

# CALIBRACION DE MODELOS BASADOS EN CURVAS MAESTRAS PARA TEMPERATURAS DE MEZCLADO Y COMPACTACION EN COSTA RICA

## MASTER CURVES MODEL CALIBRATION FOR MIXING AND COMPACTION TEMPERATURES IN COSTA RICA

Ing. J. P. Aguiar Moya, Ph.D<sup>1</sup>, T.Quim. R. E. Villegas Villegas<sup>2</sup>,  
Ing. E. Rodríguez Castro<sup>3</sup>, Ing. L. G. Loria Salazar, Ph.D<sup>4</sup>

### RESUMEN

Por muchos años, la determinación de las temperaturas de mezclado y compactación del asfalto se han basado en el principio de equiviscosidad. Dicho principio se basa en la determinación de la viscosidad a varias temperaturas y posteriormente calcular cuál es la temperatura asociada a ciertas viscosidades que históricamente se han definido como las adecuadas para el mezclado y la compactación de la mezcla asfáltica. No obstante, las temperaturas que este método sugiere para asfaltos modificados son generalmente muy altas y resultan en la oxidación excesiva del asfalto.

Debido a esto, a nivel mundial se han desarrollado varias metodologías empíricas o reológicas que pretenden identificar dichas temperaturas para asfaltos modificados o sin modificar. Una de estas metodologías se basa en el ángulo de fase del asfalto y ha demostrado ser apropiada para la determinación de las temperaturas de mezclado y compactación para una amplia gama de asfaltos en Estados Unidos. Sin embargo, al probar dicho modelo en Costa Rica, las estimaciones del mismo resultan no ser adecuadas.

De tal forma en este artículo se pretende calibrar dichos modelos con base en los asfaltos utilizados en el país. Para realizar esto, se evaluaron 9 asfaltos distintos (modificados o sin modificar) y se corrieron barridos de frecuencia a varias temperaturas con el fin de obtener la curva maestra para cada asfalto. Con base en esta información se calibraron los modelos y se demuestra que los resultados obtenidos son muy prometedores para los asfaltos disponibles en el país.

**Palabras Claves:** Ángulo de fase, curvas maestras, temperatura de mezclado, temperatura de compactación.

### ABSTRACT

*For many years, the estimation of the mixing and compaction temperatures for asphalt has been based on the principle of equiviscosity. This principle is based on the measurement of viscosities at various temperatures, followed by the estimation of the temperature associated with certain viscosities that have historically been proven to define adequate mixing and compaction temperatures for the asphalt mix. However, the temperatures that the method suggests for modified binders are generally too high and often result in excessive aging of the binder.*

*Because of this, at the international level several empirical and rheological methodologies that pretend to identify these temperatures for modified and unmodified binders have been developed. One of this methodologies is based on the phase angle of the binder and has proven to be adequate for the estimation of the mixing and compaction temperatures of a wide range of binders in the US. However, when the methodology was tested with Costa Rican binders, the results of the model were not always adequate.*

*Therefore, this article pretends to calibrate these models based on the binders in use in Costa Rica. In order to achieve this, 9 different asphalt binders were evaluated (modified and non modified) and frequency sweeps were performed at various temperatures with the objective of determining the master curve for each binder. Then the information was used to calibrate the models and demonstrates that the obtained results are very promising for the binders that are available in the country.*

**Keywords:** Phase angle, mastercurves, mixing temperature, compaction temperature

<sup>1</sup> Coordinador de Unidad de Materiales y Pavimentos, LanammeUCR, Universidad de Costa Rica  
e-mail: [jose.aguiar@ucr.ac.cr](mailto:jose.aguiar@ucr.ac.cr), tel: + (506) 2511-2529, fax: + (506) 2511-4442

<sup>2</sup> Laboratorio de Ligantes Asfálticos y Materiales, LanammeUCR, Universidad de Costa Rica  
e-mail: [rafael.villegas@ucr.ac.cr](mailto:rafael.villegas@ucr.ac.cr), tel: + (506) 2511-4963, fax: + (506) 2511-4442

<sup>3</sup> Jefe Laboratorio de Ligantes Asfálticos y Materiales, LanammeUCR, Universidad de Costa Rica  
e-mail: [ellen.rodriguez@ucr.ac.cr](mailto:ellen.rodriguez@ucr.ac.cr), tel: + (506) 2511-2512, fax: + (506) 2511-4442

<sup>4</sup> Coordinador General Programa de Infraestructura del Transporte, LanammeUCR, Universidad de Costa Rica  
e-mail: [luis.loriasalazar@ucr.ac.cr](mailto:luis.loriasalazar@ucr.ac.cr), tel: + (506) 2511-4080, fax: + (506) 2511-4442

## INTRODUCCIÓN

Durante los años 90, como resultado de SHRP, se dió un salto significativo en las metodologías de caracterización de ligantes asfálticos. Dicho estudio resultó en la metodología Superpave®, la cual fue altamente novedosa en términos de caracterización de ligantes asfálticos puesto que se incorporó el concepto de desempeño del ligante y el efecto de la temperatura en el mismo, algo que las metodologías previas de caracterización de ligantes (ej. penetración, viscosidad) no consideraban directamente (1,2,3). No obstante, en la actualidad, nuevos materiales y tecnologías son utilizados comúnmente: un ejemplo de esto son los ligantes modificados. Esto ha dificultado la determinación de ciertos parámetros tan básicos e importantes como lo son la temperatura de mezclado y compactación de la mezcla asfáltica.

Siguiendo la línea de metodologías previas (ej. Marshall), la metodología Superpave® basa el cálculo de las temperaturas de mezclado y compactación en el principio de equiviscosidad. El principio de equiviscosidad, que se basa en las viscosidades del ligante asfáltico, es el que históricamente se ha venido usando para la determinación de las temperaturas de mezclado y compactación de la mezcla asfáltica. Con base en este principio, todo ligante asfáltico debería resultar en el mismo contenido óptimo de ligante a 4% de vacíos, cuando todas las demás propiedades (eg. esfuerzo de compactación, granulometría) se mantienen constantes (4). Sin embargo, es claro que para que este principio sea cierto, el envejecimiento que sufre cualquier ligante asfáltico previo a la compactación debería ser el mismo.

Según la norma ASTM D6925, la temperatura de mezclado y la temperatura de compactación corresponden a valores de viscosidad de  $0,17 \pm 0,02$  Pa·s y  $0,28 \pm 0,03$  Pa·s respectivamente (5) (Figura 1). Estos rangos fueron desarrollados en base a ligantes asfálticos no modificados, y desde un punto de vista práctico, los ligantes asfálticos no deberían calentarse a más de  $165\text{ }^{\circ}\text{C}$  de manera que no se incurra en un envejecimiento excesivo del mismo (6). Sin embargo, con base en dichos rangos, es muy común que ligantes asfálticos modificados con polímeros resulten en temperaturas de mezclado y compactación mucho mayores a las que en realidad se necesitan, superando inclusive los  $190\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Esto es un problema serio puesto que se traduce en excesiva oxidación del ligante asfáltico, producción de vapores durante el calentamiento y drenaje del ligante asfáltico, lo que puede resultar en contenidos de asfalto inferiores a los esperados. Ya desde los años 60 se demostró que la mayoría de las reacciones de oxidación se duplican con cada incremento de  $10\text{ }^{\circ}\text{C}$  (7), por lo que la oxidación generado por sobrecalentar un asfalto en  $30\text{ }^{\circ}\text{C}$  o más tendrá repercusiones graves en el desempeño de la mezcla asfáltica. Adicionalmente, hay otros problemas que van asociados a la oxidación del asfalto como lo son problemas constructivos y exceso de vapores generados producto de la excesiva oxidación.

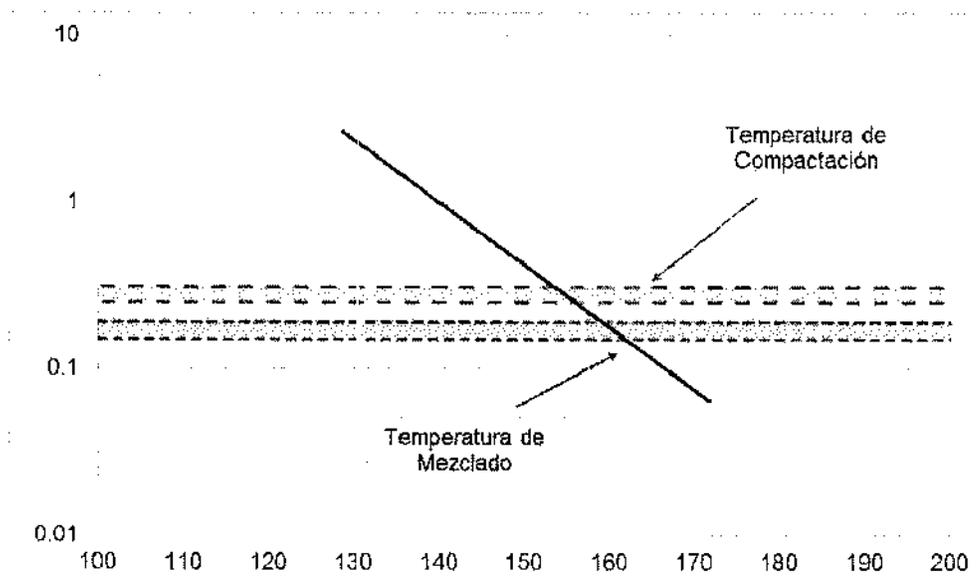


Figura 1. Gráfico para selección de temperaturas de mezclado y compactación por principio de equiviscosidad.

En general, la elección de temperaturas de mezclado y compactación son típicamente basadas en experiencia (lo cual es el caso en la gran mayoría de DOTs donde las temperaturas de mezclado y compactación están

definidas, típicamente según grado PG, en sus especificaciones locales), o en recomendaciones del proveedor del asfalto modificado o del modificante. Esta práctica puede ser problemática cuando el productor del modificante o la Agencia no tienen gran experiencia en el tipo de aplicación. En el caso específico de Costa Rica, la Refinadora Costarricense de Petróleo (RECOPE) no produce asfaltos modificados. De llegar a ser usados, tienen que ser producidos en las plantas de producción de mezcla asfáltica de los contratistas.

Con el fin de corregir esta deficiencia en la selección de temperaturas de mezclado y compactación a nivel mundial, se ha realizado investigación para definir métodos que puedan ser utilizados para la determinación de dichas temperaturas en mezclas basados en: viscosidad de cero cortante, viscosidad a tasa de cortante alta (extrapolado), flujo bajo cortante estable, tasa de dependencia de cortante, ensayos de trabajabilidad y compactación o el ángulo de fase de los ligantes asfálticos (3).

En el presente estudio se evalúa la posibilidad de incorporar el método basado en el ángulo de fase (Método Casola) que se fundamenta en el desarrollo de una curva maestra para el ligante asfáltico a una temperatura de referencia de 80°C. De dicha curva se determina la frecuencia reducida asociada a un ángulo de fase de 86° (donde ocurre la transición de comportamiento viscoso a comportamiento viscoelástico) y con esta se calcula la temperatura de mezclado y compactación (con base en modelos previamente desarrollados).

Para adaptar dicha metodología al país, se desarrollaron las curvas de ángulo de fase versus frecuencia para nueve ligantes asfálticos: 2 AC-20s y 3 AC-30s en estado original y AC-30 modificado con Látex UP-70 (2,5%), Butonal NX 1138 (2,5%), SBS (2,5%) y residuos de polietileno (3%) con el fin de calibrar los modelos desarrollados en Estados Unidos en base a ligantes asfálticos y modificantes distintos a los de uso en Costa Rica.

## COMPORTAMIENTO DE ASFALTOS MODIFICADOS

La normativa ASTM D2493 (8), en la que se describe la metodología para estimar la viscosidad de asfaltos a distintas temperaturas (relación temperatura - viscosidad) aplica para asfaltos no modificados los cuales se comportan como fluidos newtonianos a altas temperaturas. Esto significa que el comportamiento del material no depende de la tasa de corte. Sin embargo, dada la introducción del modificante, la gran mayoría de los asfaltos modificados exhiben un fenómeno que se conoce como pseudo-plasticidad o "shear thinning". Un material pseudo-plástico se diferencia del fluido newtoniano en que la viscosidad del fluido decrece al aumentar la tasa de esfuerzo cortante aplicado (comportamiento tixotrópico) (9).

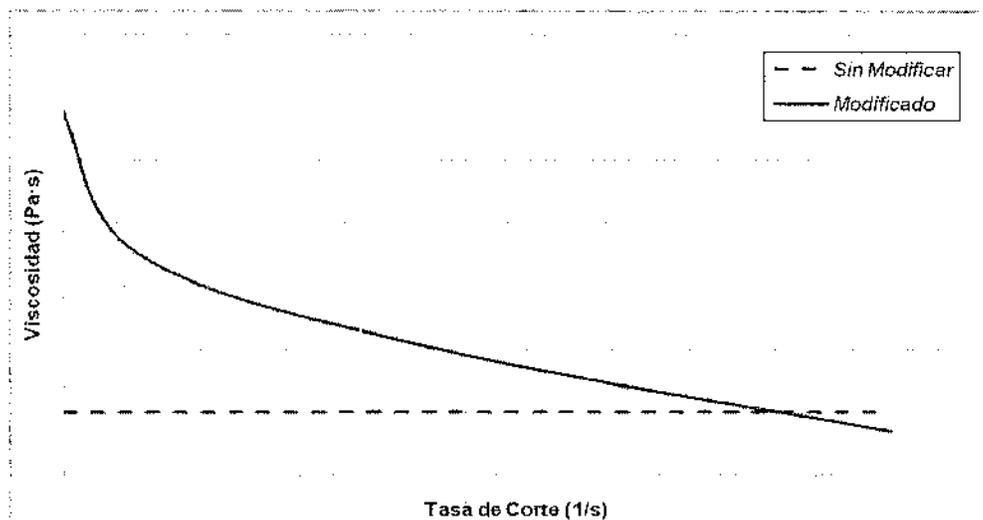


Figura 2. Efecto en viscosidad debido a cambios en la tasa de cortante.

Dado este comportamiento de los asfaltos modificados, el uso de tan altas temperaturas de mezclado y compactación (según principio de equivalencia de viscosidad) no deberían ser necesarias. De tal forma, se han realizado distintos proyectos de investigación que buscan determinar distintos parámetros que están asociados con las tasas de corte típicamente asociadas con el proceso de mezclado de tal forma que puedan ser utilizados en la determinación de temperaturas de mezclado y compactación (3, 10). Ejemplos de estos métodos son los que se

mencionan anteriormente: viscosidad de cero cortante, viscosidad a tasa de cortante alta (extrapolado), flujo bajo cortante estable, tasa de dependencia de cortante, ensayos de trabajabilidad y compactación o el ángulo de fase. Dado que se ha demostrado que el método basado en el ángulo de fase es apropiado para determinar las temperaturas de mezclado y compactación, los modelos que se desarrollan en este estudio se basan en los principios de dicho método.

### MÉTODO BASADO EN EL ÁNGULO DE FASE

El método basado en el ángulo de fase fue concebido por John Casola como parte del estudio NCHRP 648. En método se basa en que el Reómetro Dinámico de Cortante (DSR por sus siglas en inglés), mediante el ángulo de fase, es capaz de capturar la naturaleza viscoelástica del asfalto. Esto significa que con una medida de consistencia como lo es el ángulo de fase se puede identificar cuando el asfalto se comporta como material visco-elástico o puramente viscoso. Este cambio de comportamiento se da cuando el ángulo de fase está entre los  $\delta = 85^\circ$  y los  $\delta = 90^\circ$  (3). Por tanto, este rango es una región en la cual se puede distinguir el comportamiento reológico de los asfaltos.

El procedimiento sugerido involucra realizar barridos de frecuencia con el DSR a varias temperaturas (deformación al 12%) y construir una curva maestra con temperatura base de  $80^\circ\text{C}$ . La temperatura de  $80^\circ\text{C}$  fue seleccionada pues permite observar claramente la variación del ángulo de fase en asfaltos modificados y puesto que no coincide con ningún grado PG (ej.  $76^\circ\text{C}$ ,  $82^\circ\text{C}$ ). A mayores temperaturas el asfalto se empieza a comportar como un fluido newtoniano donde el ángulo de fase es muy cercano a  $90^\circ\text{C}$ .

La Figura 3 muestra los barridos de frecuencia realizados para uno de los asfaltos evaluados (AC-30 sin modificar) y la curva maestra a una temperatura de referencia de  $80^\circ\text{C}$  que se generó con base a esta información.

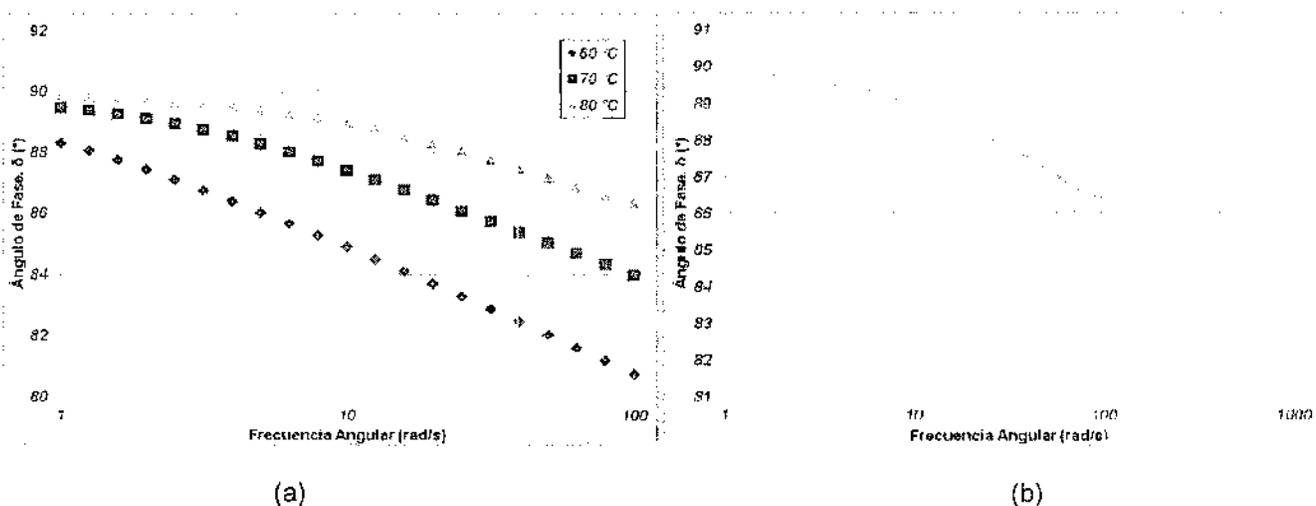


Figura 3. (a) Barrido de frecuencias a varias temperaturas y (b) Desarrollo de curva maestra ( $80^\circ\text{C}$ ).

Con base en la curva maestra, es posible determinar la frecuencia angular ( ) con la que se asocia un ángulo de fase de  $\delta = 86^\circ$ , el cual fue seleccionado como un punto de referencia adecuado para la técnica. En base a este ángulo de fase y la frecuencia angular asociada, Casola desarrollo modelos para determinar la temperatura de mezclado y compactación. Los modelos se basan en leyes de potencia y fueron determinados mediante regresión usando las temperaturas de mezclado y compactación recomendados para distintos grados de desempeño (11).

Los modelos desarrollados por Casola para Estados Unidos fueron los siguientes,

Ec. [1]

Ec. [2]

Según estos modelos, el asfalto evaluado en la Figura 3 ( $\omega = 125,9 \text{ rad/s @ } \delta = 86^\circ$ ) debería tener una temperatura de mezclado y compactación de 151 °C y 139 °C respectivamente. No obstante, según el análisis de equiviscosidad, las temperaturas calculadas según Ec. [1] y Ec.[2] son inferiores a las sugeridas por el principio de equiviscosidad, el cual, para el caso de asfaltos no modificados ha resultado en trabajabilidad apropiada para la mezcla. De la misma forma, surgen diferencias (positivas o negativas) para los otros asfaltos evaluados, por lo que la calibración del modelo para los asfaltos del país es pertinente.

## CALIBRACIÓN DE MODELOS PARA TEMPERATURA DE MEZCLADO Y COMPACTACIÓN

Según lo establecido en la introducción, para la calibración de los modelos de temperatura se utilizaron 9 asfaltos: 2 AC-20s y 3 AC-30s en estado original y AC-30 modificado con Látex UP-70 (2,5%), Butanal NX 1138 (2,5%), SBS (2,5%) y residuos de polietileno (3%). La importancia de los modelos radica en la determinación efectiva de temperaturas de mezclado y compactación para asfaltos modificados, los cuales han sido de uso limitado en el país, pero que, dadas recientes modificaciones a las especificaciones, se espera que su uso crezca para satisfacer las necesidades de desempeño de las carreteras del país.

Las características generales de los asfaltos evaluadas se definen en la Tabla 1.

Tabla 1. Características generales de los asfaltos utilizados en el análisis

Asfalto	Viscosidad Absoluta @ 60°C (Poise)	Grado PG (Alto)
AC-30 (1)	3209	64
AC-20 (1)	2345	58
AC-20 (2)	2322	58
AC-30 (2) + 3% Polietileno	5039	70
AC-30 (3)	3135	64
AC-30 (4)	3154	64
AC-30 (2) + 2,5% Butanal	5698	70
AC-30 (2) + 2,5% SBS	8054	76
AC-30 (2) + 2,5% UP70	4312	70

Es claro de la tabla que inclusive asfaltos con un mismo grado de viscosidad presentan variaciones de dicho parámetro. Esto es más evidente aún cuando se usan modificantes, ya que dependiendo del tipo de modificante y cantidad del mismo a incorporar, es fácil ver saltos de 1 o 2 grados PG. De tal forma, es muy importante poder calibrar un método para determinar temperaturas de mezclado y compactación y no basarse únicamente en experiencia o tablas generalizadas que asocian temperaturas de mezclado y compactación a grados de desempeño específicos. Esto puesto las propiedades de dos asfaltos que clasifiquen según cualquier metodología (ej. penetración, viscosidad, grado de desempeño) pueden presentar propiedades muy distintas.

Con el fin de calibrar los modelos de temperatura y compactación, evidentemente es necesario conocer las temperaturas de mezclado y compactación asociadas a cada uno de los asfaltos que se usen en la calibración de dicho modelo. Dichas temperaturas se presentan en la tabla 2 y son basadas en mediciones de viscosidad absoluta a 60 °C y viscosidad cinemática a 125 °C, 135 °C y 145 °C, las cuales fueron graficadas según la Figura 1 e interpoladas según lo establecido por la norma ASTM D6925.

En el caso de los asfaltos modificados, por razones mencionadas anteriormente, las temperaturas de mezclado y compactación no pueden ser determinadas por equiviscosidad. Por tanto, dichas temperaturas se calcularon según lo recomendado en las especificaciones Tex-205-F y Tex-206-F (12, 13). Es interesante ver que las temperaturas recomendadas por especificación anteriores, las cuales se basan en sugerencias de los productores de asfalto y en una encuesta a varios Departamentos de Transporte, tienden a coincidir con los rangos inferiores sugeridos por el método de equiviscosidad en el caso de los asfaltos no modificados.

Tabla 2. Temperaturas de mezcla y compactación para asfaltos analizados

Asfalto	Temperatura de Mezclado (°C)	Temperatura de Compactación (°C)
AC-30 (1)	153 – 158	144 – 148
AC-20 (1)	148 – 153	139 – 143
AC-20 (2)	148 – 153	139 – 143
AC-30 (2) + 3% Polietileno	149	135
AC-30 (3)	153 – 158	143 – 147
AC-30 (4)	153 – 158	143 – 147
AC-30 (2) + 2,5% Butanal	149	135
AC-30 (2) + 2,5% SBS	163	149
AC-30 (2) + 2,5% UP70	149	135

Adicional a las temperaturas de mezclado y compactación, los modelos sugeridos por Casola se basan en la frecuencia angular ( $\omega$ ) a un ángulo de fase  $\delta = 86^\circ$ .

### ESTIMACIÓN DE FRECUENCIAS ANGULARES

La medición de la información reológica necesaria para calibrar los modelos de temperatura de mezclado y compactación se realizó con un DSR de TA – Instruments, modelo AR-G2. Con este equipo se realizó un barrido de frecuencias a varias temperaturas para cada uno de los asfaltos estudiados. En general, los barridos se realizaron a 60 °C, 70 °C y 80 °C y con base en esta información se calcularon las curvas maestras de ángulo de fase para cada uno de los asfaltos. La temperatura de referencia para la generación de las curvas maestras fue la sugerida por Casola (80 °C).

La Figura 4 presenta las curvas maestras para los asfaltos no modificados y la Figura 5 muestra la misma información para los asfaltos modificados.

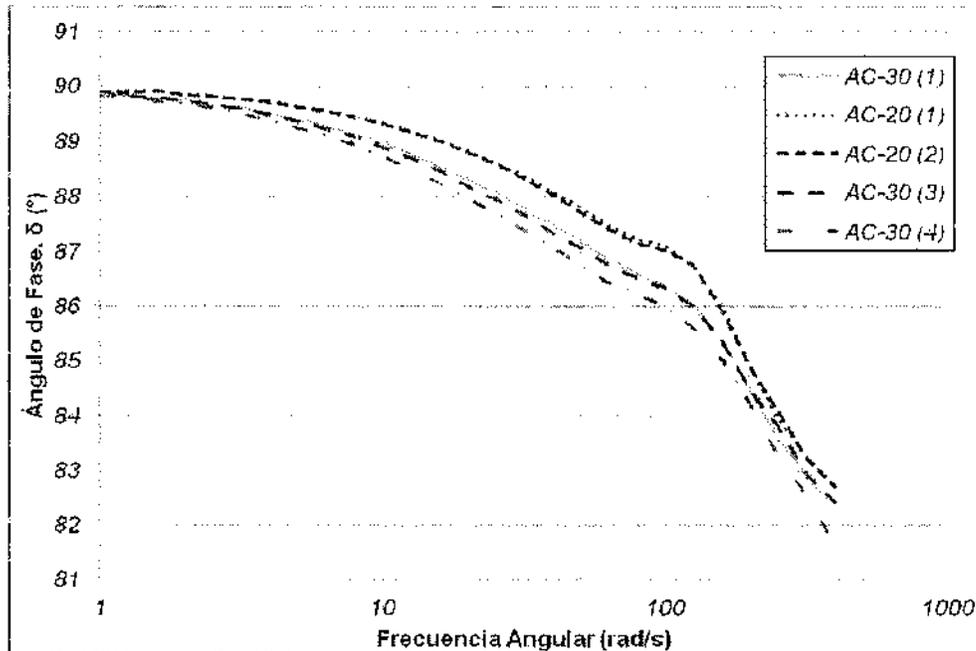


Figura 4. Curvas Maestras para Asfaltos No Modificados.

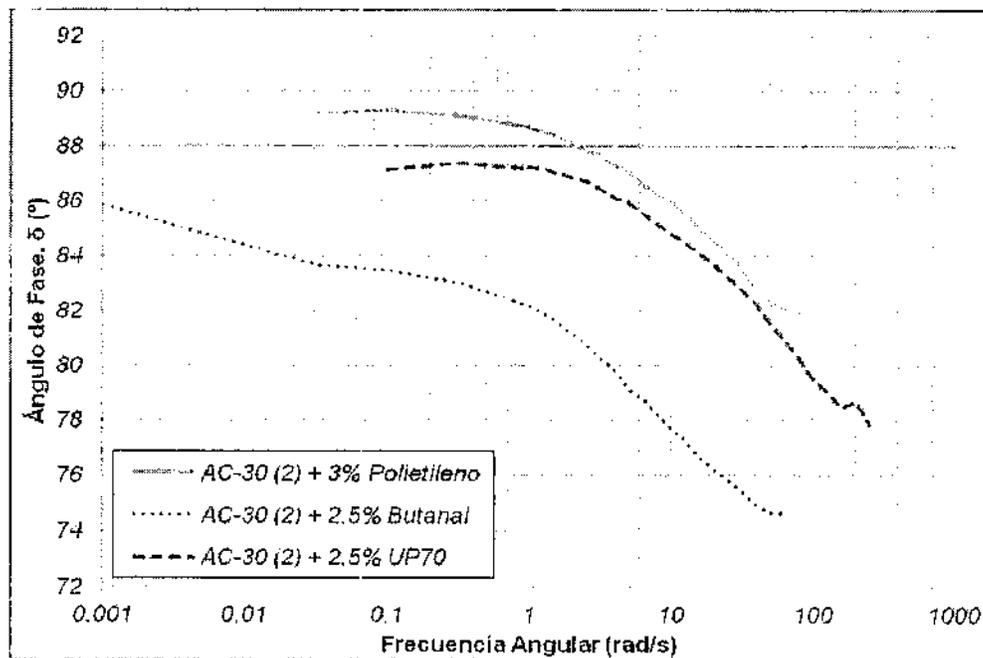


Figura 5. Curvas Maestras para Asfaltos Modificados.

Se observa claramente que el comportamiento del asfalto sin modificar es relativamente uniforme para el caso de Costa Rica. Estos asfaltos presentan curvas maestras donde a cualquier frecuencia, la diferencia máxima a cualquier frecuencia angular es como máximo  $1^\circ$ . No obstante, nótese que esta diferencia se puede capturar considerando la viscosidad del asfalto ya que las diferencias entre los asfaltos AC-30 o AC-20 son como máximo  $0,4^\circ$ .

Esto no es el caso en asfaltos modificados donde, aunque se utilice un mismo asfalto base, el efecto del modificador introduce grandes cambios en la respuesta del material. Esto es de esperarse ya que la composición química de los modificantes es distinta y cada modificador es introducido para brindar un efecto en el desempeño que no es necesariamente el mismo.

Con base en las curvas maestras, se determinó cuál es la frecuencia angular ( ) para la cual el ángulo de fase es de  $\delta = 86^\circ$ . Un ejemplo de esta estimación se presenta en la Figura 6.

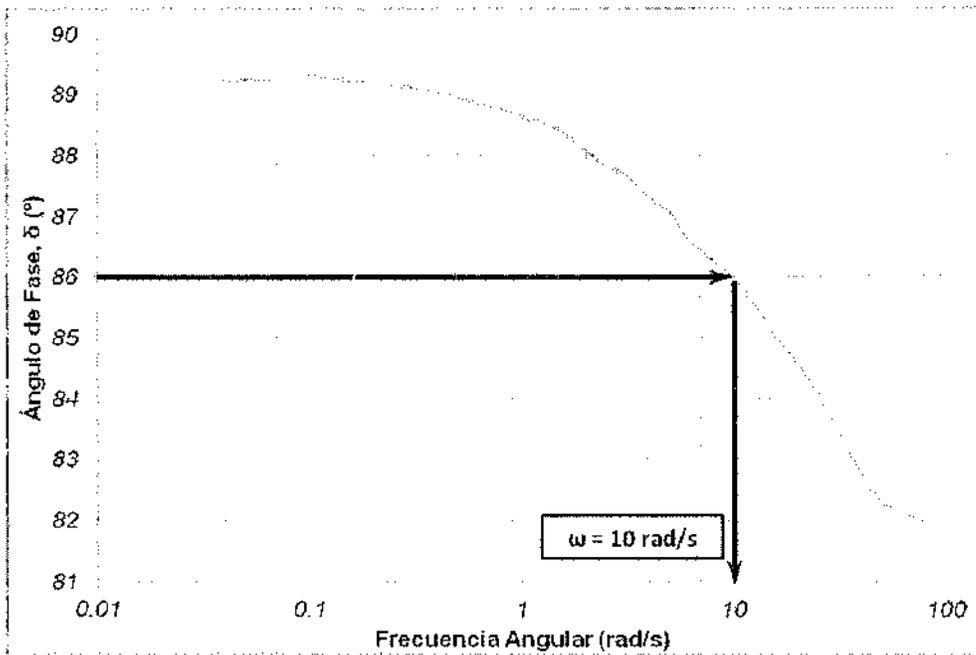


Figura 6. Estimación de frecuencia angular ( ) para  $\delta = 86^\circ$  (AC-30 (2) + 3% Polietileno).

### CALIBRACIÓN DE MODELOS

Una vez conocidas las frecuencias angulares asociadas a un ángulo de fase  $\delta = 86^\circ$  (en base a curvas maestras con temperatura de referencia de  $80^\circ\text{C}$ ) es posible calibrar los modelos de interés. Los modelos iniciales que se evaluaron tienen la siguiente forma estructural:

Ec. [3]

Ec. [4]

Con base en la forma estructural definida en las ecuaciones [3] y [4], por medio de regresión no lineal se estimaron los parámetros de interés ( ). Los resultados se presentan en la Tabla 3.

Tabla 3. Estimación de parámetros de calibración para modelos [3] y [4]

Parámetro	Coficiente	Error Estándar	Estadístico t	Valor P
	150,925	0,004	604,283	0,000
	0,003	0,002	1,655	0,149
	138,253	0,005	421,779	0,000
	0,006	0,002	2,244	0,066

Es claro del modelo que a excepción de , el cual es significativo a un nivel de confianza del 85%, todos los otros parámetros son estadísticamente significativos a aproximadamente el 95%. No obstante, los autores consideran que el modelo puede ser mejorado si se considera la inclusión del modificante dentro del modelo. Esto dada la observación anterior que indica comportamientos muy distintos del material modificado y son modificar. De tal forma, para el caso de Costa Rica se proponen los siguientes modelos para estimación de temperaturas de mezclado y compactación,

Ec. [5]

Ec. [6]

Los modelos incluyen el parámetro *Mod* el cual corresponde a una variable ficticia que corresponde a un valor de 1 si el asfalto es modificado, o 0 si no lo es. Los resultados de la estimación basada en las ecuaciones [5] y [6] se muestran en la Tabla 4.

Tabla 4. Estimación de parámetros de calibración para modelos [5] y [6]

Parámetro	Coefficiente	Error Estándar	Estadístico t	Valor P
$\beta_1$	149,138	0,004	496,903	0,000
$\beta_2$	0,006	0,003	2,496	0,055
$\beta_3$	-0,006	0,004	-1,701	0,150
$\beta_4$	135,120	0,004	490,730	0,000
$\beta_5$	0,012	0,003	4,821	0,005
$\beta_6$	-0,012	0,004	-3,297	0,022

De los parámetros estimados se pueden observar dos cosas. La importancia o efecto de cada parámetro incrementa su significancia estadística puesto que se está considerando el efecto del modificante dentro de la forma estructural del modelo. Esto se confirma en una mejora de los modelos en cuanto al coeficiente de correlación ( $R^2$ ) el cual prácticamente se duplica cuando se comparan los modelos [3] y [4] con los modelos [5] y [6], y es fácil de verificar cuando se usan los modelos para predecir las temperaturas en cuestión.

## CONCLUSIÓN

El problema de determinación de temperaturas de mezclado y compactación en el caso de asfaltos modificados es crítico para el país pues, a pesar de que históricamente el uso de asfaltos modificados no a sido común, dado la reciente modificación en las especificaciones nacionales las cuales promueven el uso de dichos materiales se espera que cada vez más se utilicen asfaltos modificados en proyectos nuevos.

No obstante, es claro que la metodología de equiviscosidad no aplica en el caso de asfaltos modificados pues resultan en temperaturas de mezclado y compactación muy altas que generan una oxidación prematura del asfalto. Con este fin se analizaron distintas metodologías para estimación de dichas temperaturas y se determinó que el método basado en el ángulo de fase es apropiado para ser usado en el país, pues entre otras cosas se basa en el uso del DSR el cuál es común en muchos laboratorios. Sin embargo, los modelos desarrollados para Estados Unidos fueron calibrados con asfaltos distintos a los usados en el país. Adicionalmente, al revisar las temperaturas sugeridas por el método y compararlas con las temperaturas estimadas por equiviscosidad (en el caso de asfaltos sin modificar), existen diferencias que en algunos casos eran considerables.

De tal forma, en el presente artículo se realizó un esfuerzo para calibrar los modelos a los asfaltos del país. Para tales efectos se analizar distintos asfaltos sin modificar y modificados con distintos aditivos. Para cada uno de los asfaltos analizados se desarrollaron curvas maestras de ángulo de fase con el fin de determinar cuál es la frecuencia angular ( $\omega$ ) asociada a un ángulo de fase de  $86^\circ$ , el cual corresponde a un punto adecuado donde se puede diferenciar el comportamiento visco-elásticos (que se presenta a ángulos inferiores a  $85^\circ$ ) y el comportamiento puramente viscoso.

Con base en esta información se calibró el modelo sugerido inicialmente por Casola y posteriormente se procedió a mejorar la formulación estructural del mismo basándose en la observación que las curvas maestras para los asfaltos modificados difieren considerablemente de los no modificados. Los parámetros estimados son significativos estadísticamente y mejoraron considerablemente el ajuste del modelo.

Por tanto se considera que el modelo desarrollado es un punto inicial muy apropiado en la estimación de temperaturas de mezclado y compactación, tanto en el caso de asfaltos modificados como no modificados ya que inclusive en el caso de asfaltos no modificados agiliza la estimación de las temperaturas de mezclado y compactación, en comparación con el método de equiviscosidad.

## REFERENCIAS

1. McGennis, R.B.; Shuler, S.; Bahia, H.U. *Background of SUPERPAVE Asphalt Binder Test Methods*. Federal Highway Administration Report No. FHWA-SA-94-069. Washington, D.C., 1994.
2. McGennis, R.B.; Anderson, R.M.; Kennedy, T.W.; Solaimanian, M. *Background of SUPERPAVE Asphalt Mixture Design and Analysis*. Federal Highway Administration Report No. FHWA-SA-95-003. Washington, D.C., 1995.
3. West, R.C.; Watson, D.E.; Turner, P.A.; Casola, J.R. *Mixing and Compaction Temperatures of Asphalt Binders in Hot-Mix Asphalt*. Transportation Research Board NHCPR Report 648. Washington, D.C., 2010.
4. Stuart, K.D. *Methodology for Determining Compaction Temperatures for Modified Asphalt Binders*. Federal Highway Administration Report No. FHWA-RD-02-016. Washington, D.C., 1999.
5. ASTM D6925. *Standard Test Method for Preparation and Determination of the Relative Density of Hot Mix Asphalt (HMA) Specimens by Means of the Superpave Gyratory Compactor*. ASTM International, 2009.
6. AI. *Superpave Mix Design (SP-2), Third Edition*. Asphalt Institute, 2001.
7. Fink, D.F. *Research Studies and Procedures*. AAPT Vol. 27, 1958.
8. ASTM D2493. *Standard Viscosity-Temperature Chart for Asphalts*. ASTM International, 2009.
9. Barnes, H.A. *Thixotropy a review*. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 70: 3, 1997.
10. Yetkin, Y; Solaimanian, M; Kennedy, T.W. *Mixing and Compaction Temperatures for Hot Mix Asphalt Concrete*. TxDOT Report 1250-5. Austin, Texas, 2000.
11. APEC. *Best Management Practices to Minimize Emissions during HMA Construction*, EC 101. Asphalt Pavement Environmental Council, 2000.
12. Tex-205-F. *Laboratory Method of Mixing Bituminous Mixtures*. Texas Department of Transportation, 2010.
13. Tex-206-F. *Compacting Specimens using the Texas Gyratory Compactor (TGC)*. Texas Department of Transportation, 2010.