

IAG152-01-2013
EVALUACION DEL COMPORTAMIENTO A LA FATIGA DE MEZCLAS
ASFALTICAS CONVENCIONAL Y MODIFICADO CON POLIMERO SBS
AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO À FADIGA DE MISTURAS
ASFÁLTICAS CONVENCIONAL E MODIFICADO POR POLÍMERO SBS

Jorge Rodolfo Escalante Zegarra
EESC / Universidade de Sao Paulo – TDM Asfaltos SAC
Lima, Perú
jescalantez@gmail.com

José Leomar Fernandes Junior
EESC / Universidade de Sao Paulo
Sao Carlos - SP, Brasil
leomar@sc.usp.br

Resumen

Los objetivos de este trabajo son, establecer la distribución del Grado de Desempeño (PG) de ligantes asfálticos con base en las condiciones climáticas de cada región de Perú, realizar la propuesta del tipo de asfalto que debe utilizarse para atender el PG de las diferentes regiones del Perú y evaluar el comportamiento a la fatiga de los asfaltos peruanos convencional PEN 60/70 y modificados con polímero SBS Betutec y PG 76 -22 en mezclas asfálticas densas, sin y con envejecimiento a corto plazo, para los ensayos de fatiga fueron utilizados 76 cuerpos de prueba.

Los resultados de los ensayos Superpave, mostraron que la modificación de los asfaltos con polímero mejora las propiedades reológicas del ligante asfáltico, presentando menor índice de susceptibilidad térmica y mayor resistencia al envejecimiento, mejorando sustancialmente el comportamiento de las mezclas asfálticas a la fatiga. Esos resultados fueron confirmados por el análisis estructural con el programa computacional Elsym5, en las dos condiciones de envejecimiento estudiadas.

Resumo

Os objetivos deste trabalho são, estabelecer a distribuição do Grau de Desempenho (PG) de ligantes asfálticos baseado nas condições climáticas de cada região do Peru, fazer a proposta do tipo de asfalto que deve utilizarse para atender o PG das diferentes regiões do Peru e avaliar o comportamento à fatiga dos asfaltos peruanos convencional PEN 60/70 e modificados por polímero SBS Betutec e PG 76 -22 em misturas asfálticas densas, sem e com envelhecimento a curto prazo, para os ensaios de fatiga foram usados 76 corpos de prova.

Os resultados dos ensaios Superpave, mostraram que a modificação dos asfaltos por polímero melhora as propriedades reológicas do ligante asfáltico, apresentando menor índice de susceptibilidade térmica e maior resistencia ao envelhecimento, melhorando o comportamento

das misturas asfálticas à fadiga. Esses resultados foram conferidos com a análise estrutural com o programa computacional Elsym5, nas duas condições de envelhecimento estudadas.

1. INTRODUCCIÓN

Entre los defectos que afectan el desempeño de un pavimento, dos requieren especial atención en virtud de una mayor ocurrencia y, principalmente, por representar el comprometimiento estructural: la acumulación de la deformación permanente en los canales de tráfico, que generalmente ocurre en los primeros años de vida del pavimento, por estar más sujeto al adensamiento, a las deformaciones plásticas por cizallamiento, y el surgimiento y propagación de las fisuras por fatiga del revestimiento asfáltico (Roberts et al., 1991).

Uno de los aspectos fundamentales para el comportamiento adecuado de los pavimentos frente a las solicitaciones climatológicas y de tránsito, es el grado de desempeño de los ligantes asfálticos utilizados, por lo que el Programa SHRP (Strategic Highway Research Program), resultó en la especificación de ligantes asfálticos basada en el Grado de Desempeño (PG, Performance Grade) que clasifica los ligantes de acuerdo con las condiciones climáticas y el tipo de solicitud de tráfico a las que el pavimento será sometido. Datos como temperatura máxima del pavimento durante siete días consecutivos, temperatura mínima del pavimento, confiabilidad, tiempo de carga y volumen de tránsito son usados en la especificación de ligantes Superpave para seleccionar el ligante apropiado para soportar a la deformación permanente y a los agrietamientos por fatiga, siendo que la clasificación determina el grado de desempeño del ligante asfáltico.

Los esfuerzos en investigaciones para mejorar el desempeño de la capa asfáltica de los pavimentos, con la intención de prolongar su vida útil y atender adecuadamente las solicitudes de clima y tránsito no se deben restringir a los materiales comúnmente encontrados en mezclas asfálticas (ligante asfáltico, piedra chancada y filler mineral), también deben considerar los modificadores, que pueden ser materiales elastoméricos, termoplásticos, termorrígidos, cauchos naturales y/o sintéticos, entre otros.

Una alternativa para que los pavimentos puedan soportar las variaciones climáticas, así como las crecientes solicitudes del tránsito, es el uso de asfaltos de alto desempeño, destacándose, entre ellos, los asfaltos modificados con polímero SBS. La función básica de un polímero, cuando es adicionado al asfalto, es reducir la susceptibilidad térmica, mejorando el comportamiento elástico del asfalto y proporcionando el aumento de la resistencia a la deformación permanente de las mezclas asfálticas en situaciones extremas de altas temperaturas en servicio, la disminución de las fisuras en bajas temperaturas y la disminución de las fisuras por fatiga. Los polímeros también mejoran la adhesividad entre los agregados y el asfalto, disminuyendo la abrasión y mejorando la resistencia a la oxidación.

2. OBJETIVOS

Los objetivos de este trabajo son:

- Establecer el grado de desempeño del ligante asfáltico peruano convencional PEN 60/70 y modificado con polímero SBS y establecer los ligantes asfálticos indicados para uso en la pavimentación asfáltica en las diferentes regiones del Perú;

- Evaluar el comportamiento de los asfaltos convencional y modificados con polímero SBS a la vida a la fatiga (fisuras y grietas) de mezclas asfálticas sin envejecimiento y con envejecimiento a corto plazo.

3. PROGRAMA EXPERIMENTAL

El programa experimental fue compuesto de cuatro etapas: (1) determinación del grado de desempeño PG de los asfaltos para las diferentes regiones del Perú, (2) determinación de las propiedades del agregado utilizado, (3) modificación del ligante asfáltico con polímero SBS y determinación de sus propiedades por el método convencional y Superpave, (4) determinación del comportamiento de las mezclas asfálticas producidas a la fatiga.

3.1. Determinación del grado de desempeño de ligantes asfálticos para el Perú

La especificación Superpave para ligantes asfálticos define el grado de desempeño (PG) con base en registros de temperaturas ambiente de estaciones meteorológicas por un período mínimo de 20 años. Se calcula el promedio y la desviación estándar de las temperaturas máximas del aire de los siete días consecutivos más calurosos del año y el promedio y la desviación estándar de la temperatura mínima del aire del día más frío del año. Posteriormente, son calculadas las temperaturas del pavimento.

El grado de desempeño de los ligantes asfálticos varía en niveles, siendo que cada nivel equivale a 6°C, tanto en altas como en bajas temperaturas. El PG a altas temperaturas es determinado a través de ensayos en el Reómetro de Corte Dinámico (Dynamic Shear Reometer – DSR) con ligante virgen y envejecido a corto plazo en el Horno Rotatorio de Película Delgada (Rolling Thin Film Oven Test – RTFOT), el PG a bajas temperaturas es determinado a partir del ensayo de módulo de rigidez del asfalto en el Reómetro de Flexión en Viga (Bending Beam Rheometer – BBR) el mismo que es realizado con asfalto envejecido en el RTFOT y el Vaso de Envejecimiento a Presión (Pressure Aging Vessel – PAV). Los asfaltos definidos por el método Superpave son representados en la Tabla 1 (Motta et al, 1996).

Tabla 1. Intervalos para el grado de desempeño PG de ligantes asfálticos

Clasificación a Temperatura Alta	Clasificación a Temperatura Baja
PG 46	-34, -40, -46
PG 52	-10, -16, -22, -28, -34, -40, -46
PG 58	-16, -22, -28, -34, -40
PG 64	-10, -16, -22, -28, -34, -40
PG 70	-10, -16, -22, -28, -34, -40
PG 76	-10, -16, -22, -28, -34
PG 82	-10, -16, -22, -28, -34

3.1.1. Datos y consideraciones para la selección del grado de desempeño (PG)

Para la selección del PG de ligantes asfálticos, fueron utilizados datos de 120 estaciones meteorológicas que operaron en los últimos 25 a 30 años, proporcionados por el Senamhi (Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología). Esta base de datos no cuenta con información meteorológica de los departamentos de Ucayali y Madre de Dios, debido a que las estaciones meteorológicas de esa región no cuentan con la data necesaria.

3.1.2. Método de cálculo del grado de desempeño (PG) del ligante asfáltico

Para la selección del PG del ligante asfáltico, fueron realizados los cálculos de las temperaturas máximas y mínimas del pavimento, utilizándose inicialmente la metodología del SHRP original y, posteriormente las modificaciones basadas en el LTPP Bind (FHWA).

El cálculo de las temperaturas máximas a 20 mm de profundidad del pavimento fue realizado por tres modelos diferentes: Modelo recomendado por el SHRP original (MC GENNIS et al. 1994 y MOHSENI, 1996), y los modelos, basados en investigaciones realizadas por los investigadores del LTPP Bind (FHWA) de 1996 y 2004 (LTPP-FHWA, 1998 y Bosscher, 2000). De estos tres, el modelo más actualizado del LTPP Bind (2004) proporciona los valores más críticos, ya que al algoritmo presentado por Mohseni y Carpenter (2004) lleva en consideración parámetros de tiempos de duración de las temperaturas máximas horarias, velocidad del viento, y radiación solar utilizando el modelo climático integrado (ICM) de la FHWA para el cálculo de las temperaturas máximas del pavimento.

El cálculo de las temperaturas mínimas del pavimento fue realizado por cuatro modelos diferentes. El modelo recomendado por el SHRP original, que toma la temperatura mínima del aire como la temperatura mínima del pavimento, el modelo desarrollado por los investigadores canadienses del C-SHRP que calcula temperaturas no muy conservadoras como las del SHRP original, y los modelos desarrollados por el LTPP Bind basado en estudios de desempeño de 30 trechos experimentales, de esos cuatro, el modelo del LTPP Bind de 1996, proporciona temperaturas del pavimento menos severas y el modelo del SHRP original proporciona los valores de temperaturas mínimas más críticas.

Considerándose un 98% de confiabilidad y los resultados más críticos de los modelos presentados, por encontrarnos en un país mega-climático que presenta gradientes térmicas elevadas en periodos de tiempo cortos pudieron ser determinados los ligantes asfálticos más indicados, de acuerdo con las Especificaciones Superpave, para todas las regiones del Perú, con excepción de los Departamentos de Madre de Dios y Ucayali. Fue elaborado el mapa (Figura 1) a partir de las condiciones climáticas de cada región del Perú, destacándose que no son considerados los ajustes por volumen y velocidad de tráfico, por ser esas condiciones variables específicas para cada región.

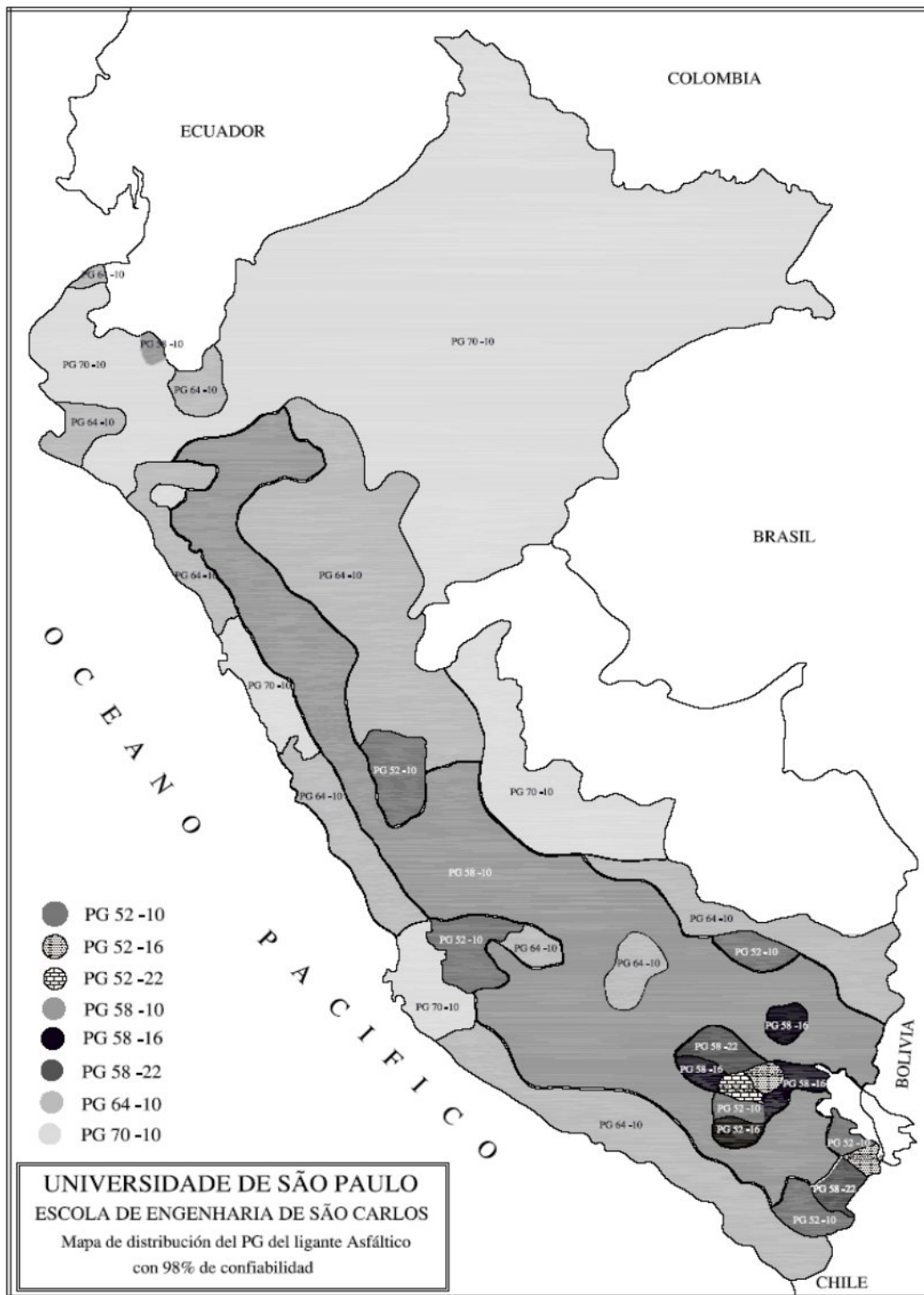
3.1.3. Selección del grado de desempeño (PG) del ligante asfáltico

Para la selección del ligante asfáltico se considero las condiciones climáticas de las regiones naturales del Perú. El país presenta 28 tipos de clima, de los 32 establecidos por Thornthwaite, constituyéndose en un país mega-climático. Las temperaturas máximas calculadas fueron registradas en la estación meteorológica de Junin – Satipo – Satipo, y las mínimas en la estación

meteorológica de Puno – Chucuito – Mazocruz, concluyéndose que para atender todas las condiciones climáticas del Perú, el ligante asfáltico debe tener un PG 70 -22.

Según Brown y Cooley (1999), la tendencia es usar un ligante asfáltico convencional o modificado con grado de desempeño (PG) uno o dos grados arriba de lo recomendado de acuerdo a la temperatura de la región. De esa forma, fueron realizados los ajustes para la selección del ligante asfáltico por nivel de tráfico y velocidad, considerándose un porcentaje de tráfico lento (velocidad media de 20 a 70 km/h) donde el C-SHRP; SUPERPAVE 2000 recomienda incrementar en un nivel el grado de desempeño, tomando en consideración esta recomendación, el ligante asfáltico debe tener un PG 76 -22 para atender las condiciones climáticas y de tráfico del Perú.

Figura 1. Proceso de incorporación del polímero al asfalto



3.2. Programa Laboratorial

3.2.1. Agregados

Los agregados utilizados son de origen basáltico provenientes de la cantera Bandeirantes, localizada en la ciudad de San Carlos – SP. Fueron determinados sus propiedades de origen y conceso. Los resultados de estos parámetros son presentados en la Tabla 2 y 3.

Tabla 2. Propiedades de origen de los agregados

Propiedades	Agregado Mineral		
	Piedra 3/4"	Piedra 1/2"	Arena Chancada
Densidad real	2,876	2,883	2,893
Densidad aparente (superficie seca)	2,767	2,788	2,839
Densidad aparente (superficie saturada)	2,805	2,821	2,857
Absorción (%)	1,37	1,18	0,66
Abrasión (%)	21	23	.-
Durabilidad SO ₄ Mg	9,05	9,55	9,85
Equivalente de arena	.-	.-	87
Materiales contaminantes	.-	.-	.-

Tabla 3. Propiedades de conceso de los agregados

Agregado	AAG (%)	AAF (%)	PPA – 5:1	Contenido de finos	Textura Superficial
Basalto	100	58	3	7,21	rugosa

3.2.2. Ligantes asfálticos

Fueron utilizados tres tipos de ligantes asfálticos:

- Cemento Asfáltico de Petróleo convencional PEN 60/70, proveniente de la Refinería Conchan – Lima – Perú;
- Cemento Asfáltico de Petróleo modificado con polímero SBS (Betutec), proveniente de la empresa Tecnología de Materiales (TDM-Asfaltos) – Perú y;
- Cemento Asfáltico de Petróleo modificado por polímero SBS (PG 76 -22) producido en esta investigación, teniendo como materia prima el cemento asfáltico de petróleo peruano PEN 60/70 y el polímero SBS.

La producción del asfalto modificado para esta investigación fue realizada llevando en consideración el cálculo de grado de desempeño para atender las condiciones meteorológicas y de tráfico propuesto de acuerdo a la recomendación del C-SHRP, fue establecido para el Perú en PG 76 -22 (ESCALANTE, 2007).

El proceso de incorporación de SBS en el asfalto, presentado en la Figura 2, requiere que el CAP utilizado como materia prima tenga una relación asfáltenos/aromáticos para asegurar compatibilidad y estabilidad al almacenamiento.

Figura 2. Proceso de incorporación del polímero al asfalto



Los asfaltos modificados tienen como origen el asfalto producido en la refinería de Conchan (Lima –Perú), con diferencia en la serie de polímero y tecnología utilizada en el proceso de modificación. Los tres ligantes asfálticos fueron caracterizados por el método convencional y Superpave, el asfalto convencional presenta un grado de desempeño PG 64 -22 y los asfaltos modificados con polímero SBS presentan un grado de desempeño PG 76 -22. Los resultados de la caracterización de los asfaltos son presentados en la Tabla 4.

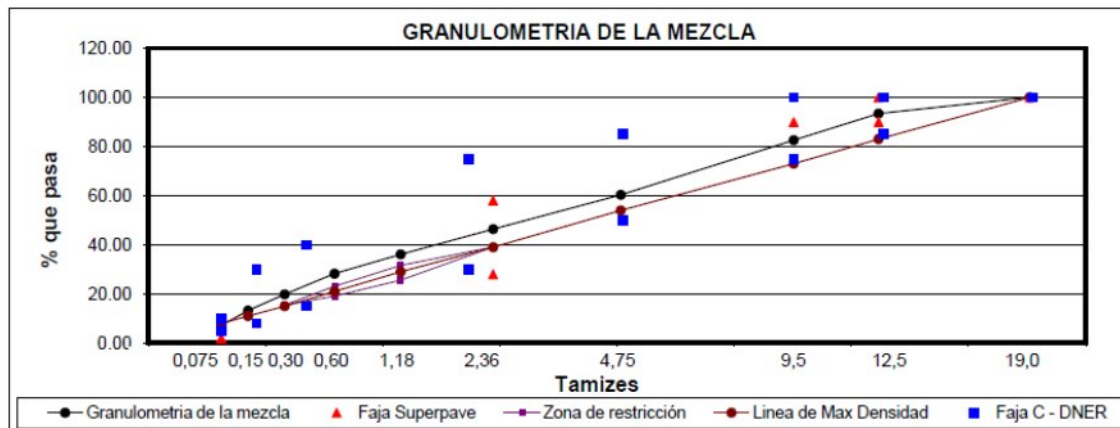
Tabla 4. Características físicas de los ligantes asfálticos utilizados

Características	Und.	Ligante Asfáltico			Métodos	
		PEN 60 / 70	AMP Betutec	AMP PG 76 -22	ABNT	ASTM
Penetración (100 g, 5s, 25°C)	0,1mm	60	49	56	NBR 6576	D 5
Punto de ablandamiento	°C	51	66	68	NBR 6560	D 36
Viscosidad Brookfield a 135°C	cP	455	1383	1089	NBR 15184	D 4402
Viscosidad Brookfield a 155°C	cP	178	485	581	NBR 15184	D 4402
Viscosidad Brookfield a 175°C	cP	81	222	278	NBR 15184	D 4402
Índice de susceptibilidad térmica		-0,5	2,1	2,8		
Punto de inflamación	°C	235	> 240	> 240	NBR 11341	D 92
Recuperación Elástica	%	.-	86	93	NBR-15086	D 6084
Estabilidad al Almacenamiento	°C	.-	0	0	NBR 15166	
Corte dinámico	°C	64	76	76		P 246
G*/senδ ≥ 1 KPa	kPa	1,999	1,598	1,130		P 246
Después de envejecimiento en RTFOT a 163 °C, 85, min						
Variación de masa	%	-0,518	-0,312	-0,304		D 2872
Viscosidad Brookfield a 135°C	cP	949	2535	1943	NBR 15184	D 4402
Viscosidad Brookfield a 155°C	cP	319	774	898	NBR 15184	D 4402
Viscosidad Brookfield a 175°C	cP	134	312	342	NBR 15184	D 4402
Punto de ablandamiento	°C	61	72	73	NBR 6560	D 36
Aumento/Disminución del P. A.	°C	+10	+6	+5		
Penetración	0,1mm	28	34	36	NBR 6576	D 5
Índice de susceptibilidad térmica		-0,1	2,2	2,5		
Penetración retenida	%	47	69	64		
Recuperación Elástica	%	.-	82	89	NBR-15086	D 6084
Corte dinámico	°C	70	76	76		P 246
G*/senδ ≥ 2,2 KPa	kPa	3,343	4,104	3,794		P 246
Después de envejecimiento en RTFOT/PAV						
Corte dinámico G* senδ ≤ 5000 KPa	°C	22	19	19		P 246
Rigidez a la fluencia BBR S ≤ 300MPa y m ≥ 0,3	°C	-22	-22	-22		D 6648

3.2.3. Mezclas Asfálticas

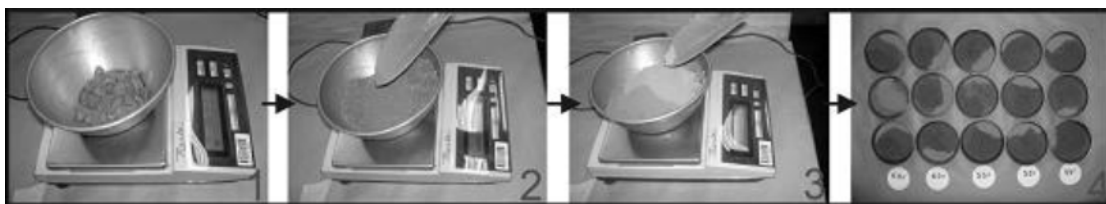
La distribución granulométrica de la mezcla, atiende a los criterios del Superpave para un Diámetro Máximo Nominal de 12,5 mm, pasando entre los puntos de control y encima de la zona de restricción, además de encajarse dentro de la faja C del DNER. Se puede observar, también que la granulometría de la mezcla es casi paralela a la línea de máxima densidad, lo que representa una buena distribución granulométrica de la mezcla. Es importante resaltar que a pesar de haber la recomendación para que la curva pase fuera de la zona de restricción, varios investigadores ya constataron que la zona de restricción no es capaz de prevenir curvas granulométricas con bajo desempeño con respecto a la deformación permanente, recomendando inclusive su eliminación como criterio de desempeño (HAND et al., 2001).

Figura 3. Curva granulométrica de la mezcla



La composición granulométrica de los agregados fue realizada en función de la cantidad necesaria retenida en cada tamiz, la composición de los cuerpos de prueba fue realizada en una balanza con precisión de 0,01g, con la finalidad de tener una mezcla con granulometría estrictamente controlada, procedimiento que fue repetido para todos los cuerpos de prueba utilizados, conforme se presenta en la Figura 4.

Figura 4. Dosificación controlada de agregados para cada cuerpo de prueba



Los contenidos de diseño de ligante asfáltico fueron obtenidos en dos condiciones: sin envejecimiento (DNER-ME 043/95) y con envejecimiento a corto plazo de 2 horas en el horno a la temperatura de compactación (ASTM D 6926/04) llevando en consideración los criterios volumétricos establecidos por el Superpave (4% de volumen de vacíos). Los contenidos de asfalto obtenidos para las mezclas sin envejecimiento fueron de 5,08% para el PEN 60/70, 5,10% para el AMP Betutec y 5,12% para el AMP PG 76 -22, siendo adoptado un contenido de diseño de 5,1% para los tres ligantes asfálticos utilizados. Para mezclas con envejecimiento a corto plazo fueron obtenidos contenidos de 5,76% para el PEN 60/70, 5,79% para el AMP Betutec y 5,82%

para el AMP PG 76 -22, siendo adoptado un contenido de diseño de 5,8% para los tres ligantes asfálticos utilizados.

3.2.4. Moldado de los cuerpos de prueba

Los cuerpos de prueba fueron moldados con el contenido óptimo de diseño calculado para cada condición de envejecimiento y tipo de ligante asfáltico, para realizar los ensayos de fatiga. El proceso de moldado fue realizado sin envejecimiento, con envejecimiento a corto plazo de 2 horas de acuerdo a la ASTM D 6926-04, y con envejecimiento a corto plazo de 4 horas de acuerdo a la AASHTO PP2.

3.2.5. Ensayo de Fatiga por compresión diametral

La vida a la fatiga de un material asfáltico puede ser expresada como el número de aplicaciones de carga necesario para que la mezcla llegue a la ruptura o a un desplazamiento vertical mayor a 6 mm (definido en el laboratorio de carreteras del STT-EESC-USP) bajo determinado estado de tensiones. En el ensayo de fatiga por compresión diametral con tensión controlada, la carga aplicada es mantenida constante y las deformaciones resultantes se incrementan durante la ejecución del ensayo. Consiste en la aplicación de un ciclo de carga con duración de 0,1 segundo, con 0,9 segundos de intervalo, para representar el tiempo de intervalo entre la aplicación de una rueda y otra. En este tipo de ensayo, el cuerpo de prueba está sujeto a un estado bi-axial de tensiones.

Debido a que el ensayo de fatiga en mezclas asfálticas todavía no está normalizado en el Brasil ni en Perú, este fue realizado con base en la literatura brasilera y en la experiencia de centros de investigación, como COPPE/UFRJ y UFRGS.

El ensayo fue realizado por compresión diametral a tensión controlada, aplicándose cargas verticales repetidas de tal forma que las tensiones generadas correspondan a los valores de 20, 30, 40 y 45 % de la resistencia a la tracción (RT).

La diferencia de tensiones ($\Delta\sigma$) y la deformación resiliente (ϵ_i), se calculo con las ecuaciones (1) y (2) respectivamente.

$$\Delta\sigma = \frac{8F}{100.\pi.d.h} \quad (1)$$

$$\epsilon_i = \frac{(\%RT)}{MR} \quad (2)$$

La representación de las curvas de fatiga en un gráfico bi-logarítmico, con los números de sollicitaciones de carga que llevaron a la ruptura del cuerpo de prueba en las ordenadas y las diferencias de tensiones y deformaciones que llevaron a la ruptura en las absisas. La curva de fatiga para el material se determina con las ecuaciones (3) y (4).

$$N = k_1 \left(\frac{1}{\Delta\sigma} \right)^{k_2} \quad (3)$$

$$N = k_3 \left(\frac{1}{\varepsilon_i} \right)^{k_2} \quad (4)$$

Figura 5. Ensayo de Fatiga por compresión diametral.



4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1. Distribución del grado de desempeño de ligantes asfálticos para el Perú

Del análisis de resultados, se puede determinar el grado de desempeño PG de los ligantes asfálticos requeridos en las diferentes regiones del Perú. Para las regiones del litoral, entre 0 y 500 m de altitud, y parte de los valles interandinos hasta 800 m de altitud, los ligantes asfálticos indicados para las condiciones geográficas son el PG 64-10 y PG 70-10.

Para la región de la Sierra, localizadas entre 800 y 4800 m de altitud, con relevo natural muy accidentado por la cordillera de los Andes, con climas variados, temperaturas que dependen de la altitud del local, los ligantes asfálticos indicados son: PG 58-10, PG 58-16, PG 58-22, PG 52-10, PG 52-16, PG 52-22. Siendo que por las condiciones geográficas de la sierra es recomendable utilizar un asfalto con PG 58 -22.

Para la región de la Selva, localizada entre 80 y 1000 m de altitud, la clasificación PG de los ligantes asfálticos está comprendida entre PG 64-10 y PG 70-10.

A todos estos grados de desempeño calculados para las condiciones meteorológicas de las diferentes regiones del Perú se debe hacer los ajustes por velocidad, volumen de tránsito y las características geométricas de la carretera de acuerdo al requerimiento de cada proyecto, de manera a obtener el PG del asfalto para ser utilizado en cada proyecto específico.

4.2. Índice de Susceptibilidad Térmica

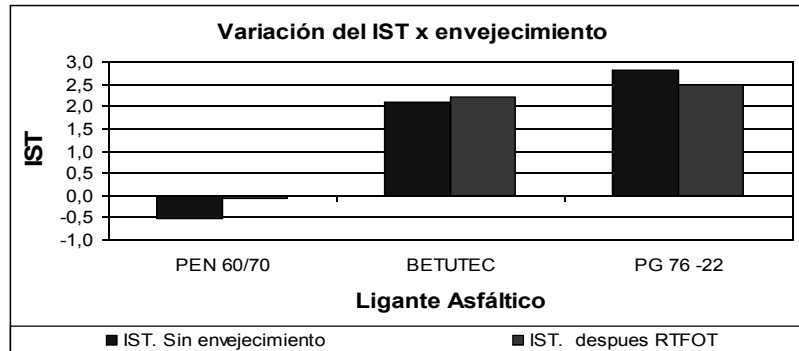
A partir de los datos de índice de susceptibilidad térmica (IST) de las muestras analizadas, se puede concluir que: El asfalto convencional PEN 60/70 presenta un índice de susceptibilidad térmica de -0,5, comprendido en la faja de -1,5 a +0,7 especificada por las normas brasileras para asfalto PEN 50-70, y en la faja de -2 a +2 que corresponde a muestras asfálticas que presentan elasticidad, siendo denominados tipo sol o bitúmenes normales, que son apropiados para los servicios de pavimentación (DE SENÇO, 1997).

Los AMP Betutec y PG 76 -22 presentan índices de susceptibilidad térmica de 2,1 y 2,8 respectivamente. Valores mayores que +2 corresponden a asfaltos poco susceptibles y que

presentan elasticidad, sin embargo valores menores que -2 son relacionados a asfaltos muy susceptibles y con comportamiento viscoso.

El índice de susceptibilidad térmica de los ligantes asfálticos también sufre variación con el envejecimiento, lo que está relacionado con las variaciones sufridas en los ensayos de penetración y punto de ablandamiento después RTFOT. En la figura 6 se presenta la variación del índice de susceptibilidad térmica del ligante sin envejecimiento y después envejecimiento en el RTFOT.

Figura 6. Variación del IST sin envejecimiento y después de envejecimiento en el RTFOT.

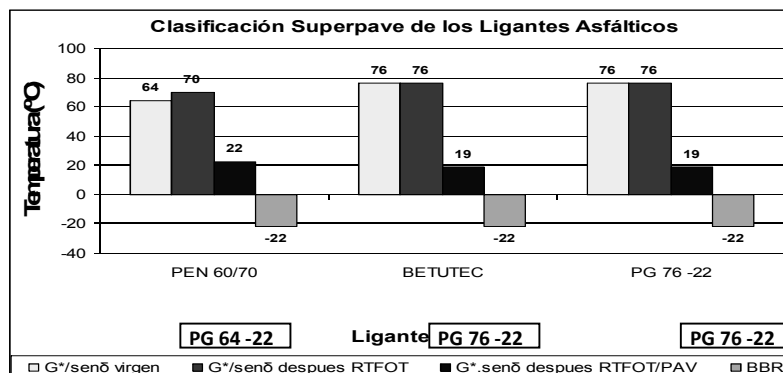


4.3. Grado de desempeño Superpave de los ligantes asfálticos utilizados

El PG del ligante asfáltico se encuentra directamente relacionado con el desempeño de las mezclas asfálticas, (deformación permanente, fisuras por bajas temperaturas y vida a la fatiga), y como fue visto, cada región necesita de un ligante con grado de desempeño capaz de atender sus condiciones meteorológicas y de tráfico.

El PG a altas temperaturas de los asfaltos modificados estudiados (76°C) fue superior al PG del ligante convencional (64°C), lo que quiere decir que los AMP trabajan adecuadamente hasta temperaturas de 76 °C, que permite concluir que el proceso de modificación permitió incrementar el desempeño a altas temperaturas (mayor resistencia a la deformación permanente) de 2 niveles de la clasificación Superpave.

Figura 7. Clasificación Superpave de los ligantes asfálticos utilizados.



Ese salto en el desempeño califica, a principio, estos materiales para uso en las regiones más calientes de la costa y selva peruana, que requieren ese PG obtenido, lo que no se sería posible atender con el CAP convencional PEN 60/70.

4.4. Ensayo de vida a la fatiga

La vida a la fatiga fue determinada através del ensayo de compresión diametral bajo tensión controlada y el criterio de falla fue, la ruptura propiamente dicha o un desplazamiento vertical acumulado del cuerpo-de-prueba de 6 mm. La vida a la fatiga es expresada en función de la diferencia de tensiones ($\Delta\sigma$), entre la tensión de tracción y de compresión, y en función del parámetro de deformación resiliente (ϵ_i), calculado através de las expresiones (1 y 2).

Con base en los resultados de los ensayos fueron generados los modelos de fatiga en función de la diferencia de tensiones y de la deformación resiliente calculada para los tres asfaltos utilizados y para todas las condiciones de envejecimiento. La tabla 5 muestra los modelos de fatiga obtenidos a partir de los ensayos en los tres ligantes asfálticos para todas las condiciones de envejecimiento.

Tabla 5. Modelos de fatiga para todas las condiciones de envejecimiento.

Asfalto	Sin envejecimiento	Con 2 horas de envejecimiento	Con 4 horas de envejecimiento
PEN 60/70	$N=3490,8(1/\Delta\sigma)^{4,2683}$	$N=26600(1/\Delta\sigma)^{4,1743}$	$N=82292(1/\Delta\sigma)^{4,8964}$
	$N=6,0 \times 10^{-14}(1/\epsilon_i)^{4,2683}$	$N=5,0 \times 10^{-14}(1/\epsilon_i)^{4,1743}$	$N=4,0 \times 10^{-17}(1/\epsilon_i)^{4,8964}$
AMP Betutec	$N=12779(1/\Delta\sigma)^{4,6417}$	$N=158831(1/\Delta\sigma)^{5,2113}$	$N=458010(1/\Delta\sigma)^{5,9932}$
	$N=5,0 \times 10^{-15}(1/\epsilon_i)^{4,6417}$	$N=5,0 \times 10^{-18}(1/\epsilon_i)^{5,2113}$	$N=2,0 \times 10^{-21}(1/\epsilon_i)^{5,9932}$
AMP PG 76 -22	$N=16924(1/\Delta\sigma)^{4,0476}$	$N=395175(1/\Delta\sigma)^{4,9262}$	$N=116237(1/\Delta\sigma)^{4,4286}$
	$N=4,0 \times 10^{-13}(1/\epsilon_i)^{4,0476}$	$N=7,0 \times 10^{-17}(1/\epsilon_i)^{4,9262}$	$N=7,0 \times 10^{-15}(1/\epsilon_i)^{4,4286}$

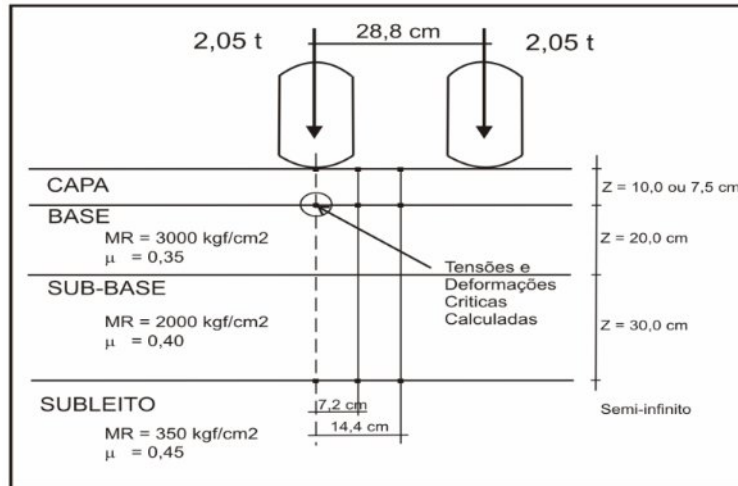
4.6. Análisis Mecánica de la influencia del tipo de ligante y del envejecimiento a corto plazo en la vida a la fatiga

Fue realizado un análisis estructural con el objetivo de comparar el comportamiento de las mezclas con relación a la vida a la fatiga, con la ayuda del programa computacional ELSYM5 (Elastic Layered System 5), que determina las tensiones, los desplazamientos y las deformaciones en una estructura de pavimento constituido por hasta cinco capas elástico-lineales, bajo una condición de carga pré-establecida.

Para fines de comparación, se hizo necesario el estudio de comportamiento de las mezclas a partir de un mismo referencial, para lo cual fue primeramente realizado los ensayos de modulo de resiliencia (MR) para todas las condiciones de envejecimiento y fue asumida una estructura de pavimento muy utilizada en vías de alto volumen de tránsito en el Perú. A partir de estas estructuras de pavimentos (Figura 8) fueron calculadas las tensiones y deformaciones de tracción en las fibras inferiores del revestimiento.

En la tabla 6 se presentan los resultados de los análisis mecanísticos y el número de solicitaciones admisibles o vida a la fatiga para los tres ligantes asfálticos, para cada condición de envejecimiento, para una estructura de pavimento con un espesor de carpeta asfáltica de 10cm.

Figura 8. Perfil utilizado, características y localización del punto de tensiones y deformaciones más críticas.



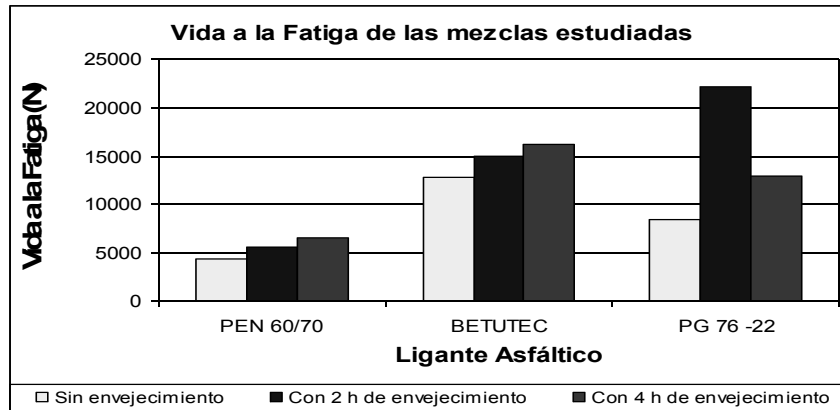
Considerando la misma estructura propuesta para todas las mezclas asfálticas estudiadas, se puede analizar comparativamente la influencia del ligante asfáltico a la vida a la fatiga estimada, para cada condición de envejecimiento.

Tabla 6. Vida a la fatiga de las mezclas asfálticas para cada condición de envejecimiento.

Condición	Modelo	MR (kgf/cm ²)	$\Delta\sigma$ (Mpa)	N
Ligante Asfáltico: PEN 60/70				
Sin envejecimiento	$N=3490,8(1/\Delta\sigma)^{4,2683}$	21353	0,8383	7411
Con 2 h. de envejecimiento	$N=26600(1/\Delta\sigma)^{4,1743}$	44229	12,288	11255
Con 4 h. de envejecimiento	$N=82292(1/\Delta\sigma)^{4,8964}$	57502	13,991	15894
Ligante Asfáltico: AMP Betutec				
Sin envejecimiento	$N=12779(1/\Delta\sigma)^{4,6417}$	23348	0,880	23131
Con 2 h. de envejecimiento	$N=158831(1/\Delta\sigma)^{5,2113}$	51058	13,204	37317
Con 4 h. de envejecimiento	$N=458010(1/\Delta\sigma)^{5,9932}$	61893	14,491	49588
Ligante Asfáltico: AMP PG 76 -22				
Sin envejecimiento	$N=16924(1/\Delta\sigma)^{4,0476}$	31194	10,273	15176
Con 2 h. de envejecimiento	$N=395175(1/\Delta\sigma)^{4,9262}$	65249	14,856	56230
Con 4 h. de envejecimiento	$N=116237(1/\Delta\sigma)^{4,4286}$	55213	13,719	28655

En las mezclas sin envejecimiento, los AMP presentaron vidas a la fatiga de dos a tres veces más que el PEN 60/70, en las mezclas con dos horas de envejecimiento, los AMP presentaron vidas de fatiga de tres a cinco veces más que el asfalto convencional y en las mezclas con 4 horas de envejecimiento, también los AMP presentaron vidas de fatiga superiores, demostrándose así que los AMP tienen mejor comportamiento que los asfaltos convencionales, proporcionando mayores vidas a la fatiga para las tres condiciones estudiadas, como se puede observar en la Figura 9.

Figura 9. Vida a la fatiga de las mezclas asfálticas estudiadas.



5. CONCLUSIONES

- Fue determinado el mapa de distribución del grado de desempeño PG para las diferentes regiones del Perú, el mismo que debe ser constantemente actualizado con la base de datos de las estaciones meteorológicas.
- Del mapa de distribución del grado de desempeño PG se pudo concluir que sin considerar los efectos de la velocidad y volumen de tráfico, a fin de atender solo las cuestiones meteorológicas para la región de la sierra es necesario utilizar un ligante asfáltico con PG 58-22, entretanto que para las regiones de la Costa y Selva un ligante asfáltico con PG 70-10, a estos valores debe realizarse los ajustes correspondientes (velocidad y volumen de tránsito) de acuerdo al requerimiento específico de cada proyecto.
- Los ligantes asfálticos modificados por polímero presentaron mejor comportamiento que el ligante asfáltico convencional, presentando bajo índice de susceptibilidad térmica, mayor grado de desempeño PG y mayor resistencia al envejecimiento.
- El control riguroso de la granulometría, utilizando todas las mallas especificadas por el Superpave, resultó en excelente repetibilidad, tanto en la determinación de las características volumétricas de los cuerpos de prueba, como en los resultados de los ensayos mecánicos, para todas las condiciones de envejecimiento;
- Los resultados del ensayo de fatiga y el análisis mecanístico mostraron que los asfaltos modificados por polímeros presentaron vidas de fatiga mayores que el asfalto convencional PEN 60/70, para todas las condiciones de envejecimiento, variables entre 200% a 500% en función de la condición de envejecimiento, siendo que los mayores valores de vida a la fatiga fueron observados para mezclas con dos horas de envejecimiento. Se debe aclarar que el objetivo de esta investigación fue comparar el desempeño de las mezclas asfálticas a la luz de los resultados de ensayos de laboratorio, es decir, los modelos de fatiga presentados no deben ser utilizados para la previsión de la vida a la fatiga de las mezclas en servicio, debido a la falta de ajuste laboratorio/campo;

6. REFERENCIAS

- Bosscher P. (2000) Relationship between pavement temperature and weather data. Transportation Research Board, Washington, D.C. Proceedings TRB Annual Meeting.
- BROWN, E. R., COOLEY JR, L. A. (1999) Designing Stone Matrix Asphalt Mixtures for Rut-Resistant Pavements. Part 1: Summary of Research Results, Part 2: Mixture Design Method, Construction Guidelines, and Quality Control/Quality Assurance Procedures. NCHRP Report 425. National Cooperative Highway Research Program, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C., EUA.
- DE SENÇO, Wlastermiller. (1997) Manual de técnicas de pavimentação. Editora PINI Ltda 746 p.
- ESCALANTE, J. R. (2007) Avaliação de misturas produzidas com ligantes asfálticos peruanos convencional PEN 60/70 e modificados por polímero SBS tipo I 60/60 e PG 76-22. Dissertação de mestrado. EESC/USP, São Carlos, SP.
- HAND, A.J., STIADY, J.L., WHITE, T.D. et al. (2001) Gradation effects on hot-mix asphalt performance. In: Journal of the Transportation Research Board. National Academy Press. Asphalt Mixtures, 2001, no. 1767, pp 152-157.
- LTPP-FWHA, 1998 LTPP Data Analysis: Improved Low Pavement Temperature Prediction, U.S. Department of transportation Federal Highway Administration, June 1998, FHWA RD-97-104.
- McGennis R.B., Anderson T.M., Kennedy T.W., Solaimanian, M. (1994) Background of Superpave asphalt mixture design and analysis - Report FHWA-SA-95-003.
- Mohseni A. (1996) LTPP Seasonal AC pavement temperature models (SATP) - Federal Highway Administration.
- Mohseni, A. e Carpenter S. (2004) Development of enhanced algorithm for Superpave High Temperature Performance Grade (PG) Selection and New Software Version - Long-Term Pavement Performance Group, Federal Highway Administration.
- MOTTA, L. M. G., TONIAL, I., LEITE, L. F., CONSTANTINO R. S. (1996), Princípios do Projeto e Análise Superpave de Misturas Asfálticas. Traducción comentada: Background of SUPERPAVE Asphalt Mixture Design and Analysis, nº FHWA-SA-95-003, Petrobrás, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- ROBERTS, F. L.; KANDHAL, P. S.; BROWN, E. R; LEE, D.Y.; KENNEDY, T. W. (1991) Hot mix asphalt materials, mixture design and construction. 1 ed., NAPA Research and Education Foundation, National Center for Asphalt Technology -NCAT, Lanham, Maryland, USA.