

Efecto de la viscosidad del ligante asfáltico sobre las propiedades de la mezcla asfáltica

Ing. Laura Ramirez, Ing. Pedro Castro, MSc. MBA.
Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales
Universidad de Costa Rica

Informe parcial de resultados

1. Introducción

El objetivo de este estudio es determinar qué propiedades de la mezcla asfáltica se ven afectadas por un cambio en la consistencia del ligante asfáltico, con el fin de obtener un criterio técnico para valorar el uso de un ligante de consistencia mayor a la usada en las obras de pavimentación en Costa Rica (AC-20).

El estudio abarca el uso de mezclas densas producidas en laboratorio con tres distintas fuentes de agregado, tres distintas granulometrías y dos ligantes con distintos grados de consistencia. Ninguno de los dos ligantes fue modificado con polímeros.

El esquema experimental planteado para el desarrollo del estudio se muestra en la Figura 1.

2. Resultados obtenidos

2.1 Ligante Asfáltico

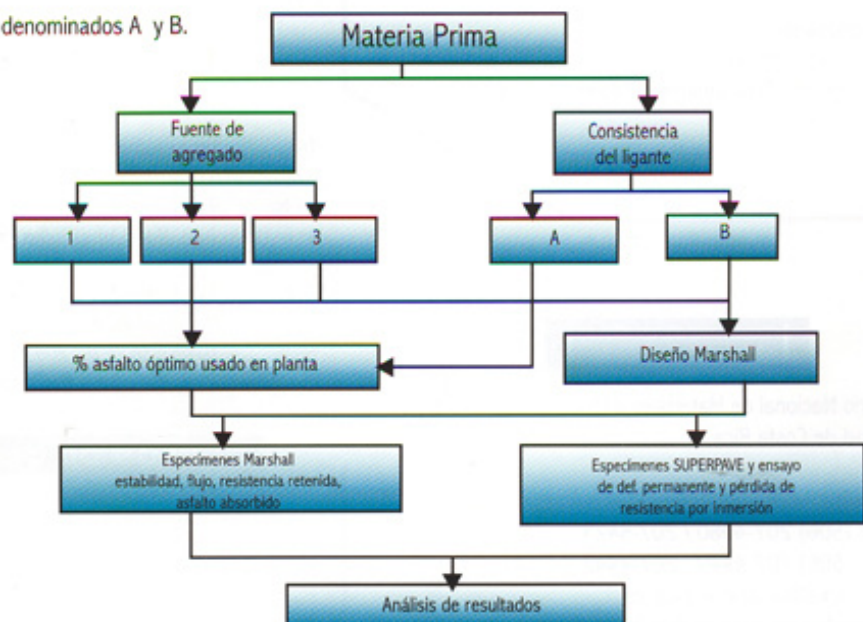
2.1.1 Propiedades físico-químicas

El estudio contempla el uso de dos ligantes, denominados A y B.

El ligante B presenta una mayor consistencia en comparación con el ligante A. Ambos ligantes fueron procesados a partir del mismo crudo. En la Tabla 1 se presentan las propiedades físico-químicas de los ligantes.

Ambos ligantes presentan características físico-químicas muy similares. Analizando los parámetros de pureza, seguridad, susceptibilidad al envejecimiento y susceptibilidad térmica, ambos ligantes presentan semejanza en cuanto a puntos de chispa y solubilidad en tricloroetileno, índice de susceptibilidad térmica (VTS) y razón de viscosidades, cumpliendo con lo establecido en el Reglamento Técnico NCR 248:1997 (normativa para ligantes asfálticos en Costa Rica). Las mayores diferencias se presentan en la gravedad específica a 25°C, donde se evidencia un mayor peso del ligante A (el de menor consistencia). En cuanto a la pérdida de masa, tanto en el horno rotatorio de película delgada (TFO) como en el horno rotatorio vertical de película delgada (RTFO), el ligante B, el de mayor consistencia, presenta menores pérdidas por

Figura 1. Esquema experimental



calentamiento, lo cual evidencia un menor contenido de volátiles en comparación con el ligante A.

Los parámetros de consistencia comprueban que el ligante A es más blando a todas las temperaturas ensayadas, tanto en condición original como en condición envejecida. Las temperaturas de mezclado y compactación son mayores para el ligante B, como consecuencia de ser un ligante más consistente. En la Tabla 2 se presentan las temperaturas de mezclado y compactación para ambos ligantes.

2.1.2 Propiedades reológicas

En la Tabla 3 se presenta la caracterización reológica de ambos ligantes, basada en la metodología de ensayo SUPERPAVE para la determinación del grado de desempeño.

Evaluando el parámetro de resistencia a la deformación plástica ($G^*/sen\delta$), el cual, según los criterios establecidos por SUPERPAVE, debe ser mayor o igual a 1.00 kPa en condición original, y de 2.20 kPa o más para la condición envejecida en RTFO, a altas temperaturas de desempeño; se ha encontrado que, tanto para la condición original como para la condición envejecida en RTFO, el ligante B evidencia una mayor resistencia a la deformación en comparación con el ligante A. El ligante A, sin embargo, presenta menores ángulos de fase a altas temperaturas de desempeño, lo cual está relacionado con una mayor componente elástica (en comparación con la componente viscosa), al menos en dicho rango de temperatura.

Para el parámetro de tendencia al agrietamiento por fatiga ($G^*/sen\delta$), la metodología SUPERPAVE establece como criterio de aceptación un máximo de 5000 kPa, en condición envejecida en el dispositivo de envejecimiento a presión (PAV). Se observa, en la Tabla 3, como el ligante A, a temperaturas medias de desempeño, tiene una menor tendencia al agrietamiento por fatiga en comparación con el ligante B.

El ligante B presenta una mayor resistencia a la deformación plástica pues su temperatura máxima de desempeño es de exactamente 69.2°C, 1.3°C mayor a la temperatura máxima de desempeño del ligante A (67.9°C). A su vez, el ligante A presenta una menor tendencia al agrietamiento por fatiga, ya que

su temperatura intermedia de desempeño es de exactamente 16.2°C, 1.8°C menor a la temperatura intermedia del ligante B (18.0°C).

Según la clasificación por grado de desempeño de SUPERPAVE, ambos ligantes clasifican como PG 64 (19), donde 64 representa la temperatura máxima a la cual ambos ligantes tendrán un desempeño suficientemente rígido y elástico como para no contribuir significativamente con la deformación plástica de la mezcla asfáltica.

Tabla 1: Propiedades fisico-químicas de los ligantes A y B

Propiedad	Unidad	Ligante A	Ligante B
Parámetros de pureza y seguridad			
Punto de chispa	°C	255	276
Solubilidad en tricloroetileno	%	99.97	99.99
Pérdida de masa en RTFO	%	0.69	0.61
Pérdida de masa en TFO	%	0.55	0.42
Gravedad específica a 25°C	-	1.037	1.021
Parámetros de consistencia			
Penetración a 25°C	1/10 mm	80	61
Viscosidad absoluta a 60°C	Poise	2411	3041
Viscosidad absoluta a 125°C	cSt	844	1033
Viscosidad cinemática a 135°C	cSt	488	578
Viscosidad cinemática a 145°C	cSt	308	332
Viscosidad absoluta a 60°C TFO	Poise	5952	7283
Parámetros de susceptibilidad al envejecimiento y susceptibilidad térmica			
Índice de susceptibilidad térmica VTS	-	3.37	3.41
Razón de viscosidades	-	2.47	2.39

Tabla 2: Temperaturas de mezclado y compactación

Ligante	Temperatura de mezclado		Temperatura de compactación	
	Mínima (°C)	Máxima (°C)	Mínima (°C)	Máxima (°C)
A	143	147	152	157
B	145	149	155	160

Tabla 3: Propiedades reológicas

Ensayo	Unidad	Temperatura	Ligante A	Ligante B
Parámetro de resistencia a la deformación plástica				
$G^*/sen\delta$ (original)	kPa	82°C	0.227	0.248
		70°C	0.708	0.829
		58°C	3.054	4.045
Angulo de fase (original)	°	82°C	87.7	87.9
		70°C	86.3	86.1
		58°C	81.7	82.7
$G^*/sen\delta$ (RTFO)	kPa	82°C	0.532	0.607
		70°C	1.883	2.221
		58°C	7.985	10.918
Angulo de fase (RTFO)	°	82°C	84.2	85.5
		70°C	80.9	82.3
		58°C	75.8	77.6
Parámetro de tendencia al agrietamiento por fatiga				
$G^*/sen\delta$ (PAV)	kPa	28°C	1270	1612
		22°C	2497	3131
		16°C	5152	6367
Angulo de fase (PAV)	°	28°C	52.3	52.0
		22°C	48.0	47.1
		16°C	44.5	42.5

Dicha temperatura (64°C) se define como la máxima temperatura a la cual, tanto la condición original como la condición envejecida en RTFO, cumplen con los requisitos mínimos estandarizados para la resistencia a la deformación plástica. El 19 representa la temperatura intermedia de desempeño (19°C), la cual corresponde a la temperatura mínima a la cual el ligante envejecido en PAV cumple con el requisito máximo de tendencia al agrietamiento por fatiga; se considera que a temperaturas inferiores el ligante asfáltico se comporta demasiado frágil a la fatiga, contribuyendo al agrietamiento de la capa asfáltica.

La similitud en grado de desempeño entre ambos ligantes aplica a considerar los grados normados. Debido a que las diferencias de desempeño para ambos ligantes, tanto por fatiga como por deformación plástica, son marginales, les corresponde el mismo grado normado, a saber PG 64(19).

2.2 Mezcla asfáltica

Para la elaboración de mezcla asfáltica se usaron los ligantes A y B con tres distintas fuentes de agregado, denominadas en este estudio fuente 1, fuente 2 y fuente 3. Las fuentes 1 y 2 provienen de la zona de Guápiles (este del país, costa caribeña) y la fuente 3 de la Región Central. Todas las fuentes son aplicadas regularmente en las obras de pavimentación de Costa Rica.



Fuente	Absorción asfalto (% PTM)	
	Ligante A	Ligante B
1	1.03	0.86
2	1.13	1.30
3	(*)	(*)

Tabla 4. Porcentajes de absorción de asfalto

Tabla 5: Valores promedio de los parámetros Marshall

Fuente	% asfalto (PTM)	Ligante asfáltico	Gmb	Gmm	VTM (%)	Estabilidad (kg)	Flujo (1/10 mm)
2	5.50	A	2.338	2.483	5.8	1506	30
		B	2.348	2.491	5.7	1675	31
	6.00	A	2.360	2.476	4.7	1500	27
		B	2.367	2.481	4.6	1773	30
	6.50	A	2.370	2.439	2.8	1438	31
		B	2.388	2.465	3.1	1696	30
3	6.00	A	2.275	2.425	5.5	1318	35
		B	2.286	2.419	5.5	1328	38
	6.50	A	2.284	2.394	4.6	1344	36
		B	2.285	2.399	4.8	1350	39
	7.00	A	2.277	2.394	4.9	1294	35
		B	2.295	2.399	4.4	1310	48

Nota: Resultados para la fuente 1 no disponibles aún.

2.2.1 Absorción de asfalto

En la Tabla 4 se presentan los porcentajes de absorción de asfalto para las distintas fuentes.

De la Tabla 4 se observa como no existe un patrón definido en cuanto a la absorción de asfalto, ya que en un caso (fuente 2) el ligante B, de mayor consistencia, determina un aumento en este parámetro, mientras que en otro caso (fuente 1) hay una disminución en comparación con la absorción del ligante A, el de menor consistencia. Este comportamiento evidencia que la composición química de los ligantes y la mineralogía de las fuentes usadas son parámetros más relevantes en la absorción de asfalto, que la consistencia del ligante.

2.2.2 Variación de parámetros Marshall respecto a cambios en el contenido de asfalto

Se prepararon especímenes Marshall con los mismos contenidos de asfalto para ambos ligantes, A y B, para analizar estadísticamente el efecto de un cambio en la consistencia del ligante sobre las propiedades Marshall. Los resultados Marshall se muestran en la Tabla 5 y en la Tabla 6 se presentan los resultados del análisis estadístico (ANOVA).

Fuente	Gmb			Estabilidad			Flujo		
	Consistencia	Contenido	Interacción	Consistencia	Contenido	Interacción	Consistencia	Contenido	Interacción
2	Si	Si	Si	Si	Si	No	No	No	No
3	Si	No	No	No	No	No	Si	Si	No

Tabla 6. Resultado de ANOVA considerando los factores contenido y consistencia del ligante. Se indica la significancia de los factores experimentales a un 85% de confianza

Para el análisis estadístico se tomaron en cuenta dos factores experimentales: la consistencia del ligante asfáltico y el contenido de asfalto, y además se consideró la interacción entre ambos factores. El factor consistencia del ligante asfáltico tiene dos niveles (2 ligantes) mientras que el factor contenido de asfalto tiene 3 niveles (3 contenidos de asfalto). Cada fuente de agregado se analizó por separado mediante un análisis de varianza.

De los resultados de estos análisis se determinó lo siguiente, para este estudio:

- Un cambio en el ligante determina un cambio significativo en el parámetro de gravedad específica bruta (Gmb) y por lo tanto los vacíos de aire se ven modificados.
- Para las mezclas producidas con la fuente de agregado 3, un cambio en el ligante determina cambios significativos en el parámetro de flujo. Esto evidencia que en este caso, el efecto del cambio de ligante en el parámetro flujo depende de la fuente de agregado, es decir de la mineralogía y la absorción selectiva de componentes del ligante.
- Para las mezclas producidas con la fuente de agregado 2, un cambio en el ligante determina cambios significativos en el parámetro de estabilidad. Esto evidencia que en este caso, el efecto del cambio de ligante en el parámetro estabilidad depende de la fuente de agregado.

2.2.3 Comparación de propiedades con el contenido óptimo de asfalto

Para comparar mezclas con volumetría semejante (al menos en porcentaje de vacíos en la mezcla), se elaboraron especímenes Marshall con los porcentajes óptimos de asfalto obtenidos del diseño, usando las tres fuentes de agregado (1, 2 y 3) y los dos ligantes (A y B).

En la Tabla 7 se presentan los porcentajes óptimos de asfalto, por peso total de mezcla, obtenidos a partir del diseño Marshall.

Fuente	% óptimo de asfalto	Ligante	Gmb	Gmm	VIM (%)	Estabilidad (kg)	Flujo (1/10 mm)
1	5.6	A	2.388	2.491	4.1	1965	24
	5.3	B	2.372	2.494	4.9	2407	25
2	6.1	A	2.361	2.464	4.2	1445	33
	6.1	B	2.356	2.467	4.5	1629	33
3	7.0	A	2.304	2.408	4.3	1243	38
	7.3	B	2.292	2.388	4.0	1334	36

Nuevamente se observa como la mineralogía de la fuente y la composición química del ligante tienen una mayor relevancia que la consistencia del ligante, ya que usando el ligante B (de mayor consistencia) y la fuente de agregado 1, el porcentaje óptimo de asfalto disminuyó; mientras que con el mismo ligante, pero aplicando la fuente de agregado 3, el porcentaje óptimo de asfalto aumentó en comparación con el porcentaje obtenido con el ligante A.

En la Tabla 8 se presentan los promedios de los parámetros Marshall obtenidos a partir de los porcentajes óptimos de asfalto, y en la Tabla 9 se presentan los resultados del análisis estadístico, considerando dos factores experimentales: consistencia del ligante y la fuente de agregado y, además, la interacción entre ambos factores. Obsérvese que se ha tomado en cuenta el factor fuente de agregado en vista de la importancia relativa de la mineralogía y absorción selectiva del agregado.

De los resultados de estos análisis se determinó lo siguiente, para este estudio:

- El parámetro estabilidad depende de la fuente de agregado, la consistencia del ligante y la interacción entre ambos factores (efecto de absorción selectiva, por ejemplo).
- Los parámetros de flujo y gravedad específica bruta (Gmb) sólo dependen de la fuente de agregado. La consistencia y la interacción entre estos factores no determinan cambios significativos en estos parámetros.

Según los resultados obtenidos del análisis estadístico, las propiedades de las fuentes tienen una mayor relevancia que la consistencia de los ligantes. Cabe aclarar que cuando se considera la fuente, también

Fuente	% PTM	
	Ligante A	Ligante B
1	5.3	5.0
2	5.7	5.7
3	6.5	6.8

Tabla 7. Porcentajes óptimos de asfalto por peso total de mezcla

Tabla 8. Valores promedio de parámetros Marshall para condiciones similares de volumetría

Tabla 9. Resultado de ANOVA considerando factores fuente de agregado y consistencia del ligante. Similar contenido de vacíos. Se indica la significancia de los factores experimentales a un 90% de confianza

Parámetro	Factor experimental		
	Fuente	Consistencia	Interacción
Estabilidad	Sí	Sí	Sí
Flujo	Sí	No	No
Gmb	Sí	No	No

se está considerando la estructura granulométrica de la mezcla (en todos los casos se trabajó con mezclas densas, pero no iguales granulometrías).

2.2.4 Deformación plástica simulada con ensayo de pista a escala de laboratorio

Con el fin de evaluar la resistencia a la deformación plástica en mezclas producidas con distintas fuentes de agregado (1, 2 y 3) y distintos ligantes (A y B), se elaboraron especímenes de ensayo de 15 cm de diámetro, 7.5 cm de espesor y vacíos de $7 \pm 1\%$, para ser ensayados en la pista de ensayo de Georgia (Asphalt Pavement Analyzer). Los resultados de la prueba se muestran en la Tabla 10. Por medio de un análisis de varianza, se evaluó la significancia de los resultados obtenidos. El análisis contempla dos factores experimentales: la consistencia del ligante y la fuente del agregado, y la interacción entre ambos factores. Los resultados del análisis se muestran en la Tabla 11.

Según el análisis estadístico, para este estudio en particular, la fuente de agregado (incluyéndose en este factor la granulometría) produce un cambio significativo en la deformación plástica. No hay evidencia, al 90% de confianza, que la consistencia del ligante asfáltico o la interacción entre la consistencia y la fuente de agregado produzcan cambios significativos en este parámetro.

2.2.5 Susceptibilidad a la pérdida de resistencia por inmersión

Para complementar la valoración de desempeño para la mezcla asfáltica con diferentes ligantes, se realizaron pruebas para evaluar la susceptibilidad al daño por humedad, mediante los ensayos de resistencia retenida tanto a tensión diametral como a compresión uniaxial. Los resultados se muestran en la Tabla 12.

Al igual que en los casos anteriores, no se pueden obtener conclusiones generalizadas en cuanto al beneficio o perjuicio del uso de un ligante de mayor consistencia, porque, para la fuente de agregado evaluada, en el ensayo de tensión diametral, la resistencia retenida aumenta con el uso de un ligante más consistente (ligante B), sin embargo ocurre lo contrario en el ensayo de compresión uniaxial, donde el uso del ligante de mayor consistencia provoca una disminución de la resistencia retenida, lo que sugiere que las propiedades del agregado son de mayor relevancia en cuanto a desempeño simulado, que un cambio en la consistencia del ligante asfáltico.

Ligante	Deformación (mm)					
	Fuente 1		Fuente 2		Fuente 3	
	Promedio	Desv. Est.	Promedio	Desv. Est.	Promedio	Desv. Est.
A	3.5	0.3	4.0	0.4	5.7	0.4
B	4.6	0.7	3.9	0.8	6.3	0.9

Tabla 10. Deformaciones promedio con APA

Parámetro	Factores experimentales significativos		
	Consistencia	Fuente	Interacción
Deformación luego de 8000 repeticiones	No	Sí	No

Tabla 11. Resultado de ANOVA para ensayo de deformabilidad. Se indica la significancia de los factores experimentales a un 90% de confianza

Propiedad	Ligante A	Ligante B
Tensión diametral		
Resistencia no condicionada	1.3 Mpa	1.3 Mpa
Resistencia condicionada	1.0 MPa	1.1 MPa
Resistencia retenida	79%	85%
Compresión uniaxial		
Resistencia no condicionada	3.7 MPa	5.4MPa
Resistencia condicionada	2.7 MPa	3.6 MPa
Resistencia retenida	72%	66%

Tabla 12. Resultados de ensayos de susceptibilidad al daño por humedad (*)

(*) Resultados para la fuente de agregado 1. Los resultados para las fuentes 2 y 3 aún no están disponibles.

3. Conclusiones

Las siguientes son las conclusiones preliminares del estudio. Recuérdese que el ligante A es menos consistente en comparación con el ligante B.

3.1 Ligante asfáltico

* Los ligantes evaluados, A y B, presentan características físico-químicas muy similares, encontrándose diferencias un poco más marcadas en el contenido de volátiles y la gravedad específica a 25°C.

* La diferencia en el contenido de volátiles (menor cantidad en el ligante B) no determina una diferencia significativa en susceptibilidad térmica, ni en susceptibilidad al envejecimiento.

* Al presentar el ligante B una mayor consistencia a todas las temperaturas evaluadas, la compactación debe realizarse a temperaturas y energías mayores a las requeridas para un ligante de menor consistencia. En este sentido, el proceso de producción, colocación y construcción se torna aún más crítico en el caso del ligante B.

* En cuanto a las propiedades reológicas, ambos ligantes clasifican como PG 64 (19), sin embargo el ligante B presenta una marginal mayor resistencia a la deformación plástica mientras que el ligante A presenta una marginal menor tendencia al agrietamiento por fatiga. Hay que considerar que la resistencia a la deformación plástica en mezclas asfálticas depende más de la estructura granulométrica que del ligante, más aún cuando los ligantes no han sido modificados con polímeros. En cuanto a la tendencia al agrietamiento por fatiga, debe considerarse que el agregado, el paquete estructural y el espesor de la capa asfáltica también influyen.

3.2 Mezcla asfáltica

* La composición química del ligante y la mineralogía del agregado evidencian tener una mayor influencia en el cambio de algunos parámetros como: la absorción de asfalto (el cual influye directamente en el porcentaje óptimo de diseño), la estabilidad y el flujo; que el cambio en la consistencia del ligante.

* Hay evidencia estadística de que un cambio en la fuente de agregado (incluida aquí la mineralogía, propiedades físico-mecánicas y estructura granulométrica) provoca cambios significativos en la deformación plástica, no así un cambio en la consistencia del ligante.

* El cambio en la consistencia del ligante no parece determinar una tendencia definida en los resultados de susceptibilidad al daño por humedad.

Este estudio, está siendo complementado con ensayos adicionales, de manera que en una posterior entrega, se formularán conclusiones definitivas.

3.3 Limitaciones

El proyecto de investigación base de este artículo aún no ha concluido; los resultados presentados serán posteriormente complementados con ensayos adicionales.

Este estudio se refiere a los dos tipos de ligantes valorados, por interés estratégico para las actividades de pavimentación en Costa Rica.

Considérese que el cambio en consistencia no es drástico, sino más bien marginal.

Referencias

1. Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales. Análisis comparativo en laboratorio de asfaltos de diferente viscosidad. Informe de avance No.1. Octubre 2002.
2. Instituto del Asfalto: Especificaciones y pruebas Superpave para ligantes asfálticos clasificados por grado de desempeño SP1. Editorial Instituto del Asfalto. EUA. 1994.
3. Cody, Ronald; Smith, Jeffrey. Estadística aplicada y programación en lenguaje SAS. Editorial Prentice Hall. 3a Edición. 1994.
4. Roberts, Freddy. Materiales para mezclas asfálticas en caliente, diseño de mezcla y construcción. Editorial NAPA. 1a Edición. EUA. 1994.

