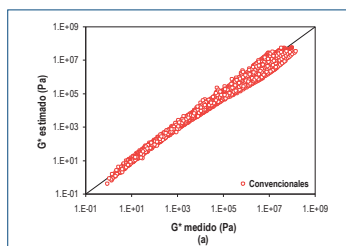


Un modelo empírico de estimación de las propiedades reológicas de ligantes asfálticos



An Empirical Estimation Model for the Rheological Properties of Bituminous Binders

Dr. Ing. Silvia Angelone

Dr. Ing. Fernando Martínez

MSc. Ing. Marina Cauhapé Casaux

Laboratorio Vial – Instituto de Mecánica Aplicada y Estructuras I.M.A.E
Fac. de Cs. Exactas, Ingeniería y Agrimensura – Universidad de Rosario
Riobamba y Berutti - (2000) – Rosario – Argentina

Resumen

Las propiedades reológicas de los ligantes asfálticos son de interés por cuanto les confieren las características viscoelásticas propias de las mezclas asfálticas. Los ensayos de penetración, punto de ablandamiento y viscosidad son utilizados de manera habitual para caracterizar y tipificar los asfaltos de uso vial. Más recientemente, el reómetro de corte dinámico *DSR* adoptado durante el Programa Estratégico de Investigación de Carreteras (*SHRP*) es utilizado para determinar las propiedades reológicas de los ligantes asfálticos a través de la determinación del módulo de corte dinámico G^* y del desfase entre tensiones y deformaciones. Sin embargo, el *DSR* es un equipo de alto costo y que no está disponible en mu-

chos laboratorios. Este trabajo presenta el desarrollo de modelos empíricos de estimación de estas propiedades reológicas utilizando los resultados de ensayos convencionales, como la penetración a 25 °C, el punto de ablandamiento y las viscosidades determinadas a distintas temperaturas. El modelo ha sido ajustado para distintos ligantes asfálticos, tanto convencionales como modificados y multigrados, utilizando la información contenida en una base de datos que se ha configurado especialmente y que contiene más de 5000 resultados. Se presentan los modelos propuestos, los resultados que se obtienen, la comparación con valores medidos experimentalmente y las conclusiones alcanzadas.

Abstract

The rheological properties of bituminous binders are of interest because they provide the viscoelastic characteristics to the asphalt. The penetration, softening point and viscosity tests are commonly used to characterize and typify bitumens for road use. More recently, the Dynamic Shear Rheometer (DSR) adopted by the Strategic Highway Research Program (SHRP) is used to determine the rheological properties of bituminous binders through the determination of the dynamic shear modulus G^* and the divergence between stresses and strains. However, the DSR, an equipment of high cost, is

not available in many laboratories. This work presents the development of empirical models to estimate these rheological properties using the results of conventional tests, such as penetration at 25° C, softening point and viscosities determined at different temperatures. The model has been adapted to different bitumens, both conventional and modified and multigrade, using information from a specific database containing more than 5.000 results. We present the proposed models, results, comparison with experimentally measured values and the resulting conclusions.

1. Introduccion

Los métodos de diseño de pavimentos asfálticos basados en principios mecanicistas requieren el conocimiento y caracterización de las propiedades mecánicas de los distintos materiales componentes. En el caso de las mezclas asfálticas, la principal propiedad mecánica de interés es el módulo dinámico. Esta propiedad depende, entre otros factores, de la rigidez del ligante asfáltico que le confiere las características viscoelásticas propias de este tipo de materiales.

Tradicionalmente, la penetración a 25 °C (Pen_{25}) y el punto de ablandamiento ($T_{a\&b}$) han sido utilizados para valorar empíricamente la consistencia de los asfaltos.

A partir de ellos es posible valorar la susceptibilidad térmica de los asfaltos a través del índice de penetración IP definido por Pfeiffer & Van Doormaal [1]:

$$IP = \frac{20 \cdot (1 - 25 \cdot A)}{(1 + 50 \cdot A)} \quad (1)$$

$$A = \frac{\log(800) - \log(Pen_{25})}{(T_{A\&B} - 25)} \quad (2)$$

Buscando una descripción racional de las propiedades reológicas de los asfaltos, en 1954, Van der Poel introdujo el concepto de stiffness (rigidez en español) de los asfaltos como una función de la temperatura y el tiempo de carga, basándose en el simple concepto del módulo de Young aplicado a materiales viscoelásticos [2].

Según Van der Poel, este módulo de rigidez de los asfaltos S_{bit} se define como el cociente entre la tensión aplicada y la deformación resultante, para un tiempo de carga t y una temperatura T del asfalto:

$$S_{bit} = \left(\frac{\sigma}{\epsilon} \right)_{t,T} \quad (3)$$

donde σ es la tensión aplicada y ϵ es la deformación resultante.

Basándose en los resultados obtenidos sobre 47 distintos ligantes asfálticos, Van der Poel desarrolló un nomograma de estimación del módulo de rigidez de los asfaltos para una condición de temperatura y un tiempo de carga utilizando resultados obtenidos convencionalmente para estos ligantes. Según Van der Poel, la precisión de este nomograma es ampliamente suficiente para aplicaciones ingenieriles, y S_{bit} puede ser estimado a cualquier temperatura y tiempo de carga con un factor de 2 [3]. Numerosos investigadores han establecido también que el nomograma fue desarrollado en una época en que los asfaltos eran convencionales y, en consecuencia, no es adecuado para ser usado con asfaltos modificados con polímeros [4,5,6].

Algunas pequeñas modificaciones al nomograma original de Van der Poel fueron realizadas en 1966 y 1973, con el objeto de considerar algunas inconsistencias observadas respecto a la hipótesis de equi-consistencia de los asfaltos a la temperatura del punto de ablandamiento "anillo y bola" [7,8].

Las funciones matemáticas usadas por Van der Poel para el desarrollo de su nomograma nunca fueron explicitadas en ninguna publicación. Sin embargo, Ullidtz [9] ha propuesto una fórmula de aproximación ajustando una porción limitada del nomograma de la forma:

$$S_{bit} = (1.157 \times 10^{-7}) \cdot (t^{-0.368}) \cdot (e^{-iP}) \cdot (T_{a\&b} - T)^5 \quad (4)$$

con t como tiempo de carga en segundos, IP como Índice de Penetración y T como temperatura del ligante asfáltico en $^{\circ}C$.

El uso de esta ecuación está restringida a tiempos t entre 0,01 y 0,1 segundos, IP entre -1,0 y +1,0 y diferencias entre el punto de ablandamiento $T_{a\&b}$ y la temperatura del asfalto ($T_{a\&b} - T$) entre 10 y 70 $^{\circ}C$.

En 1998 la compañía *Shell International Oil Products* desarrolló una versión computerizada del nomograma, disponible como un software comercial denominado *Bands 2.0* [10].

Si bien la rigidez del asfalto produce una descripción de las propiedades reológicas del mismo, ésta es incompleta por cuanto no describe el desfase entre tensiones y deformaciones que es característico de los materiales viscoelásticos.

La viscosidad es también una propiedad fundamental de los ligantes asfálticos, y es una medida de la resistencia a fluir de un líquido, definida como la relación entre la tensión de corte aplicada y la velocidad de deformación por corte resultante:

$$\eta = \frac{\tau}{\left(\frac{d\gamma}{dt}\right)} \quad (5)$$

donde η es la viscosidad, τ la tensión de corte y $(d\gamma/dt)$ la velocidad de deformación.

Actualmente está muy difundido el uso de los viscosímetros rotacionales, que posibilitan la determinación de la viscosidad de los ligantes asfálticos a distintas temperaturas. En esas condiciones, ha sido propuesta por ASTM una relación entre esta viscosidad y la temperatura [11] mediante una relación de la forma:

$$\log[\log(\eta)] = A + VTS \cdot \log(T) \quad (6)$$

donde η es la viscosidad en cP, T la temperatura en $^{\circ}Rankine$, A el parámetro de intersección de la viscosidad y VTS el parámetro para el Índice de Susceptibilidad Térmica del ligante.

Durante el desarrollo del Programa SHRP se propuso la utilización del Reómetro de Corte Dinámico *DSR* como el equipamiento óptimo para caracterizar mecánicamente el comportamiento reológico de los ligantes asfálticos en condiciones dinámicas, e incorporado para la especificación del grado de prestaciones *PG* de los materiales asfálticos.

En este equipo, una tensión de corte τ que oscila sinusoidalmente es aplicada a un delgado disco de asfalto dispuesto entre dos platos paralelos, y se determina la deformación de corte γ que resulta por esa tensión aplicada. Entonces el módulo dinámico de corte G^* es:

$$\log[\log(\eta_{f,T})] = A' + VTS' \cdot \log(T) \quad (7)$$

El ensayo puede llevarse a cabo a distintas temperaturas y frecuencias, de manera que se tenga una visión general del comportamiento reológico de ese material. Debido

a la naturaleza viscoelástica del asfalto, también puede ser determinado el desfase δ entre tensiones aplicadas y deformaciones resultantes.

Sin embargo, este equipo es muy costoso; y en consecuencia no está disponible en la mayoría de los laboratorios, por lo que se hace necesario desarrollar ecuaciones o métodos de estimación del módulo de corte dinámico G^* y el ángulo de desfase δ a partir de los resultados de ensayos convencionales.

Bari y Witczak [12] han propuesto un procedimiento de estimación de G^* y δ para una temperatura y frecuencia a partir de la relación A-VTS.

Primero, una relación A-VTS modificada, que introduce el efecto de la frecuencia sobre la viscosidad del ligante, es formulada como:

$$G^* = \frac{\tau}{\gamma} \quad (8)$$

donde $\eta_{f,T}$ en cP es la viscosidad del ligante como función de la frecuencia de carga f y la temperatura T ; A' y VTS' son los parámetros A y VTS modificados con:

$$A' = 0.9699 \cdot f^{-0.0527} \times A \quad (9)$$

$$VTS' = 0.9668 \cdot f^{-0.0575} \times VTS \quad (10)$$

Luego, el ángulo de fase δ es estimado a partir de la ecuación:

$$\delta = 90 + (-7.3146 - 2.6162 \cdot VTS') \times \log(f \cdot \eta_{f,T}) + (0.1124 + 0.2029 \cdot VTS') \times [\log(f \cdot \eta_{f,T})]^2 \quad (11)$$

y entonces el módulo dinámico de corte G^* es establecido como:

$$G^* = 0.0051 \cdot f \cdot \eta_{f,T} \cdot (\sin \delta)^{7.1542 - 0.4929f + 0.0211f^2} \quad (12)$$

En este procedimiento de estimación, la viscosidad es usada como parámetro de predicción. El mayor inconveniente en este caso es que la estimación de G^* no es directa, por cuanto se requiere una estimación previa del ángulo de fase δ .

Este trabajo presenta dos modelos de estimación empíricos de los parámetros reológicos G^* y δ de ligantes convencionales y modificados. En el primero de ellos se han utilizado la penetración a 25 $^{\circ}C$ y el punto de ablandamiento como parámetros de predicción, mientras que para el segundo se ha usado la viscosidad.

Estos modelos han sido ajustados utilizando la información contenida en una base de datos que se ha configurado especialmente, y que contiene más de 5000 resultados. Se presentan los modelos propuestos, los resultados que se obtienen mediante el mismo, la valoración de la bondad del ajuste entre valores medidos y estimados y las conclusiones alcanzadas.

Tabla 1: Ligantes considerados

Nº	Designación	Descripción	Conv. / Modif.	Condición
1	P1	PG58-22	Convencional	Original
2	P1	PG58-22	Convencional	RTFOT
3	P1	PG58-22	Convencional	PAV100
4	P1	PG58-22	Convencional	PAV110
5	P2	PG64-16	Convencional	Original
6	P2	PG64-16	Convencional	RTFOT
7	P2	PG64-16	Convencional	PAV100
8	P2	PG64-16	Convencional	PAV110
9	C11	PG64-22	Convencional	Original
10	C11	PG64-22	Convencional	RTFOT
11	C11	PG64-22	Convencional	PAV100
12	C11	PG64-22	Convencional	PAV110
13	C21	PG76-16	Convencional	Original
14	C21	PG76-16	Convencional	RTFOT
15	C21	PG76-16	Convencional	PAV100
16	C21	PG76-16	Convencional	PAV110
17	N1	PG70-10	Convencional	Original
18	N1	PG70-10	Convencional	RTFOT
19	N1	PG70-10	Convencional	PAV100
20	N1	PG70-10	Convencional	PAV110
21	N2	PG70-10	Convencional	Original
22	N2	PG70-10	Convencional	RTFOT
23	N2	PG70-10	Convencional	PAV100
24	N2	PG70-10	Convencional	PAV110
25	C1	CA10	Convencional	Original
26	C1	CA10	Convencional	RTFOT
27	C2	CA20	Convencional	Original
28	C2	CA20	Convencional	RTFOT
29	C3	CA30	Convencional	Original
30	C3	CA30	Convencional	RTFOT
31	M2	Multigrado	Modificado	Original
32	M2	Multigrado	Modificado	RTFOT
33	MP1	Modificado (EVA)	Modificado	Original
34	MP1	Modificado (EVA)	Modificado	RTFOT
35	MP2	Modificado (SBS)	Modificado	Original
36	MP2	Modificado (SBS)	Modificado	RTFOT
37	MP3	Modificado (SBS)	Modificado	Original
38	MP3	Modificado (SBS)	Modificado	RTFOT
39	PG	PG64-22	Convencional	Original
40	PG	PG64-22	Convencional	RTFOT
41	PG	PG64-22	Convencional	PAV100
42	PG	PG64-22	Convencional	PAV110
43	CA1	CA30	Convencional	Original
44	CA2	50-60	Convencional	Original
45	AM	Modificado AM3 (SBS)	Modificado	Original
46	1SBH	Modificado (1% polietileno reciclado)	Modificado	Original
47	2SBH	Modificado (2% polietileno reciclado)	Modificado	Original
48	3SBH	Modificado (3% polietileno reciclado)	Modificado	Original
49	4SBH	Modificado (4% polietileno reciclado)	Modificado	Original

2. Materiales empleados y metodología experimental

Para este trabajo se han considerado resultados informados por J. Bari en su Tesis de Maestría ^[13], por F. Morea en su Tesis Doctoral ^[14] y otros obtenidos por los autores de este trabajo en distintas etapas previas de investigación, totalizando valores de 49 asfaltos tanto convencionales como modificados y con diferentes grados de envejecimiento.

Para todos ellos, los resultados de la penetración a 25 °C (Pen_{25}), el punto de ablandamiento ($T_{a\&b}$), la viscosidad rotacional a diferentes temperaturas, el módulo de corte dinámico G^* y el ángulo de desfase δ para un amplio rango de temperaturas de ensayo y frecuencias de sollicitación han sido compilados en una larga base de datos, que contiene aproximadamente 5600 conjuntos de datos.

3. Desarrollo de modelos de estimación de G^* y δ usando Pen_{25} y $T_{a\&b}$

Se han desarrollado dos modelos de estimación empíricos de G^* y δ , utilizando como variables de entrada la penetración a 25 °C (Pen_{25}) y el punto de ablandamiento ($T_{a\&b}$). El modelo de estimación empírico propuesto es de tipo polinómico, obtenido por prueba y error a partir de varias posibles opciones que fueron optimizándose progresivamente, utilizando un procedimiento no lineal con la función Solver del programa Excel, minimizando la suma del error cuadrático entre los valores medidos de G^* y los estimados por el modelo para todos los ligantes, temperaturas y frecuencias incluidas en la base de datos referida en un espacio doble-logarítmico.

El modelo final de estimación de G^* resulta:

$$\log(G^*) = a_1 \cdot (T_{a\&b} - T)^2 + [a_2 \cdot \log(f) + a_3] \cdot (T_{a\&b} - T) + [a_4 \cdot \log(f) + a_5] \quad (13)$$

con:

$$a_1 = 0.000232 \quad (14)$$

$$a_2 = 0.000446 \cdot IP - 0.004097 \quad (15)$$

$$a_3 = 0.000227 \cdot IP^2 - 0.006002 \cdot IP + 0.059462 \quad (16)$$

$$a_4 = 0.002189 \cdot IP^2 - 0.027486 \cdot IP + 0.791450 \quad (17)$$

$$a_5 = -0.003872 \cdot IP^2 - 0.178917 \cdot IP + 3.825399 \quad (18)$$

y G^* es el módulo de corte dinámico en Pa a la temperatura T en °C y la frecuencia f en Hz, $T_{a\&b}$ es el Punto de Ablandamiento en °C e IP es el Índice de Penetración.

Para el ángulo de fase δ resulta:

$$\delta = b_1 \cdot (T_{a\&b} - T)^2 + [b_2 \cdot \log(f) + b_3] \cdot (T_{a\&b} - T) + [b_4 \cdot \log(f) + b_5] \quad (19)$$

con:

$$b_1 = -0.000106 \quad (20)$$

$$b_2 = 0.000552 \cdot IP - 0.000978 \quad (21)$$

$$b_3 = 0.000308 \cdot IP^2 + 0.000740 \cdot IP - 0.007808 \quad (22)$$

$$b_4 = -0.004780 \cdot IP^2 - 0.005437 \cdot IP - 0.067407 \quad (23)$$

$$b_5 = -0.002645 \cdot IP^2 - 0.0187785 \cdot IP + 1.385008 \quad (24)$$

y δ es el ángulo de desfase en radianes a la temperatura T en °C y la frecuencia f en Hz.

La Figura 1 muestra la comparación entre valores medidos y estimados del módulo de corte dinámico G^* resultante del modelo anterior, para los ligantes convencionales y modificados incluidos en la base de datos.

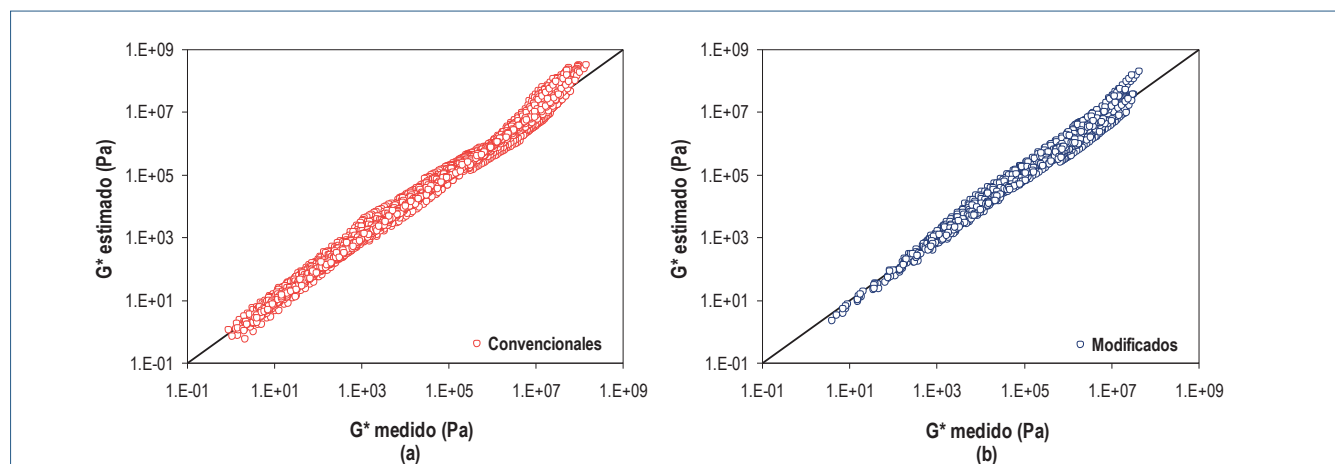


Figura 1: Comparación de valores medidos y estimados de G^* usando Pen_{25} y $T_{a\&b}$ como parámetros de predicción (a) Ligantes convencionales (b) Ligantes modificados

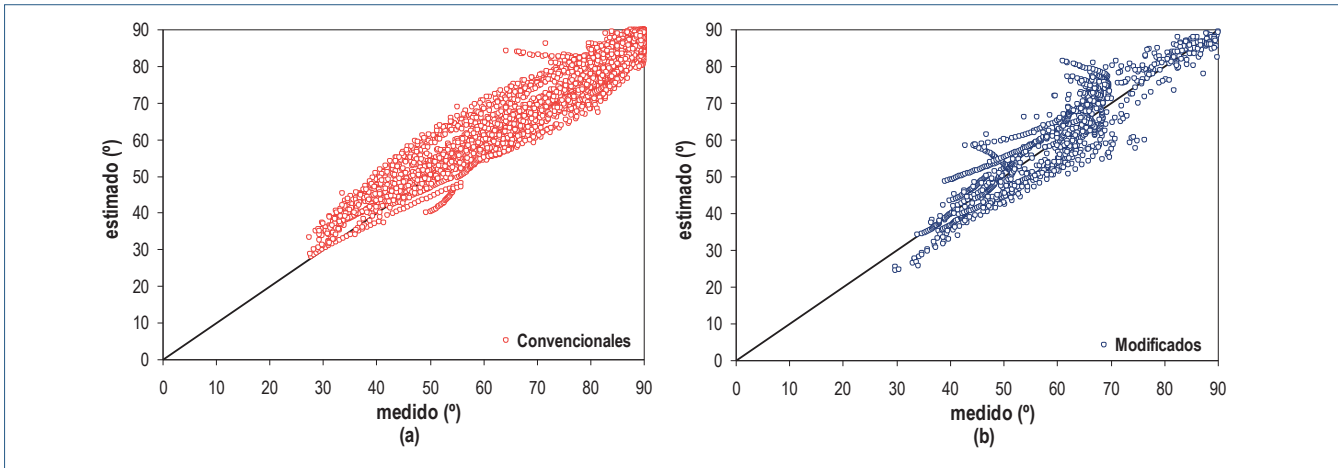


Figura 2: Comparación de valores medidos y estimados de δ usando Pen_{25} y $T_{a\&b}$ como parámetros de predicción (a) Ligantes convencionales (b) Ligantes modificados

La Figura 2 muestra la misma comparación entre valores medidos y estimados para el ángulo de desfase δ .

Para evaluar la calidad de las estimaciones resultantes de estos modelos se ha utilizado un criterio estadístico de “buen ajuste” propuesto por Witczak y otros [15] y mostrado en la Tabla 2. Las estadísticas incluyen la relación entre el error típico de la estimación de los valores y la desviación estándar de valores medidos (Se/Sy) y el coeficiente de correlación, R^2 .

La Tabla 3 presenta la evaluación de estos modelos de estimación de acuerdo con ese criterio subjetivo propuesto y para los resultados expresados en un espacio logarítmico para G^* y otro aritmético para δ . La calidad de

las estimaciones para los modelos desarrollados usando la penetración a 25 °C y el punto de ablandamiento como factores de predicción resulta entre excelente y bueno de acuerdo al criterio de “buen ajuste” subjetivo usado, tanto para el conjunto total de resultados como cuando éstos son disgregados en subgrupos separadamente para los ligantes convencionales y los modificados.

Tabla 2: Criterio estadístico subjetivo de “buen ajuste”		
Criterio	R^2	Se/Sy
Excelente	$\geq 0,90$	$\leq 0,35$
Bueno	$0,70 - 0,89$	$0,36 - 0,55$
Adecuado	$0,40 - 0,69$	$0,56 - 0,75$
Pobre	$0,20 - 0,39$	$0,76 - 0,89$
Muy Pobre	$\leq 0,19$	$\geq 0,90$

Tabla 3: Evaluación de los modelos de predicción usando Pen_{25} y $T_{a\&b}$				
Modelo	Ligantes	R^2	Se/Sy	Evaluación
$G^* - Pen_{25}/T_{a\&b}$ (Espacio Logarítmico)	Todos	99,0%	0,10	Excelente/ Excelente
	Convencionales	99,1%	0,09	Excelente/ Excelente
	Modificados	98,2%	0,13	Excelente/ Excelente
$\delta - Pen_{25}/T_{a\&b}$ (Espacio Aritmético)	Todos	92,2%	0,26	Excelente/ Excelente
	Convencionales	93,8%	0,22	Excelente/ Excelente
	Modificados	83,9%	0,45	Bueno/Bueno

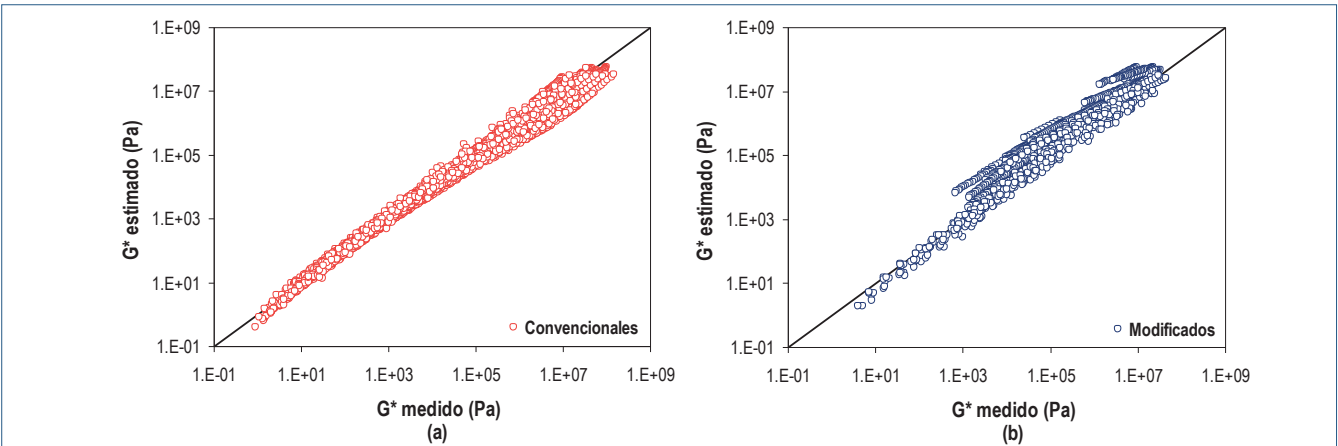


Figura 3: Comparación de valores medidos y estimados de G^* usando $Visc_I$ como parámetro de predicción (a) Ligantes convencionales (b) Ligantes modificados

4. Desarrollo de modelos de estimación de G^* y δ usando la viscosidad

En este caso, siguiendo una metodología similar a la utilizada previamente, se han desarrollado dos modelos de estimación de G^* y δ usando la viscosidad ($Visc_T$) como parámetro de predicción. El modelo de estimación de G^* resulta:

$$\log(G^*) = c_1 \cdot [\log(Visc_T)]^2 + [c_2 \cdot \log(T/f) + c_3] \cdot \log(Visc_T) + [c_4 \cdot \log(T/f) + c_5] \quad (25)$$

con:

$$c_1 = 0.00141 \cdot VTS^2 + 0.00465 \cdot VTS - 0.03635 \quad (26)$$

$$c_2 = 0.01433 \cdot VTS^2 + 0.13124 \cdot VTS + 0.36764 \quad (27)$$

$$c_3 = -0.04005 \cdot VTS^2 - 0.12529 \cdot VTS + 1.19337 \quad (28)$$

$$c_4 = -0.09266 \cdot VTS^2 - 0.75342 \cdot VTS - 2.83358 \quad (29)$$

$$c_5 = -0.01087 \cdot VTS^2 - 1.02485 \cdot VTS - 3.81335 \quad (30)$$

donde $Visc_T$ es la viscosidad del ligante a la temperatura T en cP, T es la temperatura en $^{\circ}C$, f es la frecuencia en Hz, y VTS es el parámetro de susceptibilidad térmica de la ecuación (6). Para estimar la viscosidad $Visc_T$ a la temperatura T es necesario recurrir a la relación A-VTS mostrada previamente.

La Figura 3 muestra la comparación de valores de G^* medidos y estimados mediante la ecuación de predicción.

Para el ángulo de fase δ , el modelo que se propone resulta:

$$\delta = d_1 \cdot [\log(Visc_T)]^2 + [d_2 \cdot \log(T/f) + d_3] \cdot \log(Visc_T) + [d_4 \cdot \log(T/f) + d_5] \quad (31)$$

con:

$$d_1 = 0.00398 \cdot VTS + 0.01052 \quad (32)$$

$$d_2 = -0.00923 \cdot VTS^2 - 0.07568 \cdot VTS - 0.12880 \quad (33)$$

$$d_3 = 0.00650 \cdot VTS^2 - 0.04363 \cdot VTS - 0.31727 \quad (34)$$

$$d_4 = 0.05443 \cdot VTS^2 + 0.44782 \cdot VTS + 0.81228 \quad (35)$$

$$d_5 = -0.00785 \cdot VTS^2 + 0.29045 \cdot VTS + 2.99781 \quad (36)$$

donde δ es el ángulo de fase en radianes y los restantes parámetros tienen el mismo significado indicado previamente.

La Figura 4 muestra la comparación de valores de δ medidos y estimados mediante la ecuación de predicción.

La calidad de la estimación para los modelos desarrollados usando la viscosidad como factor de predicción ha sido evaluada usando el mismo criterio subjetivo utilizado previamente resultando las valoraciones que se indican en la Tabla 4.

En este caso, la calidad de las estimaciones para los modelos desarrollados usando la viscosidad como factor de predicción resulta excelente para G^* , y entre excelente y adecuado para el ángulo de desfase δ tanto para el conjun-

Tabla 4: Evaluación de los modelos de predicción usando la Viscosidad

Modelo	Ligantes	R ²	Se/Sy	Evaluación
$G^* - Visc_T$ (Espacio Logarítmico)	Todos	97,4%	0,16	Excelente/ Excelente
	Convencionales	98,9%	0,10	Excelente/ Excelente
	Modificados	94,5%	0,24	Excelente/ Excelente
$\delta - Visc_T$ (Espacio Aritmético)	Todos	87,5%	0,31	Bueno/ Excelente
	Convencionales	93,8%	0,20	Excelente/ Excelente
	Modificados	71,5%	0,66	Bueno/ Adecuado

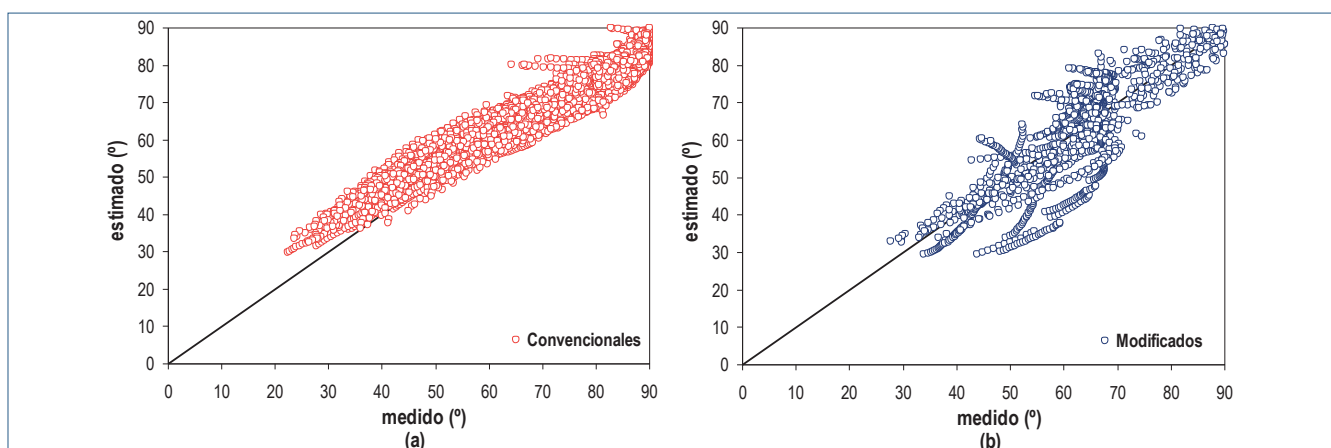


Figura 4: Comparación de valores medidos y estimados de δ usando $Visc_T$ como parámetro de predicción
(a) Ligantes convencionales (b) Ligantes modificados

to total de resultados así como cuando éstos son disgregados en los subgrupos de los ligantes convencionales y los modificados separadamente.

5. Conclusiones

- Se han desarrollado modelos de predicción del módulo de corte dinámico G^* y del ángulo de desfase δ de asfaltos convencionales y modificados, usando como factores de predicción características convencionalmente determinadas, como son la penetración a 25 °C, el punto de ablandamiento o la viscosidad rotacional.
- Estos modelos de estimación son de tipo empírico y de estructura polinómica, obtenidos por prueba y error a partir de varias posibles opciones que fueron optimizadas utilizando un procedimiento no lineal con la función Solver del programa Excel, minimizando la suma del error cuadrático entre los valores medidos y los estimados.
- Los modelos han sido ajustados usando los resultados contenidos en una amplia base de datos, con aproximadamente 5600 conjuntos de datos recopilados de diversas fuentes.
- En el caso de los modelos de estimación de G^* usando la penetración a 25 °C y el punto de ablandamiento, la calidad de las predicciones es excelente, tanto para el conjunto de datos como cuando éstos son disgregados en dos conjuntos diferentes para los asfaltos convencionales y modificados. Lo mismo ocurre para el modelo de predicción de G^* usando la viscosidad como factor de predicción.
- La calidad de las estimaciones para el caso de los modelos de estimación de δ usando la penetración a 25 °C y el punto de ablandamiento o la viscosidad, y sólo para el conjunto de los asfaltos convencionales, resulta excelente. Sin embargo, para el conjunto de los ligantes modificados la calidad de las estimaciones resulta afectada, variando entre buena y adecuada. Esta observación es consecuente con el comportamiento reológico más complejo de los asfaltos modificados.
- Se destaca que estos modelos desarrollados son herramientas de estimación que no reemplazan las determinaciones experimentales.
- Sin embargo, estos modelos basados en resultados empíricos convencionalmente obtenidos en los laboratorios viales permiten predecir de una manera suficientemente precisa las propiedades reológicas fundamentales de los cementos asfálticos para ser empleadas con propósitos prácticos en el diseño estructural de pavimentos flexibles.

6. Referencias bibliográficas

- [1] Pfeiffer, J. P. and van Doormaal. 1936. "The rheological properties of asphaltic bitumen". Journal of the Institute of Petroleum Technologists. 22: 414.
- [2] Van der Poel C. "A general system describing the viscoelastic properties of bitumens and its relation to routine test data". J. Appl. Chem.; 4:231–6. 1954.
- [3] Bonnaure F, Gest G, Gravois A, Uge P. "A new method of predicting the stiffness of asphalt paving mixtures". Proc. Association of Asphalt Paving Technologists, 46:64–104. 1977.
- [4] Read J, Whiteoak D. "The Shell bitumen handbook". 5^a ed. London. Thomas Telford Publishing. 2003.
- [5] Anderson D. A, Christensen D. W., Bahia H. U., Dongré R., Sharma M. G. and Antle C. E. "Binder characterization and evaluation", vol. 3: physical characterization. Report SHRP-A-369. 1994.
- [6] Yusoff, N. I., Shaw, M. T. and Airey, G. D. "Modelling the linear viscoelastic rheological properties of bituminous binders". Construction and Building Materials 25, 2171–2189. 2011.
- [7] Heukelom W. "Observations on the rheology and fracture of bitumens and asphalt mixes". Proc Association of Asphalt Paving Technologists. 36:359–97. 1966.
- [8] Heukelom, W. "An improved method of characterizing asphaltic bitumens with the aid of their mechanical properties". Proc Association of Asphalt Paving Technologists. 42: 67–98. 1973.
- [9] Ullidtz, P. "A fundamental method for the prediction of roughness, rutting and cracking in asphalt pavements". Proc Association of Asphalt Paving Technologists. 48: 557–586. 1979.
- [10] Shell International Oil Products. Bands2. 1998.
- [11] American Society of Testing and Materials. D2493-01 "Standard Viscosity-Temperature chart for asphalts". Volume 04.03. 2009.
- [12] Bari, J. and Witczak, M. W. "New predictive models for viscosity and complex shear modulus of asphalt binders: for use with mechanistic-empirical pavement design guide". Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2001: 9-19.2007.
- [13] Bari, J. "Investigation of the rheological properties of typical asphalt binders used in Arizona". MSc. Thesis. Arizona State University. 2001.
- [14] Morea, F. "Deformaciones permanentes en mezclas asfálticas. Efecto de la reología de los asfaltos, la temperatura y condiciones de carga". Tesis presentada para el grado de Doctor en Ingeniería, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de La Plata. 2011.
- [15] Witczak, M.W., T. Pellinen and M. El-Basyouny. "Pursuit of the Simple Performance Test for Asphalt Concrete Fracture/Cracking", Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, Volume 71, 2002. ❖