

Evaluación estadística de métodos para determinar el contenido de asfalto y la granulometría de mezclas asfálticas

Ing. Pedro Castro Fernández, MSCE., MBA
Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales
Universidad de Costa Rica

1. Introducción

El propósito de este estudio es valorar la exactitud y la precisión de diversas técnicas de laboratorio empleadas para la determinación del contenido de asfalto y granulometría en mezclas de concreto asfáltico. Se fundamenta en la necesidad de establecer elementos de comparación para las diversas técnicas disponibles actualmente (con diferencias de tiempo de ensayo, costo y proceso), lo cual es particularmente relevante cuando se cuenta con varias fuentes de información de laboratorio que procuran describir la misma población de interés (un lote de producción de mezcla asfáltica sujeto a aceptación y pago), caso por ejemplo del contraste de resultados de control (contratista) y verificación de calidad (contratante).

El estudio se basa en la evaluación de tres fuentes de agregado de distinta mineralogía y representativas de la materia prima aplicada en la producción de mezcla asfáltica en Costa Rica, dos curvas granulométricas (de acuerdo con las especificaciones costarricenses) y tres contenidos de asfalto. El tipo de ligante asfáltico usado es una constante, y corresponde a AC-20

(una misma muestra).

La Tabla 1 ilustra los escenarios de combinación para los diversos factores de estudio.

2. Métodos para la determinación del contenido de asfalto y la obtención de agregado residual para granulometría

Este estudio comprende la aplicación de cuatro métodos para la determinación de las proporciones de materia prima en la mezcla asfáltica, a saber:

- Métodos de separación con solventes: a) reflujó y b) ignición.
- Método de incineración, en horno de combustión de ligante asfáltico.
- Método de irradiación nuclear.

La Tabla 2 presenta información general sobre los mismos. Obsérvese que los métodos de separación con solventes e incineración permiten determinar el contenido de asfalto de una manera directa (cuantificación de la masa del ligante), a

Tabla 1. Definición de tratamientos experimentales (*)

Contenido real de asfalto	Fuente de agregado					
	A		B		C	
	Granulometría G1	Granulometría G2	Granulometría G1	Granulometría G2	Granulometría G1	Granulometría G2
5.00%	✓	✓	✓	✓	✓	✓
5.75%	✓	✓	✓	✓	✓	✓
6.50%	✓	✓	✓	✓	✓	✓

(*) En cada caso considérese cuatro diferentes métodos para la determinación del contenido de asfalto, para un total de 72 tratamientos experimentales

Característica	Método			
	Reflujo	Centrifuga	Ignición	Nuclear
Norma	ASTM D2172	ASTM D2172	ASTM D6307	ASTM D4125
Aplicación	Determinación de contenido de asfalto y obtención de agregado residual para granulometría.	Determinación de contenido de asfalto y obtención de agregado residual para granulometría. Permite la recuperación del ligante asfáltico para su evaluación.	Determinación de contenido de asfalto y obtención de agregado residual para granulometría.	Determinación de contenido de asfalto. Metodología indirecta de estimación.
Técnica	El solvente es filtrado a través de la mezcla asfáltica, disolviendo el ligante. El solvente es recirculado mediante ciclos sucesivos de evaporación (aplicando calor) y condensación.	El solvente es filtrado a través de la mezcla asfáltica, disolviendo el ligante. El solvente no se recircula. La acción es mecánica (agitación a gran velocidad).	El equipo incrementa la temperatura hasta que el ligante asfáltico entra en combustión. Se cuenta con un sistema de ignición y pesado simultáneo. Se detiene el proceso cuando el cambio en el peso medido es despreciable.	El equipo cuantifica la tasa de retorno para emisiones de neutrones bombardeados sobre la muestra, y correlaciona dicha tasa de retorno (o conteo) con el contenido de asfalto.
Calibración	A pesar de que el método no lo norma, se recomienda la aplicación de un coeficiente de corrección, función de la consistencia del ligante absorbido y de la absorción del agregado; particularmente en el caso de mezclas ya envejecidas.	A pesar de que el método no lo norma, se recomienda la aplicación de un coeficiente de corrección, función de la consistencia del ligante absorbido y de la absorción del agregado; particularmente en el caso de mezclas ya envejecidas.	Debe necesariamente aplicarse un coeficiente de corrección, en función de la pérdida de masa del agregado durante la incineración. El procedimiento estándar así lo requiere.	Debe desarrollarse, para cada mezcla, un modelo de regresión para contenido de asfalto en función del conteo de neutrones que retornan luego de su emisión.
Ensayos	Contenido de ceniza y contenido de agua.	Contenido de ceniza y contenido de agua.	Contenido de agua.	Si se requiere granulometría, debe aplicarse un ensayo adicional independiente.
Duración	Varias horas.	De 20 a 60 minutos.	De 20 a 60 minutos.	De 5 a 10 minutos.
Consideraciones sobre su uso	Posibilidad de subestimar el contenido de asfalto, cuando el agregado es altamente absorbente o la mezcla ha sido envejecida. Necesidad de ajustar la granulometría en función del contenido de ceniza. Determina envejecimiento adicional en el ligante; por lo que no se recomienda su posterior caracterización.	Posibilidad de subestimar el contenido de asfalto, cuando el agregado es altamente absorbente o la mezcla ha sido envejecida. Necesidad de ajustar la granulometría en función del contenido de ceniza. Posibilidad de desgaste en el agregado, por agitación mecánica (sesgo en granulometría).	Posibilidad de sobreestimar el contenido de asfalto, cuando el agregado pierde masa al calentarse (agregados degradables). Posible necesidad de ajustar la granulometría en función de la pérdida de masa del agregado durante la incineración.	Incertidumbre por la aplicación de un método indirecto, con base en correlaciones y no en mediciones directas. Efecto significativo de un cambio en las características de la mezcla y su materia prima (la granulometría es de mucha relevancia).

Tabla 2. Características de diversos métodos para la determinación del contenido de asfalto y la detención de agregado residual para granulometría

diferencia del método de irradiación nuclear, que es un método indirecto (requiere un modelo de regresión).

3. Propiedades de la materia prima empleada

3.1. Propiedades de los agregados:

La Tabla 3 sintetiza la información relevante con respecto a los agregados usados en el estudio. Se incluye el porcentaje de absorción de agua por considerarse un parámetro de alta relevancia para la determinación del contenido de asfalto mediante extracción de solventes (sesgo cuando hay un elevado porcentaje de asfalto absorbido); así como el porcentaje de abrasión en máquina de Los Ángeles, por considerarse un parámetro que podría correlacionar con la pérdida de masa durante la incineración (agregados que tienden a desintegrarse con la aplicación de calor).

Tabla 3. Propiedades de los agregados

Propiedad	Fuente A (1)				Fuente B (2)				Fuente C (3)			
	Agregado grueso		Agregado fino		Agregado grueso		Agregado fino		Agregado grueso		Agregado fino	
	G1	G2	G1	G2	G1	G2	G1	G2	G1	G2	G1	G2
Gravedad específica bruta	2.72	2.70	2.65	2.64	2.68	2.69	2.63	2.62	2.64	2.65	2.65	2.64
Porcentaje de absorción de agua (%)	0.8	0.8	2.0	2.0	0.3	0.2	1.3	1.6	1.7	1.8	1.5	1.7
Porcentaje de abrasión en máquina de Los Angeles (%)	13	(4)	(4)	(4)	21	(4)	X	(4)	19	(4)	(4)	(4)

- (1) Agregado sedimentario triturado, del Sur-Oeste del país
- (2) Agregado calizo triturado, del Nor-Oeste del país
- (3) Agregado sedimentario triturado, del Este del país
- (4) Dato no disponible

La Figura 1 presenta las curvas granulométricas consideradas para este estudio. Considérese la aplicación de un tamaño nominal máximo de 12.7 mm, de acuerdo con la normativa para granulometría B de las Especificaciones Generales para la Construcción de Carreteras, Caminos y Puentes,

Disposición General AM-01-2000, del MOPT de Costa Rica. Nótese que la granulometría G1 es suave y continua, centrada dentro de los límites de especificación, mientras que la granulometría G2 presenta quiebres definidos (incluidos con el propósito de representar una estructura granulométrica aún dentro de especificaciones con diferente contenido de vacíos en el agregado mineral).

Propiedad	Magnitud
Viscosidad absoluta a 60 °C	1750 Poise
Gravedad específica a 25 °C	1.028
Temperatura de mezclado en el laboratorio	158 - 164 °C

Tabla 4. Propiedades del ligante asfáltico

3.2. Propiedades del ligante asfáltico:

Se empleó un ligante asfáltico de uso cotidiano en la producción de mezcla asfáltica para pavimentación en Costa Rica. Este corresponde, de acuerdo con el Reglamento Técnico RTCR 246:1997, que reglamenta la clasificación de ligantes asfálticos en Costa Rica, a AC-20; con las propiedades descritas en la Tabla 4.

Se aplicaron tres contenidos de ligante asfáltico, en las mezclas preparadas en el laboratorio, a saber: 5.00, 5.75 y 6.50 % por peso total de mezcla, mismos que representan las magnitudes de dosificación cotidianas para mezclas asfálticas de granulometría densa con agregados de las tres fuentes valoradas.

4. Análisis de variancia para determinaciones de contenido de asfalto

Para cada tratamiento experimental (Tabla 1) se determinaron los contenidos de asfalto de acuerdo con la metodología de ensayo para cada caso particular. La Tabla 5 presenta los resultados de un análisis de variancia, aplicado con el propósito de valorar diferencias significativas en los contenidos de asfalto cuantificados.

Se debe considerar que para la realización de este estudio se han aplicado coeficientes de corrección por pérdida de masa en el agregado a los resultados

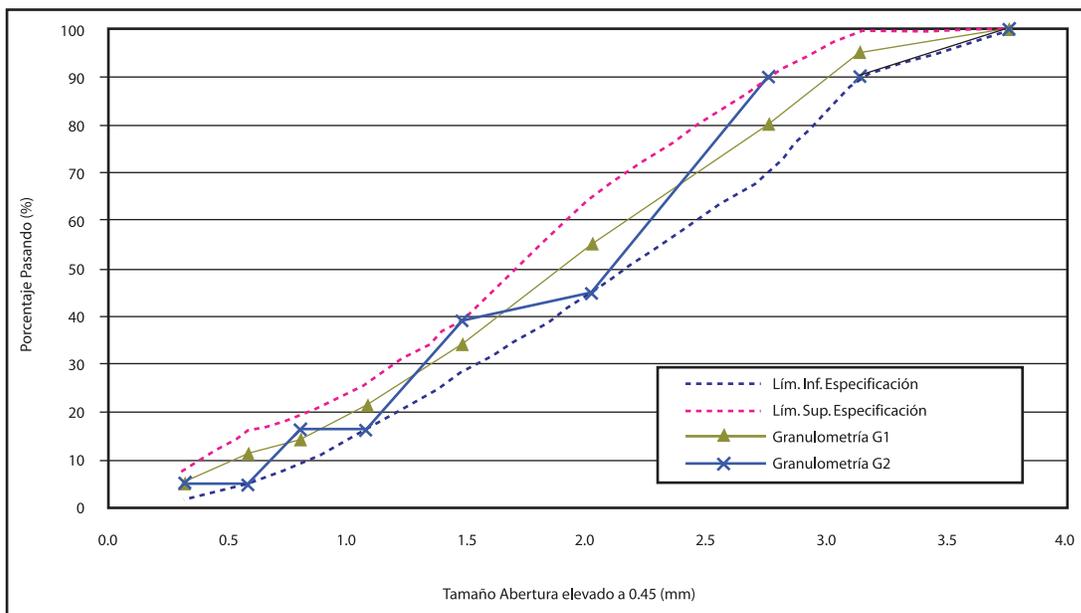


Figura 1. Granulometrías empleadas en el estudio

de contenido de asfalto por ignición; y se han desarrollado curvas de calibración para la determinación del contenido de asfalto vía equipo nuclear. En el caso de los métodos por extracción de solventes, sin embargo, no se han aplicado coeficientes de corrección por absorción del agregado, por no ser una práctica estandarizada y por tratarse en este caso de mezclas asfálticas no envejecidas y con agregados de absorción no muy elevada.

Fuente de variabilidad	Estadístico P	Conclusión al 95% de confianza
Método	0.006	Efecto significativo
Contenido de asfalto real	0.000	Efecto significativo
Granulometría	0.896	Efecto no significativo
Fuente de agregado	0.000	Efecto significativo

Tabla 5. Análisis de variancia para las estimaciones de contenido de asfalto

Tabla 6. Contraste de estimaciones de contenido de asfalto promedio por método (*)

Método	Reflujo	Centrífuga	Ignición	Nuclear
Reflujo	X	0.002 (**)	0.337	0.422
Centrífuga	0.002 (**)	X	0.001 (**)	0.0006 (**)
Ignición	0.337	0.001 (**)	X	0.265
Nuclear	0.422	0.006 (**)	0.422	X

(*) Se indican los parámetros P, correspondientes a cada comparación de pares de metodologías
 (**) Diferencias significativas a un nivel de confianza del 95%

Tabla 7. Contraste de estimaciones de contenido de asfalto por fuente de agregado (*)

Fuente de agregado	Fuente A	Fuente B	Fuente C
Fuente A	X	0.000 (**)	0.001 (**)
Fuente B	0.000 (**)	X	0.012 (**)
Fuente C	0.001 (**)	0.012 (**)	X

(*) Se indican los parámetros P, correspondientes a cada comparación de pares de metodologías
 (**) Diferencias significativas a un nivel de confianza del 95%

Posteriormente se evalúa, sin embargo, la aplicabilidad de factores de corrección para los contenidos de asfalto estimados a partir de extracción de solventes. Del análisis de variancia es posible concluir que las diferencias cuantificadas en las observaciones disponibles se justifican no sólo en diferencias en contenido de asfalto real (consecuencia esperada), sino que también en diferencias de fuente de origen del agregado y metodología

para la determinación del contenido de asfalto.

Al realizar el análisis de variancia se encontró que no existen efectos de interacción entre los factores considerados: método, contenido de asfalto real y granulometría; así, se concluye que la diferencia en contenidos de asfalto justificada por las diversas metodologías consideradas, no es función del contenido de asfalto o la granulometría, sino que hay un efecto principal único asociado a cada factor. Cada método determina, respecto a los otros, una diferencia, independientemente de la granulometría y del contenido de asfalto real.

La aplicación de una fuente específica, a su vez, determina diferencias en la estimación del contenido de asfalto; para todos los métodos de medición.

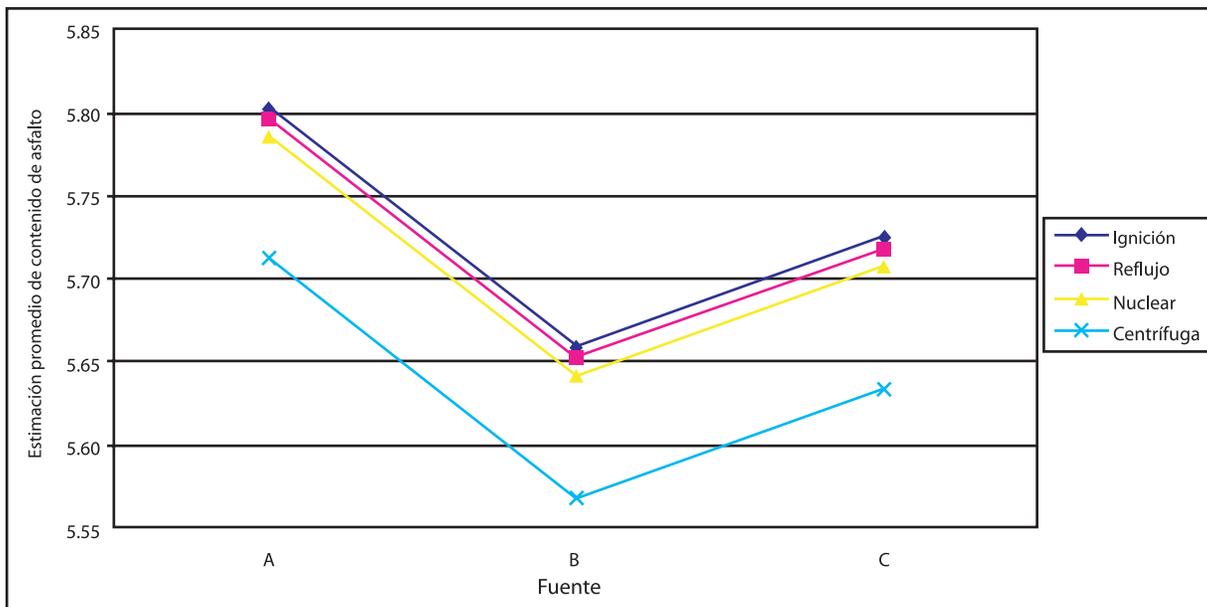
Adicionalmente se hizo un análisis de contrastes, con el propósito de comparar los contenidos de asfalto promedio estimados a partir de diversos métodos de ensayo (Tabla 6), así como los contenidos de asfalto promedio estimados para cada fuente de agregado (Tabla 7).

A partir del análisis de contrastes de la Tabla 6 se concluye que el método de determinación de contenido de asfalto por centrífuga induce contenidos de asfalto significativamente diferentes que los otros métodos de ensayo (menores). El resto de métodos no determinan diferencias significativas

significativas en contenido de asfalto estimado (valores promedio).

A partir de la Tabla 7, se ha encontrado que las determinaciones de contenido de asfalto promedio, para todas las fuentes de agregado difieren entre sí; lo cual pone en evidencia la relevancia de la mineralogía y propiedades del agregado, res-

Figura 2. Estimación promedio de contenido de asfalto vrs. fuente de agregado y método de ensayo



Nota: los valores indicados se refieren a estimaciones promedio de acuerdo con un modelo de análisis de variancia

pecto a la determinación de contenido de asfalto. Es decir, la aplicación de una fuente específica determina diferencias en la estimación del contenido de asfalto; para todos los métodos de medición. Así, los contenidos de asfalto estimados para mezclas de diferentes fuentes, con el mismo contenido de asfalto real, difieren.

La Figura 2 ilustra las diferencias en la estimación promedio de contenido de asfalto. Nótese que, para la fuente B (agregado calizo triturado) se han determinado menores contenidos de asfalto estimados.

La Tabla 8 presenta un análisis de variancia realizado a partir de las diferencias absolutas en la estimación de contenido de asfalto, determinadas como la desviación entre el contenido de asfalto estimado y el contenido de asfalto real. Se puede apreciar como la metodología de ensayo y la fuente de agregado continúan evidenciando diferencias significativas en cuanto a las diferencias estimado-real cuantificadas; una vez que se ha aislado el efecto de contenido de asfalto real (se está trabajando con diferencias). Por tanto, no hay evidencia de que la exactitud de las distintas metodologías de ensayo consideradas en este estudio dependa de aumentos o reducciones en el contenido de asfalto; al menos para el rango de variación en contenido de asfalto aquí considerado. Sí se ha encontrado, sin embargo, que tanto la metodología de ensayo, como la fuente de agregado, inciden en las diferencias de contenido de asfalto estimado-real.

De acuerdo con la Tabla 8, no hay un efecto significa-

Tabla 9. Desviación estándar para las diferencias entre contenido de asfalto estimado y contenido de asfalto real (*)

Metodología de ensayo	Metodología de ensayo		
	A	B	C
Reflujo	0.15	0.10	0.11
Centrífuga	0.09	0.14	0.11
Ignición	0.04	0.05	0.02
Nuclear	0.14	0.07	0.14

(*) Desviación estándar en porcentaje por peso total de mezcla (PTM)

tivo del contenido de asfalto real, en cuanto a la determinación de diferencias respecto a la realidad.

Con el propósito de valorar la precisión de los diversos

Tabla 8. Análisis de variancia para las diferencias en el contenido de asfalto estimado y contenido de asfalto real

Fuente de variabilidad	Estadístico P	Conclusión al 95% de confianza
Método	0.006	Efecto significativo
Contenido de asfalto real	0.000	Efecto significativo
Granulometría	0.896	Efecto no significativo
Fuente de agregado	0.000	Efecto significativo

métodos para la determinación de contenido de asfalto aquí considerados, la Tabla 9 presenta las desviaciones estándar para las diferencias de contenido de asfalto medido y real, para cada combinación de metodología de ensayo y fuente de agregado.

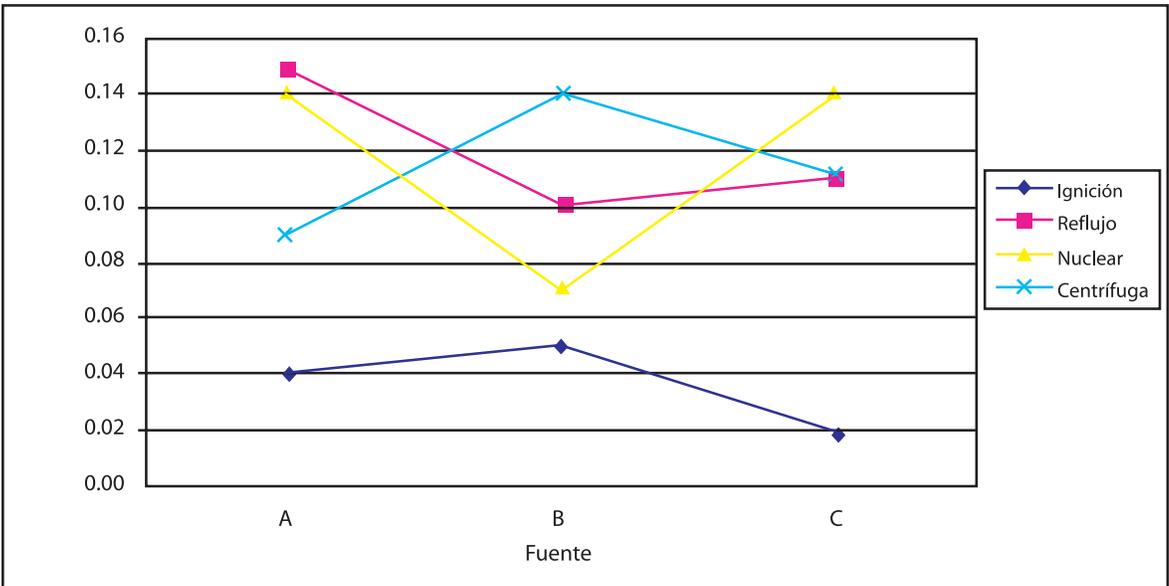
Nótese como los resultados de contenido de asfalto determinados por el método de ignición presentan mejor precisión (menor desviación estándar de diferencias).

La Figura 3 ilustra como los mejores niveles de precisión se logran, para todas las granulometrías, con el método de ignición. La precisión de las restantes técnicas depende de la fuente de agregado específica; pero en todos los casos es menor que la correspondiente al método de ignición.

5. Análisis de variancia para determinaciones de granulometría en el agregado residual

Para cada combinación de variables experimentales (Tabla 1) se obtuvieron granulometrías estimadas, a partir de la evaluación del agregado residual; excluyendo los casos donde el ensayo de contenido de asfalto no suministra agregado residual (método nuclear). La Tabla 10 presenta los resultados de un análisis de variancia aplicado con el propósito de determinar

Figura 3. Desviación estándar para diferencias en contenido de asfalto estimado y contenido de asfalto real, por fuente y método de ensayo



diferencias en los porcentajes de agregado cuantificados en tres fracciones, a saber:

- Fracción gruesa: agregado pasando el tamiz de 19.0 mm y retenido en el tamiz No. 4.
- Fracción intermedia: agregado pasando el tamiz No. 4 y retenido en el tamiz No. 30.
- Fracción fina: agregado pasando el tamiz No. 30 y retenido en el No. 200.

Del análisis de variancia indicado en la Tabla 10 se concluye que la metodología de ensayo y el contenido de asfalto no determinan diferencias significativas en los porcentajes de agregado que se ubican dentro de cada una de las tres fracciones evaluadas. La granulometría (consecuencia esperada) y la fuente de agregado

recuperación del agregado, se aprecia:

- Para la fuente de agregado A, el porcentaje de agregado grueso, intermedio y fino tiende a ser menor, en todos los casos.
- Para la fuente de agregado B, el porcentaje de agregado grueso tiende a ser menor, pero los porcentajes de agregado intermedio y fino tienden a ser mayores.
- Para la fuente de agregado C, los porcentajes de agregado grueso e intermedio tienden a ser mayores, mientras que el porcentaje de agregado fino tiende a ser menor.

Hay diferencias significativas en cuanto al efecto de degradación en el ensayo de recuperación al considerarse agregados de diferentes formaciones minerales expuestas a los procesos de reflujo, centrifugado y/o incineración. Se evidencia la aplicabilidad de una calibración para granulometría estimada.

6. Conclusiones

Considérense que las siguientes conclusiones se refieren estrictamente a la materia dispuesta para este proyecto.

Contenido real de asfalto	Fuente de agregado					
	A		B		C	
	Granulometría G1	Granulometría G2	Granulometría G1	Granulometría G2	Granulometría G1	Granulometría G2
5.00%	✓	✓	✓	✓	✓	✓
5.75%	✓	✓	✓	✓	✓	✓
6.50%	✓	✓	✓	✓	✓	✓

Tabla 10. Análisis de variancia para granulometría del agregado residual

Se ha determinado que el efecto particular de la fuente de agregado es uno de los parámetros más significativos en cuanto a la determinación del contenido de asfalto; las propiedades del agregado y su mineralogía son de alta significancia en la estimación del contenido de asfalto por métodos directos e indirectos. Dentro de este contexto, es de particular consideración la aplicación de coeficientes de corrección, para cualquier método de ensayo, sea por extracción de solventes, por incineración o por irradiación con neutrones. Igualmente, cambios en las propiedades de los materiales deben ser detectados oportunamente, para poder determinar el cambio en los factores de corrección correspondientes.

Se ha encontrado que las técnicas de reflujó, incineración e irradiación arrojan promedios de contenido de asfalto estimado equivalentes. En este respecto, se ha encontrado que el ensayo con centrífuga requiere, necesariamente, de calibración para poder ser aplicado en igualdad de condiciones que los otros tres métodos mencionados.

En cuanto a precisión de ensayo, se ha encontrado que el ensayo de incineración arroja los menores niveles de dispersión para la estimación del contenido de asfalto. A este respecto, igualmente, se ha encontrado una alta correspondencia con la fuente de agregado, es decir, las propiedades del agregado evidencian incidir en la dispersión de los resultados de contenido de asfalto estimado.

En cuanto a exactitud y precisión de los métodos para la determinación del contenido de asfalto, no se ha encontrado evidencia de un efecto significativo en función del cambio de granulometría. Tanto la granulometría densa suave y continua, como la granulometría densa más quebrada (mayor VMA), determinan similitud de resultados en contenido de asfalto. Las diferencias se asocian, con mucha mayor significancia estadística, a la metodología de ensayo y a la fuente de agregado.

Con respecto a la granulometría del agregado residual, producto de la extracción del ligante a través de solventes y de la incineración del ligante, se ha

encontrado que no existe diferencia significativa por método de ensayo. No se ha encontrado evidencia de que en la acción de centrifugado o incineración se produzcan efectos de degradación mecánica y química, respectivamente.

Se ha encontrado, sin embargo, que sí existe un efecto de cambio en la granulometría, cuantificada antes y después del ensayo de separación del ligante, pero que dicho efecto está relacionado estrictamente con la fuente de agregado particular. Es decir, se ha encontrado que el efecto de degradación del agregado no es significativamente diferente, en función del método de obtención del agregado residual, sino que depende estrictamente de la fuente de agregado particular.

7. Referencias

Fernandez, George C.J., www.agec.unr.edu/gf, University of Nevada - Reno.

Proyecto de graduación para optar al grado de licenciado en Ingeniería Civil de la Universidad de Costa Rica de Mauricio Salazar Blanco.