proper adherence to these procedures and the development of mix design criteria, good performance could not be assured. The Superpave is a product of the Strategic Highway Research Program, SHRP. The SHRP was established by U.S. Congress in 1987, \$150 million research program to improve the performance, durability of road and the development of performance based asphalt specifications to directly relate laboratory analysis with field performance. The Superpave is being implemented by Americans agencies to replace the Marshall and Hveem design methods (actually used in Peru). The Superpave system optimises mixture resistance to permanent deformation, fatigue cracking and low temperature cracking. In the early 1960's the European asphalt industry recognized a critical need for pavements which would be resistant to permanent deformation and the various pavement distresses associated with heavy traffic and low temperature. In response to this need, contractors developed Stone Mastic Asphalt, SMA a gap graded mix containing increased amounts of coarse aggregate, mineral filler and asphalt cement as well as decreased amounts of fine aggregate and sand. This mixture proved so successful in Germany that its use was continued throughout Europe and actually in USA and Canada. The article presents the results of investigations in the National University of Engineering for the application of the Superpave and SMA in Perú.

INTRODUCCIÓN

En 1987 la Strategic Highway Research Program-SHRP de los EE.UU. inició el desarrollo de un sistema de manejo y diseño de pavimentos denominado Superpave, con una inversión de 150 millones de dólares.

El sistema SUPERPAVE es denominado "mecanístico" debido a que incorpora conceptos y fundamentos básicos de la mecánica de los materiales, conceptos que están desplazando a las formulaciones empíricas.

A finales de 1995 se terminó de construir la pista de pruebas denominada WESTRACK. Se ensayaron 26 secciones con dos tipos de mezclas asfálticas. En 1997, de manera prematura, se presentaron problemas de asentamientos permanentes o "rutting" no previstos, problemas que fueron materia de investigación y cuyas conclusiones permitieron ajustar y mejorar progresivamente el método. Actualmente, las agencias estatales están realizando investigaciones en pistas de pruebas con la finalidad de implementar ensayos de evaluación de menor duración.

En el año 2000 más del 60% del volumen de mezclas asfáltica, fue diseñado por el sistema Superpave y los EE.UU. ha invertido hasta la fecha más de 500 millones de dólares en la implementación del Sistema Superpave.

Es importante mencionar que los métodos "mecanísticos" se aplican actualmente en el diseño de toda la estructura del pavimento, inclusive en la evaluación de la fundación o sub-rasante (Ordoñez y Minaya, 2001), es decir, ya no queda campo de aplicación para los métodos de diseño "empíricos", esto producirá, como en los EE.UU. un reciclaje natural en la ingeniería de pavimentos en el Perú.

ETAPAS DEL SISTEMA SUPERPAVE

El diseño de mezclas SUPERPAVE considera cuatro etapas:

1. Selección de materiales tanto del agregado como ligante.
2. Diseño de la estructura del agregado.
3. Determinación del contenido de ligante asfáltico.

4. Evaluación de la sensibilidad de la mezcla al humedecimiento.

SELECCIÓN DE MATERIALES

Los agregados deben cumplir: (a) 04 ensayos obligatorios denominada *propiedades consensuales* y (b) ensayos especificados por cada agencia descentralizada de transporte, denominados *propiedades de fuente* (relacionado a condicionantes geológicos ambientales y de tránsito de cada zona).

Las *propiedades consensuales* son: (1) Angularidad del agregado Grueso, ASTM D 5821; (2) Angularidad del agregado Fino, AASHTO T 304-96; (3) Partículas Chatas y Alargadas, ASTM D 4791; y (4) Equivalente de Arena, AASHTO T 176.

La *Angularidad del agregado Grueso* es el porcentaje de partículas de agregados gruesos con caras fracturadas. La combinación de agregados se tamiza por la malla 4.75 mm, el material retenido se analiza visualmente para determinar el porcentaje en peso que tienen una o más caras fracturadas. El valor mínimo requerido depende del nivel de tráfico y la capa en la que se ubicará el agregado. La cantidad de partículas angulares determina el nivel de resistencia al corte que se puede desarrollar en la estructura del agregado. Superpave recomendó el criterio de angularidad del agregado grueso de la Tabla 1:

Tabla 1 Criterios de Angularidad del Agregado Grueso Superpave.

Tráfico	Profundidad desde la Superficie	
	< 100 mm	> 100 mm
ESALs (millones)		
< 0.3	55/-	-/-
< 1	65/-	-/-
< 3	75/-	50/-
< 10	85/80	60/-
< 30	95/90	80/75
< 100	100/100	95/90
< 100	100/100	100/100

El primer número es el valor mínimo requerido para uno o más caras fracturadas y el segundo número es el valor mínimo requerido para dos o más caras fracturadas.

La *Angularidad del Agregado Fino* o *Contenido de Vacíos No Compactados del Agregado Fino* asegurara un alto nivel de fricción, valores menores de 45 indican formas más redondeadas relacionadas con arenas naturales.

El agregado fino se vierte libremente sobre un cilindro de 100 cm³, determinando el porcentaje de vacíos entre los agregados, a mayor angularidad del agregado mayor porcentaje de vacíos.

La cantidad de vacíos no compactados en el cilindro se determina con la expresión:

$$\text{Vacíos no compactado} = \frac{V - W/G_{sb}}{V} \times 100 \quad (1)$$

donde:

- V volumen del cilindro, milímetros,
- W peso del agregado fino suelto que llenó el cilindro, gr,
- G_{sb} gravedad específica bulk del agreg. fino

Los requisitos mínimos recomendados para la angularidad se presenta en la Tabla 2:

Tabla 2 Criterios de Angularidad del Agregado Fino Superpave.

Tráfico ESALs(millones)	Profundidad desde la superficie	
	< 100 mm	> 100 mm
< 0.3	-	-
< 1	40	-
< 3	40	40
< 10	45	40
< 30	45	40
< 100	45	45
100	45	45

Cuando los materiales son más redondeados, la resistencia al corte se reduce y es más probable que el «rutting» ocurra en la mezcla.

Otro ensayo importante es el de *Partículas Chatas y Alargadas*. Cuando los agregados son chatos y alargados con frecuencia tienden a quebrarse durante la compactación, resultando una mezcla en sitio que puede ser significativamente diferente de la mezcla diseñada. En algunos casos las mezclas con exceso de partículas chatas y alargadas pueden ser difíciles de trabajar y compactar. La relación máxima es 5:1 y la mínima es 3:1 y 2:1.

La propiedad final del agregado es el contenido de arcilla. El problema más frecuente es la arcilla adherida al agregado que impide una buena unión entre éste y el asfalto, cuando esto sucede el “stripping” o peladura es el resultado. La especificación considera un límite en el contenido de arcilla. El ensayo usado para medir el contenido de arcilla es el *Equivalente de Arena*. Los requisitos sugeridos por Superpave se presentan en la Tabla 3:

Tabla 3 Porcentajes Mínimos de Equivalencia en Arena Superpave.

Tráfico ESALs (millones)	Equivalente de Arena (porcentaje mínimo)
< 0.3	40
< 1	40
< 3	40
<10	45
< 30	45
< 100	50
≥ 100	50

Las propiedades de fuente son opcionales del Departamento de Transporte, y puede ser el ensayo de Abrasión por la Máquina de Los Ángeles ASTM C 131, Ensayo de Durabilidad AASHTO T 104 y Partículas Friables y Terrones de Arcilla AASHTO T 112. Al no ser rígidas éstas propiedades de fuente, se está optimizando el diseño, resultando mezclas más económicas.

Elección del Ligante («Performance Graded»)

Considera las siguientes especificaciones:

- Los criterios de temperatura se cambian considerando el grado del ligante seleccionado para las condiciones climáticas que prevalecen.
- Las propiedades físicas medidas por ensayos de ligantes con SUPERPAVE son directamente relacionadas con su performance en el campo.
- El ligantes asfáltico es ensayado para 03 condiciones: (1) al ser transportado, almacenado y manipulado antes de mezclarlo con el agregado, (2) el envejecimiento luego de la producción y construcción (3) el envejecimiento durante su vida de servicio.
- Se considera el rango completo de temperaturas que experimntará el pavimento en el lugar del proyecto.
- Los ensayos controlan 03 tipos de fallas: deformación permanente («rutting»), agrietamiento por fatiga y agrietamiento térmico.

Superpave considera 04 ensayos (Fig.1) para evaluar la performance del asfalto. El viscosímetro rotacional evalúa la viscosidad del asfalto a temperaturas

similares a las comúnmente usadas durante la construcción.

El segundo ensayo utiliza el Reómetro de Corte Dinámico, DSR que evalúa la reología del asfalto (módulo de corte complejo y el ángulo de fase) para temperaturas intermedias a altas. El ensayo DSR será usado para evaluar la habilidad del asfalto para resistir deformaciones permanentes.

La fatiga se evalúa luego del envejecimiento RTFO (simulación de envejecimiento durante la mezcla y construcción) y envejecimiento PAV (simulación de envejecimeinto luego de 7 a 10 años de servicio). Esto se debe a que el agrietamiento por fatiga tarda varios años y depende de las condiciones medioambientales y de tráfico. Las propiedades del ligante a bajas temperaturas se determina usando el Reómetro de Viga de Flexión, BBR. En este ensayo se aplica una carga estática a una viga de cemento asfáltico en un baño maría.

El ensayo de Tensión Directa, DTT evalúa el agrietamiento baja temperatura.

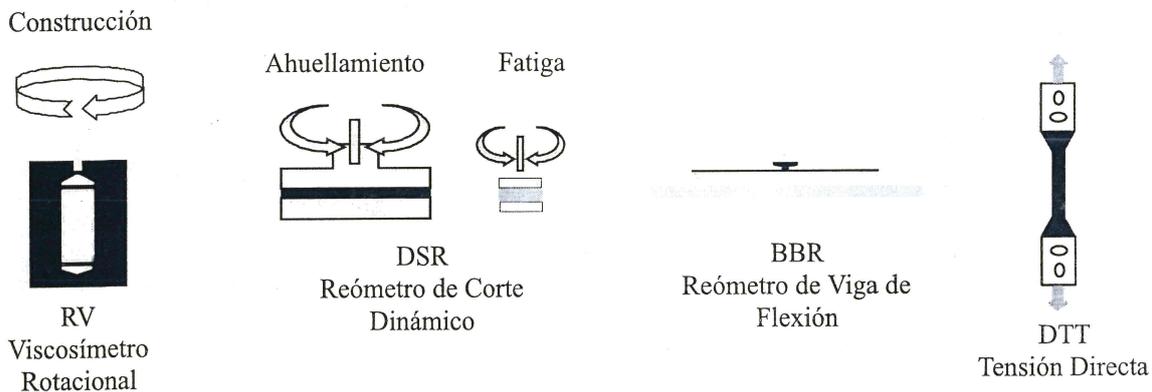
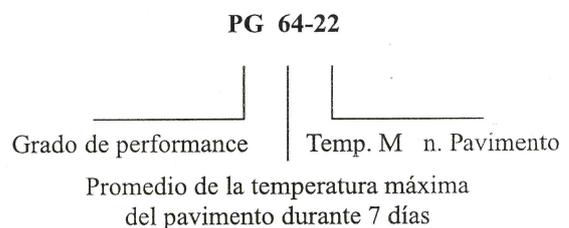


Fig. 1 Ensayos de Laboratorio para Especificaciones PG.

Especificaciones Superpave del Ligante Asfáltico

El sistema clasifica el ligante en función de las temperaturas extremas de calor y frío del pavimento.



SELECCIÓN DE LA COMBINACIÓN DE AGREGADOS

Se debe indicar que el diseño de la mezcla de agregados se basa no solamente en conseguir una estructura agregado-ligante estable, resistente, con deformaciones permisibles y adecuado comportamiento hidráulico sino en la consideración que el ligante tendrá una función estructural principal, es decir, soportará los esfuerzos transmitidos por las cargas. Este enfoque conceptual de diseño del Superpave es diferente respecto al SMA donde el ligante, es un miembro secundario y no soportará esfuerzo significativo.

La gradación del agregado es muy importante porque asegura 1) el tamaño máximo del agregado, 2) se calcula el porcentaje de vacíos en el agregado mineral, VMA, y 3) se asegura un esqueleto de agregado satisfactorio.

El tamaño máximo nominal del agregado es un tamiz mayor que el primer tamiz que retiene el 10% de material.

El tamaño máximo del agregado es un tamiz mayor que el tamaño máximo nominal. La gradación del agregado deberá estar dentro de los límites de los "puntos de control".

Los "puntos de control" aseguran la buena gradación del agregado evitando problemas de segregación y de mezcla, con el ligante.

Sin embargo, los "puntos de control" limitan el diseño, tan es así que el SMA considera una granulometría incompleta, lo que le permite obtener una estructura granular más estable, resistente y menos deformable; sin embargo, dicha granulometría cae fuera de los "puntos de control".

Los problemas de segregación y mezcla con el ligante en el SMA es resuelto con la incorporación de fibras.

Para el Superpave la zona restringida asegura que no se use mucha arena natural en la mezcla, y asegura un mínimo porcentaje de vacíos en el agregado mineral, VMA, en la mezcla.

En la Fig. 2 se muestra la especificación Superpave

para agregados con tamaño máximo nominal de 12,5 mm.

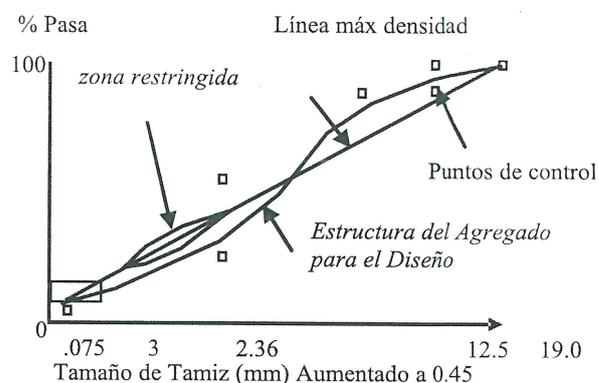


Fig. 2 Gradación SUPERPAVE Tamaño Máximo Nominal 12,5 mm.

CONTENIDO DE LIGANTE Y COMPORTAMIENTO DE LA MEZCLA

El Compactador Giratorio, CG fue diseñado para compactar muestras a densidad similar a la que se obtendrá bajo tráfico. La compactación tiende a orientar las partículas de agregado de manera similar a las observadas en campo.

Son 03 los parámetros que controlan el esfuerzo de compactación. Estos parámetros son: la presión vertical, ángulo de inclinación y número de revoluciones. La presión vertical es 600 kPa y el ángulo de inclinación es 1,2,5°. La velocidad de rotación es de 30 rev/min.

El CG utiliza muestras de 4 ó 6 pulg. de diámetro. Actualmente las especificaciones son para muestras de 6 pulg. El número de revoluciones se basa en el nivel del tráfico y el promedio de las temperaturas de aire más altas de diseño. Mezclas que son expuestas a mayores temperaturas y altos niveles de tráfico en el campo, densificarán más, de esa manera se compactará en el laboratorio a mayor densidad. Esta mayor densidad se obtiene con el incremento del número de revoluciones. El número de revoluciones para niveles de tráfico se muestra en la Tabla 4:

$N_{\text{diseño}}$ es el número de revoluciones requerido para

producir una densidad en la mezcla equivalente a la densidad esperada en el campo luego de recibir el tráfico de diseño. Para el diseño de mezclas, el óptimo contenido de asfalto será aquel que proporcione 4% de vacíos de aire cuando la mezcla es compactada a $N_{\text{diseño}}$.

N_{inicial} es una medida de compatibilidad de mezcla. Una mezcla con 4% de vacíos de aire a $N_{\text{diseño}}$ tendrá por lo menos 11% de vacíos a N_{inicial} . Mezclas que no cumplen con estos requisitos son con frecuencia

mezclas finas y por lo general tienden a tener una gran cantidad de arena natural.

$N_{\text{máximo}}$ es el número de revoluciones requerido para producir una densidad en el laboratorio que absolutamente nunca sería evaluada en campo.

$N_{\text{máximo}}$ proporciona una densidad compactada con un factor de seguridad que asegure que la mezcla no densificará más, resultando en bajos vacíos en el campo que pueden producir deformaciones permanentes.

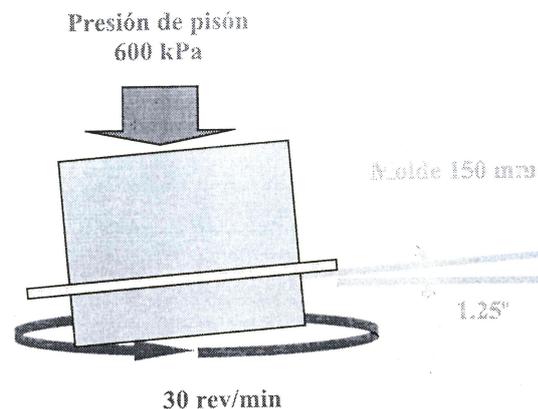


Fig. 3 Esquema de compactación de un molde en el Compactador Giratorio Superpave.

Tabla 4. Especificaciones de Revoluciones en el CG Superpave.

ESALs de Diseño[12] (millones)	Parámetros de Compactación			Aplicaciones típicas
	N_{inicial}	$N_{\text{diseño}}$	$N_{\text{máx}}$	
< 0.3	6	50	75	En carreteras con tráfico muy ligero, vías locales y calles de ciudades donde el tráfico de camiones está prohibido o es muy pequeño.
0.3 a <3	7	75	115	Vías colectoras o accesos a ciudades. Tráfico medio.
3 a < 30	8	100	160	Carreteras con dos carriles, multicarriles divididos y accesos parcial o completamente controlados. Calles de ciudades con tráfico medio a alto, rutas estatales, rutas federales y algunas intersecciones rurales.
30	9	125	205	Mayoría del vasto sistema interestadual tanto rural como urbana. Aplicaciones especiales como estaciones de pesaje de camiones, o faja donde los camiones pueden pasar en vías de doble carril.

- (1) El ESAL de diseño es el tráfico esperado en el carril de diseño en un período de 20 años. Indiferente a la vida de diseño actual de la carretera, determine el ESAL de diseño para 20 años, y elija el nivel apropiado de $N_{\text{diseño}}$.
- (2) Las aplicaciones típicas se definen en Policy on Geometric of Highway and Streets, 1994, AASHTO.

Los vacíos de aire de $N_{\text{máximo}}$ deben tener por lo menos 2%. Mezclas con valores menores al 2% son susceptibles a las deformaciones permanentes que aquellas mezclas con vacíos de aire mayores al 2% [12].

Las muestras de ensayo son compactadas usando el $N_{\text{diseño}}^1$. Una vez que se definió el $N_{\text{diseño}}$ para cada nivel de tráfico y la temperatura del aire, se determina el N_{inicial} y el $N_{\text{máximo}}$, según las siguientes ecuaciones:

$$\begin{aligned} \text{Log } N_{\text{inicial}} &= 0,45 \text{ Log } N_{\text{diseño}} \\ \text{Log } N_{\text{máximo}} &= 1,10 \text{ Log } N_{\text{diseño}} \end{aligned} \quad (2)$$

Compactación de Muestras

La mezcla de agregado y asfalto se compacta para preparar especímenes de 150 mm de diámetro y 115 mm de alto.

Las muestras compactadas son evaluadas para determinar sus características volumétricas y los porcentajes de vacíos de N_{inicial} y $N_{\text{máximo}}$.

Todas las muestras para diseño y propiedades volumétricas se envejecen a 135°C en el horno por 2 horas, luego de mezclarlas y antes de compactarlas.

La muestra se extiende en una capa delgada para el procedimiento de envejecimiento.

Este envejecimiento es necesario para permitir la absorción del cemento asfáltico dentro de los poros permeables del agregado antes de la compactación y enfriamiento.

La absorción produce una mezcla que es más representativa de la mezcla en campo.

Durante el proceso de compactación se mide la altura del espécimen, conociendo la masa que se encuentra en el molde y el diámetro de éste, se determina el volumen de mezcla.

La densidad bulk se puede determinar con este resultado. Esta densidad calculada es ligeramente incorrecta, debido a vacíos en la superficie, base, y

lados de cada espécimen, sin embargo se está considerando como parte del volumen del espécimen.

Luego que cada muestra es compactada a $N_{\text{diseño}}$ se extrae del compactador y se determina su densidad bulk real pesándolo en el aire y sumergido. La densidad real de $N_{\text{diseño}}$ se compara con la densidad calculada a $N_{\text{diseño}}$ para conseguir un factor de corrección. Las densidades calculadas a N_{inicial} y $N_{\text{máximo}}$ son corregidas en función al factor de corrección.

Con muestras sueltas de mezcla se determina la gravedad específica teórica máxima (DTM). Conociendo la DTM y la densidad bulk, los niveles de vacíos pueden calcularse para varios niveles de compactación.

Las muestras de DTM serán envejecidas de manera similar que las muestras para compactación.

Selección del Óptimo Contenido de Asfalto

El *óptimo contenido de asfalto* es definido por el SUPERPAVE como el contenido de asfalto que produce el 4% de vacíos de aire a $N_{\text{diseño}}$. De seguro, esta mezcla diseñada tiene que cumplir los requisitos para N_{inicial} y $N_{\text{máximo}}$ y algunos otros requisitos que pueden especificarse.

El primer paso para la selección del óptimo contenido de asfalto es determinar un aproximado óptimo contenido de asfalto.

Luego se preparan tres especímenes cada uno a 0,5% debajo, en el óptimo, y 0,5% sobre el óptimo contenido de asfalto y 1,0% sobre el óptimo estimado. Mezclar cada muestra y llevarlas a horno de 135°C por el tiempo de envejecimiento requerido. Compactar cada muestra a $N_{\text{diseño}}$ revoluciones que es función del tráfico y performance de la temperatura.

Luego que cada muestra sea compactada, sacar la muestra del molde y medir la densidad bulk a $N_{\text{diseño}}$

Determinar el factor de corrección para la densidad bulk real y la densidad bulk calculada y corrija los vacíos calculados para cada muestra a N_{inicial} y $N_{\text{máximo}}$.

¹ Superpave Mix Design, SP-2, Asphalt Institute, tercera edición 2001.

Promedie los resultados para el porcentaje corregido de DTM para las tres muestras y plotee como se

muestra en el siguiente ejemplo. (Hot Mix Asphalt Materials, Mixture Design and Construction, NCAT).

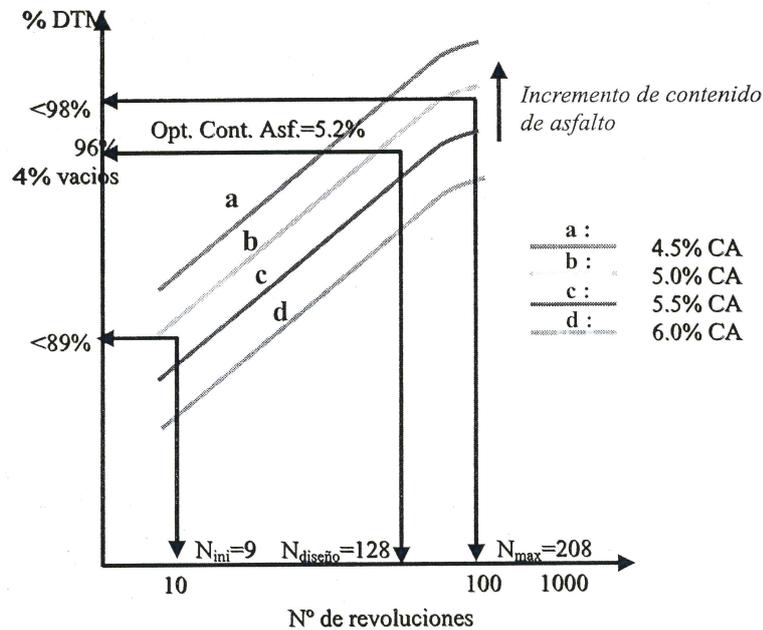


Fig. 4 Resultados Superpave con el Compactador Giratorio.

El procedimiento de cálculo de los parámetros de diseño se basan en las relaciones volumétricas y gravimétricas para mezclas asfálticas, detalle del mismo puede verse en Ordoñez y Minaya, 2001.

EL porcentaje de DTM se determinó dividiendo la densidad bulk entre DTM y multiplicando por 100.

Recordar que el porcentaje de vacíos de aire para cada muestra es igual a $100 - \text{DTM}$.

Luego que todos los datos se ploteen, el contenido óptimo de cemento asfáltico será el porcentaje ubicado en la intersección del 96% de DTM y el $N_{\text{diseño}}$.

Se puede determinar por interpolación pero no por extrapolación. Graficar una línea vertical en N_{inicial} hasta el óptimo contenido del asfalto y luego trazar una línea horizontal para determinar el porcentaje de DTM.

El porcentaje deberá ser menor que 89%. Hacer lo mismo con $N_{\text{máximo}}$.

El número seleccionado será menor que 98%. Recordar que DTM es diferente para diferentes contenidos de asfalto.

Cuando la DTM es conocido para un óptimo contenido de asfalto, éste se calcula para otros contenidos de asfalto determinado la gravedad específica de los agregados y haciendo pocos cálculos.

Si los vacíos de aire son 4% a $N_{\text{diseño}}$, mayor que 11% para N_{inicial} y mayor que 2% para $N_{\text{máximo}}$, entonces, éste es el *óptimo contenido de asfalto*. Si la mezcla falla en $N_{\text{máximo}}$ o N_{inicial} entonces es posible que la gradación del agregado o posiblemente la cantera necesite ser cambiada. Otros dos criterios deben satisfacer los vacíos en el agregado mineral (VMA) y vacíos llenos con asfalto (VFA):

Tabla 5: Requisitos de VMA.

Tamaño máximo nominal en mm	% mínimo de VMA
9.5	15
12.5	14
19	13
25	12
37.5	11

Tabla 6: Requisitos de los Vacíos Llenos con Asfalto.

ESALs (millones)	% VFA
< 0.3	65-80
< 1	65-78
< 3	65-78
< 10	65-75
< 30	65-75
< 100	65-75
≥ 100	65-75

Si el diseño de mezclas cumple con todos los requisitos excepto el VFA, el contenido de asfalto puede ajustarse ligeramente para mantener los vacíos de aire cerrados al 4% y poner el VFA dentro de los límites. El VFA es un término redundante desde que es función de los vacíos de aire y VMA. Desde el punto de vista práctico, la calidad volumétrica de HMA puede controlarse por vacíos de aire y VMA.

En muestras individuales se tiene experiencia que mezclas de diseño de 6" requieren mucho más material que en 4". Se calcula que para diseñar con 6" se requiere aproximadamente 4 veces más de material que en Marshall o Hveem.

Desde que las muestras son envejecidas en horno, uno se dará cuenta que se requiere un espacio grande en el horno.

SENSIBILIDAD AL HUMEDECIMIENTO

Una discusión en el diseño de mezclas no es completa si no se discute sobre la sensibilidad al humedecimiento o el deterioro de HMA debido a influencias diametrales de humedad, llamada "stripping". El "stripping", peladuras o desprendimiento, produce una pérdida de resistencia a través del debilitamiento de la relación entre el cemento asfáltico y agregado. Esta pérdida de resistencia puede ser repentina donde el asfalto se desprende del agregado, la cohesión de la mezcla se pierde, y el "stripping" se desarrolla rápidamente.

La situación más típica es la pérdida gradual de la resistencia sobre un período de años que contribuye a desarrollar la deformación permanente y desplazando el asfalto en la trayectoria de la llanta. Actualmente SUPERPAVE recomienda la norma AASHTO T-283.

METODO SMA ("Stone Mastic Asphalt")

El concepto de diseño SMA se basa en una estructura granular donde predomina el contacto piedra-piedra el mismo que le provee de alta resistencia cortante, baja deformación permanente o "rutting" y considera un buen porcentaje de ligante que le dá una excelente durabilidad.

Las características del comportamiento mecánico de la mezcla asfáltica es alcanzada utilizando una granulometría incompleta ("gap-graded aggregate") combinada con fibra y/o polímeros modificados y un mayor contenido de ligante.

Las siguientes fotos muestra la diferencia entre una mezcla asfáltica Superpave y el SMA.

Por su mayor contenido de asfalto y la necesaria incorporación de fibras para evitar la segregación con el ligante durante la mezcla el costo es entre 20 a 25% mayor que las mezclas asfálticas convencionales.

Sin embargo, el comportamiento del SMA es actualmente calificado en los EE.UU. como de excelente comportamiento bajo tráfico pesado e intenso, bajo costo de mantenimiento y una duración que alcanza los 30 años de vida de servicio.



Fig. 5 SMA - SUPERPAVE.

El uso del SMA en EE.UU. fue como resultado del viaje de estudio de un grupo de trabajo americano a Europa en 1990, el mismo que se encontró con el suceso del SMA en Europa por más de 20 años.

Posteriormente la incorporación del SMA en los EE.UU. se produce en el año 1991, donde la Federal Highway Administration (FHWA) estableció un Grupo de Trabajo Técnico para el desarrollo de recomendaciones para la construcción y especificaciones de materiales.

La National Center for Asphalt Technology, EE.UU.

evaluó el comportamiento de 85 proyectos de SMA. A continuación se listan las observaciones realizadas:

- Más del 90% de los proyectos presentaban asentamientos permanentes menores de 4mm. y 25% no presentaban asentamientos significativos.
- Las mezclas de SMA presentaban mayor resistencia al agrietamiento comparados con las mezclas convencionales probablemente al mayor contenido de ligante.
- No habían evidencia de erosión de las aguas pluviales sobre la superficie de la mezcla asfáltica (“raveling”) en los proyectos.

Experiencias en Georgia indican que el SMA tiene entre 30 y 40% menos asentamientos permanentes que las mezclas convencionales y de 3 a 5 veces mayor resistencia al agrietamiento por fatiga.

Experiencias en Alemania indican que una duración entre 20 a 30 años no es considerado excepcional. Peladuras, agrietamiento superficial y erosión pluvial superficial son fallamientos que generalmente no experimenta una mezcla SMA.

CONSIDERACIONES DE DISEÑO

El diseño del SMA considera 05 etapas:

- Selección de materiales de agregados.
- Determinación de la gradación del agregado.
- Asegurar que la gradación elegida consiga o exceda los requerimientos mínimos de VMA o permita el contenido mínimo de ligante a ser usado.
- Elección del contenido de ligante que provea el nivel deseado de vacío de aire.
- Evaluar la susceptibilidad al humedecimiento y la sensibilidad al escurrimiento.

Existen dos aspectos importantes en el SMA: la incorporación de fibra y/o polímeros para conseguir un diseño de acuerdo a las sollicitaciones ambientales y de tráfico y las dificultades durante la producción, almacenaje, transporte y colocación debido a la susceptibilidad del SMA al escurrimiento o “draindown”.

Los requerimientos para el agregado grueso y fino se presentan en las siguientes tablas:

Tabla 7: Requisitos de Calidad del Agregado Grueso SMA.

Ensayo	Método	Especificación
Abrasión Los Angeles, % pérdida	AASHTO T 96	30* máx.
Chatas y Alargadas, % 3 a 1 5 a 1	ASTM D 4791	20 máx. 5 máx.
Absorción, %	AASHTO T 85	2 máx.
Durabilidad (5 ciclos), % Sulfato de Sodio Sulfato de Magnesio	AASHTO T 104	15 máx. 20 máx.
Caras fracturadas, % Una cara Dos caras	ASTM D 5821	100 mín. 90 mín.

Aunque pérdida mayor del 30% pueden ser usados con éxito, pueden ocurrir quebraduras excesivas en el laboratorio durante la compactación o durante la compactación en sitio.

Tabla 8: Requisitos de Calidad del Agregado Fino SMA.

Ensayo	Método	Especificación
Durabilidad, pérdida % Sulfato de Sodio Sulfato de Magnesio	AASHTO T 104	15 m x. 20 m x.
Angularidad, %	AASHTO Tp33 (Mét. A)	45 m n.
Límite Líquido, %	AASHTO T 89	25 m x.
Índice de Plasticidad	AASHTO T 90	N.P.

En la siguiente tabla se presenta la gradación para una mezcla con tamaño máximo nominal de 19 mm.

Tabla 9: Especificaciones de Agregados SMA para TMN de 19 mm.

Tamaño Tamiz, mm	19 mm de TMN	
	Inferior	Superior
37.5		
25.0	100	100
19.0	90	100
12.5	50	74
9.5	25	60
4.75	20	28
2.36	16	24
1.18	13	21
0.6	12	18
0.3	12	15
0.075	8	10

TMN-Tamaño Máximo Nominal de Agregados-tamiz mayor que el primer tamiz que retiene más del 10%.

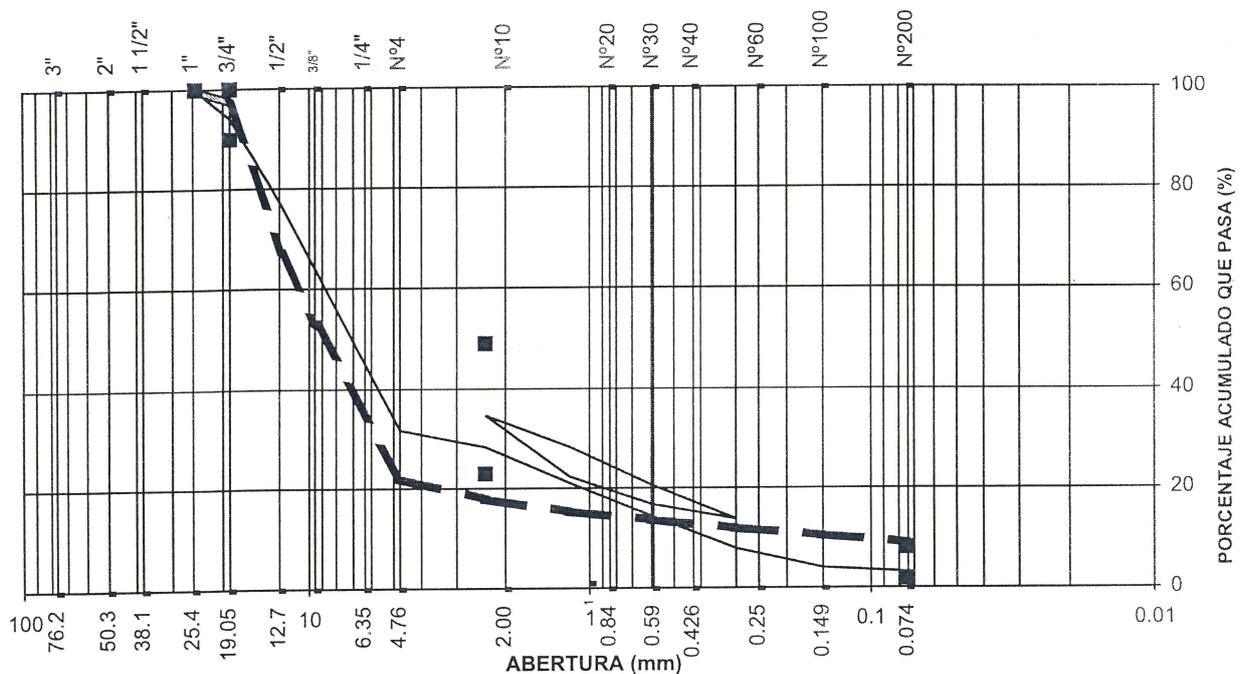


Fig. 6 Comparación de Granulometrías SUPERPAVE y SMA.

La evaluación de la sensibilidad al escurrimiento durante el proceso de mezclado es muy importante en el SMA. El ensayo simula las condiciones durante la producción, almacenaje, el transporte y la colocación. El escurrimiento es la determinación de la porción de la mezcla (finos y ligante) que se separa y fluye escurriéndose de la mezcla.

El ensayo AASHTO T 305 o ASTM D 6390 es utilizado para la evaluación. Se utiliza una cesta de malla metálica en el cual se coloca la mezcla.

La cesta es colocada sobre una fuente metálica y el conjunto es colocado en el horno durante una hora con la temperatura de producción de la mezcla, determinándose luego el porcentaje de mezcla escurrida.

Un siguiente ensayo se realiza con una temperatura superior en $+15^{\circ}\text{C}$ para evaluar la sensibilidad a las fluctuaciones de temperatura en la planta. Se repite otra serie de pruebas para promediar los resultados alcanzados.

El requerimiento de diseño considera un escurrimiento de 0,30% en peso, de la mezcla inicial.

CONCLUSIONES

El Superpave arroja un diseño optimizado tomando en cuenta condicionantes ambientales locales para la selección del agregado, en ese aspecto deja libertad a las agencias descentralizadas los requisitos mínimos de la calidad del agregado.

El Superpave considera aspectos reológicos del asfalto como la resistencia a la tracción, los esfuerzos inducidos por la contracción térmica, la sensibilidad a la temperatura y el humedecimiento y como el componente débil de la mezcla. En el SMA el ligante no juega papel estructural alguno, lo que lo diferencia al Superpave.

El Superpave considera una buena gradación de los agregados; sin embargo, el SMA con una gradación incompleta demuestra un comportamiento estructural más eficiente (más resistente y menos deformable). Con la metodología del Superpave no podrá conseguirse un diseño SMA.

El SMA basa su fortaleza estructural en los agregados gruesos de buena gradación y el alto contenido de vacíos es "rellenado" con el ligante. Los problemas

de segregación y mezcla es resuelto con la incorporación de fibra y/o polímeros.

El SMA se recomienda para climas fríos y para tránsito pesado, el Superpave para climas cálidos y templados y para tránsito mediano a ligero. El SMA es 20 a 30% más costoso que el Superpave sin embargo el mantenimiento es mínimo y su duración es mayor.

Tanto el Superpave como el SMA, son métodos que optimizan los recursos económicos y tendrán campo de aplicación en el país en un futuro inmediato. La implementación en los EE.UU. no fue fácil y en el Perú deberá basarse en un esfuerzo conjunto.

REFERENCIAS

1. **Ordóñez, A. y Minaya, S.** (2001) "C.B.R. de Subrasantes Arenosas y Limoarcillosas". Revista TECNIA. Vol. 11 No. 2. U.N.I.
2. **Ordóñez, A. y Minaya, S.** (2001) "Manual de Laboratorio. Ensayos para Pavimentos". Volumen I. Universidad Nacional de Ingeniería.
3. **U.S. Department of Transportation. Federal Highway Administration** (2002). "Superpave Asphalt Mixture Design". Version 8.0
4. **National Asphalt Pavement Association** (2002). "Designing and Constructing SMA Mixtures- State-of-the-Practice". U.S. Dep. of Transp. FHWA.
5. **National Asphalt Pavement Association** (2001). "Moisture Susceptibility of HMA Mixes". Identification of Problem and Recommended Solutions.
6. **U.S. Department of Transportation. Federal Highway Administration** (1998). "Performance of Course-Graded Mixes at WesTrack-Premature Rutting".
7. **U.S. Department of Transportation. Federal Highway Administration** (2001). "Superpave Mixture-design guide". WesTrack Forensic Team Consensus Report.
8. **Highway Engineering Research Group, University of Ulster, UK.** (2000). "Predicting the Performance of Stone Mastic Asphalt". Stone Mastic Asphalt".
9. **National Asphalt Pavement Association** (1992). "Experience with SMA in U.S".
10. **National Asphalt Pavement Association** (1997). "Superpave Construction Guidelines". Special Report 180. U.S. Dep. of Transp. FHWA.
11. **Asphalt Institute** (1999). "Performance Graded Asphalt. Binder Specification and Testing".
12. **National Center for Asphalt Technology** (1996). "Hot Mix Asphalt Materials, Mixture Design and Construction". Second Edition.
13. **Asphalt Institute** (1999). "Cause and Prevention of Stripping in Asphalt Pavements".

