



# DETERMINACIÓN DE TEMPERATURAS DE MEZCLADO Y COMPACTACIÓN DE ASFALTOS MODIFICADOS

María Fernanda Ahuja Morales<sup>1</sup>, Wendy Leticia Fisher Rodriguez<sup>2</sup>,  
Esbeydi Janet Limeta Dionet<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Terminal de Almacenamiento y Distribución de Asfalto S.A. de C.V., Salamanca, Gto., México,  
ferahujam@gmail.com

<sup>2</sup> Terminal de Almacenamiento y Distribución de Asfalto S.A. de C.V., Salamanca, Gto., México,  
wendy.fisher@petro-boox.com.mx

<sup>3</sup> Asociación Mexicana del Asfalto, Querétaro, Qro., México, elimeta@amaac.org.mx

## Resumen

En el proceso de mezclado y compactación de una mezcla asfáltica, la temperatura del asfalto juega un papel muy importante, dado que, si la temperatura es muy baja el asfalto será muy viscoso y no cubrirá el agregado de manera correcta, de igual manera, a mayor temperatura el asfalto puede comenzar a rigidizarse y modificar sus características y propiedades. Las temperaturas de mezclado y compactación en asfaltos modificados suelen ser muy altas, por lo que no existe una metodología aceptada para determinarlas. Por lo tanto, basados en la literatura, en este trabajo se propuso evaluar cuatro asfaltos modificados con diferentes clasificaciones (PG 64V-16, 70H-16, 70V-16 y 76H-16) mediante tres métodos: el tradicional (equiviscosidad), flujo constante y ángulo de fase. Con el objetivo de encontrar el procedimiento más preciso y eficiente para establecer los rangos de temperaturas de mezclado y compactación. Con los datos obtenidos, el método más confiable para obtener las temperaturas de mezclado y compactación es la de flujo constante, sin embargo, se recomienda continuar con la segunda etapa de la investigación, la cual consiste en evaluar estas temperaturas con mezcla asfáltica.

**Palabras Clave:** Asfalto, equiviscosidad, flujo constante, ángulo de fase

## 1 Introducción

Durante el proceso constructivo del pavimento, la temperatura juega un papel muy importante, lo cual implica realizar el proceso tanto de mezclado como de compactación con la temperatura correcta, si la temperatura es muy baja y el asfalto se encuentra muy viscoso, se afecta directamente la manera en la que se cubre el agregado y el desprendimiento que puede tener el mismo, de igual manera a mayor temperatura el asfalto puede comenzar a rigidizarse y modificar las características y propiedades físicas y viscoelásticas. El principal problema al no cumplir con la temperatura de compactación se ve reflejada en daños a la superficie de rodadura, desprendimientos y falla general en el diseño.

En el laboratorio se determinan las temperaturas máximas y mínimas, las cuales nos aseguran el correcto funcionamiento de la mezcla asfáltica. Actualmente el ensayo normado para determinar las temperaturas de mezclado y compactación es el método de la equiviscosidad [1], en el cual se construye una curva Viscosidad vs Temperatura. El método de la equiviscosidad, descrito por la SCT [2], nos indica que para determinar las temperaturas de compactación y mezclado es necesario correr una prueba de laboratorio utilizando el viscosímetro rotacional. esta prueba determina la resistencia a fluir del material evaluado a diferentes temperaturas y determinando la temperatura de mezclado que corresponda a una viscosidad de  $0.17 \pm 0.02$  Pa.s y la temperatura de mezclado de  $0.28 \pm 0.03$  Pa.s. Sin embargo, este método tiene una limitante, la cual no es aplicable a asfaltos modificados, ya que se obtienen temperaturas arriba de 180 °C, con estas temperaturas se corre el riesgo de ignición,



los vapores que se desprenden son dañinos tanto para el ser humano como para el ambiente y al trabajar con polímeros, algunos comienzan a degradarse a esta temperatura, perdiendo completamente los beneficios de este.

Actualmente esto sigue siendo un problema y un tema de interés pues como se menciona, no existe ninguna normativa o algún protocolo a seguir para la determinación de estas temperaturas con asfalto modificado, generalmente este problema se aborda con el proveedor de asfalto.

Por tal motivo, en este trabajo se realizó el análisis con tres métodos: el método tradicional conocido como equiviscosidad, flujo constante y ángulo de fase, con la finalidad de establecer los valores para estas temperaturas y determinar que método es el más adecuado.

## 2.1 Materiales

En este estudio se evaluaron cuatro tipos de asfalto modificados, clasificados como PG 64 V-16, PG 70 H-16, PG 70 V-16 y 76 H -16, modificados con polímero SBS.

## 2 Metodología experimental

Con la finalidad de obtener un método preciso para la determinación de las temperaturas de mezclado y compactación se evaluaron tres métodos: Equiviscosidad, Flujo Constante y Ángulo de Fase.

### 2.1 Equiviscosidad

En el método de equiviscosidad se construye una curva Viscosidad vs Temperatura, el asfalto se ensaya a diferentes temperaturas y se determina la viscosidad, posteriormente se construye una curva Viscosidad vs Temperatura. La temperatura de mezclado que corresponda a una viscosidad de  $0.17 \pm 0.02$  Pa.s y la temperatura de mezclado de  $0.28 \pm 0.03$  Pa.s.

Para realizar la evaluación se utilizó un viscosímetro rotacional, con capacidad de hasta 1200 RPM y temperatura máxima de  $180^{\circ}\text{C}$ . Como se observa en la figura 1, no fue posible obtener resultados arriba de  $180^{\circ}\text{C}$ , por lo que las temperaturas de mezclado se determinaron con ayuda de las ecuaciones obtenidas de las líneas de tendencia por de cada asfalto evaluado. Dichos resultados se muestran en la tabla 1.

Tabla 1. Ecuaciones método equiviscosidad

Ecuación	Asfalto
$y = (9E + 12) \cdot x^{-6.198}$	PG 64 V - 16
$y = (2E + 13) \cdot x^{-6.217}$	PG 70 H - 16
$y = (3E + 12) \cdot x^{-5.913}$	PG 70 V - 16
$y = (3E + 13) \cdot x^{-6.269}$	PG 76 H - 16

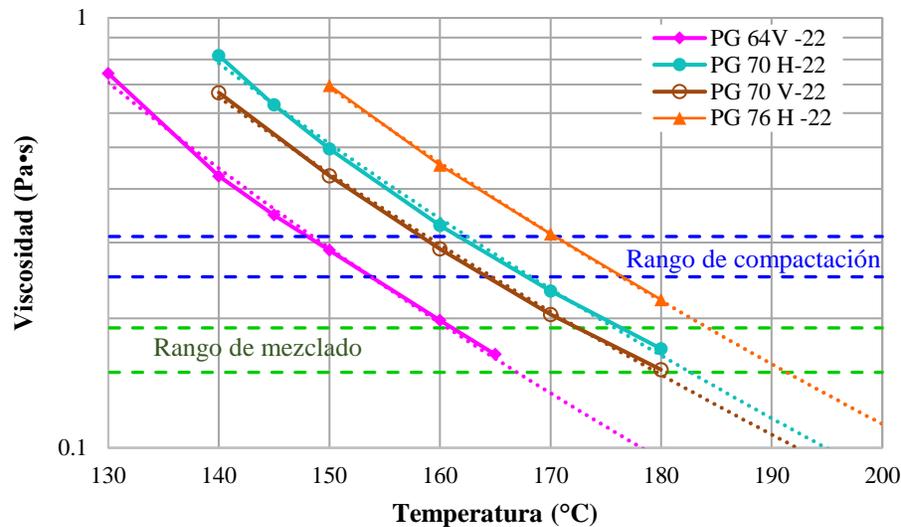


Figura 1. Método equiviscosidad

## 2.2 Flujo Constante

El procedimiento de flujo constante de corte propone que, al medir la viscosidad a una temperatura constante, a cierta deformación la viscosidad será constante. Tomando la bibliografía de la NCHRP este estado se alcanza entre los 400 y 500 Pa [3], sin embargo, este valor puede variar dependiendo del grado de desempeño y el grado de modificación.

El ensayo de flujo constante se realiza en estado original y utilizando el Reómetro de corte dinámico. La muestra se prepara para utilizar la geometría de platos paralelos de 25 mm, con un espacio de prueba de 0.5 mm, y un espacio adicional de 0.025 mm para enrazar la muestra.

Las temperaturas de prueba son: 76, 82, 88 y 94°C. Para obtener resultados lo más cercanos a la realidad posible y tomando en cuenta la capacidad del equipo que se está utilizando, se pueden ensayar hasta 100 o 105°C. El estado de flujo constante se alcanza una vez que 3 o más mediciones seguidas no varían más de un 2%.

### 2.2.1. Programación del equipo

En caso de el software no cuente con una plantilla para este procedimiento, es necesario realizar una plantilla con los siguientes datos:

- Tipo de prueba: Barrido de flujo (Flow sweep)
- Tiempo de acondicionamiento: 600s
- Escala de tipo logarítmico (base 10), obteniendo 5 puntos por década
- Tiempo máximo por punto: 720
- Barrido de esfuerzo: 50-500 Pa.
- Espacio de Prueba: 500  $\mu\text{m}$
- Espacio para enrazar 525  $\mu\text{m}$
- Temperaturas de ensayo: 76, 82, 88, 94, 100, 105 °C.

Las temperaturas de ensayo se sugieren de 76 a 88, sin embargo, el rango de temperatura puede aumentar para obtener valores lo más cercanos a la realidad, cuidando que la muestra se conserve en la forma.



Para realizar el cálculo los datos necesarios son:

- Temperatura (°C)
- Esfuerzo (Pa)
- Viscosidad (Pa.s)

Se realiza la construcción de una tabla de temperatura y viscosidad utilizando el valor de 500 Pa, se obtiene una línea de tendencia y se ajusta el periodo a 100 unidades delante.

La temperatura de mezclado está comprendida entre  $0.17 \pm 0.02$  Pa.s y la temperatura de compactación es de  $0.35 \pm 0.03$  Pa.s.

La prueba se realiza un barrido desde 50- 500 Pa, incluyendo el tiempo de acondicionamiento, puede durar entre 2 y 3 horas, sin embargo, es posible reducir este tiempo y utilizar un barrido de 400- 600 Pa., reduciendo el tiempo a 1- 1.5 horas.

La obtención de resultados se determina con la ecuación de  $y$ , obtenida de la línea de tendencia sustituyendo los valores  $y$  y utilizando el solver de Excel.

En la bibliografía no se menciona el mejor ajuste de datos, se ha observado que al utilizar el ajuste de datos potencial se obtienen temperaturas más altas a diferencia del ajuste exponencial. Se realizó la construcción de las gráficas (figura 1 y figura 2) del asfalto PG 64V – 16, para comparar los datos obtenidos con la experiencia en laboratorio por lo que se sugiere emplear el ajuste potencial.

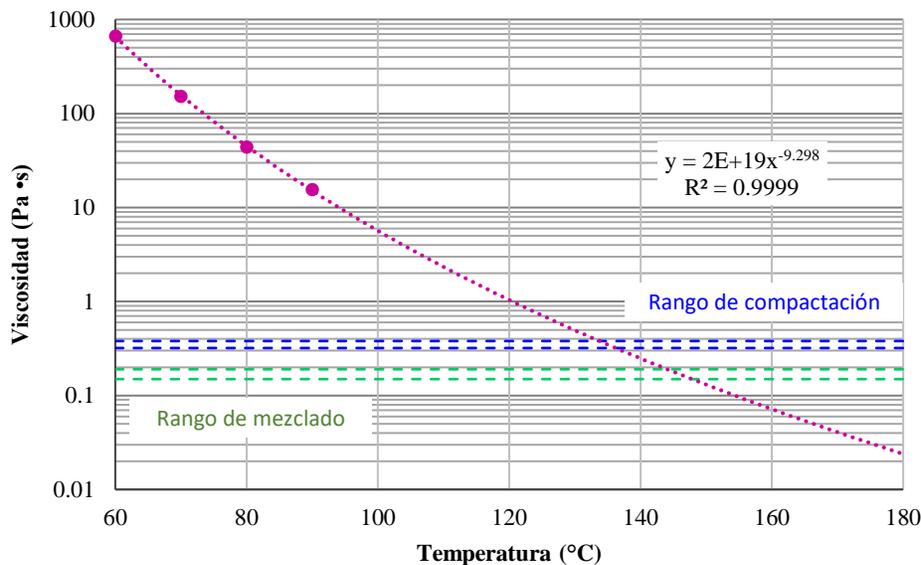


Figura 2. Ajuste Potencial – PG 64V - 16

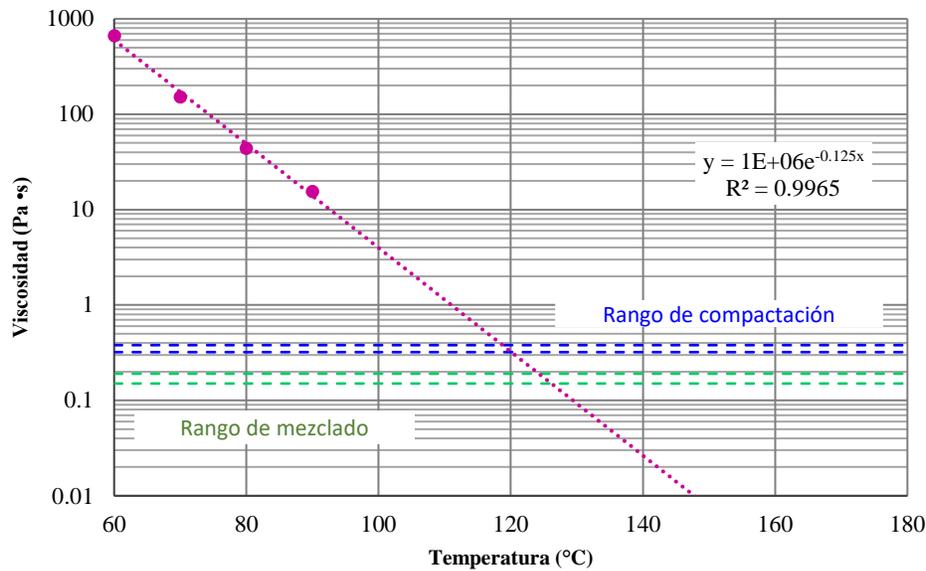


Figura 3. Ajuste exponencial – PG 64 V- 16

Con ayuda de las gráficas y las ecuaciones determinadas en cada caso se obtuvieron las temperaturas mostradas en la tabla 2.

Tabla 2. Temperaturas de mezclado y compactación para cada ajuste

Ajuste	T mezclado		T compactación	
	T mín (°C)	Tmáx (°C)	T mín (°C)	Tmáx (°C)
Potencial	142.5	146	132	134.5
Exponencial	124	125.5	142.5	146

Las temperaturas de mezclado y compactación para el PG 70 H – 16, PG 70 V – 16 y PG 76 H – 16 se determinaron con el ajuste potencial, obteniendo las ecuaciones de la tabla 3.

Tabla 3. Ecuaciones método equiviscosidad

Ecuación	Asfalto
$y = (2E + 19) \cdot x^{-9.298}$	PG 64 V - 16
$y = (8E + 19) \cdot x^{-9.438}$	PG 70 H - 16
$y = (1E + 20) \cdot x^{-9.489}$	PG 70 V - 16
$y = (2E + 21) \cdot x^{-9.852}$	PG 76 H - 16

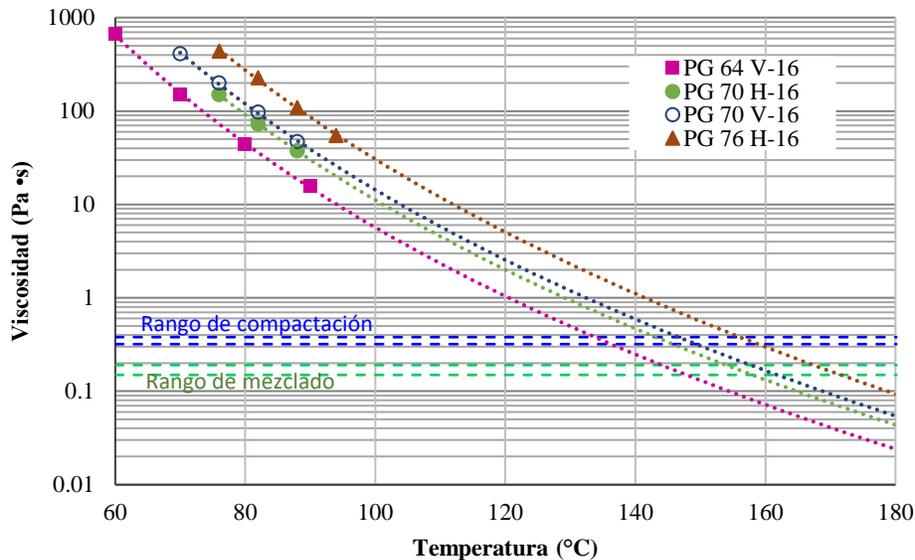


Figura 4. Flujo constante

### 2.3 Ángulo de fase

El método del ángulo de fase tiene como objetivo principal la construcción de curvas maestras, graficando el ángulo de fase y la frecuencia, tomando la temperatura de 80° como referencia y encontrar el valor de la frecuencia que corresponde al ángulo de fase de 86°. El ángulo de fase es un valor que nos ayuda a definir la naturaleza visco elástica del asfalto y se define como la diferencia entre la onda de entrada y la onda de salida o la diferencia entre la deformación aplicada y la respuesta del material a la deformación.

Se busca el valor de 86° ya que este representa el punto de transición entre el comportamiento viscoso y visco elástico y las frecuencias relacionadas a este punto se relacionan con temperaturas a las cuales el asfalto muestra un buen comportamiento durante el proceso de mezclado y compactación. El ensayo se realiza en un asfalto modificado, condición original y utilizando el reómetro de corte dinámico. La muestra se prepara para utilizar la geometría de platos paralelos de 25 mm, con un espacio de prueba de 0.5 mm, y un espacio adicional de 0.025 mm para enrazar la muestra.

#### 2.3.1. Programación del equipo

En caso de el software no cuente con una plantilla para este procedimiento, es necesario realizar una plantilla con los siguientes datos:

- Tipo de Prueba: Oscillation Frequency
- Tiempo de acondicionamiento: 600 s.
- Frecuencia: 0.1-100 rad/s
- Escala de tipo logarítmico (base 10), obteniendo 8 puntos por década.
- Tiempo máximo por punto: 720 s.
- Espacio de Prueba: 500  $\mu\text{m}$
- Espacio para enrazar 525  $\mu\text{m}$



- Temperaturas de ensayo: 60, 70, 80, 90, 100, 110 °C.

\*Las temperaturas de ensayo se sugieren de 70 a 90, sin embargo, se puede ensayar a 100 y 110 °C para alcanzar el ángulo de fase de 86° con valores reales

- Deformación (Strain): 12, 13, 14, 15, 16 %

\*La deformación podrá ser variable respetando siempre la recuperación elástica del material, se sugiere deformación del 13%.

Para realizar los cálculos y la obtención de resultados los datos necesarios son:

- Temperatura (°C)
- Frecuencia (Rad/s y Hz)
- Ángulo de fase (°)
- Módulo complejo (Pa)

Con los datos obtenidos de la prueba, se realiza la construcción de los isoterms, graficando frecuencia (Hz) VS ángulo de fase (°), estos isoterms no requieren de ningún cálculo o corrección. Para la construcción de la curva maestra, se realiza la construcción igual a los isoterms, cambiando la frecuencia por la frecuencia reducida, la cual se obtiene multiplicando la frecuencia por el factor de corrimiento. El factor de corrimiento puede obtenerse de manera gráfica, tomando siempre como referencia la temperatura de 80°C.

En la bibliografía no se menciona bajo que situaciones se debe utilizar una nueva muestra, pero basado en las pruebas realizadas y los resultados obtenidos, se sugiere al correr temperaturas por encima de los 80° utilizar una muestra únicamente para evaluar 2 temperaturas y posteriormente cambiarla, esto debido a que a partir de los 80° la muestra comienza a ser muy fluida y durante el ensayo se pueden presentar problemas en el equipo para realizar la lectura.

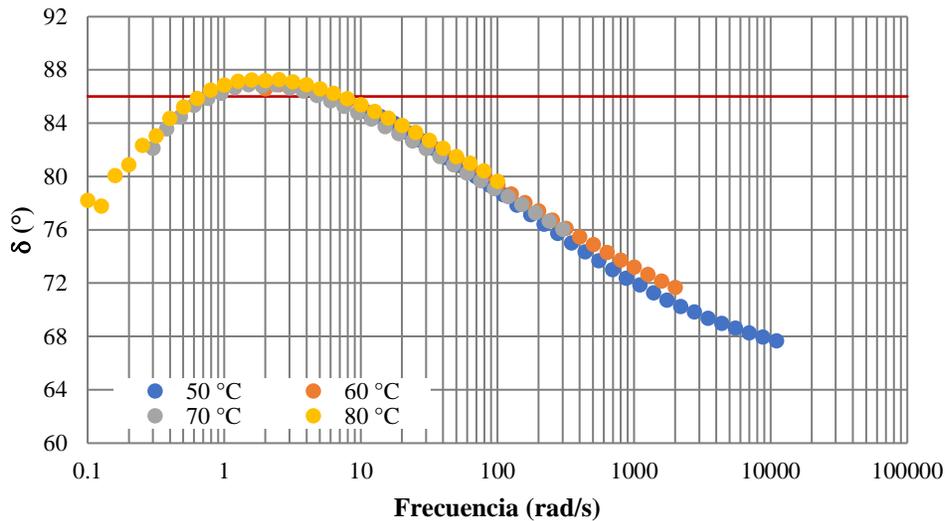


Figura 5. Curva maestra PG 64V – 16

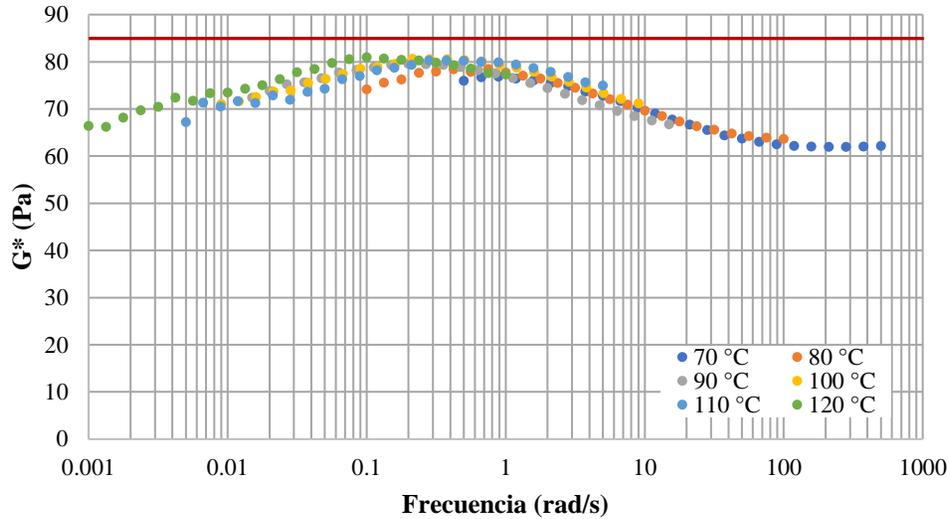


Figura 6. Curva maestra PG 76 H -16

Para determinar la temperatura de mezclado se emplea la ecuación 1 y para la temperatura de compactación la ecuación 2.

$$\text{Temperatura de mezclado } (^{\circ}\text{F}) = 325w^{-0.0135} \quad (1)$$

$$\text{Temperatura de compactación } (^{\circ}\text{F}) = 300w^{-0.012} \quad (2)$$

Donde:

w= frecuencia en rad/s para el ángulo de fase de 86 grados según la curva maestra.

En la figura 6, se observa que no es posible determinar la frecuencia con el ángulo 85, esto sólo fue posible en el asfalto clasificado como PG 64 V – 16 (figura 5).

### 3 Resultados

Con los diferentes métodos se obtuvieron los resultados que se muestran en la tabla 4. En donde se observa que con método de equiviscosidad se alcanzan temperaturas confiables en el asfalto PG 64 V-16. Para el método de flujo constante, se logró determinar las temperaturas de todos los asfaltos evaluados, contrario a lo que sucede con el método de ángulo de fase en donde sólo se obtuvo el resultado en el asfalto PG 64 V – 16, por lo que se sugiere realizar una investigación adicional para poder ajustar las ecuaciones 1 y 2, y así poder determinar dichas temperaturas.



Tabla 4. Temperaturas de mezclado y compactación

Grado PG	Equiviscosidad				Flujo constante				Ángulo de fase	
	Mezclado		Compactación		Mezclado		Compactación		Mezclado	Compactación
	T máx	T mín	T máx	T mín	T máx	T mín	T máx	T mín	T	T
64 V - 16	167	161	154	149	147	143	135	133	158	145
70 H - 16	187	180	172	166	158	154	146	143	-	-
70 V - 16	184	177	169	163	158	155	147	144	-	-
76 H - 16	191	184	176	170	166	162	154	151	-	-

#### 4 Conclusiones

- El método en la que se pudo obtener las temperaturas de los diferentes asfaltos evaluados es la de flujo constante, por lo que es el método más recomendado.
- En el método de ángulo de fase se recomienda ajustar las ecuaciones para obtener la temperatura de mezclado y compactación en diferentes asfaltos sin importar el grado de modificación.
- Se recomienda continuar con la segunda fase de la investigación, que consiste en evaluar las temperaturas obtenidas en una mezcla asfáltica.

#### 3 Referencias

- [1] American Society for Testing Materials. [ASTM]. (2016). D2493-16. Standard Practice for Viscosity – Temperature Chart for Asphalt Binders.
- [2] Normativa para la Infraestructura del Transporte. (2002). M-MMP-4-05-005/02. Viscosidad rotacional brookfield de cementos asfálticos. Mexico: Instituto Mexicano del Transporte
- [3] West, R., Watson, D., Turner, P. & Casola, J.: NCHRP REPORT 648 - Mixing and Compaction Temperatures of Asphalt Binders in Hot-Mix Asphalt. (2010). Transportation Research Board, Washington, D.C.