



# TEMPERATURA DE COMPACTACIÓN DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA Y SU COMPORTAMIENTO VISCOELÁSTICO MEDIDO MEDIANTE MÓDULO DINÁMICO Y LA ECUACIÓN DE WITCZAK

Pedro Limón-Covarrubias<sup>1</sup>, José Roberto Galaviz-González<sup>1</sup>,  
David Avalos-Cueva<sup>1</sup>, Manuel Alberto Gallardo Sánchez<sup>1</sup>, Valeria Montserrat Mora-Gutiérrez<sup>1</sup>, Josué  
Ruvalcaba Gil<sup>2</sup>, Alan Sergio Rodríguez Rodríguez<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Universidad de Guadalajara, Guadalajara, México, [pedro.limon@academicos.udg.mx](mailto:pedro.limon@academicos.udg.mx),  
[jose.galaviz2401@academicos.udg.mx](mailto:jose.galaviz2401@academicos.udg.mx), [david.avalos@academicos.udg.mx](mailto:david.avalos@academicos.udg.mx),  
[manuel.gallardo@academicos.udg.mx](mailto:manuel.gallardo@academicos.udg.mx), [valeria.mora3244@alumnos.udg.mx](mailto:valeria.mora3244@alumnos.udg.mx)

## Resumen

En una mezcla asfáltica, es crucial considerar que su rendimiento está influenciado por diversos factores, entre los cuales se encuentra la temperatura durante el proceso de compactación. La selección adecuada de la temperatura de compactación puede tener un impacto significativo en las propiedades mecánicas y la durabilidad del pavimento. Según estudios realizados en el campo de la ingeniería de pavimentos, se ha evaluado el efecto de la temperatura de compactación en la densidad y las propiedades mecánicas de las mezclas asfálticas [1]. Asimismo, se ha demostrado que la temperatura de compactación óptima mejora la adherencia entre los componentes de la mezcla y reduce la posibilidad de desprendimiento de partículas de agregado [2]. En este trabajo de investigación nos interesa definir el comportamiento de una mezcla asfáltica y el desempeño de la misma al momento de su colocación, sometiendo dicha mezcla a diferentes condiciones de temperatura de compactación. Además, se utilizarán diferentes tipos de asfaltos para analizar su comportamiento viscoelástico con el decremento de la temperatura de compactación. Para corroborar las diferentes propiedades que presentaran en nuestros especímenes, utilizaremos una Máquina de Ensayos Universal; mediante el ensayo módulo dinámico analizaremos la respuesta de los diferentes asfaltos utilizados en nuestras mezclas y el efecto que se tiene en las diferentes temperaturas de compactación. Posteriormente, se aplicará la ecuación de Witczak, para ver la correlación que existe entre los resultados obtenidos en laboratorio con los de esta ecuación. Esto para observar si existe alguna variación cuando las mezclas asfálticas se compactan a bajas temperaturas.

**Palabras Clave:** Mezcla asfáltica, temperatura de compactación, módulo dinámico, Witczak.

## 1 Introducción

Si se cumplen los requisitos fundamentales de un proyecto adecuado y una construcción correcta, el pavimento de mezcla asfáltica tiene la capacidad de tener una vida útil considerablemente prolongada. Esto implica que, con una planificación adecuada y una ejecución correcta, el pavimento puede mantener su rendimiento y funcionalidad durante un período de tiempo significativo [3]. Como señalan los expertos en la materia, la temperatura durante el proceso de compactación, las presiones de compactación aplicadas, la calidad del asfalto utilizado, la naturaleza del agregado pétreo y las cargas dinámicas a las que estará expuesta, desempeñan un papel fundamental en el resultado final. Aunado a esto la temperatura adecuada de compactación es esencial para garantizar una buena adherencia y compactación de la mezcla asfáltica.

Además, numerosas investigaciones han demostrado que un aumento excesivo de la temperatura de compactación puede tener consecuencias adversas en la vida útil del pavimento. De igual manera

se ha destacado que al reducir la temperatura de compactación la mezcla puede mantener una densidad aceptable, sin embargo, la vida esperada del pavimento disminuye con notoriedad [4]. Es fundamental tener en cuenta las cargas dinámicas provenientes del tráfico, ya que estas pueden acelerar el deterioro de la mezcla asfáltica [5].

En este trabajo de investigación nos interesa definir el comportamiento de una mezcla asfáltica y el desempeño de la misma al momento de su colocación, sometiendo dicha mezcla a diferentes condiciones de temperatura de compactación mediante el ensayo. Además, se utilizarán diferentes tipos de asfaltos para analizar su comportamiento viscoelástico con el decremento de la temperatura de compactación.

La compactación de las probetas se realizará utilizando un Compactador Giratorio Superpave, (CGS), el cual nos permite reproducir una compactación similar a la que se realizará en campo y durante la vida útil del pavimento.

Para corroborar las diferentes propiedades que presentaran en nuestros especímenes, utilizaremos una Máquina de Ensayos Universal; mediante el ensayo módulo dinámico analizaremos la respuesta de los diferentes asfaltos utilizados en nuestras mezclas y el efecto que se tiene en las diferentes temperaturas de compactación, este ensayo permite conocer las propiedades elásticas de un material de viscosidad lineal sometido a una carga sinusoidal, en este caso el módulo permitirá conocer el comportamiento elástico de la carpeta asfáltica a diferentes temperaturas de ensayo y diferentes frecuencias de aplicación de carga. En este estudio, se llevará a cabo la definición y análisis de los cambios que se producen en una mezcla asfáltica cuando se compacta a diferentes temperaturas mediante ensayos. Además, se pondrá especial énfasis en la relación entre estos cambios con el modelo desarrollado por el Dr. Matthew W. Witczak. Para ello, se empleará la ecuación de Witczak con el objetivo de determinar la correlación entre los resultados obtenidos en el laboratorio y los calculados mediante esta ecuación. De esta manera, se buscará identificar posibles variaciones en la compactación de las mezclas asfálticas a bajas temperaturas.

## 2 Metodología experimental

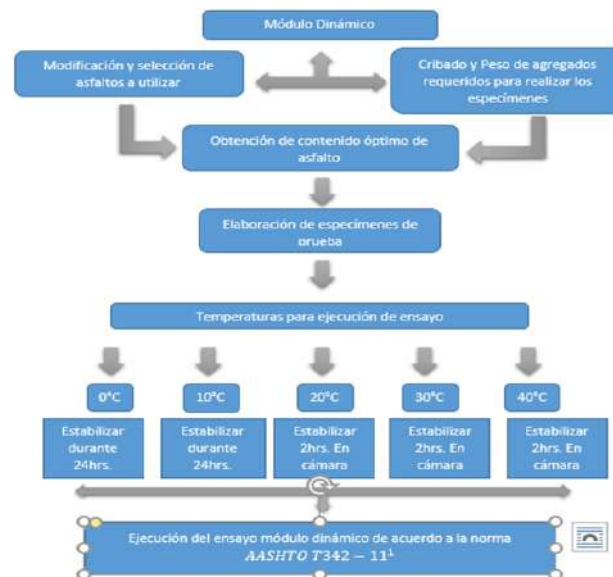


Figura 1. Plan experimental.

### 2.1 Modificación de asfalto



La modificación del asfalto cumple con especificaciones y normas. Se utilizan polímeros para mejorar propiedades como resistencia al envejecimiento, capacidad de carga y resistencia a la deformación. Los aditivos químicos mejoran propiedades reológicas, viscosidad, temperatura de flujo y reducen oxidación y mejoran resistencia al agua. En el caso de obtener un PG 76 a partir de un asfalto convencional que cumple con un PG 64-22, se puede lograr mediante la adición del 2% de SBS (estireno-butadieno-estireno) y el 0.1% de PPA (ácido polifosfórico). El SBS es un polímero que mejora la resistencia al envejecimiento y a la deformación del asfalto, mientras que el PPA actúa como un aditivo químico que ayuda a mejorar sus propiedades reológicas. Por otro lado, si se busca obtener un PG 82, se puede lograr agregando el 1% de PPA al asfalto convencional. El PPA en esta proporción contribuirá a mejorar las características del asfalto y elevar su grado PG.

Es importante tener en cuenta que los porcentajes mencionados son aproximados y pueden variar dependiendo de los requisitos específicos de cada proyecto y las condiciones locales.

## 2.2 Módulo Dinámico de Mezcla Asfáltica en Caliente

El módulo dinámico ( $|E^*|$ ) es la medida de la resistencia a deformación bajo cargas sinusoidal en las mezclas asfálticas. Se mide el esfuerzo aplicado y la deformación axial recuperable del espécimen, los cuales se utilizan para calcular el módulo dinámico y el ángulo de fase (AASHTO T 342-11).

Se aplica una carga cíclica sinusoidal a un espécimen de concreto asfáltico, de 100 mm de diámetro y 150 mm de altura, a las temperaturas de -10, 4, 21, 37 y 54°C y frecuencias de carga de 0.1 a 25 Hz para cada una de las temperaturas. Durante el ensayo, se mide el esfuerzo utilizando una celda de carga y la deformación mediante LVDTs. La deformación del espécimen se mantiene dentro del rango lineal de 50 a 150  $\mu\epsilon$ , por lo que la carga aplicada se ajusta para cada frecuencia y temperatura con el fin de alcanzar el nivel de deformación adecuado [6].

## 2.3 Ecuación de Witzark

El modelo desarrollado por Witzak para predecir el módulo dinámico de las mezclas asfáltica  $|E^*|$  durante la vida útil del pavimento [7], ha recibido un amplio respaldo por parte de la comunidad técnica debido a su capacidad para predecir con precisión los módulos. Esta capacidad se basa en características clave de la mezcla asfáltica, como la granulometría, el contenido de asfalto y los vacíos, así como en condiciones externas como la temperatura, la velocidad de carga y el envejecimiento. El modelo predictivo requiere la viscosidad del ligante a la temperatura de diseño, el tiempo de aplicación de la carga, parámetros volumétricos y de gradación de la mezcla asfáltica como datos de entradas [8].

El modelo empírico basado en la ecuación de Witzak, desarrollado a partir de un extenso conjunto de datos recopilados de 149 mezclas asfálticas diferentes, permite predecir con precisión el módulo dinámico en un amplio rango de temperaturas (-17.7 a 54.4°C) y frecuencias de carga (0.1 a 25Hz), así como condiciones de envejecimiento con información disponible de las especificaciones de los materiales o diseño volumétrico de la mezcla.

Como se mostró anteriormente la ecuación de Witzak se originó y se explicó de la siguiente manera [9]:

$$\begin{aligned} \log E^* = & 3.750063 + 0.02932 \rho_{200} - 0.001767(\rho_{200})^2 - 0.002841\rho_4 \\ & - 0.058097V_a - 0.802208 \left( \frac{V_{beff}}{V_{beff} + V_a} \right) \\ & + \frac{3.871977 - 0.0021\rho_4 + 0.003958\rho_{38} - 0.000017(\rho_{38})^2 + 0.005470\rho_{34}}{1 + e^{(-0.603313 - 0.31335 \log(f) - 0.393532 \log(\eta))}} \end{aligned} \quad (1)$$



Donde:

$E^*$  = Módulo dinámico de la mezcla asfáltica ( $lb/in^2$ ),

$\eta$  = Viscosidad del asfalto al envejecimiento y temperatura de interés ( $10^6$  Poises)

$f$  = Frecuencia de carga (Hertz)

$V_a$  = Porcentaje en volumen de aire (%)

$V_{beff}$  = Porcentaje en volumen de ligante (%)

$\rho_{200}$  = Porcentaje que pasa el tamiz N°200

$\rho_4$  = Porcentaje retenido en el tamiz N°4

$\rho_{38}$  = Porcentaje retenido en el tamiz 3/8"

$\rho_{34}$  = Porcentaje retenido en el tamiz 3/4"

### 3 Resultados

#### 3.1 Caracterización del asfalto

Se propusieron tres tipos de asfalto para el análisis: asfalto convencional, asfalto modificado con SBS y PPA, y asfalto modificado con PPA. Estos materiales fueron evaluados utilizando el sistema de clasificación grado PG, y los resultados obtenidos se detallan en la tabla 1.

Tabla 1. Clasificación Grado-PG

Prueba	Asfalto convencional	Asfalto modificado con SBS y PPA	Asfalto modificado con PPA
Punto de Inflamación Cleveland	300	384	387
Viscosidad rotacional a 135°C SC4-27 2 rpm (cP)	445	1900	2055
<b>Análisis al asfalto original</b>			
Módulo Reológico de corte dinámico a 76°C [ $G^*/\text{sen } \delta$ ] (KPa)	1.713 (64°C)	1.619	1.803 (82°C)
Ángulo de fase ( $\delta$ ) a 76°C	81.09 (64° C)	63.76	62.50
<b>Análisis del residuo de la película de la prueba de envejecimiento a presión PAV ASTM D 6521</b>			
Módulo Reológico de corte dinámico a 34°C [ $G^*/\text{sen } \delta$ ] (KPa)	3625 (28°C)	1691	1710
Rigidez en Creep a -6°C, 60s S (t), (MPa)	96.195	140.651	155.773
Valor m(t) a -6°C, 60s, (adimensional)	0.335	0.307	0.330
Grado	PG 64-16	PG 76-16	PG 82-16

Posteriormente, se llevó a cabo un análisis del agregado pétreo utilizado en la investigación, cuyos resultados se muestran en la tabla 2.



Tabla 2. Caracterización de agregado pétreo  
**Caracterización Asfaltos Guadalajara**

Prueba	Resultado	Normativa
<b>GRAVA</b>		
Partículas alargadas	1.60%	15% máx
Partículas lajeadas	0.34%	15% máx
Densidad	2.66	N/A
Desgaste de los Ángeles	10%	30% máx
Absorción	1.28	N/A
<b>ARENA</b>		
Equivalente de arena	65.45	50 min
Densidad	2.34	N/A
Absorción	4.64	N/A
Azul de metileno	13	15 ml/g máx.
Angularidad	40.9	40 min

En la tabla 3, se muestra la distribución granulométrica de los materiales utilizados en la investigación.

Tabla 3. Granulometría de materiales empleados

<b>Granulometría Grava</b>		
Malla	% Retenido	% Pasa
1"	-	-
¾"	-	-
½"	19 %	81%
3/8"	35%	46%
#4	42%	4%
#8	3%	1%
<b>Granulometría Arena</b>		
Malla	% Retenido	% Pasa
#4	0%	100
#8	11%	89%
#16	32 %	57%
#30	21%	36%
#50	9%	27%
#100	7%	19%
#200	6%	14%

### 3.2 Módulos dinámico a 0°C

El gráfico de barras resume los módulos dinámicos a 0°C y diferentes frecuencias (0.1, 1.0 y 10Hz), para cada uno de los tres ligantes asfálticos utilizados en el estudio de investigación. Se muestran también las diferentes temperaturas y energías de compactación correspondientes a cada ligante.

En la figura 2, se puede observar que a medida que la temperatura de compactación disminuye, el valor del módulo dinámico también disminuye en todas las frecuencias analizadas. Incluso, aunque se incremente la energía de compactación a la temperatura más baja (105°C), no se alcanzan módulos a temperaturas adecuadas de compactación (145°C). Esto se debe a que la baja temperatura de compactación no permite alcanzar la cohesión necesaria en la mezcla.



Figura 2. Resultados de Módulo Dinámico a 0°C en asfalto convencional

En la figura 3, se puede observar que, al disminuir la temperatura de compactación, se reduce el valor del módulo dinámico en todas las frecuencias analizadas. Sin embargo, al aumentar la energía de compactación a la temperatura más baja (120°C), se logra un ligero incremento en los módulos, pero sin llegar a los valores de temperaturas adecuadas de compactación (160°C).



Figura 3. Resultados de Módulo Dinámico a 0°C en asfaltos modificados

En la figura 4, se observa que al reducirse la temperatura de compactación se reduce el valor de módulo dinámico a todas las frecuencias analizadas. Sin embargo, si se incrementa la energía de compactación a la temperatura más baja (115°C), se alcanzan un ligero incremento en los módulos, pero sin llegar a los valores de temperaturas adecuadas de compactación (155°C). Esto debido a que ya no se alcanza la cohesión de la mezcla, por la baja temperatura de compactación.



Figura 4. Resultados de Módulo Dinámico a 0°C en asfalto modificado con PPA

### 3.3 Módulo dinámico a 20°C

El gráfico de barras presenta un resumen de los módulos dinámicos a 20°C y diferentes frecuencias (0.1, 1.0 y 10Hz), mostrando las variaciones correspondientes a las diferentes temperaturas y energías de compactación de los tres ligantes asfálticos utilizados en la investigación.

En la figura 5, se puede observar una disminución en el valor del módulo dinámico a todas las frecuencias analizadas a medida que se reduce la temperatura de compactación. Sin embargo, al aumentar la energía de compactación a la temperatura más baja (105°C), se observa un ligero incremento en los módulos, aunque no se alcanzan los valores de temperatura de compactación adecuados (145°C). Esto debido a que ya no se alcanza la cohesión de la mezcla, por la baja temperatura de compactación.



Figura 5. Resultados de los módulos dinámicos a 20°C en asfalto convencional

En la figura 6, se observa que al reducirse la temperatura de compactación se reduce el valor de módulo dinámico a todas las frecuencias analizadas. Incluso, aunque se incremente la energía de compactación a la temperatura más baja (120°C), no se alcanzan módulos a temperaturas adecuadas de compactación (160°C). Esto debido a que ya no se alcanza la cohesión de la mezcla, por la baja temperatura de compactación. El ligante asfáltico modificado con SBS y PPA exhibe una mayor viscosidad, lo que hace que sea más susceptible a los efectos del enfriamiento de la mezcla a esta temperatura de ensayo en comparación con un ligante convencional.

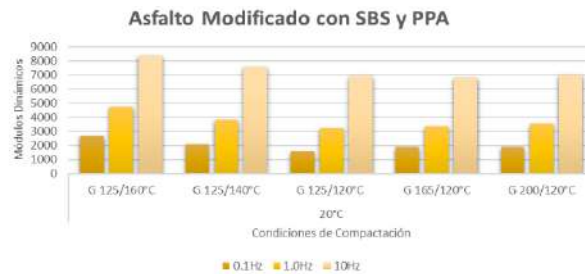


Figura 6. Resultados de los módulos dinámicos a 20°C en asfalto con SBS y PPA

En la figura 7, se aprecia una disminución en el valor del módulo dinámico a todas las frecuencias analizadas al reducirse la temperatura de compactación. Aunque se incremente la energía de compactación a la temperatura más baja (115°C), no se logran alcanzar módulos adecuados para temperaturas de compactación óptimas (155°C). Esto se atribuye a la falta de cohesión en la mezcla debido a la baja temperatura de compactación. El ligante asfáltico con PPA es más viscoso y el

enfriamiento de la mezcla lo afecta de mayor medida a esta temperatura de ensayo que un ligante convencional.



Figura 7. Resultados de los módulos dinámicos a 20°C en asfalto con PPA

### 3.4 Módulos dinámico a 40°C

Se presentan los módulos dinámicos a 40°C y diferentes frecuencias a modo de resumen en el gráfico de barras (0.1, 1.0 y 10Hz), con diferentes temperaturas y energías de compactación de cada uno de los tres ligantes asfálticos utilizados en la investigación.

En la figura 8, se observa que al reducirse la temperatura de compactación se reduce el valor de módulo dinámico a todas las frecuencias analizadas. Sin embargo, si se incrementa la energía de compactación a la temperatura más baja (105°C), se alcanzan un ligero incremento en los módulos, y casi llegando a los valores de temperaturas adecuadas de compactación (145°C). Esto se debe a que la temperatura de ensayo se acerca al punto de reblandecimiento del ligante convencional, lo que provoca que parte del trabajo sea realizado por el agregado pétreo.

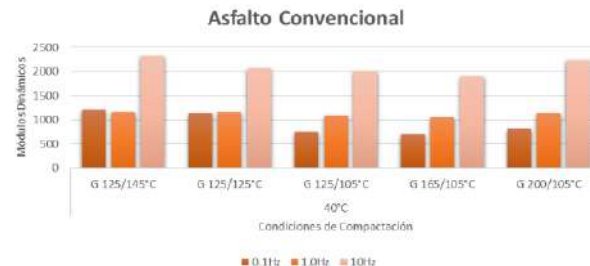


Figura 8. Módulos Dinámicos a 40°C en asfalto convencional

En la figura 9, se observa que al reducirse la temperatura de compactación se reduce el valor de módulo dinámico a todas las frecuencias analizadas. Incluso al aumentar la energía de compactación a la temperatura más baja (120°C), no se logran alcanzar módulos adecuados para temperaturas de compactación óptimas (160°C). Esto debido a que ya no se alcanza la cohesión de la mezcla, por la baja temperatura de compactación. El ligante asfáltico modificado con SBS y PPA presenta una mayor viscosidad y el enfriamiento de la mezcla lo afecta de mayor medida a esta temperatura de ensayo que un ligante convencional.





Figura 9. Módulos Dinámicos a 40°C en asfalto con SBS y PPA

En la figura 10, se observa que al reducirse la temperatura de compactación se reduce el valor de módulo dinámico a todas las frecuencias analizadas. Sin embargo, si se incrementa la energía de compactación a la temperatura más baja (115°C), se alcanzan un ligero incremento en los módulos, y casi llegando a los valores de temperaturas adecuadas de compactación (155°C), en específico cuando se tienen energías de compactación de 200 giros. Esto debido a que a la temperatura de ensayo de 40°C, el trabajo empieza a realizarlo también el agregado pétreo y ya no solamente la cohesión del ligante asfáltico, en este caso especial con ligante asfáltico con PPA.



Figura 10. Módulos Dinámicos a 40°C en asfalto con PPA

### 3.5 Correlación con la ecuación de Witzzak

Se presentan las correlaciones de los módulos medidos mediante el ensayo y los valores obtenidos con la ecuación de Witzzak, esto con la finalidad de observar si la ecuación considera esta posible pérdida de cohesión con temperaturas de compactación inferiores a las recomendadas y con diferentes energías de compactación.

Los valores mostrados en los gráficos tanto del módulo calculado, como los obtenidos con la ecuación, corresponden a todas las frecuencias y temperaturas de ensayo.



Figura 11. Relación de datos de módulo dinámico y ecuación de Witzzak

En la figura 11, se puede apreciar una correlación muy alta entre los valores obtenidos y los calculados mediante la ecuación. Estos valores corresponden al ligante convencional, con temperaturas adecuadas de compactación (145°C) y energías de compactación (125 giros).



Figura 12. Relación de datos de módulo dinámico y ecuación de Witczak

En la figura 12, se puede observar una correlación significativa entre los valores obtenidos y los calculados mediante la ecuación, aunque esta correlación es ligeramente inferior a la mostrada en la figura 11. Esto puede deberse posiblemente a la pérdida de cohesión y a las energías de compactación alteradas al sustituir la temperatura baja en el proceso. Estos valores corresponden al ligante convencional, con las temperaturas más bajas de compactación (145°C) y la mayor energía de compactación (200 giros).



Figura 13. Relación de datos de módulo dinámico y ecuación de Witczak

En la figura 13, se observa una correlación muy alta con los valores obtenidos y los de la ecuación. Estos valores corresponden al ligante modificado con SBS y PPA, con temperaturas (160°C) y energías de compactación (125 giros) adecuadas.



Figura 14. Relación de datos de módulo dinámico y ecuación de Witczak

En la figura 14, se observa una correlación alta con los valores obtenidos y los de la ecuación, pero inferior a la de la figura 13, posiblemente afectada la correlación por la pérdida de cohesión y energías

de compactación sustituyendo la temperatura baja. Estos valores corresponden al ligante modificado con SBS y PPA, con las temperaturas más bajas de compactación (160°C) y la mayor energía de compactación (200 giros).



Figura 15. Relación de datos de módulo dinámico y ecuación de Witzzak

En la figura 15, se observa una correlación muy alta con los valores obtenidos y los de la ecuación. Estos valores corresponden al ligante modificado con PPA, con temperaturas (155°C) y energías de compactación (125 giros) adecuadas.



Figura 16. Relación de datos de módulo dinámico y ecuación de Witzzak

En la figura 16, se puede observar una correlación significativa entre los valores obtenidos y los calculados mediante la ecuación, aunque esta correlación es ligeramente inferior a la mostrada en la figura 15. Esta disminución de la correlación puede atribuirse posiblemente a la pérdida de cohesión y a las energías de compactación alteradas al sustituir la temperatura más baja en el proceso. Los valores representados corresponden al ligante modificado con PPA, utilizando las temperaturas de compactación más bajas (155°C) y la mayor energía de compactación (200 giros).

#### 4 Conclusiones

1. La temperatura de compactación es fundamental en la cohesión y durabilidad de una mezcla asfáltica.
2. El módulo dinámico de una mezcla asfáltica se ve reducido cuando disminuye la temperatura de compactación.
3. La mayor reducción de módulo dinámico cuando se tiene una temperatura de compactación baja, se presenta en temperaturas de ensayo bajas como 0°C y frecuencias altas como 10Hz.
4. El módulo dinámico se ve más afectado en temperaturas de compactación bajas cuando se utilizan ligantes más viscosos como son los asfaltos modificados.



5. Aunque se aumente la energía de compactación a temperaturas de compactación bajas, nunca se alcanzará la cohesión y durabilidad, que cuando se compacta a temperaturas recomendadas o establecidas.
6. La ecuación de Witczak presenta una correlación casi perfecta con los módulos medidos en laboratorio.
7. La correlación de la ecuación de Witczak disminuye su correlación con los módulos medidos en laboratorio, cuando se compacta a menor temperatura e incluso aunque se aumente la energía de compactación.

## 5 Referencias

- [1] Li, H., Zhang, Y., Wang, D., & Hang, Y. (2014). Influence of compaction temperature on performance properties of asphalt mixture. *Construction and Building Materials*.
- [2] Saleh, M., & Bahía, H. (2006). Effect of temperature on bonding properties of asphalt-aggregate systems. *Transportation Research Record*.
- [3] AMIVTAC. (2020). *Producción y compactación de mezcla asfáltica en caliente, Manual de supervisión*.
- [4] Limón, P., Cremades, I., Miró, R., & Garnica, P. (2009). Efecto de la temperatura de compactación sobre el módulo resiliente de las mezclas asfálticas. *Carreteras: Revista técnica de la Asociación Española de la Carretera*.
- [5] Pellien, T., & Bahia, H. (2018). Effect of Temperature on Asphalt Mixture Behavior and Performance. *Transportation Research Record*.
- [6] Delgado, H., López, J. G., & Flores, M. (2017). *Propuesta de método de prueba de módulo dinámico en mezclas asfálticas para México*. Sanfandila.
- [7] Lara, J. J. (2021). Ajuste ecuación de predicción Witczak modelo NCHRP-137A del módulo dinámico ( $|E^*|$ ) de mezclas asfálticas.
- [8] Leiva, F. (2004). Módulo dinámico de mezclas asfálticas.
- [9] Fonseca, O., & Witczak, M. (1996). "A prediction methodology for the dynamic modulus of in-place aged asphalt mixtures (with discussion)". *Journal of the Association Asphalt Paving Technologists*.