

UN MODELO EMPIRICO DE ESTIMACION DE LAS PROPIEDADES REOLOGICAS DE LIGANTES ASFALTICOS

Dr. Ing. Silvia Angelone

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
Teléfono 0341-4808538 Interno 136 - Fax: 0341-04808540
Correo Electrónico: sangelon@fceia.unr.edu.ar

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
Teléfono 0341-4808538 Interno 136 - Fax: 0341-04808540
Correo Electrónico: marina_cc02@yahoo.com.ar

Dr. Ing. Fernando Martínez

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
Teléfono 0341-4808538 Interno 136 - Fax: 0341-04808540
Correo Electrónico: fermar@fceia.unr.edu.ar

Resumen

Las propiedades reológicas de los ligantes asfálticos son de interés por cuanto son las que les confieren las características viscoelásticas que son 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 el desfase entre tensiones y deformaciones. Sin embargo, el DSR es un equipo de alto costo y que no está disponible en muchos laboratorios. Este trabajo presenta el desarrollo de modelos empíricos de estimación de estas propiedades reológicas utilizando los resultados de ensayos convencionales tales 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 conteniendo más de 5000 resultados. Se presentan los modelos propuestos, los resultados que se obtienen mediante el mismo, la comparación con valores medidos experimentalmente y las conclusiones alcanzadas.

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 es dependiente 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] como:

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

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

Buscando una descripción racional de las propiedades reológicas de los asfaltos, en 1954, Van der Poel introdujo el concepto de Stiffness (o módulo de 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].

De acuerdo con Van der Poel, este módulo de rigidez de los asfaltos S_{bit} es definido como el cociente entre la tensión aplicada y la deformación resultante para un dado tiempo de carga t y una temperatura T del asfalto como:

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

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 dada condición de temperatura y tiempo de carga utilizando resultados obtenidos convencionalmente para estos ligantes. De acuerdo con Van der Poel la precisión de este nomograma es ampliamente suficiente para aplicaciones ingenieriles y Sbit 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 es el Índice de Penetración y T es la temperatura del ligante asfáltico en °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 la temperatura del Punto de Ablandamiento $T_{a\&b}$ y la temperatura del asfalto ($T_{a\&b} - T$) entre 10 y 70 °C.

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

Si bien el Stiffness 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 como:

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

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, una relación entre esta viscosidad y la temperatura ha sido propuesta por ASTM^[11] mediante la relación A-VTS de la forma:

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

donde η es la viscosidad en cPoises, T es la temperatura en °Rankine, A es el parámetro de intersección de la viscosidad y VTS es 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 performance 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 calculado como:

$$G^* = \frac{\tau}{\gamma} \quad (7)$$

El ensayo puede llevarse a cabo a distintas temperaturas y frecuencias de manera de tener 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 dada 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:

$$\log[\log(\eta_{f,T})] = A' + VTS' \cdot \log(T) \quad (8)$$

donde $\eta_{f,T}$ es la viscosidad del ligante como función de la frecuencia de carga f y la temperatura T en cPoises; 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:

$$G^* = 0.0051 \cdot f \cdot \eta_{f,T} \cdot (\sin \delta)^{7.1542 - 0.4929f + 0.021f^2} \quad (12)$$

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 °C y el Punto de Ablandamiento como parámetros de predicción en tanto 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 conteniendo 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.

2. MATERIALES EMPLEADOS Y METODOLOGIA 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 desfasaje δ para un amplio rango de temperaturas de ensayo y frecuencias de sollicitación han sido compilados en una larga base de datos conteniendo 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 utilizado un procedimiento no lineal con la función Solver del programa Excel minimizando la suma del error cuadrático entre los valores medidos de G^* y 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 fase 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.

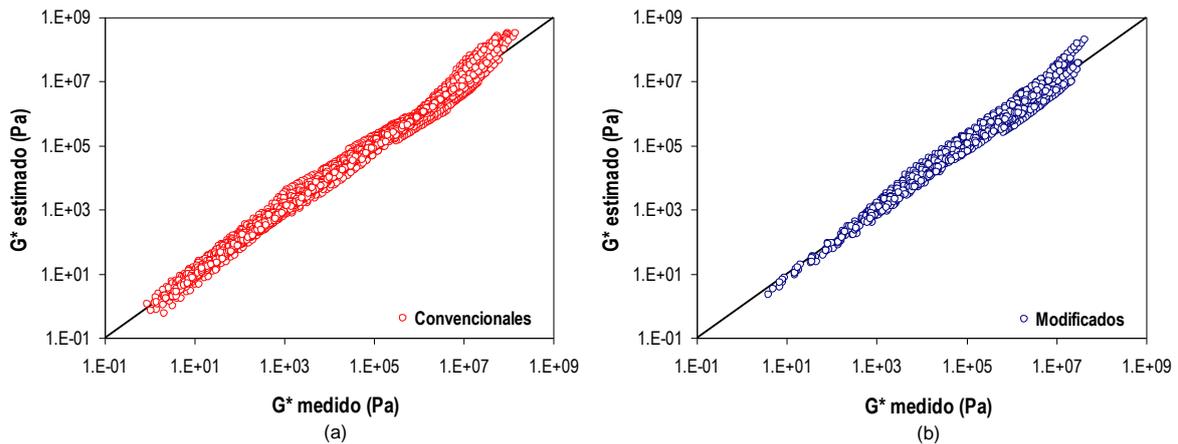


Figura 1: Comparación de valores medidos y estimados de G^* usando Pen_{25} y $T_{a\&b}$ como parámetros de predicción

(a) Ligantes convencionales (b) Ligantes modificados

La Figura 2 muestra la misma comparación entre valores medidos y estimados para el ángulo de fase 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 1. 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 2 presenta la evaluación de estos modelos de estimación de acuerdo con ese criterio subjetivo propuesto y para los resultados expresados en espacio logarítmico para G^* y 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 así como cuando éstos son disgregados en subgrupos para los ligantes convencionales y los modificados separadamente.

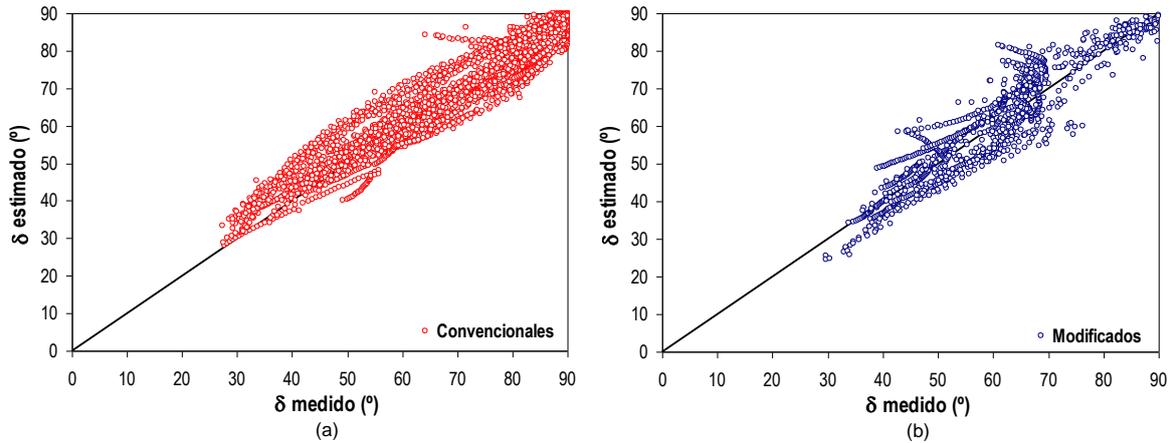


Figura 2: Comparación de valores medidos y estimados de δ usando Pen_{25} y $T_{a\&b}$ como parámetros de predicción

(a) Ligantes convencionales (b) Ligantes modificados

Tabla 1: Criterio estadístico subjetivo de “buen ajuste”

Criterio	R^2	Se/Sy
Excelente	≥ 0.90	≤ 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	≤ 0.19	≥ 0.90

Tabla 2: 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
δ - $Pen_{25}/T_{a\&b}$ (Espacio Aritmético)	Todos	92.2%	0.26	Excelente/Excelente
	Convencionales	93.8%	0.22	Excelente/Excelente
	Modificados	83.9%	0.45	Bueno/Bueno

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 cPoises, 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.

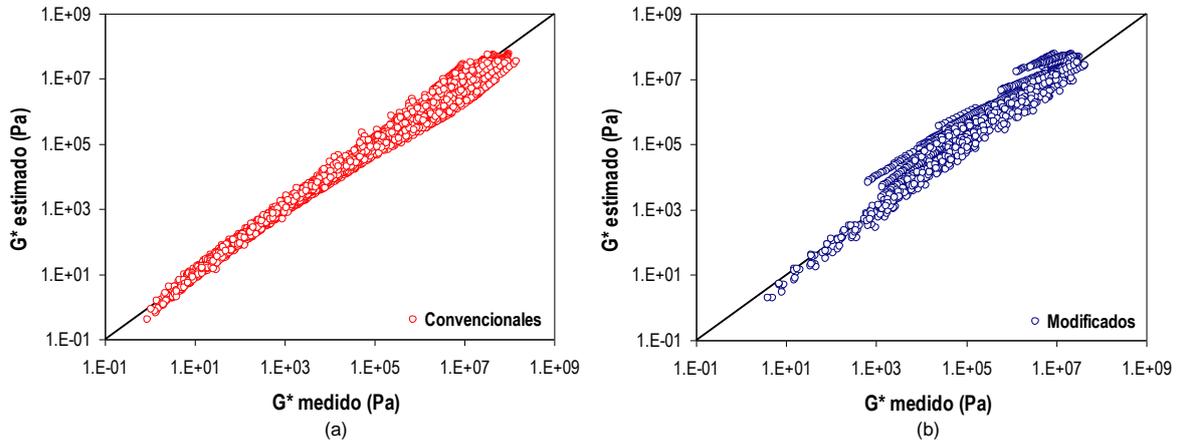


Figura 3: Comparación de valores medidos y estimados de G^* usando $Visc_T$ como parámetro de predicción

(a) Ligantes convencionales (b) Ligantes modificados

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.

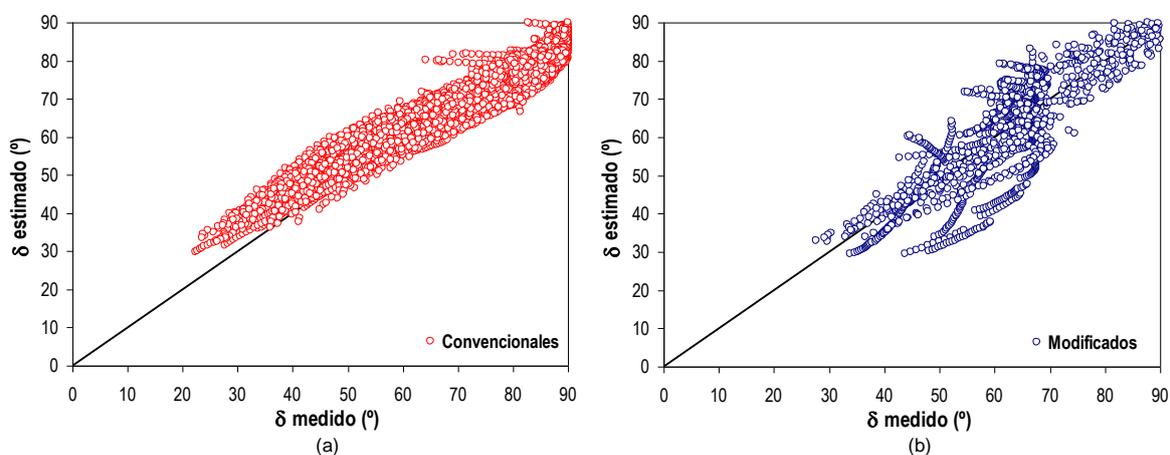


Figura 4: Comparación de valores medidos y estimados de δ usando $Visc_T$ como parámetro de predicción

(a) Ligantes convencionales (b) Ligantes modificados

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 3.

Tabla 3: 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
δ - $Visc_T$ (Espacio Aritmético)	Todos	87.5%	0.31	Bueno/Excelente
	Convencionales	93.8%	0.20	Excelente/Excelente
	Modificados	71.5%	0.66	Bueno/Adecuado

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 fase δ tanto para el conjunto 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 fase 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 valores medidos y 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 así 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 que son 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 BIBLIOGRAFICAS

- [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". 5th 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.