

Efecto de la temperatura en el módulo dinámico del cemento asfáltico y la mezcla asfáltica – caso de Boyacá

Effect of temperature on dynamic modulus of asphalt cement and asphalt mixture - case Boyacá

Efeito da temperatura no módulo dinâmico do cimento asfáltico e da mistura asfáltica – caso de Boyacá

Carlos Hernando Higuera-Sandoval¹

Forma de citar: C. H. Higuera- Sandoval, “Efecto de la temperatura en el módulo dinámico del cemento asfáltico y la mezcla asfáltica – caso de Boyacá”, *Respuestas*, vol. 21, no. 1, pp. 108-119, 2016.

Recibido:

Marzo 18 de 2015

Aceptado:

Julio 30 de 2015

Resumen

Objetivo: El presente artículo muestra de manera detallada el efecto de la temperatura en la determinación del módulo dinámico del cemento asfáltico y el módulo dinámico de la mezcla asfáltica. **Método:** Para la investigación se consideraron las temperaturas medias anuales ponderadas más representativas de las regiones del departamento de Boyacá de 13°C a 20°C, también la velocidad de operación de sus carreteras de 30, 50, 70 y 100 Km/hora y se analizaron dos cementos asfálticos del tipo AC 60 – 70 y AC 80 – 100, estipulados en el artículo INV 400-13 de las especificaciones generales de construcción de carreteras del Instituto Nacional de Vías – INVIAS - 2013 y que son de uso frecuente en la construcción de pavimentos en el departamento de Boyacá. Para la determinación de los módulos dinámicos del asfalto y de la mezcla asfáltica se siguió la metodología de la SHELL y se analizaron las variables como la temperatura media anual ponderada del aire – TMAP, la temperatura de trabajo de la mezclas – t_{mix}, la velocidad de operación de las carreteras – Vop, el tiempo de aplicación de la carga – t, la frecuencia de la aplicación de la carga – F y el índice de penetración del asfalto – IP. **Resultados:** Se presentan los módulos dinámicos del asfalto y de la mezcla asfáltica para diferentes temperaturas medias anuales ponderadas y diferentes velocidades de operación de las carreteras del Departamento de Boyacá, para los asfaltos tipo AC 60-70 y AC 80-100. **Conclusión:** El aporte de este trabajo de investigación es de gran utilidad para los ingenieros de diseño de estructuras de pavimentos, porque permite conocer el módulo dinámico de una mezcla asfáltica densa en caliente tipo INVIAS MDC-19 para rodadura, teniendo en cuenta la temperatura media anual ponderada de la zona del proyecto y las características de operación de la carretera, variables fundamentales para el diseño de las estructuras de pavimento flexible.

Palabras clave: Diseño de pavimentos flexibles, mecánica de pavimentos, mezclas asfálticas, módulos dinámicos.

Abstract

Objective: This article shows in detail the effect of temperature on the determination of the dynamic module of asphaltic cement and the dynamic module of the asphalt mix. **Method:** Average pondered annual temperatures of the most representative Regions of the department of Boyaca ranging 13 ° C to 20 ° C were considered, as well as the speed of operation of its highways 30, 50, 70 and 100 km / hour and were considered, and two asphalt cements the type AC 60 - 70 and AC 80 – 100 which are stipulated in the article INV 400-13 of the general specifications for road construction of the National roads Institute - INVIAS - 2013 of frequent use in the pavement construction in the department

¹Magister en Ingeniería
Docente Titular – Escuela de
Transporte y Vías
Universidad Pedagógica y
Tecnológica de Colombia
carlos.higuera@upte.edu.co
Orcid: 0000-0003-1333-2517
Tunja-Colombia

of Boyaca. For the determination of the dynamic modules of asphalt and asphalt mixture the methodology SHELL was followed and variables as the weighted average annual air temperature TMAP, temperature Working Mixtures - TMIX, Speed Operation of roads - VOP, the application time load - t , the frequency of application of the load - F and the rate of penetration asphalt - IP were analyzed. **Results:** Dynamic modules asphalt and asphalt mixture paragraph for different annual pondered average temperatures and different speeds of operation of the roads on the Department of Boyaca are presented, for asphalts type AC 60-70 and AC 80-100. **Conclusion:** The contribution of this research work is very useful for Design Engineers of pavement structures as it allows to know the dynamic module of a hot-dense asphalt mixture of the type INVIAS MDC-19 for rolling, taking into account the annual pondered average temperature of the project area and the operating characteristics of the road, fundamental variables for the design of flexible pavement structures.

Keywords: Flexible Pavement Design, Mechanics of Pavement, Asphalt Mixtures, dynamic modules.

Resumo

Objetivo: O presente artigo mostra de maneira detalhada o efeito da temperatura na determinação do módulo dinâmico do cimento asfáltico e o módulo dinâmico da mistura asfáltica. **Método:** Nesta pesquisa foram consideradas as temperaturas médias anuais ponderadas mais representativas das regiões do Estado de Boyacá, que variam entre 13°C e 20°C, também a velocidade de operação de suas estradas de 30, 50, 70 y 100 km/hora e se analisaram dois cimentos asfálticos do tipo AC 60 – 70 e AC 80 – 100, estipulados no artigo INV 400-13 das especificações gerais de construção de estradas do Instituto Nacional de Vias – INVIAS - 2013 e que são de uso frequente na construção de pavimentos no Estado de Boyacá. Para a determinação dos módulos dinâmicos do asfalto e da mistura asfáltica se seguiu a metodologia da SHELL e se analisaram as variáveis como a temperatura média anual ponderada do ar – TMAP, a temperatura de trabalho da mistura – t_{mix} , a velocidade de operação das estradas – Vop , o tempo de aplicação da carga – t , a frequência da aplicação da carga – F e o índice de penetração do asfalto – IP . **Resultados:** Apresentam-se os módulos dinâmicos do asfalto e da mistura asfáltica para diferentes temperaturas médias anuais ponderadas e diferentes velocidades de operação das estradas do Estado de Boyacá, para os asfaltos tipo AC 60-70 e AC 80-100. **Conclusão:** O aporte deste trabalho de pesquisa é de grande utilidade para os engenheiros de design de estruturas de pavimentos, devido a que permite conhecer o módulo dinâmico de uma mistura asfáltica densa em quente tipo INVIAS MDC-19, para laminação, tendo em conta a temperatura média anual ponderada da área do projeto e as características de operação da estrada, variáveis fundamentais para o design das estruturas de pavimento flexível.

Palavras-chave: Design de pavimentos flexíveis, mecânica de pavimentos, mistura asfáltica, módulos dinâmicos.

1. Introducción

El Departamento de Boyacá cuenta con varias regiones con climas diferentes y la infraestructura de carreteras con diferente jerarquía vial y velocidades de operación. Las estructuras de pavimentos predominantes se construyen en pavimentos flexibles o asfálticos. Por esta razón, es necesario conocer

el comportamiento de las capas asfálticas para las diferentes regiones del departamento de Boyacá y tener parámetro que ayuden al prediseño de las estructuras de pavimento.

El objetivo del presente trabajo de investigación es conocer el efecto de la temperatura en el módulo dinámico del cemento asfáltico y de la mezcla asfáltica en

la modelación de las estructuras de pavimento flexible y dar recomendaciones para su prediseño, evaluación y comportamiento. Para la modelación del efecto de la temperatura en el módulo dinámico del cemento asfáltico y de la mezcla asfáltica se analizaron las metodologías de la SHELL [1]-[4] AASHTO, Heukelom y Klomp, Bonnaure, Instituto del Asfalto y Witczak y se decidió trabajar con las metodologías SHELL y AASHTO debido a su gran correlación y simplicidad para la modelación y el conocimiento en la región de Boyacá.

Para la modelación se tomaron las temperaturas medias mensuales representativas del departamento de Boyacá de 13°C a 20°C, las velocidades de operación de 30, 50, 70 y 100 Km/hora y dos tipos de asfaltos el AC 60 – 70 y el AC 80 – 100, los cuales son muy utilizados en la fabricación de mezclas asfálticas en el departamento de Boyacá. La modelación permite calcular el tiempo y la frecuencia de aplicación de la carga, el índice de penetración, el módulo dinámico del asfalto y el módulo dinámico de la mezcla asfáltica.

2. Materiales y métodos

2.1 Generalidades. Los métodos modernos de diseño de pavimentos exigen como datos de entrada las características elásticas y dinámicas de las capas asfálticas: el módulo dinámico, la relación de Poisson y la ley de

fatiga o de comportamiento, las cuales se pueden obtener sobre probetas elaboradas en laboratorio o extraídas directamente de cada una de las capas de la estructura del pavimento.

El módulo dinámico es la relación entre el esfuerzo aplicado bajo carga repetida (condición dinámica) y la deformación elástica recuperable y se determina en (1):

$$E_d = \frac{\sigma_d}{\epsilon_r} \quad (1)$$

Donde:

- E_d : Módulo dinámico de la mezcla asfáltica.
- σ_d : Esfuerzo desviador, el cual es el esfuerzo axial en el ensayo de compresión inconfined.
- ϵ_r : Deformación elástica recuperable.

La Figura 1, muestra el comportamiento de la deformación medida en una probeta sometida a carga repetida. En las aplicaciones iniciales de carga toda la deformación es de tipo plástico o permanente y acumulable, a medida que se aumentan los ciclos de carga, la deformación plástica es menor, al final por ejemplo, después de 100 o 200 ciclos de carga como ocurre en los suelos, solamente se presentará deformación elástica (ϵ_r).

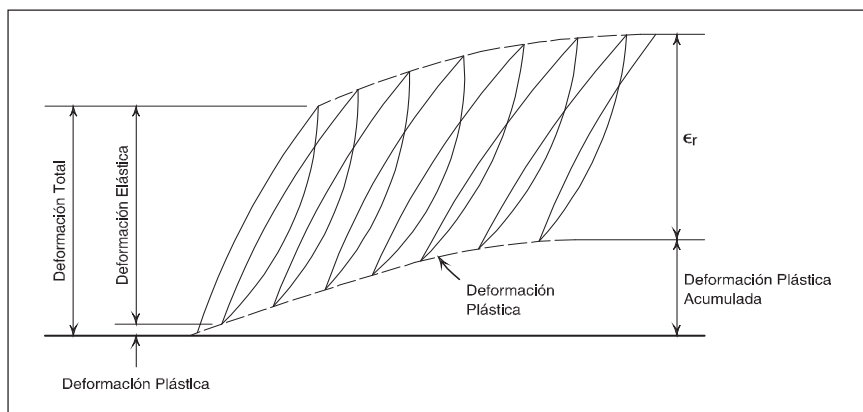


Figura 1. Comportamiento de la deformación medida en una probeta sometida a carga repetida

Fuente: Y.H. HUANG, "Material Characterization" in *Pavement analysis and design*, 2th edition.

Pearson Prentice Hall, 2004, ch. 7, pp. 280.

Fuente: [3].

En mezclas asfálticas, teniendo en cuenta la susceptibilidad térmica y las cargas de los vehículos, el valor del módulo dinámico dependerá de la temperatura de la mezcla (T) y del tiempo de aplicación de la carga (t) y se determina mediante (2).

$$E_d(T, t) = \frac{\sigma_d}{\epsilon_r} \quad (2)$$

Se conocen las siguientes formas de determinar los módulos dinámicos de las mezclas asfálticas [3]:

- Mediante ensayos de laboratorio.
- Mediante fórmulas y correlaciones
- Mediante nomogramas
- Retrocálculo o cálculo inverso

Para el estudio de modelación del comportamiento del módulo dinámico del asfalto y de la mezcla asfáltica se utilizó el método de las correlaciones y se detalla a continuación [1] para el diseño de pavimentos flexibles.

2.2. Determinación de la temperatura media anual ponderada del aire – TMAP. Para determinar la TMAP se parte de la información de las temperaturas medias mensuales del aire – TMM de la zona más cercana al proyecto. Generalmente, los análisis se realizan con datos de más de 10 años para poder evaluar efectivamente el comportamiento de la temperatura en la zona del proyecto, la cual influye directamente en el comportamiento estructural y funcional de los pavimentos. Esta información es suministrada por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia - IDEAM. [2].

El procedimiento consiste en el desarrollo de los siguientes pasos:

- Seleccionar las estaciones meteorológicas más cercanas al proyecto y consultar en el IDEAM las temperaturas medias mensuales del aire – TMM de la serie histórica.

- Para cada temperatura media mensual del aire – TMM determinar su factor de ponderación - *fp*, el cual puede calcularse por medio de (3) y (4) o con ayuda del programas de cálculo.

$$TMM^{\circ}C = 20.348 + 17.5683 \log(fp) \quad (3)$$

$$fp = 10^{\left[\frac{TMM^{\circ}C - 20.348}{17.5683} \right]} \quad (4)$$

- Se determina el factor de ponderación promedio del año – *fprom* y con ayuda de (5).

$$fprom = \frac{\sum fp}{n} \quad (5)$$

- Se determina la TMAP para cada año con ayuda de (6).

$$TMAP^{\circ}C = 20.348 + 17.5683 \log(fprom) \quad (6)$$

- Con la TMAP de los años de la serie histórica se determina la TMAP de diseño como el promedio de las TMAP anuales de la serie histórica.

Donde:

TMM = Temperatura media mensual del aire, °C

fp = Factor de ponderación

fprom = Factor de ponderación promedio

TMAP = Temperatura media anual ponderada del aire, °C

n = Número de meses del año

Para este trabajo de investigación se consideró la temperatura media anual ponderada del aire de 13°C a 20°C, por ser las más representativas de las regiones del Departamento de Boyacá.

2.3 Determinación de la temperatura de la mezcla- Tmix. La temperatura de la mezcla asfáltica se determina en función de la

temperatura media anual ponderada de diseño – TMAP y se realizó con ayuda del ábaco RT de la SHELL.

más representativas de las regiones del Departamento de Boyacá, tal como se muestra en el Tabla I.

Para el presente trabajo de investigación se calculó la Tmix en función de la TMAP

Tabla I. Temperatura de la mezcla – Tmix °C

Temperatura media anual ponderada del aire – TMAP, °C	Temperatura de la mezcla – Tmix , °C
13	19.6
14	21.0
15	22.5
16	24.0
17	25.4
18	26.9
19	28.3
20	29.7

Fuente: Elaboración propia.

2.4 Tiempo de aplicación de la carga - t. El tiempo de aplicación de la carga del tránsito representa el efecto dinámico de operación de una estructura de un pavimento y se determina mediante (7), la cual es función del espesor probable de la capa asfáltica y de la velocidad de operación [1].

$$t = 10^{(0.005 hasf - 0.2 - 0.94 \log(Vop))} \quad (7)$$

Donde:

- t = Tiempo de aplicación de la carga, s
- $hasf$ = Espesor probable de la capa asfáltica, cm (se consideró para la investigación de 10 cm)
- Vop = Velocidad de operación, Km/hora

2.5 Frecuencia de aplicación de la carga - F. La frecuencia de aplicación de la carga define el efecto dinámico de la carga a la estructura del pavimento y está asociado al tiempo de aplicación de la carga como se muestra en (8). [3]

$$F = \frac{1}{2\pi t} \quad (8)$$

Donde:

- F = Frecuencia de aplicación de la carga, Hz
- t = Tiempo de aplicación de la carga, s

En el Tabla II se muestra los valores de las variables velocidad de operación, tiempo y frecuencia de aplicación de la carga, utilizados en este trabajo de investigación.

Tabla II. Variables dinámicas de aplicación de la carga

Velocidad de operación - Vop, Km/hora	Tiempo de aplicación de la carga – t, s	Frecuencia de aplicación de la carga – F, Hz
30	0.029	5.5
50	0.018	8.8
70	0.013	12.2
100	0.009	17.7

Fuente: Elaboración propia.

2.6 Caracterización de los cementos asfálticos. Se analizaron en laboratorio dos tipos de asfaltos de uso frecuente en la construcción de carreteras del departamento de Boyacá, el asfalto AC 60 – 70 y el asfalto

AC 80 – 100. Las propiedades del asfalto se presentan en el Tabla III. El índice de penetración se determinó utilizando el programa BAND 2.0 de la Shell [4].

Tabla III. Propiedades del asfalto

NORMA	ENSAYO	AC 80 - 100	AC 60 - 70
INV E - 706 - 13	Penetración (25 °C. 100g. 5 s)	83	65
INV E - 723 - 13	Punto de inflamación, °C	241	245
INV E - 707 - 013	Gravedad Específica	1.069	1.012
INV E - 712 - 13	Punto de ablandamiento-anillo y bola, °C	48	53
INV E - 714 - 13	Viscosidad Saybolt Furol (P)	1050	1650
INV E - 724 - 13	Índice de Penetración	-0.40	+0.20

Fuente: Elaboración propia.

2.7 Módulo dinámico del asfalto – Sasf. El módulo dinámico del asfalto se determinó teniendo en cuenta la temperatura media anual ponderada del aire – TMAP, la temperatura de la mezcla – Tmix, el tiempo de aplicación de la carga – t, la frecuencia de aplicación de la carga – F, la diferencia de temperatura – DT y el índice de penetración – IP del asfalto. Para la presente investigación el módulo dinámico del asfalto se calculó con el programa BAND 2.0 de la Shell.

Para la presente investigación el módulo dinámico de la mezcla asfáltica se calculó con el programa BAND 2.0 de la Shell.

Es importante destacar que la simulación o estimación del módulo dinámico se realizó con el objeto de analizar su comportamiento dinámico ante los cambios de las condiciones de trabajo y no se realizaron ensayos de laboratorio porque el número de ensayos es muy grande.

2.8 Módulo dinámico de la mezcla asfáltica – Smix. El módulo dinámico de la mezcla asfáltica se determinó teniendo en cuenta los parámetros volumétricos de la mezcla asfáltica densa en caliente tipo MDC-19 para rodadura, Artículo 450-13 del INVIAS [5], la cual es una mezcla típica que se fabrica en el departamento de Boyacá.

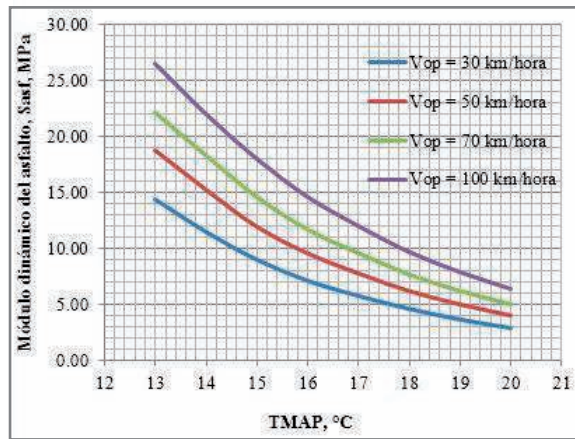
3. Resultados y análisis

3.1 Influencia de la temperatura media anual ponderada del aire – TMAP y la velocidad de operación en el módulo dinámico del asfalto. La temperatura tiene influencia directa en la viscosidad del asfalto y por tanto en su módulo dinámico, tal como se muestra en las Figuras 2 y 3, siendo su tendencia inversamente proporcional, a mayor temperatura menor módulo dinámico del asfalto, es decir que el asfalto es más blando o menos viscoso. [6].

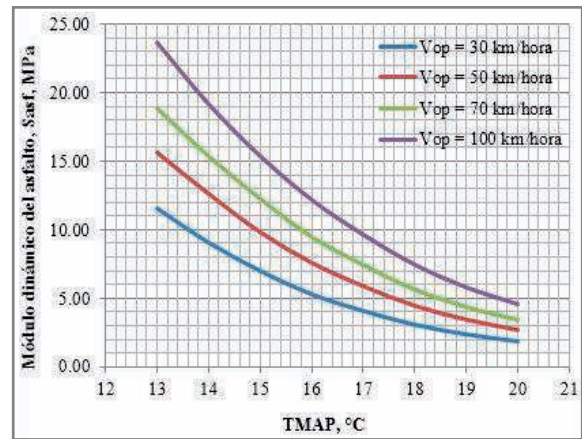
Los parámetros volumétricos promedios de la mezcla asfáltica densa en caliente tipo MDC-19 para rodadura (según la metodología de diseño de mezclas asfálticas Marshall Modificado), diseñada con agregados típicos de la región de Tunja son las siguientes:

- Porcentaje del volumen de vacíos, $V_v = 4.0\%$
- Porcentaje del volumen de asfalto de la mezcla, $V_b = 11\%$
- Porcentaje del volumen de agregados de la mezcla, $V_{ag} = 85\%$

Efecto de la temperatura en el módulo dinámico del cemento asfáltico y la mezcla asfáltica – caso de Boyacá



Asfalto AC 60 – 70



AC80-100

Figura 2 y 3. Comportamiento del módulo dinámico del asfalto en función de la temperatura y la velocidad de operación. Asfalto AC 60 – 70. Fuente: Elaboración propia.

La Figura 2 muestra el comportamiento del módulo dinámico del asfalto AC 60 – 70 en función de la temperatura media anual ponderada del aire – TMAP para las velocidades de operación de 30, 50, 70 y 100 Km/hora y la Figura 3 muestra el comportamiento del asfalto AC 80 – 100. Del análisis de estas figuras se deduce lo siguiente:

- La tendencia del módulo dinámico del asfalto en función de la temperatura es decreciente e inversamente proporcional.
- Para velocidades de operación bajas el módulo dinámico del asfalto es bajo y a medida que se incrementa la velocidad de operación el módulo dinámico del asfalto aumenta.
- Al comparar el comportamiento del módulo dinámico del asfalto en función de la temperatura media anual ponderada del aire, para los asfaltos AC 60 – 70 y AC 80 – 100, se tiene: Para asfaltos de mayor consistencia (AC 60 – 70) el módulo dinámico del asfalto es mayor que el obtenido para la misma temperatura con un asfalto de menor consistencia (AC 80 – 100), tal como se aprecia en los Tablas IV, V y en las Figuras 2 y 3.

- Para temperaturas bajas, el módulo dinámico del asfalto es más sensible que para temperaturas altas, tal como se muestra en las Figuras 2 y 3.

- Al comparar el módulo dinámico del asfalto en función de la velocidad de operación, (ver Figuras 2 y 3), se tiene que a medida que aumenta la velocidad de operación la variación del módulo dinámico del asfalto por grado de temperatura MPa/°C es mayor, tal como se muestra en el Tabla VI; lo anterior, permite analizar la sensibilidad de una curva de módulo dinámico del asfalto en función **de la temperatura** para una velocidad de operación considerada. El análisis se realizó para los asfaltos AC 60-70 y AC 80-100.

En los Tablas IV y V se presenta el efecto de la temperatura en el módulo dinámico del cemento asfáltico tipo AC 60 – 70 y AC 80 – 100 y se destaca las siguientes tendencias

Tabla IV. Efecto de la temperatura en el módulo dinámico del asfalto y de la mezcla asfáltica, AC 60 – 70

Temperatura media anual ponderada - TMAP, °C	Temperatura de la mezcla - Tmix, °C	Velocidad de operación, Km/hora	Tiempo de aplicación de la carga - t, s	Frecuencia de aplicación de la carga - F, Hz	Temperatura de penetración del asfalto, °C	Penetración del asfalto a 25°C, 1/10 mm	Temperatura Ablandamiento del asfalto, °C	Índice de Penetración, IP	Módulo del asfalto - Sasf, MPa	Módulo de la mezcla asfáltica - Smix, MPa
13	19.6	30	0.029	5.5	25	65	53	0.2	14.40	3010
14	21.0								11.50	2600
15	22.5								9.01	2220
16	24.0								7.13	1910
17	25.4								5.77	1660
18	26.9								4.61	1350
19	28.3								3.66	1100
20	29.7								2.89	850
13	19.6	50	0.018	8.8	25	65	53	0.2	18.80	3580
14	21.0								15.30	3130
15	22.5								12.00	2680
16	24.0								9.62	2320
17	25.4								7.83	2030
18	26.9								6.25	1750
19	28.3								5.06	1530
20	29.7								4.07	1250
13	19.6	70	0.013	12.2	25	65	53	0.2	22.10	3980
14	21.0								18.30	3520
15	22.5								14.60	3040
16	24.0								11.70	2630
17	25.4								9.60	2310
18	26.9								7.69	2000
19	28.3								6.23	1750
20	29.7								5.04	1520
13	19.6	100	0.009	17.7	25	65	53	0.2	26.50	4470
15	21.0								22.00	3970
15	22.5								18.00	3480
16	24.0								14.60	3040
17	25.4								12.00	2680
18	26.9								9.68	2330
19	28.3								7.88	2040
20	29.7								6.38	1770

Fuente: Elaboración propia.

3.2 Influencia de la temperatura media anual ponderada – TMAP y la velocidad de operación en el módulo dinámico de la mezcla asfáltica. El módulo dinámico de las

mezclas asfálticas depende de la temperatura y de las condiciones dinámicas de la mezcla asfáltica, tal como se muestra en los Tablas V, VI y en las Figuras 4 y 5.

Efecto de la temperatura en el módulo dinámico del cemento asfáltico y la mezcla asfáltica – caso de Boyacá

Tabla V. Efecto de la temperatura en el módulo dinámico del asfalto y de la mezcla asfáltica, AC 80 - 100

Temperatura media anual ponderada - TMAP, °C	Temperatura de la mezcla - Tmix, °C	Velocidad de operación, Km/hora	Tiempo de aplicación de la carga - t, s	Frecuencia de aplicación de la carga - F, Hz	Temperatura de penetración del asfalto, °C	Penetración del asfalto a 25°C, 1/10 mm	Temperatura Ablandamiento del asfalto, °C	Índice de Penetración, IP	Módulo del asfalto - Sasf, MPa	Módulo de la mezcla asfáltica - Smix, MPa
13	19.6	30	0.029	5.5	25	83	48	-0.4	11.60	2620
14	21.0								9.09	2230
15	22.5								7.01	1890
16	24.0								5.30	1570
17	25.4								4.08	1250
18	26.9								3.07	1000
19	28.3								2.36	750
20	29.7								1.85	500
13	19.6	50	0.018	8.8	25	83	48	-0.4	15.60	3170
14	21.0								12.60	2760
15	22.5								9.80	2350
16	24.0								7.57	1980
17	25.4								5.86	1680
18	26.9								4.43	1350
19	28.3								3.42	1050
20	29.7								2.67	750
13	19.6	70	0.013	12.2	25	83	48	-0.4	18.90	3590
14	21.0								15.40	3150
15	22.5								12.30	2720
16	24.0								9.50	2300
17	25.4								7.47	1970
18	26.9								5.67	1640
19	28.3								4.39	1250
20	29.7								3.45	950
13	19.6	100	0.009	17.7	25	83	48	-0.4	23.70	4160
15	21.0								19.20	3630
15	22.5								15.40	3150
16	24.0								12.20	2700
17	25.4								9.65	2320
18	26.9								7.46	1960
19	28.3								5.80	1670
20	29.7								4.57	1350

Fuente: Elaboración propia.

TABLA VI. Análisis de sensibilidad de las curvas del módulo dinámico del asfalto en función de la velocidad de operación

Velocidad de operación Vop, Km/hora	Asfalto AC 60 - 70			Asfalto AC 80 - 100		
	Diferencia de temperatura Δ °C	Diferencia del módulos del asfalto-ΔSasf, MPa	Variación - ΔSasf/Δ°C, MPa/°C	Diferencia de temperatura Δ °C	Diferencia del módulos del asfalto-ΔSasf, MPa	Variación - ΔSasf/Δ°C, MPa/°C
30	7	11.51	1.64	7	9.75	1.39
50		14.73	2.10		12.93	1.85
70		17.06	2.43		15.45	2.21
100		20.12	2.87		19.13	2.73

Fuente: Elaboración propia.

- Del análisis de la información contenida en los Tablas IV, V y las Figuras 4 y 5 se deduce lo siguiente:
- La tendencia del módulo dinámico de la

mezcla asfáltica en función de la temperatura es decreciente e inversamente proporcional.

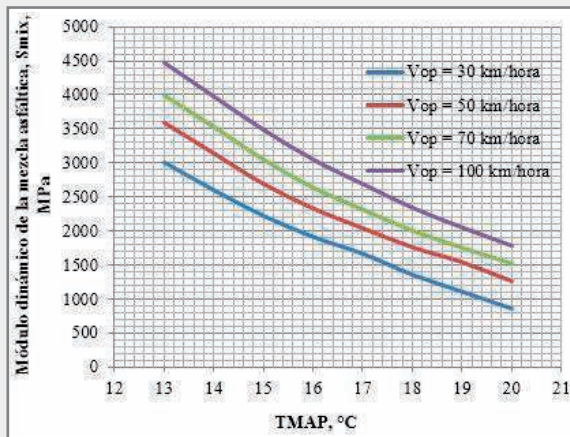
- Para velocidades de operación bajas el módulo dinámico de la mezcla asfáltica es bajo

y a medida que se incrementa la velocidad de operación el módulo dinámico de la mezcla aumenta significativamente.

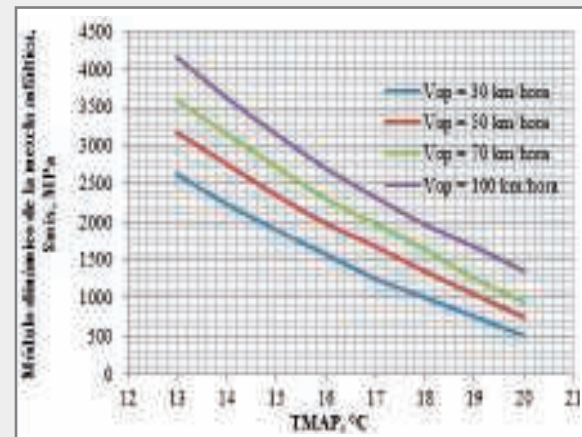
- Al comparar el comportamiento del módulo dinámico de la mezcla asfáltica en función de la temperatura para los asfaltos AC 60 – 70 y AC 80 – 100, se tiene: para asfaltos de mayor consistencia (AC 60 – 70) el módulo dinámico

de la mezcla asfáltica es mayor (Ver Figura 4) que el obtenido para la misma temperatura con un asfalto de menor consistencia (AC 80 – 100), tal como se aprecia en la Figura 5. [7], [8].

Para temperaturas bajas, el módulo dinámico de la mezcla asfáltica es más sensible que para temperaturas altas. (Ver Figuras 4 y 5).



AC 60 – 70



AC 80 – 100

Figura 4 y 5. Comportamiento del módulo dinámico de la mezcla asfáltica en función de la temperatura y la velocidad de operación. Asfalto AC 60 – 70, AC 80 – 100
Fuente: Elaboración propia.

- Al comparar el módulo dinámico de la mezcla asfáltica en función de la velocidad de operación, (Ver Figuras 4 y 5), se tiene que a medida que aumenta la velocidad de operación la variación del módulo dinámico de la mezcla asfáltica por grado de temperatura MPa/°C es mayor, tal como se muestra en el Tabla VII;

lo anterior, permite analizar la sensibilidad de una curva de módulo dinámico de la mezcla asfáltica en función de la temperatura para una velocidad de operación considerada. El análisis se realizó para los asfaltos AC 60-70 y AC 80-100.

Tabla VII. Análisis de sensibilidad de las curvas del módulo dinámico de la mezcla asfáltica en función de la velocidad de operación

Velocidad de operación Vop, Km/hora	Asfalto 60 – 70			Asfalto AC 80 - 100		
	Diferencia de temperatura Δ °C	Diferencia del módulo de la mezcla asfáltica- ΔSmix, MPa	Variación - ΔSmix/Δ°C, MPa/°C	Diferencia de temperatura Δ °C	Diferencia del módulo de la mezcla asfáltica-ΔSmix, MPa	Variación - ΔSmix/Δ°C, MPa/°C
30	7	2160	308.57	7	2120	302.86
50		2330	332.86		2420	345.71
70		2460	351.43		2640	377.14
100		2700	385.71		2810	401.43

Fuente: Elaboración propia.

4. Conclusiones

4.1 Efecto de la temperatura media anual ponderada del aire en el módulo dinámico del asfalto

- La tendencia del módulo dinámico del asfalto en función de la temperatura es decreciente e inversamente proporcional.
- Para velocidades de operación bajas el módulo dinámico del asfalto es bajo y a medida que se incrementa la velocidad de operación el módulo dinámico del asfalto aumenta.
- Al comparar el comportamiento del módulo dinámico del asfalto en función de la temperatura media anual ponderada del aire, para los asfaltos AC 60 – 70 y AC 80 – 100, se tiene: Para asfaltos de mayor consistencia (AC 60 – 70) el módulo dinámico del asfalto es mayor que el obtenido para la misma temperatura con un asfalto de menor consistencia (AC 80 – 100).
- Para temperaturas bajas, el módulo dinámico del asfalto es más sensible que para temperaturas altas.
- Al comparar el módulo dinámico del asfalto en función de la velocidad de operación, se tiene que a medida que aumenta la velocidad de operación la variación del módulo dinámico del asfalto por grado de temperatura MPa/°C es mayor.

4.2 Efecto de la temperatura media anual ponderada del aire en el módulo dinámico de la mezcla asfáltica

- La tendencia del módulo dinámico de la mezcla asfáltica en función de la temperatura es decreciente e inversamente proporcional.
- Para velocidades de operación bajas el módulo dinámico de la mezcla asfáltica es bajo y a medida que se incrementa la velocidad de operación el módulo dinámico de la mezcla aumenta significativamente.

- Al comparar el comportamiento del módulo dinámico de la mezcla asfáltica en función de la temperatura para los asfaltos AC 60 – 70 y AC 80 – 100, se tiene: Para asfaltos de mayor consistencia (AC 60 – 70) el módulo dinámico de la mezcla asfáltica es mayor que el obtenido para la misma temperatura con un asfalto de menor consistencia (AC 80 – 100).
- Para temperaturas bajas, el módulo dinámico de la mezcla asfáltica es más sensible que para temperaturas altas
- Al comparar el módulo dinámico de la mezcla asfáltica en función de la velocidad de operación, se tiene que a medida que aumenta la velocidad de operación la variación del módulo dinámico de la mezcla asfáltica por grado de temperatura MPa/°C es mayor.

5. Agradecimientos

El autor expresa sus agradecimientos a la Escuela de Transporte y Vías de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia por el apoyo brindado al desarrollo de este proyecto de investigación.

6. Referencias

- [1] SHELL. Manual del usuario del programa SHELL, módulo BISAR 3.0.
- [2] C. H, Higuera Sandoval. Nociones sobre métodos de diseño de estructuras de pavimentos para carreteras. Volumen I y II. Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. ISBN 978-958-660-149-8 y ISBN 978-958-660-152-8, Tunja. 2011.
- [3] Y. H, Huang. Pavement analysis and design. Prentice – Hall. Inc. United State of America. 2004.
- [4] Shell, Guía de diseño de pavimentos flexibles por el método SHELL. Programa de cálculo - SPDM-PC. 2000.
- [5] Instituto Nacional de Vías - INVIAS. Especificaciones generales de

construcción de carreteras. Bogotá. 2013.

- [6] F. J, Lilli. Curso sobre diseño racional de pavimentos. Instituto de Postgrado en Vías e Ingeniería Civil. Universidad del Cauca. Popayán. 1987.
- [7] F. A, Reyes Lizcano. Diseño racional de pavimentos. Bogotá. Editorial Ceja y la Escuela Colombiana de Ingeniería. 2004.
- [8] American Association Of State Highway Transportation Official. Guide for Design of Pavement Structures 1993.