

IAG105-01-2013
MODELOS PARA LA CONSTRUCCIÓN DE CURVAS MAESTRAS
DEL MÓDULO DINÁMICO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS
MODELOS PARA A CONSTRUÇÃO DE CURVAS MAESTRAS DO
MÓDULO DINÂMICO DE MISTURAS ASFÁLTICAS

Fernando Martinez

Laboratorio Vial – Instituto de Mecánica Aplicada y Estructuras (I.M.A.E)
Facultad de Cs. Exactas, Ingeniería y Agrimensura – Universidad de Rosario
Rosario, Argentina
fermar@fceia.unr.edu.ar

Silvia Angelone

Laboratorio Vial – Instituto de Mecánica Aplicada y Estructuras (I.M.A.E)
Facultad de Cs. Exactas, Ingeniería y Agrimensura – Universidad de Rosario
Rosario, Argentina
sangelon@fceia.unr.edu.ar

Marina Cauhape Casaux

Laboratorio Vial – Instituto de Mecánica Aplicada y Estructuras (I.M.A.E)
Facultad de Cs. Exactas, Ingeniería y Agrimensura – Universidad de Rosario
Rosario, Argentina
marina_cc02@yahoo.com.ar

Manuel Borghi

Laboratorio Vial – Instituto de Mecánica Aplicada y Estructuras (I.M.A.E)
Facultad de Cs. Exactas, Ingeniería y Agrimensura – Universidad de Rosario
Rosario, Argentina

Resumen

El módulo dinámico $|E^*|$ es la principal propiedad de las mezclas asfálticas utilizada como dato de entrada para los procedimientos de diseño de pavimentos flexibles sobre la base de principios mecanicistas. Entre otros factores, este módulo dinámico es una función de la frecuencia y de la temperatura de carga. Con el fin de modelar los efectos de estos factores, el módulo dinámico se describe utilizando una curva maestra construida a una temperatura de referencia utilizando el principio de superposición de frecuencia temperatura. Diferentes métodos y funciones matemáticas se han propuesto para modelar la influencia de la frecuencia y la temperatura así como la curva maestra resultante. El objetivo de este trabajo es evaluar estos diferentes métodos y funciones matemáticas que pueden ser adecuadamente usadas para desarrollar las curvas maestras de variación del módulo dinámico $|E^*|$ en función de la frecuencia para una dada temperatura de referencia considerando seis mezclas asfálticas diferentes, utilizadas en Argentina. Se presentan los resultados experimentales, los procedimientos utilizados y un análisis comparativo con una síntesis de las conclusiones alcanzadas.

Resumo

O módulo dinâmico é a principal propriedade de misturas betuminosas utilizados como entrada para os procedimentos de dimensionamento de pavimentos flexíveis com base em princípios mecanicistas. Entre outros fatores, esse módulo dinâmico é uma função da frequência e temperatura. De forma a modelar os efeitos destes fatores, o módulo de elasticidade dinâmico é descrito usando uma curva principal construída a uma temperatura de referência utilizando o princípio da sobreposição de temperatura – frequência. Diferentes métodos e funções matemáticas têm sido propostos para modelar a influência da temperatura e da frequência e da resultante curva principal. O objetivo deste trabalho é avaliar os diferentes métodos e funções matemáticas que podem ser corretamente utilizados para desenvolver as curvas mestras de variação do módulo dinâmico como uma função da frequência para uma dada temperatura de referência, considerando seis misturas betuminosas diferentes, utilizadas na Argentina . Os resultados experimentais, os procedimentos utilizados e uma análise comparativa com um resumo das conclusões são apresentados neste trabalho.

INTRODUCCION

Los procedimientos de diseño de pavimentos están tendiendo a aplicar metodologías mecanicistas donde la caracterización de las propiedades mecánicas de los materiales de pavimentación juega un papel vital en la determinación de las respuestas de las estructuras.

Para las mezclas asfálticas, el módulo dinámico $|E^*|$ es la propiedad fundamental de entrada que se define como el valor absoluto de la máxima tensión aplicada dividida por el máximo de la deformación recuperable para un material sometido a cargas sinusoidales. Entre otros factores, este módulo dinámico es una función de la frecuencia de carga y de la temperatura de ensayo. Con el fin de modelar los efectos de estos factores, el módulo dinámico de las mezclas asfálticas se describe utilizando una curva maestra construida a una temperatura de referencia determinada arbitrariamente sobre la base del principio de superposición de frecuencia - temperatura para materiales de comportamiento termo-reológicamente sencillos. Se ha demostrado que este principio de superposición de frecuencia - temperatura puede ser aplicado incluso si no se cumplen las condiciones viscoelásticas lineales (Chehab et al., 2002).

En la construcción de estas curvas maestras, los valores de módulo dinámico obtenidos a múltiples temperaturas se desplazan mediante la aplicación de un factor a la frecuencia a la cual se toman las mediciones de manera de combinar los resultados individuales en una única curva suave de variación del módulo dinámico frente a la frecuencia para una determinada temperatura. La cantidad de desplazamiento a cada temperatura está dada por un factor de desplazamiento que describe la dependencia de la temperatura del material y se define como:

$$a_T = \frac{f_R}{f} \quad (1)$$

donde:

f_R : frecuencia reducida (frecuencia de solicitud a la temperatura de referencia)

f : frecuencia de solicitud a la temperatura de ensayo

a_T : factor de desplazamiento

La curva maestra obtenida puede ser utilizada para estimar o interpolar el módulo dinámico a diferentes temperaturas y frecuencias de interés a partir de un conjunto limitado de datos obtenidos en ensayos de laboratorio. Varias funciones matemáticas se han propuesto para modelar la curva maestra del módulo dinámico para ser utilizadas en programas de diseño de pavimentos, pero en general, ésta tiene una forma de S apaisada donde el módulo tiende a un límite alto (módulo vítreo) para frecuencias grandes y a un valor pequeño (módulo de equilibrio) cuando la frecuencia tiende a cero (Pronk, 2004). También se han propuesto varias funciones que describen la dependencia del factor de desplazamiento aT respecto a la temperatura.

El objetivo de este trabajo es evaluar los distintos métodos y funciones matemáticas que pueden ser utilizados para modelar satisfactoriamente las curvas maestras del módulo dinámico $|E^*|$ en función de la frecuencia a una temperatura de referencia para seis mezclas asfálticas diferentes que han sido utilizadas en la Argentina. La metodología para la evaluación se basa en el uso de los mismos datos de laboratorio y la comparación de las curvas resultantes a través de análisis de correlación. Los resultados experimentales, los procedimientos considerados, los modelos utilizados para elaborar las curvas maestras y los resultados alcanzados se presentan en este trabajo seguido de un análisis comparativo y una síntesis de las conclusiones alcanzadas.

MODELOS PARA LAS CURVAS MAESTRAS DEL MODULO DINAMICO

Tres modelos diferentes han sido evaluados para describir las curvas maestras del módulo dinámico de las mezclas asfálticas:

- Un modelo logístico sigmoidal simétrico
- Un modelo logístico sigmoidal no simétrico generalizado
- Un modelo potencial

La metodología para evaluar estos tres métodos se basa en el uso de los mismos datos de laboratorio para generar distintas curvas maestras como funciones de variación del módulo dinámico $|E^*|$ respecto a la frecuencia (f_r) para una temperatura de referencia (t_R) de 20 ° C y luego comparar las curvas resultantes a través de un análisis de correlación.

Modelo Logístico Sigmoidal Simétrico (MLSS)

La forma funcional de este modelo es:

$$\log |E^*| = \delta + \frac{(\alpha - \delta)}{1 + e^{(\beta + \gamma \cdot \log f_R)}} \quad (2)$$

donde:

$|E^*|$: módulo dinámico (MPa)

δ : logaritmo del valor mínimo de $|E^*|$ ($|E^*|_{\min}$, módulo de equilibrio)

α : logaritmo del valor máximo de $|E^*|$ ($|E^*|_{\max}$, módulo vítreo)

γ, β : parámetros que describen la forma de la función sigmoidal y el punto de inflexión

Este tipo de función ha sido adoptada en la Guía de Diseño Empírico – Mecanicista de Estructuras de Pavimentos Nuevos y Rehabilitados desarrollados en el marco del proyecto NCHRP 9-19 (NCHRP, 2004) y por otros autores (Witczak y Sotil, 2004; Witczak et al., 2004).

Modelo Logístico Sigmoidal No Simétrico Generalizado (MLSNS)

La forma funcional de este modelo está representada por la siguiente ecuación:

$$\log|E^*| = \delta + \frac{(\alpha - \delta)}{\left[1 + \lambda e^{(\beta + \gamma \cdot \log f_R)}\right]^{1/\lambda}} \quad (3)$$

donde:

λ : parámetro adicional produciendo la forma no simétrica.

En esta ecuación $|E^*|$, f_R , β , α , δ y γ tienen el mismo significado que en la ecuación (2). La diferencia entre las ecuaciones (2) y (3) es la introducción del parámetro λ que permite que la curva adopte una forma no simétrica; cuando $\lambda = 1$, la ecuación se reduce a la sigmoidal de formato estándar simétrica como se representa por la ecuación (2) (Rowe et al, 2009).

Modelo Potencial

El modelo potencial se define como:

$$\log|E^*| = A - B \frac{f_R^C}{f_R^C + D} \quad (4)$$

donde:

A, B, C y D: parámetros que definen la forma de la función

El parámetro A representa el logaritmo del máximo valor de $|E^*|$ ($|E^*|_{\max}$, módulo vítreo) para las frecuencias altas; cuando la frecuencia tiende a cero, el logaritmo del mínimo valor de $|E^*|$ ($|E^*|_{\min}$, módulo de equilibrio) tiende a (A-B) dado que resulta $C < 1$ (Pronk, 2004).

ECUACIONES PARA EL FACTOR DE TRASLACION aT

En este trabajo se han utilizado tres formas convencionales para el cálculo de los factores de traslación de mezclas asfálticas: una ecuación del tipo Arrhenius, una ecuación del tipo Williams-Landel-Ferry (WLF) y una ecuación polinómica de segundo orden, cuyas formas funcionales se presentan en la Tabla 1.

Estas ecuaciones para calcular el factor de desplazamiento a_T en función de la temperatura han sido utilizadas en distintas investigaciones; la del tipo Arrhenius por Bonaquist, 2003 y Picado et al 2003, la del tipo WLF por Wu et al, 2006 y Di Benedetto et al, 2010, en tanto que la ecuación polinómica de segundo orden ha sido empleada por Kim et al, 2005 y Al-Jatib et al, 2006. En este último caso, si la temperatura de ensayo de interés T_i es igual a la temperatura de referencia T_R , la ecuación debe ser condicionada con el fin de que resulten factores de desplazamiento igual a la unidad a esa temperatura de referencia.

Tabla 1: Ecuaciones consideradas para los factores de traslación aT

Ecuación del Tipo Arrhenius	Ecuación del Tipo Williams-Landel-Ferry (WLF)	Ecuación Polinómica de Segundo Orden
$\log(aT) = C_A \left(\frac{1}{T_i} - \frac{1}{T_R} \right)$ <p> C_A : constante de Arrhenius del material T_i : temperatura de ensayo de interés (°K) T_R : temperatura de referencia (°K) </p>	$\log(aT) = \frac{-C_1 \cdot (T_i - T_R)}{(C_2 + T_i - T_R)}$ <p>C1 y C2: constantes del material</p>	$\log(aT) = a + b \cdot T_i + c \cdot T_i^2$ <p>T_i : temperatura de ensayo de interés (° C)</p>

PROCEDIMIENTOS Y MATERIALES

Procedimiento de Ensayo

En este trabajo, la determinación del módulo dinámico ha sido realizada usando la técnica de compresión uniaxial con cargas sinusoidales (Haversine) utilizando un equipo de ensayos servo-neumático, desarrollado en el Laboratorio Vial de la Universidad de Rosario. El marco de carga está encerrado en una cámara de temperatura con un sistema de control en el rango de 0 a 50°C. Las mediciones del módulo dinámico en compresión uniaxial se llevaron a cabo siguiendo un procedimiento similar al que se describe en la AASHTO TP-62 “Método estándar de ensayo para determinar el módulo dinámico de mezclas asfálticas en caliente”. Se han ensayado dos muestras de cada mezcla asfáltica y se ha considerado finalmente el promedio de ambos resultados para la construcción de las curvas maestras. Las probetas utilizadas tienen un diámetro de 100 mm y una relación altura / diámetro igual a 1,5. Los resultados del módulo dinámico se han obtenido para 7 frecuencias de sollicitación (5, 4, 2, 1, 0,5, 0,25 Hz y 0,10) y 4 temperaturas (10, 20, 30 y 40 ° C) con el fin de tener una caracterización completa del comportamiento viscoelástico de las mezclas asfálticas.

Mezclas Asfálticas

Seis diferentes mezclas asfálticas fueron consideradas en este estudio identificadas como A, B, H, I, J y K. Una breve descripción de cada una de ellas se presenta en la Tabla 2. Cabe señalar que las mezclas H e I son dos mezclas asfálticas no convencionales formuladas con un suelo local calcáreo (llamado "Tosca" en Argentina), arena natural y cemento asfáltico. Estas mezclas asfálticas resultantes tienen notables propiedades reológicas como se muestra más adelante en este trabajo.

RESULTADOS OBTENIDOS

Los resultados promedio del módulo dinámico para las 6 mezclas asfálticas a las 7 frecuencias y las temperaturas 4 de ensayo se presentan en la Tabla 3. Se evidencia la reducida susceptibilidad térmica de las mezclas no convencionales H e I con mayores valores de $|E^*|$ a 30 y 40 ° C, y para todas las frecuencias, en comparación con las otras mezclas asfálticas.

Tabla 2: Mezclas asfálticas consideradas

Id.	Descripción	Contenido de asfalto en peso (%)	Tipo de asfalto	Vacíos (%)	Tamaño máximo del agregado (mm)
A	Concreto asfáltico denso con agregados basálticos	4.7	Convencional CA30	4.9	19.0
B	Concreto asfáltico denso con agregados basálticos	5.1	Convencional CA30	4.1	19.0
H	Mezcla asfáltica no convencional con suelo calcáreo y arena natural	9.0	Convencional CA70-100	3.2	37.5
I	Mezcla asfáltica no convencional con suelo calcáreo y arena natural	9.3	Convencional CA70-100	3.1	25.0
J	Concreto asfáltico denso con agregados graníticos	4.5	Asfalto Modificado AM3	4.2	19.0
K	Concreto asfáltico denso con agregados graníticos	4.8	Asfalto Modificado AM3	3.9	19.0

Tabla 3: Módulo dinámico $|E^*|$ para las seis mezclas asfálticas ensayadas (MPa)

Temperatura (°C)	Frecuencia (Hz)	Mezcla asfálticas					
		A	B	H	I	J	K
10	5.00	18005	11641	12154	4678	10628	8380
10	4.00	17127	11188	11872	4512	9964	8090
10	2.00	15493	9603	11500	4316	8883	7090
10	1.00	13600	8322	10373	4163	7626	6008
10	0.50	11919	7024	9880	4038	6663	5239
10	0.25	10222	5899	9266	3926	5574	4432
10	0.10	7983	4605	8028	3710	4399	3458
20	5.00	9405	5666	8619	3818	5161	3707
20	4.00	8880	5372	8170	3808	4991	3495
20	2.00	6903	4326	7307	3613	3943	2706
20	1.00	5565	3246	6392	3453	3093	2151
20	0.50	4249	2428	5795	3341	2440	1717
20	0.25	3196	1932	4939	3183	1911	1398
20	0.10	2162	1209	4190	2964	1393	1005
30	5.00	3298	2136	4638	2852	1692	1737
30	4.00	2901	1956	4474	2776	1600	1660
30	2.00	2165	1405	3774	2650	1071	1315
30	1.00	1581	1042	3228	2504	845	970
30	0.50	1162	750	2756	2311	649	797
30	0.25	854	543	2301	2182	502	676
30	0.10	557	395	1812	2014	393	576
40	5.00	954	680	2815	2399	854	674
40	4.00	819	561	2646	2350	783	620
40	2.00	648	437	2243	2225	742	514
40	1.00	479	379	1845	2013	553	496
40	0.50	375	330	1483	1841	498	475
40	0.25	299	298	1255	1676	402	286
40	0.10	239	196	956	1498	298	248

Sobre la base de los tres modelos para la construcción de las curvas maestras del módulo dinámico y las tres ecuaciones para calcular los factores de desplazamiento aT , los resultados enumerados en la Tabla 3 se utilizaron para desarrollar nueve curvas maestras diferentes para cada mezcla asfáltica considerada. Los parámetros de los modelos que describen las curvas maestras del módulo dinámico y los que intervienen en las ecuaciones para el cálculo de los factores de desplazamiento se obtuvieron simultáneamente al minimizar la suma de los cuadrados

de los errores de los valores experimentales y los del modelo (en espacio, logarítmico) mediante la función Solver en la hoja de cálculo Excel. En este trabajo, se ha utilizado Solver debido a que es un método simple, robusto y de uso muy difundido para la optimización de valores.

Con el fin de ilustrar las diferencias de comportamiento de las mezclas ensayadas, la Figura 1 presenta una comparación de las seis curvas maestras construidas con estos procedimientos utilizando el modelo logístico sigmoidal no simétrico generalizado (MLSNS) y la ecuación del tipo WLF ajustados en el espacio logarítmico.

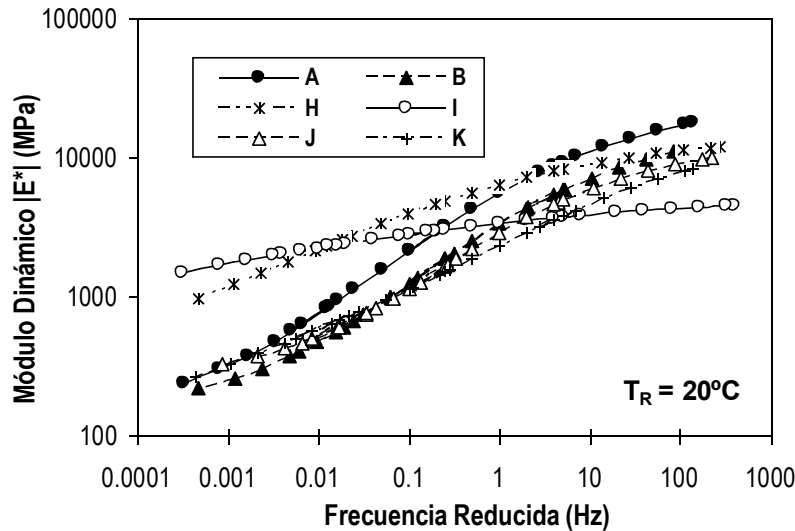


Figure 1: Curvas maestras de $|E^*|$ para las 6 mezclas asfálticas ensayadas (MLSNS, ecuación WLF)

La Tabla 4 presenta un resumen de los principales resultados obtenidos con los tres modelos y las tres ecuaciones para las seis mezclas consideradas en este trabajo. En esta tabla se presentan, el máximo y el mínimo valor de $|E^*|$ (módulo vítreo y de equilibrio, respectivamente), los factores de traslación resultantes a 10, 30 y 40°C, el coeficiente de correlación R^2 y la relación entre el error estándar de los valores estimados y la desviación estándar de los valores medidos Se/Sy . Estos dos últimos parámetros son un buen indicador de la bondad del ajuste de los modelos: R^2 más altos y más bajos valores de Se/Sy indican un mejor ajuste de la curva maestra a los datos considerados (Witczak et al, 2002.).

ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

El análisis de estos resultados muestra que las nueve posibilidades de modelos y ecuaciones considerados proporcionan un ajuste excelente entre los valores medidos y modelizados para las seis mezclas asfálticas analizadas. En todos los casos, los valores de R^2 fueron mayores a 0,98 y la relación Se/Sy menor a 0,12 mostrando que la bondad del ajuste es excelente.

Tabla 4: Resumen de resultados obtenidos

Modelo		MLSS			MLSNS			Potencial			Prom (MPa)	Dv.St (MPa)	CDV (%)	
Ecuación		Ar.	WLF	Poli.	Ar.	WLF	Poli.	Ar.	WLF	Poli.				
Mezcla A	R ²	0.9996	0.9997	0.9997	0.9996	0.9997	0.9997	0.9996	0.9997	0.9997	----	----	----	
	Se/Sy	0.021	0.018	0.018	0.021	0.016	0.018	0.021	0.018	0.018	----	----	----	
	E* max	27376	26532	26703	27977	28764	27032	27367	26519	26743	27224	750	2.8%	
	E* min	96	93	93	105	133	99	96	93	93	100	13	13.0%	
	log (aT)	10°C	1.388	1.431	1.421	1.388	1.443	1.422	1.388	1.431	1.423	1.415	0.021	1.5%
		30°C	-1.297	-1.302	-1.306	-1.297	-1.304	-1.306	-1.297	-1.302	-1.306	-1.302	0.004	0.3%
		40°C	-2.511	-2.492	-2.496	-2.511	-2.488	-2.495	-2.511	-2.492	-2.496	-2.499	0.009	0.4%
Mezcla B	R ²	0.9987	0.9986	0.9987	0.9989	0.9990	0.9990	0.9987	0.9986	0.9986	----	----	----	
	Se/Sy	0.037	0.037	0.037	0.033	0.032	0.032	0.037	0.037	0.037	----	----	----	
	E* max	17317	17123	17239	18506	18515	18591	17309	17116	17234	17661	661	3.7%	
	E* min	126	125	125	146	151	149	126	125	125	133	12	9.0%	
	log (aT)	10°C	1.292	1.307	1.299	1.292	1.315	1.305	1.292	1.307	1.299	1.301	0.008	0.6%
		30°C	-1.207	-1.207	-1.210	-1.207	-1.208	-1.210	-1.207	-1.207	-1.210	-1.208	0.002	0.1%
		40°C	-2.336	-2.325	-2.330	-2.336	-2.321	-2.326	-2.336	-2.325	-2.330	-2.330	0.006	0.2%
Mezcla H	R ²	0.9953	0.9979	0.9983	0.9965	0.9980	0.9983	0.9953	0.9979	0.9983	----	----	----	
	Se/Sy	0.070	0.047	0.041	0.060	0.046	0.042	0.070	0.047	0.042	----	----	----	
	E* max	20004	15852	15814	14991	14686	16155	19980	15842	16473	16644	1975	11.9%	
	E* min	215	176	164	1	1	142	217	177	119	135	82	60.8%	
	log (aT)	10°C	1.345	1.751	1.739	1.338	1.728	1.743	1.345	1.751	1.744	1.609	0.200	12.4%
		30°C	-1.256	-1.312	-1.362	-1.249	-1.308	-1.365	-1.256	-1.312	-1.367	-1.310	0.048	3.7%
		40°C	-2.432	-2.333	-2.348	-2.419	-2.332	-2.353	-2.432	-2.332	-2.358	-2.371	0.044	1.8%
Mezcla I	R ²	0.9889	0.9891	0.9892	0.9891	0.9891	0.9897	0.9891	0.9891	0.9897	----	----	----	
	Se/Sy	0.107	0.106	0.106	0.106	0.106	0.103	0.106	0.106	0.103	----	----	----	
	E* max	7911	5431	4970	6904	5435	5211	6862	5423	5198	5927	1029	17.4%	
	E* min	84	335	460	267	355	214	305	341	201	285	109	38.2%	
	log (aT)	10°C	1.445	1.895	2.134	1.437	1.895	2.122	1.436	1.895	2.121	1.820	0.302	16.6%
		30°C	-1.350	-1.408	-1.554	-1.342	-1.408	-1.555	-1.342	-1.408	-1.554	-1.436	0.093	6.5%
		40°C	-2.613	-2.496	-2.528	-2.598	-2.496	-2.543	-2.597	-2.496	-2.541	-2.545	0.047	1.8%
Mezcla J	R ²	0.9973	0.9924	0.9875	0.9963	0.9928	0.9886	0.9973	0.9924	0.9875	----	----	----	
	Se/Sy	0.053	0.088	0.112	0.062	0.086	0.107	0.053	0.088	0.112	----	----	----	
	E* max	14645	12509	11946	12359	13151	13270	14640	12506	11941	12996	1038	8.0%	
	E* min	287	231	199	219	262	282	287	231	199	244	36	14.9%	
	log (aT)	10°C	1.311	1.626	1.755	1.310	1.642	1.794	1.311	1.626	1.757	1.570	0.204	13.0%
		30°C	-1.224	-1.179	-1.252	-1.223	-1.180	-1.263	-1.224	-1.179	-1.252	-1.220	0.033	2.7%
		40°C	-2.370	-2.073	-2.000	-2.368	-2.069	-1.996	-2.370	-2.073	-2.000	-2.147	0.170	7.9%
Mezcla K	R ²	0.9934	0.9968	0.9958	0.9958	0.9975	0.9958	0.9934	0.9968	0.9958	----	----	----	
	Se/Sy	0.084	0.058	0.067	0.066	0.051	0.067	0.084	0.058	0.067	----	----	----	
	E* max	62716	42799	50809	9451	11223	46912	62395	42610	50334	42139	19442	46.1%	
	E* min	51	44	43	1	1	37	52	45	43	35	20	56.5%	
	log (aT)	10°C	1.373	1.493	1.451	1.362	1.441	1.450	1.373	1.493	1.451	1.432	0.051	3.5%
		30°C	-1.283	-1.271	-1.285	-1.272	-1.258	-1.285	-1.282	-1.270	-1.285	-1.277	0.009	0.7%
		40°C	-2.484	-2.365	-2.404	-2.462	-2.367	-2.404	-2.483	-2.364	-2.403	-2.415	0.049	2.0%

Arr: Arrhenius; WLF: Williams-Landel-Ferry, Poli: Polinomio de segundo orden, Prom: promedio; Dv.St: Desviación Estándar, CDV: Coeficiente de Variación

Desde el punto de vista de su sencillez, los mejores modelos son el modelo logístico sigmoidal simétrico (MLSS) y el potencial, ambos utilizando la ecuación de Arrhenius, porque solamente se deben ajustar cinco parámetros durante el proceso de optimización, seguido por los mismos modelos pero con la ecuación WLF con seis parámetros a ajustarse.

Para las mezclas A y B, mezclas asfálticas convencionales con asfaltos convencionales, los valores máximo y mínimo de |E*| (módulo vítreo y de equilibrio) obtenidos con los nueve posibles modelos investigados en este trabajo muestran aproximadamente los mismos resultados

con coeficientes de variación (CDV) menores que el umbral de uso general del 20%, indicando que los modelos y las ecuaciones no son estadísticamente diferentes. Para las mezclas asfálticas no convencionales H e I, se han obtenido en algunos casos valores del mínimo $|E^*|$ significativamente diferentes y menores para algunos modelos considerados. También para la mezcla K y comparando las nueve posibilidades consideradas, se han obtenido diferencias grandes para el módulo de equilibrio y vítreo utilizando el modelo logístico sigmoidal no simétrico generalizado (MLSNS) y las ecuaciones del tipo Arrhenius y WLF. En general, las mayores diferencias se observaron en el mínimo valor de $|E^*|$.

Para las condiciones de ensayo de temperaturas y frecuencias utilizadas en este estudio, el análisis de los factores de traslación aT muestra que todas las curvas maestras del módulo dinámico (a la temperatura de referencia de 20 ° C) se encuentran en una gama de frecuencias reducidas f_R comprendidas entre 0,0002 y 400 Hz. El módulo vítreo representa físicamente el valor límite que podría alcanzar el valor del módulo dinámico $|E^*|$ a muy alta frecuencia ($f_R \rightarrow \infty$) y bajas temperaturas. Por otro lado, el módulo de equilibrio representa físicamente el valor límite de $|E^*|$ que podría alcanzar a muy baja frecuencia ($f_R \rightarrow 0$) y altas temperaturas. En consecuencia, se debe señalar que la extrapolación de valores del $|E^*|$ más allá del rango de temperaturas y frecuencias cubiertas en las determinaciones experimentales podría dar estimaciones no realistas.

Para los seis mezclas y los nueve posibilidades de los modelos y ecuaciones obtenidas en el espacio logarítmico, los factores de traslación aT a 10, 30 y 40 ° C producen coeficientes de variación (CDV) inferior al 17%, mostrando que las tres ecuaciones son aproximadamente equivalentes para el rango de temperaturas y frecuencias de ensayo utilizados en este estudio. Sin embargo, un análisis más detallado pone de manifiesto que en general, los factores de desplazamiento a 10 y 30 ° C calculado con la ecuación de Arrhenius son menores que los calculados con la ecuaciones de WLF y polinómicas y entonces, las curvas maestras resultan desplazadas hacia las bajas frecuencias. Por último, se ha observado también que en algunos casos, los parámetros obtenidos son fuertemente dependientes de los valores de inicio o “semillas” utilizados en los procedimientos de ajuste.

CONCLUSIONES

En este trabajo, se han evaluado distintos métodos y funciones matemáticas que pueden ser usadas para modelar satisfactoriamente las curvas maestras del módulo dinámico $|E^*|$ como una función de la frecuencia a una temperatura de referencia para seis mezclas asfálticas utilizadas en Argentina.

Las nueve posibilidades consideradas de modelos y ecuaciones ajustadas proporcionan un ajuste excelente entre los valores medidos y modelados con coeficientes de regresión R^2 muy elevados, superiores a 0,98 en todos los casos. Los modelos logístico sigmoidal simétrico (MLSS) y potencial utilizando la ecuación de Arrhenius son los más convenientes porque tienen solamente cinco parámetros a ajustar durante el proceso de optimización. En algunos casos, los parámetros obtenidos que definen la curva maestra de $|E^*|$ con los diferentes modelos y ecuaciones son fuertemente dependientes de los valores de inicio utilizados en los procedimientos de ajuste pudiendo resultar en valores muy diferentes para los módulos límites vítreo y de equilibrio. La

extrapolación de valores de $|E^*|$ más allá del rango de temperaturas y frecuencias cubiertas en las determinaciones experimentales podrían dar estimaciones no realistas. Por último, las curvas maestras modeladas con cualquiera de los procedimientos investigados en este trabajo podrían ser utilizadas con fines prácticos como datos de entrada en programas de computación para el diseño estructural de pavimentos basados en principios mecánicos.

REFERENCIAS

- Bennert, T., Maher, A. and Smith, J., 2004. Evaluation of Crumb Rubber in Hot Mix Asphalt. Center for Advanced Infrastructure and Transportation (CAIT), Final Report, Rutgers University, USA.
- Bonaquist, R., 2003. Simple Performance Tester for Superpave Mix Design. Quarterly Progress Report (Appendix B), National Cooperative Highway Research Program (NCHRP) Project 9-29.
- Chehab, G.R., Kim, Y.R., Schapery, R.A., Witczak, M.W. and Bonaquist, R., 2002. Time-Temperature Superposition for Asphalt Concrete Mixtures with Growing Damage in Tension State, Association of Asphalt Paving Technologists, USA.
- Di Benedetto, H. Sauzeat, C., Bilodeau, K., Buannic, M., Mangiafico, S., Nguyen, Q., Pouget, S. Tapsoba, N. and Van Rompu, J., 2010. General Overview of the Time-Temperature Superposition Principle Validity for Materials Containing Bituminous Binder. International Journal of Roads and Airports (IJRA), ISSN 2036-2595.
- Kim, R., Momen, M. and King, M., 2005. Typical Dynamic Moduli for North Carolina Asphalt Concrete Mixtures. Final report FHWA/NC/2005-03, NCSU, USA.
- NCHRP 1-37a., 2004. Mechanistic-Empirical design of new and rehabilitated pavement structures. Transp. Research Board, National Research Council, Washington DC, USA.
- Picado-Santos, L., Capitão, S. and Pais, J., 2003. Stiffness Modulus and Phase Angle Prediction Models for High Modulus Asphalt Concrete. International Pavement Journal IPJ, Volume 2, Number 3.
- Pronk, A. C., 2004. Creation of Master curves without adopting a Rheological Model. IPG project (IPG2.2.3B/PRAKT/LAB), The Netherlands.
- Rowe, G., 2009. Functional Forms for Master Curve Analysis of Bituminous Materials. Advanced Testing and Characterization of Bituminous Materials, ISBN 978-0-415-55854-9, London, UK.
- Witczak, M., Pellinen T., El-Basyouny M., 2002. Pursuit of the Simple Performance Test for Asphalt Concrete Fracture/Cracking. Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, USA.
- Witczak, M. and Sotil, A., 2004. A Recommended Methodology for Developing Dynamic Modulus E^* Master Curves from Non-Linear Optimization, Inter Team Technical Report, Superpave Support and Performance Models Management (NCHRP 9-19) Project, Arizona State University, USA.