

Influencia de las condiciones ambientales de la ciudad de Bogotá sobre la estabilidad y el flujo Marshall de una mezcla densa en caliente

Hugo Alexander Rondón Quintana y Miguel Hernesto Pinzón Hernández
Universidad Católica de Colombia (Bogotá, Colombia)

Fredy Alberto Reyes Lizcano y Hermes Ariel Vacca Gámez
Pontificia Universidad Javeriana (Bogotá, Colombia)

Luís Ángel Moreno Anselmi
Universidad Piloto de Colombia (Bogotá, Colombia)

Xiomara Andrea Vargas Arenas
Universidad Manuela Beltrán (Bogotá, Colombia)

Recibido: junio 24 de 2008

Arbitrado y aceptado: julio 28 de 2008

Resumen

El artículo presenta el cambio que experimentan los parámetros de estabilidad y flujo del ensayo Marshall de mezclas asfálticas densas en caliente tipo MDC-2, cuando son expuestas al medio ambiente de la ciudad de Bogotá D.C. Las mezclas estudiadas fueron elaboradas y evaluadas empleando los dos cementos asfálticos (CA) típicos producidos en Colombia por ECOPETROL: CA 80-100 proveniente de la refinería de Barrancabermeja y CA 60-70 proveniente de la refinería de Apiay. Los parámetros de estabilidad y flujo de las mezclas fueron medidos cada tres meses durante un año con el fin de observar su evolución en el tiempo. De los resultados se concluye que el comportamiento que experimentan las mezclas depende del tipo de CA utilizado. Adicionalmente, la tendencia de las mezclas con ambos tipos de CA es experimentar aumento en los valores de estabilidad y flujo con el tiempo de exposición al medio ambiente.

Palabras clave: Módulo dinámico, envejecimiento, mezclas asfálticas.

Influence of the environmental conditions of Bogotá on the Marshall Stability and flow of a hot mix asphalt

Abstract

The paper presents the change that undergo the Marshall Stability and Flow of hot mix asphalts (type MDC-2) when they are exposed to weather of Bogotá D.C. The mixes were performed and evaluated employing the two typical asphalt cements (AC) produced in Colombia by ECOPETROL: AC 80-100 from Barrancabermeja and AC 60-70 from Apiay. Marshall Stability and Flow of the mixes were measurement each three months during one year in order to obtain its evolution with the time. The general conclusion was that the behavior of the mixes depends of the AC used. Additionally, the tendency of hot mix asphalts is increase the values of Marshall Stability and Flow when the asphalt mixtures are exposed to weather of Bogotá D.C.

Key words: Dynamic modulus, aging, asphalt mixtures.

Introducción

Una mezcla asfáltica debe ser diseñada y construida de tal manera que pueda resistir las cargas impuestas por el tránsito y la acción del medio ambiente. Cuantificar la influencia que tiene el medio ambiente sobre el comportamiento de las mezclas asfálticas no es una tarea fácil. En Colombia existen equipos de laboratorio que pueden simular el envejecimiento a corto y largo plazo y, que pueden medir la pérdida de resistencia de la mezcla debido a la presencia de agua. Los ensayos para simular el envejecimiento, tienen como limitación principal que son incapaces de reproducir las condiciones reales a las cuales están expuestas las mezclas asfálticas in situ.

Una forma de medir in situ la influencia que tiene el medio ambiente en el comportamiento de mezclas asfálticas es realizando tramos de prueba o pistas de prueba a escala. La limitación de este tipo de pruebas radica en que son muy costosas y en ellas no se puede medir de manera directa y por separado, la influencia que tienen las cargas vehiculares y el medio ambiente. Por lo anterior, en la investigación se realizaron una serie de ensayos en los cuales la mezcla asfáltica es sometida a solicitaciones reales de temperatura, precipitación, rayos ultravioletas y aire durante cinco años; para evaluar la influencia de estas condiciones en su comportamiento mecánico medido a través de parámetros como la estabilidad, flujo, resistencia al ahuellamiento, fatiga y módulo dinámico. En este artículo se presenta la evolución de los parámetros de estabilidad y flujo del ensayo Marshall, cuando fueron expuestas al medio ambiente de la ciudad de Bogotá, mezclas asfálticas densas en caliente tipo MDC-2 (de acuerdo a INVIAS, 2007) durante el primer año del proyecto.

Metodología

Inicialmente se realizó el ensayo Marshall a las mezclas asfálticas tipo MDC-2 fabricadas con CA 80-100 y CA 60-70, con el fin de determinar el porcentaje óptimo de CA necesario para obtener su mejor comportamiento in situ. Una vez determinado el porcentaje óptimo de asfalto se elaboraron 180 briquetas de cada tipo de mezcla para exponerlas a las condiciones ambientales de la ciudad de Bogotá. A continuación se describe de

manera general la metodología utilizada, la cual es similar a aquella reportada en Rondón Quintana y otros (2008 y 2008a).

El agregado pétreo empleado para la elaboración de las mezclas asfálticas para el ensayo Marshall (llamadas briquetas) procedía de la cantera de Subachoque en Cundinamarca. A estos materiales se le realizaron los siguientes ensayos, siguiendo las especificaciones del Instituto Nacional de Vías (INVIAS, 2007a): análisis granulométrico de agregados gruesos y finos (INV. E – 213), peso específico y absorción de agregados finos (INV. E – 222), peso específico y absorción de agregados gruesos (INV. E – 223), resistencia al desgaste de los agregados (tamaños menores de $\frac{3}{4}$ " por medio de la máquina de Los Ángeles (INV. E – 218), partículas fracturadas (INV. E – 227), ensayo para medir el equivalente de arena (INV. E – 133) e índice de alargamiento aplanamiento (INV. E-230).

Los cementos asfálticos empleados en el proyecto provenían de las refinerías de la Empresa Colombiana de Petróleos (ECOPETROL) en Barrancabermeja y Apiay. Las características de los cementos asfálticos se presentan en las Tablas 1 y 2.

Después de realizar los ensayos al agregado pétreo se fabricaron cinco briquetas (compactadas a 75 golpes por cara) para cada porcentaje de asfalto entre 4.5 y 6.5 % con el fin de realizar el diseño Marshall (INV. E-748) para determinar el contenido óptimo de asfalto de las mezclas convencionales. Una vez realizado el diseño Marshall y los ensayos de caracterización al agregado pétreo y a los cementos asfálticos se elaboraron probetas o briquetas de mezcla asfáltica tipo MDC-2 utilizando el contenido óptimo de asfalto. Estas briquetas fueron colocadas en el techo del edificio de laboratorios de la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Católica de Colombia para que recibieran de manera directa la influencia del medio ambiente. Estas muestras fueron ensayadas cada tres meses durante un año con el fin de evaluar el cambio que experimentan los parámetros mecánicos de estabilidad y flujo del ensayo Marshall.

Tabla 1. Características generales del cemento asfáltico CA 80-100 proveniente de Barrancabermeja

Ensayo	Método	Unidad	CA 80-100	Resultado
Ensayos sobre el asfalto original				
Penetración (25°C, 100 g, 5 s)	ASTM D-5	0.1 mm	80-100	85
Índice de penetración	INV. E-724	-	-1/+1	-0.5
Viscosidad absoluta (60°C)	ASTM D-4402	Poises	1000 mín.	1400
Ductilidad (25°C, 5cm/min)	ASTM D-113	cm	100 mín.	>105
Solubilidad en Tricloroetileno	ASTM D-2042	%	99 mín.	>99
Contenido de agua	ASTM D-95	%	0.2 máx.	<0.2
Punto de inflamación COC	ASTM D-92	°C	232 mín.	295
Ensayos sobre el residuo luego del RTFOT				
Pérdida de masa	ASTM D-2872	%	1.0 máx.	0.2
Penetración como porcentaje de la original (25°C, 100 g, 5 s)	ASTM D-5	%	48 mín.	65

Fuente: Shell de Colombia S.A. Carta técnica Shell Bitumen, 2007.

Tabla 2. Características generales del cemento asfáltico CA 60-70 proveniente de Apiay

Ensayo	Método	Unidad	CA 60-70	Resultado
Ensayos sobre el asfalto original				
Penetración (25°C, 100 g, 5 s)	ASTM D-5	0.1 mm	60-70	67
Índice de penetración	INV. E-724	-	-1/+1	-0.7
Viscosidad absoluta (60°C)	ASTM D-4402	Poises	1500 mín.	1750
Ductilidad (25°C, 5cm/min)	ASTM D-113	cm	100 mín.	>105
Solubilidad en Tricloroetileno	ASTM D-2042	%	99 mín.	>99
Contenido de agua	ASTM D-95	%	0.2 máx.	<0.2
Punto de inflamación COC	ASTM D-92	°C	232 mín.	275
Ensayos sobre el residuo luego del RTFOT				
Pérdida de masa	ASTM D-2872	%	1.0 máx.	0.4
Viscosidad absoluta (60°C)	ASTM D-4402	Poises	10000 máx.	5200
Índice de durabilidad	-	-	3 máx.	<3
Penetración como porcentaje de la original (25°C, 100 g, 5 s)	ASTM D-5	%	52 mín.	70

Fuente: Shell de Colombia S.A. Carta técnica Shell Bitumen, 2007.

Durante los ensayos, desarrollados ente mayo de 2007 y mayo de 2008, las temperaturas máximas medias de la ciudad de Bogotá estuvieron entre los 18 y 19 grados centígrados, mientras las mínimas y entre los 5 y 7 grados centígrados. La precipitación media varió entre 33 y 112 milímetros por mes, presentándose los mayores valores en los meses de septiembre, octubre y noviembre del año 2007, y de abril y mayo en el año 2008.

Resultados y análisis

Caracterización de los agregados pétreos. Para cumplir con las especificaciones del INVIAS (2007), se modificó la granulometría original de los agregados, tomando como referencia los valores promedios en porcentajes de la franja granulométrica que exige la especificación para la elaboración de las briquetas del ensayo Marshall (Tabla 3).

En la Tabla 4 se presentan los valores obtenidos de los ensayos de caracterización al agregado pétreo. Se observa en la Tabla que los valores de

cada uno de los ensayos cumplen con el requisito mínimo de calidad exigido por las especificaciones INVIAS (2007) para fabricar mezclas tipo MDC-2.

Tabla 3. Gradación de mezclas densas en caliente tipo 2 (MDC-2)

Tamiz		% que pasa
Normal	Alterno	MDC-2
25.0 mm	1"	-
19.0 mm	¾"	100
12.5 mm	½"	80-95
9.5 mm	3/8"	70-88
4.75 mm	No.4	49-65
2.00 mm	No.10	29-45
425 µm	No.40	14-25
180 µm	No.80	8-17
75 µm	No.200	4-8

Fuente: Instituto Nacional de Vías – INVIAS (2007). Artículo 450.2.1.

Tabla 4. Valores obtenidos en los ensayos de caracterización de los agregados

Característica	Subchoque
Peso específico	2.56
Equivalente de arena	83.0%
Caras fracturadas	86%
Índice de alargamiento	14%
Índice de aplanamiento	13%
Resistencia al desgaste máquina de los Ángeles	22.50%

Ensayo Marshall. Los cálculos obtenidos del ensayo Marshall para las briquetas elaboradas con asfalto convencional CA 80-100 y CA 60-70 están registrados en las Tablas 5 y 6 respectivamente. Los porcentaje óptimos de cemento asfáltico de acuerdo con los datos de las Tablas 5 y 6 son de

5.3% y 5.6% para el caso de mezclas fabricadas con CA 80-100 y CA 60-70 respectivamente. En estos porcentajes se están cumpliendo, los requisitos mínimos exigidos por la especificación INVIAS (2007) para MDC-2 y tránsitos tipo NT1 y/o NT2.

Tabla 5. Resumen del ensayo Marshall para mezcla asfáltica convencional MDC-2 con CA 80-100

% Asfalto	Peso Unitario g/cm ³	Estabilidad (E) [kg]	Vacios en la mezcla [%]	Vacios en agregados [%]	Flujo (F) [mm]	Relación E/F [kg/mm]
4.5%	2.21	710	7.63	17.52	3.33	213.09
5.0%	2.24	835	5.76	16.89	3.45	242.14
5.5%	2.24	853	5.09	17.33	3.51	243.48
6.0%	2.23	813	4.64	17.96	3.70	219.71

Tabla 6. Resumen ensayo Marshall para mezcla asfáltica convencional tipo MDC-2 con CA 60-70

% Asfalto	Peso Unitario g/cm ³	Estabilidad (E) [kg]	Vacios en la mezcla [%]	Vacios en agregados [%]	Flujo (F) [mm]	Relación E/F [kg/mm]
5.0%	2.24	1189	5.83	16.95	3.40	349.86
5.5%	2.25	1323	4.47	16.80	3.60	367.84
6.0%	2.25	1393	3.48	16.96	3.69	377.18
6.5%	2.26	1229	3.02	17.60	3.92	313.38

Evolución de los parámetros de estabilidad y flujo en el tiempo.

En la Figura 1 se presenta la evolución de los parámetros de estabilidad y flujo del ensayo Marshall de las mezclas asfálticas con el tiempo (t en meses). Se observa para las mezclas fabricadas con CA 80-100 y CA 60-70 un incremento en la estabilidad con el tiempo de exposición al medio ambiente (ver Figura 1a). Para el caso de las mezclas elaboradas con CA 60-70 en un periodo de once meses, la estabilidad incrementa en un 61.5% su valor, comparado con el alcanzado en $t=0$, mientras que las mezclas con CA 80-100 incrementan tan solo en un 18.3% su valor en $t=12$ meses en comparación con el alcanzado en $t=0$.

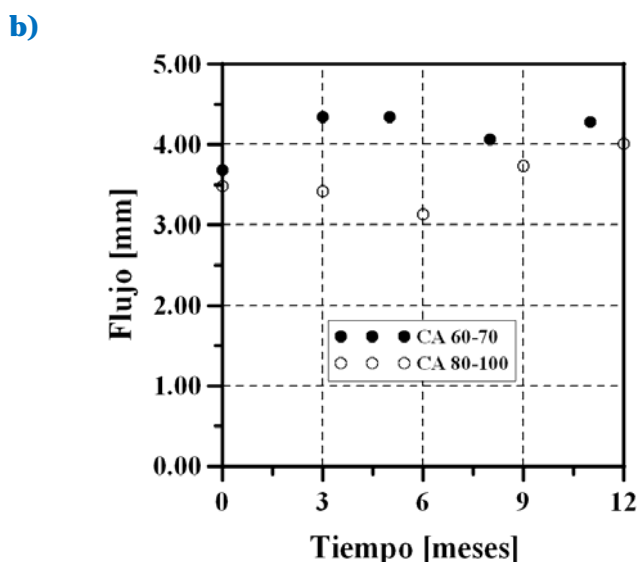
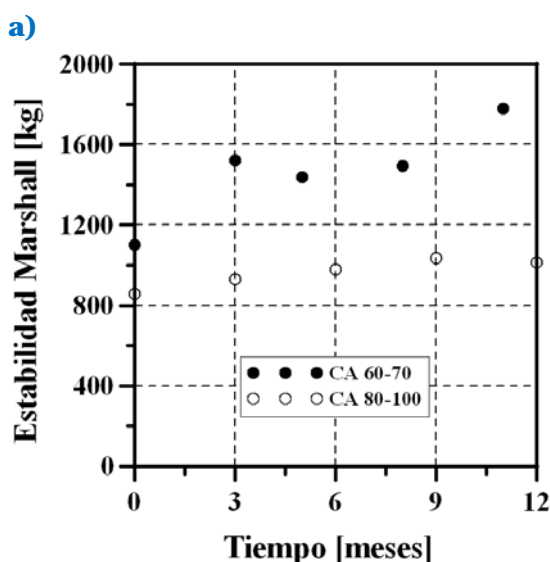


Figura 1. Evolución de a) estabilidad Marshall y b) flujo con el tiempo de envejecimiento, para mezclas fabricadas con CA 80-100 y CA 60-70.

En la Figura 2 se observa que la resistencia mecánica de las mezclas fabricadas con CA 60-70 tiende a aumentar con el tiempo de exposición, y en once meses incrementa un 39% con respecto al valor inicial alcanzado en $t=0$. Para el caso de las mezclas con CA 80-100 los valores tienden a aumentar en los primeros seis meses en un 27% en comparación con el valor obtenido en $t=0$, para luego disminuir hasta alcanzar valores similares a los reportados en el estado inicial de las mezclas ($t=0$). Todo lo anterior puede ser explicado por

En la Figura 1b se observa que a pesar de disminuir los valores del flujo de las mezclas fabricadas con CA 80-100 en los seis primeros meses, la tendencia, con los dos tipos de CA, es experimentar un incremento del flujo con el tiempo de exposición con respecto al valor inicial en $t=0$ meses.

En la Figura 2 se observa la evolución de la relación entre la estabilidad y el flujo (llamada por algunos investigadores como rigidez Marshall) con el tiempo. Esta relación físicamente puede ser entendida como una resistencia mecánica evaluada en el estado de falla de las mezclas, bajo carga monótonica en un ensayo de tracción indirecta.

dos fenómenos que están ocurriendo en las mezclas simultáneamente:

Primero, el envejecimiento por oxidación que experimenta el cemento asfáltico, y por lo tanto las mezclas, cuando es solicitado a diferentes gradientes de temperatura y exposición a radiación ultra-violeta (UV) tal como ha sido ampliamente reportado por otros investigadores (por ejemplo: Kemp y Predoehl, 1981; Welborn, 1984; Kim y otros, 1987; Montepara, 1999; Bocci y Cerni, 2000; Khalid y Walsh, 2000; Montepara y Giuliani, 2000; Brown y Scholz, 2000; Khalid,

2002; Airey, 2003). Adicionalmente, se ha demostrado en otras investigaciones (Vargas y otros, 2008, Álvarez y Afanasjeva, 2004) que el envejecimiento por oxidación ejerce una gran influencia en las propiedades viscoelásticas del cemento asfáltico reflejado en el incremento del módulo elástico G^* , resultado del aumento de las interacciones moleculares del asfalto como: fuerzas dispersivas, puentes de hidrógeno e interacciones polares, especialmente de los asfaltenos, que en conjunto resultan en una mayor estructuración del asfalto o un incremento en la conectividad de las moléculas del material. Las temperaturas bajas ($< 40^{\circ}\text{C}$) a su vez

favorecen el incremento de la rigidización del asfalto que junto con la influencia de los diferentes factores climáticos de la ciudad de Bogotá D.C. explican el comportamiento observado en las mezclas asfálticas usadas en este estudio.

En segundo lugar, el agua en las mezclas produce pérdida de adherencia entre el agregado pétreo y el asfalto, lo cual genera un aumento del flujo y disminución de la relación estabilidad - flujo. Investigaciones adicionales en esta área deben ser realizadas con el fin de evaluar por separado, el efecto del agua y del envejecimiento del asfalto, sobre las propiedades mecánicas de las mezclas.

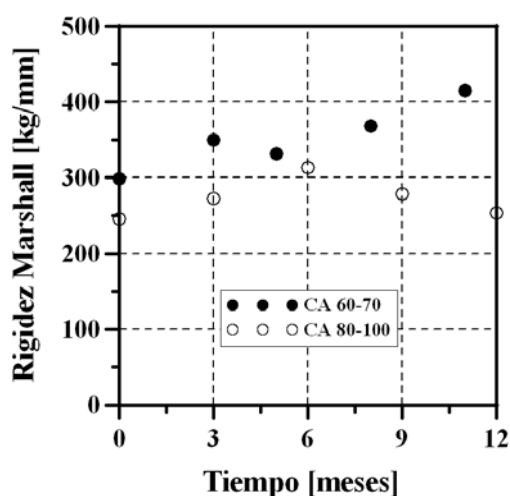


Figura 2. Evolución de la relación entre la estabilidad y el flujo (rigidez Marshall) con el tiempo de envejecimiento para mezclas elaboradas con CA 80-100 y CA 60-70.

Conclusiones

En el artículo se presenta la primera fase de un proyecto de investigación que tiene como objetivo principal evaluar el cambio en las propiedades mecánicas que experimentan mezclas asfálticas densas en caliente cuando se exponen a condiciones reales del medio ambiente. En esta primera fase se evalúa la evolución cada tres meses, durante un año, de los parámetros de estabilidad y flujo de mezclas tipo MDC-2 fabricadas con CA 80-100 y CA 60-70, y expuestas a las condiciones ambientales de la ciudad de Bogotá D.C.

De los resultados se concluye que el cambio que experimentan la estabilidad y el flujo de mezclas asfálticas tipo MDC-2 depende del tipo de cemento asfáltico utilizado. Para el caso de mezclas fabricadas con CA 60-70 la resistencia

mecánica (medida a través de la relación estabilidad-flujo) tiende a aumentar durante el año al que fueron expuestas, mientras que en las mezclas con CA 80-100 tiende a aumentar en los primeros seis meses, para luego disminuir hasta alcanzar valores similares en el mes doce, a los reportados en el estado inicial de las mismas. La tendencia de los valores de estabilidad y flujo es a incrementar con el tiempo de exposición de las mezclas. Las fases futuras del proyecto deben medir la evolución de parámetros mecánicos como resistencia a fatiga, módulo dinámico y ahuellamiento de las mezclas asfálticas, así como el cambio en la composición química que experimentan los cementos asfálticos utilizados para la fabricación de las mezclas.

Referencias bibliográficas

- AIREY, G. D. (2003). State of the art report on ageing test methods for bituminous pavement materials. *International Journal of Pavement Engineering*, 4 (3): 165-176.
- ÁLVAREZ CIFUENTES, M. y AFANASJEVA, N. (2004). Estudio del envejecimiento de los asfaltos bajo la acción de algunos factores climáticos. 1ª Edición. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. ISBN: 978-958-33-7135-6
- BOCCI, M. y CERNI, G. (2000). The ultraviolet radiation in short-and long-term aging of bitumen. *Proc. 2nd Eurasphalt and Eurobitume Congress*, Session 1: Performance Testing and Specifications for Binder and Mixtures (Barcelona), pp. 49-58.
- BROWN, S. F. y SCHOLZ, T. V. (2000). Development of laboratory protocols for the ageing of asphalt mixtures. *Proc. 2nd Eurasphalt and Eurobitume Congress*, Session 1: Performance Testing and Specifications for Binder and Mixtures, (Barcelona), pp. 83-90.
- INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS. (2007). Especificaciones generales de Construcción de carreteras. Bogotá D.C., INVIAS.
- INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS. (2007^a). Normas de Ensayos de Materiales para Carreteras. V. I y II. Bogotá D.C., INVIAS.
- KEMP, G. R. y PREDOEHL, N. H. (1981). A comparison of field and laboratory environments of asphalt durability. *Proc. Assn. Asphalt Paving Technol.*, 50, pp. 492-537.
- KHALID, H. A. (2002). A new approach for the accelerated ageing of porous asphalt mixtures. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Transport*, 153(3): 171-181.
- KHALID, H. A. y WALSH, C. M. (2000). Relating mix and binder fundamental properties of aged porous asphalt materials. *Proc. 2nd Eurasphalt and Eurobitume Congress, Session 1: Performance Testing and Specifications for Binder and Mixtures* (Barcelona), pp. 398-405.
- KIM, O-K.; BELL, C. A.; WILSON, J. E. y BOYLE, G. (1987). Development of laboratory oxidative aging procedures for asphalt cements and asphalt mixtures. *Transportation Research Record*, 1115, Transportation Research Board, Washington D.C., pp. 101-112.
- MONTEPARA, A. (1999). A theoretical-interpretative model of the relationship between UV-radiation ageing of bitumen and viscosity variation. *Proc. of Eurobitume Workshop, paper No. 075*, Luxemburg.
- MONTEPARA, A. y GIULIANI, F. (2000). Comparison between ageing simulation tests of road bitumen. *Proc. 2nd Eurasphalt and Eurobitume Congress*, Session 1: Performance Testing and Specifications for Binder and Mixtures, (Barcelona), pp. 518-523.
- RONDÓN QUINTANA, H. A.; PINZÓN HERNÁNDEZ, M. H.; REYES LIZCANO, F. A.; VACCA GÁMEZ, H. A., MORENO ANSELMI, L. A. (2008). Resistencia mecánica evaluada en el ensayo Marshall de una mezcla densa en caliente elaborada con asfaltos modificados con asfaltita. En: *Ciencia, tecnología e innovación, tomo 1*. (pp. 45-56). Bogotá, Editorial Universidad Católica de Colombia, ISBN: 978-958-8465-02-9.
- RONDÓN QUINTANA, H. A.; PINZÓN HERNÁNDEZ, M. H.; REYES LIZCANO, F. A.; VACCA GÁMEZ, H. A., MORENO ANSELMI, L. A. Y VARGAS ARENAS, X. A. (2008^a). Influencia de las condiciones ambientales de la ciudad de Bogotá sobre el módulo dinámico de mezclas densas en caliente. En: *Ciencia, tecnología e innovación, tomo 1*. (pp. 35-44). Bogotá, Editorial Universidad Católica de Colombia, ISBN: 978-958-8465-02-9.
- VARGAS ARENAS, X.; AFANASJEVA, N.; ÁLVAREZ, M.; MARCHAL, P. H. y CHOPLIN, L. (2008). Asphalt rheology evolution through thermo-oxidation (aging) in a rheo-reactor. En: *Fuel*, 87(13-14): 3018 -3023.
- WELBORN, J. Y. (1984). Physical properties as related to asphalt durability: State of the art. *Transportation Research Record*, (pp. 31-36). Washington D.C.