



Propuesta de Investigación

UI-PI-09-11

# **IMPLEMENTACIÓN DEL MÓDULO DINÁMICO COMO ENSAYO DE EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS PRODUCIDAS EN PLANTA Y LABORATORIO**

## **Propuesta de Investigación**

### **Investigadores**

Ing. José Pablo Corrales A. MSc.

Ing. Fabián Elizondo Arrieta. MBA

Ing. Mónica Jiménez Acuña

Ing. Edgar Camacho Garita

Ing. Andrea Ulloa Calderón

Julio 2011

# **IMPLEMENTACIÓN DEL MÓDULO DINÁMICO COMO ENSAYO DE EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS PRODUCIDAS EN PLANTA Y LABORATORIO**

## **1. JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA**

Con la implementación de la Guía Empírico-Mecánica de Diseño de Pavimentos (MEPDG), AASHTO 2002, se ha procurado iniciar una nueva era de diseño de pavimentos asfálticos, basada no solo en la cantidad de vehículos proyectados sino en el desempeño de la mezcla ante los diversos esfuerzos a la que es sometida los cuales pueden provocar diferentes deterioros tales como la fatiga, el ahuellamiento o la falla por cortante.

Uno de los ensayos para medir el desempeño de la mezcla asfáltica, es el ensayo de Módulo Dinámico. Si bien este ensayo se ha utilizado en el país por mucho tiempo, es indispensable asegurarse de que está siendo ejecutado de la manera más adecuada para poder obtener resultados comparables con aquellos obtenidos en otros países a nivel mundial. Esto debido a que este ensayo contiene muchas variables que pueden llevar a diferencias importantes en los resultados obtenidos.

La calibración de este ensayo para la futura implementación en Costa Rica de una guía de diseño mecánica, es de vital importancia para el perfecto funcionamiento de la misma. Con la creación de un procedimiento estándar para la realización del ensayo de Módulo Dinámico, se busca unificar criterios para una correcta obtención de especímenes de ensayo así como para la realización del ensayo propiamente.

En conjunto con la creación de este procedimiento de ensayo, es necesaria la realización de pruebas de laboratorio para corroborar que los resultados son los esperados y para esto es necesario utilizar mezclas típicamente producidas en Costa Rica para evaluar su tanto su desempeño final bajo este ensayo así como la variación de este desempeño, dadas ciertas diferencias en la producción de los especímenes de ensayo de acuerdo a la metodología AASHTO creada para este fin.

## 2. INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES

Como parte del desarrollo de la Guía Mecánico-Empírica de Diseño de Pavimentos, se han incluido como variables de entrada, modelos de desempeño relacionados con ensayos de laboratorio para las mezclas asfálticas. Uno de estos ensayos es el Módulo Dinámico, seleccionado en 1999 por el Programa Cooperativo Nacional para Investigación en Carreteras de los Estados Unidos (NCHRP) en su proyecto I-37A para incluir un parámetro análogo al módulo E del acero, con el fin de calcular los esfuerzos y deformaciones en pavimentos asfálticos.

El  $E^*$  de un material viscoelástico, se define como la respuesta desarrollada por el material bajo condiciones de carga sinusoidales a través de un dominio de frecuencias definidas. Este es un número complejo ya que contiene tanto una parte real como una imaginaria. De acuerdo a la teoría de viscoelasticidad, el valor absoluto del módulo complejo es por definición el Módulo Dinámico del material  $|E^*|$ .

Mediante la realización de este ensayo es posible conocer el módulo del concreto asfáltico a todos los niveles de análisis de temperatura y tiempos de carga, por medio de la Curva Maestra. Esta curva es construida utilizando el principio de superposición de tiempo y temperatura. Los datos a las distintas temperaturas ensayadas son corridos con respecto al logaritmo del tiempo hasta que todas las curvas se unen como una sola función. La curva resultante en función del tiempo, describe la dependencia del tiempo del material. Por otra parte la dependencia del material a la temperatura, está dada por la cantidad de espacio que debe moverse cada curva.

La construcción de estas curvas con los resultados obtenidos del ensayo de Módulo Dinámico, son uno de los principales objetivos a seguir para la calibración de una guía de diseño mecánica en Costa Rica, ya que estas curvas son parte de los parámetros de entrada para la caracterización de pavimento asfáltico en cuanto a su desempeño ante los diversos esfuerzos a los que es sometido.

### **3. OBJETIVO GENERAL**

Desarrollar un protocolo de ensayo para el Módulo Dinámico de manera que se unifiquen criterios en cuanto a la realización del ensayo y la producción de especímenes con mezclas producidas tanto en laboratorio como en planta.

### **4. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

1. Realizar una revisión del procedimiento de compactación de especímenes mediante el compactador giratorio Superpave, para la obtención de los vacíos adecuados para pruebas de desempeño.
2. Monitorear el procedimiento de ensayo del Módulo Dinámico, para introducir algunos cambios en los criterios utilizados para determinar de esta manera, la metodología más adecuada a seguir para la realización de este.
3. Evaluar la posible influencia del procedimiento de cuarteo en la producción de especímenes con mezcla proveniente de plantas, además de la influencia de este procedimiento en los resultados de Módulo Dinámico.
4. Reproducir una mezcla de planta en el laboratorio para evaluar las diferencias entre los resultados obtenidos mediante el Módulo Dinámico para las diversas condiciones de envejecimiento que se pueden producir.
5. Determinar el módulo  $G^*$  del asfalto, para las diversas condiciones estudiadas, con el fin de determinar posibles variaciones en éste, debido a las condiciones de envejecimiento a las que las mezclas son expuestas.

## 5. ETAPAS Y ACTIVIDADES DEL PROYECTO

Para la realización de este proyecto se considera adecuado dividirlo en varias etapas correlacionadas, las cuales podrán ir generando resultados previos que pueden ser analizados por separado, sin embargo el objetivo final será juntar todos estos resultados para crear un análisis integrado de todas las condiciones evaluadas.

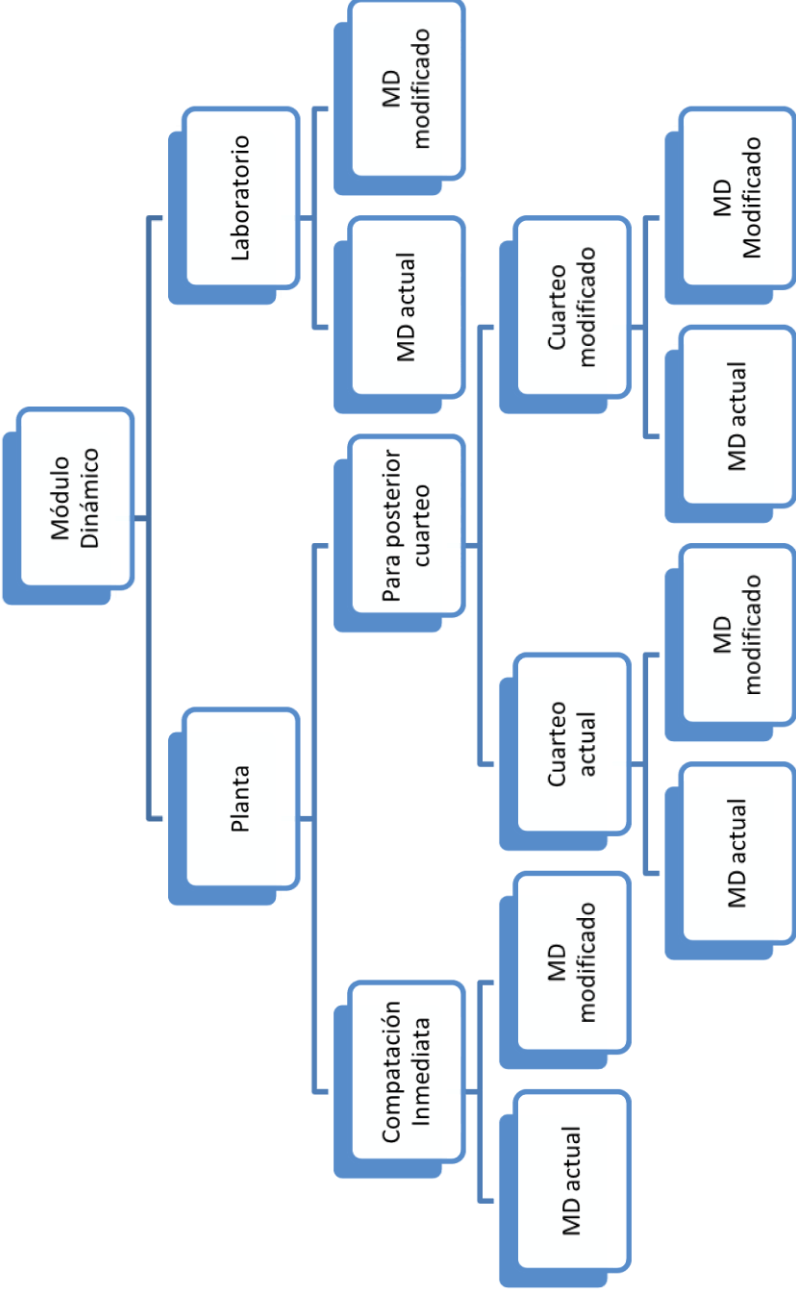
El proyecto será entonces subdividido de la siguiente manera:

- 1- Muestreo de mezcla en planta para la compactación y posterior evaluación mediante Módulo Dinámico. En esta primera etapa se pretende evaluar el procedimiento de compactación utilizado además de analizar la influencia del procedimiento de cuarteo en el envejecimiento de la mezcla asfáltica. La mezcla se utilizará de la siguiente manera
  - a. Una parte de la mezcla se transportará en recipientes térmicos, de manera que la mezcla pueda ser compactada de inmediato a la llegada al laboratorio. Total a compactar: 12 cilindros
  - b. La mezcla restante se dejará enfriar y posteriormente se realizará el procedimiento de cuarteo (actualmente utilizado por el laboratorio) para crear un segundo set de especímenes. Total a compactar: 32 cilindros
  - c. Ambas condiciones a. y b. se compactarán siguiendo el procedimiento AASHTO PP 60-09, el cual será desglosado y detallado más adelante.
  - d. Todos los especímenes serán ensayados por Módulo Dinámico. De cada condición de compactación, 6 especímenes serán ensayados de acuerdo a la metodología actual, mientras que los otros 6 serán ensayados siguiendo la metodología sugerida más adelante.
  - e. Con la información obtenida se generará un primer informe parcial de los resultados en el que se comparen las dos condiciones estudiadas con el fin de generar una retroalimentación para el proceso de compactación de la mezcla, además del proceso de recalentamiento y cuarteo y también la metodología de ensayo del Módulo Dinámico.

- 2- Con el restante de mezcla traída de planta, se realizará una segunda etapa, que pretende reducir el envejecimiento de la mezcla a la hora de ser cuarteada. Los pasos a seguir serán los siguientes
- a. Se realizará un cuarteo de la mezcla previamente almacenada, modificando los tiempos y procesos de recalentamiento utilizados actualmente, para procurar reducir el envejecimiento producido durante este procedimiento. Total a compactar: 12 cilindros
  - b. La mezcla será compactada siguiendo el procedimiento AASHTO PP 60-09, el cual será desglosado y detallado más adelante.
  - c. Todos los especímenes serán ensayados por Módulo Dinámico. La mitad de los cilindros serán ensayados de acuerdo a la metodología actual, mientras que la otra mitad serán ensayados siguiendo la metodología sugerida más adelante.
  - d. Con esta información, se generará un segundo informe parcial que incluirá la comparación de los resultados de esta muestra con las dos analizadas previamente. El informe pretende evaluar el envejecimiento intermedio adicional que se pueda generar en comparación a las dos primeras condiciones debido al procedimiento de cuarteo de la mezcla que es la variable monitoreada, además de la influencia de este posible envejecimiento en los resultados de módulo dinámico.
- 3- La tercera etapa del proyecto estará dedicada al análisis de una mezcla producida en laboratorio siguiendo el diseño de mezcla de la mezcla traída de planta. Esta etapa se desglosa de la siguiente manera.
- a. Se reproducirá en laboratorio la mezcla que ha analizado en las primeras dos etapas, siguiendo el diseño utilizado en la planta para la respectiva producción. Total a compactar: 12 cilindros
  - b. La mezcla será compactada siguiendo el procedimiento AASHTO PP 60-09, el cual será desglosado y detallado más adelante.
  - c. Todos los especímenes serán ensayados por Módulo Dinámico. De esta condición, 6 especímenes serán ensayados de acuerdo a la metodología actual, mientras que los otros 6 serán ensayados siguiendo la metodología sugerida más adelante.

- d. Un tercer informe y final se generará, en el que se comparen las tres condiciones previamente estudiadas con los resultados de la mezcla producida en laboratorio. El objetivo primordial será el de comparar las condiciones de envejecimiento previas a la compactación de especímenes para ensayos de desempeño, además de estudiar las posibles diferencias en los resultados de Módulo Dinámico para todas las condiciones.
- 4- Para cada una de las 3 etapas mencionadas, se extraerá una muestra de 2000 gramos de cada condición (para un total de 4 muestras), para realizar extracción del asfalto. El asfalto extraído se evaluará con el Módulo G\*, así como con su viscosidad para comprobar la variación de este de acuerdo a las diversas condiciones de envejecimiento. Los resultados obtenidos de estas pruebas se incluirán en los informes respectivos de cada etapa.

6. ESQUEMA EXPERIMENTAL





## **7. PRODUCTOS DE LA INVESTIGACIÓN**

Los productos de esta investigación serán:

1. Informe sobre la implementación del ensayo de Módulo Dinámico para mezclas asfálticas en Costa Rica bajo diversas condiciones. Este incluye:
  - a. Evaluación del procedimiento de compactación para ensayos de desempeño.
  - b. Variación del Módulo con el envejecimiento de la mezcla
  - c. Variación del envejecimiento bajo un procedimiento de cuarteo restringido.
  - d. Diferencias en el Módulo Dinámico de acuerdo a variaciones en el procedimiento de ensayo.

## **8. CRONOGRAMA PROPUESTO**

## 9. ANEXOS

### Anexo A. Proceso de Compactación de especímenes sugerido.

Este procedimiento debe seguirse tanto para la mezcla de laboratorio como para la mezcla de planta. Los puntos 2.1. a 2.3. se realizarán únicamente para mezclas de laboratorio. Para mezclas de planta, la norma AASHTO R-30 especifica que no debe haber condicionamiento de las mezclas. Por lo que se seguirá la nota correspondiente.

#### 1. CALCULO DE MATERIAL PARA COMPACTACIÓN

Previo a la compactación de la mezcla, se realizará el cálculo de la cantidad de material necesario para alcanzar el porcentaje de vacíos requerido de acuerdo a la norma AASHTO PP 60. Para ensayos de desempeño el volumen de vacíos objetivo será de  $7 \pm 0.5\%$ . Todo espécimen que no cumpla con este parámetro será desechado. El procedimiento a seguir será el siguiente:

- 1.1 Todo espécimen debe ser compactado a una altura mínima de 170 mm. Esta altura estará definida por el gradiente de vacíos producido por el compactador y por efectos del equipo de corte de especímenes. Una mezcla típica tendrá alrededor de  $1.5 \pm 0.5\%$  menos de vacíos en el núcleo debido a la irregularidad de la superficie sin cortar.
- 1.2 La masa de MAC necesaria para el espécimen dependerá de la altura definida en el compactador, la gravedad específica máxima teórica de la mezcla (Gmm) y el porcentaje de vacíos esperado en el espécimen.
- 1.3 El cálculo a realizar será el siguiente:

$$G = \frac{\rho (\text{material})}{\rho (\text{agua})}$$

En donde:

G = gravedad específica del material

$\rho$  = densidad del material o del agua

De acuerdo a esto se tiene que:

$$G \cdot \rho(\text{agua}) = \frac{M}{V}$$

En donde:

G = gravedad específica del material

$\rho$  (agua) = densidad del agua = 1g/cm<sup>3</sup>

M = masa total del material

V = volumen del material

Dado que la densidad requerida en los especímenes es conocida, así como también se conoce el volumen de los mismos, podemos obtener la masa total de mezcla de la siguiente manera:

$$\% \rho (\text{mezcla}) \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot h = \text{Masa}$$

En donde:

%  $\rho$  (mezcla) = porcentaje de la densidad máxima de la mezcla que se desea obtener. Este porcentaje será aproximadamente 91.5 ± 0.5% dependiendo de la mezcla, para una densidad esperada del núcleo de 93% (7% de vacíos).

$\rho$  (mezcla) = densidad máxima de la mezcla, numéricamente idéntica al Gmm.

D = diámetro del espécimen = 10 cm

h = altura del espécimen = 17 cm (variar únicamente de ser necesario de acuerdo a 1.1.)

La sustitución de estos números deriva en la siguiente ecuación:

$$0.92 \cdot \rho(\text{mezcla}) \cdot \frac{\pi \cdot (10\text{cm})^2}{4} \cdot 17\text{cm} = \text{Masa total}$$

la cual puede ser resuelta de inmediato al conocerse el Gmm de la mezcla estudiada.

Nota 1: De no conocerse la Gravedad Específica Máxima Teórica, se debe proceder de acuerdo al apéndice X1 de la norma AASHTO PP 60.

- 1.4 Siempre será adecuado incluir al menos 50 gramos de mezcla adicionales, ya que durante el proceso completo de preparación de la mezcla, algunos gramos se pueden perder al quedarse adheridos a los recipientes (especialmente las partículas más finas). El peso total calculado es el que se debe garantizar al momento de ser vertido en el molde para la compactación.
- 1.5 Es muy importante tener presente que el compactador Superpave debe ser programado previamente para que compacte hasta la altura de 170 mm requerida y no por número de giros.

Nota 2: El compactador giratorio Superpave, comienza a detenerse cuando internamente mide la altura de 170 mm requerida, por lo que generalmente da una o dos vueltas más antes de detenerse por completo, alcanzando una altura del espécimen ligeramente menor a los 170 mm esperados. Esto puede ser corregido agregando 1 o 2 mm a la altura requerida de acuerdo a la compactabilidad de la mezcla en estudio.

## **2. PROCESO DE COMPACTACIÓN SUGERIDO.**

- 2.1 Colocar la mezcla suelta en una bandeja. Esparcir la mezcla de manera que se logre un ancho uniforme de entre 25 y 50 mm.
- 2.2 Colocar la mezcla en el horno por  $4h \pm 5$  minutos a una temperatura de  $135 \pm 3^{\circ}\text{C}$
- 2.3 Revolver la mezcla cada  $60 \pm 5$  minutos para mantener un acondicionamiento uniforme. Una vez que la muestra ha recibido este condicionamiento, se procederá a subir la temperatura del horno hasta la de compactación de la mezcla.
- 2.4 Una vez que la mezcla se introduzca en el horno a la temperatura de compactación se debe revisar la temperatura de esta cada  $30 \pm 5$  minutos hasta verificar que se ha obtenido la temperatura deseada en la misma. Si la temperatura se encuentra cerca del rango de compactación cuando es revisada, el tiempo de revisión siguiente debe ser reducido a criterio del usuario para evitar una oxidación adicional en la mezcla.  
  
Nota 3: Este punto aplica tanto para mezcla de planta previamente cuarteada o para mezcla de laboratorio previamente condicionada.  
  
Nota 4: Para garantizar la uniformidad del calentamiento de la mezcla, es preferible revolver la mezcla cada vez que se revisa la temperatura o al menos una vez cada  $60 \pm 5$  minutos.
- 2.5 Cuando la mezcla se encuentre a la temperatura de compactación, se procederá a sacar el molde con su plato en la base, el plato superior y el embudo para verter la mezcla (los cuales deben estar también a la temperatura de compactación). Una vez que se coloca el disco de papel en el fondo del molde se verterá toda la mezcla (el peso calculado en la sección anterior) en una sola acción, teniendo cuidado de que no se genere segregación en el molde. Sobre la mezcla se colocará otro disco de papel y a continuación el plato metálico superior para iniciar la compactación.

- 2.6 La mezcla será compactada para una altura de 170 mm, para lo cual el compactador giratorio Superpave debe ser programado con anterioridad para evitar que la mezcla se enfríe.
- 2.7 Una vez que el cilindro sea compactado, se debe esperar algunos minutos a que la mezcla baje su temperatura para evitar que esta se desmorone al sacarla. Los discos de papel deber removerse lo más pronto posible para evitar que se adhieran completamente a la superficie del cilindro.
- 2.8 Es importante que antes de proceder con la siguiente compactación, el molde vuelva al horno por al menos 5 minutos para mantenerlo a la temperatura adecuada. El uso de varios moldes es recomendado para evitar este tiempo de espera.

## **Anexo B. Proceso de cuarteo sugerido.**

Con el fin de procurar evitar un sobrecalentamiento de la mezcla y por lo tanto una oxidación mayor a la esperada o requerida, se plantean una serie de recomendaciones para el proceso de cuarteo de mezcla asfáltica realizado en el laboratorio.

1. La mezcla será transportada en baldes metálicos tapados debidamente para facilitar el proceso de recalentamiento y evitar a la vez una oxidación excesiva de la misma.

2. Para iniciar el cuarteo de la mezcla, el balde metálico será colocado en el horno a una temperatura de  $135 \pm 3^{\circ}\text{C}$  por un período de 2 horas. El balde no debe estar sellado para evitar una posible explosión, sin embargo si debe estar completamente tapado para evitar la oxidación de la mezcla.

Nota 1: La temperatura sugerida, es una temperatura cercana al rango de mezclado, lo que garantiza que se conseguirá que la mezcla se suavice y sea fácil de manipular y cuartear.

Nota 2: En caso de que al finalizar las dos horas la mezcla no se encuentra completamente suelta, ésta se dejará en el horno hasta lograr la condición esperada, revisándola en intervalos de 20 minutos.

3. Una vez que las dos horas transcurran, se procederá a realizar el cuarteo de la mezcla de acuerdo a la norma AASHTO correspondiente.

4. Una vez que la mezcla se encuentre cuarteada, se procederá a colocarla en las bandejas correspondientes para continuar con el proceso de compactación.

Nota 3: Para efectos de reducir los tiempos de recalentamiento, se recomienda evitar realizar el proceso de cuarteo con el único fin de reducir el tamaño de la mezcla para posteriores ensayos. Es altamente recomendable continuar con el proceso de compactación una vez que la mezcla esté cuarteada.

5. Posteriormente al proceso de cuarteo, la temperatura del horno será subida hasta la temperatura de compactación y se introducirán las bandejas de mezcla con una altura uniforme de 25 a 50 mm.
6. A partir de este punto empieza a aplicar el proceso de compactación sugerido en el Anexo A, Sección 2.4.

Nota 4: Para mezcla de planta recién cuarteada, se espera que el tiempo que la mezcla debe estar en el horno antes de alcanzar la temperatura de compactación es aproximadamente de 2 horas. Durante este tiempo es imperativo que la mezcla se revuelva al menos una vez cada  $60 \pm 5$  min.



## **Anexo C. Proceso de ensayo para Módulo Dinámico sugerido.**

Esta guía de desarrollo pretende servir como complemento a los procedimientos de ensayo para la determinación del Módulo Dinámico de la MAC (AASHTO TP 62 y AASHTO TP 79). Esta tendrá como fin, crear un procedimiento unificado y sencillo a seguir para investigar las variaciones en el Módulo Dinámico con respecto a las variaciones en la metodología utilizada. De esta manera se pretende hallar la mejor manera de realizar el ensayo para obtener resultados comparables con los obtenidos en otras investigaciones.

La compactación del cilindro se realizará de acuerdo al procedimiento descrito en el anexo A, es decir, mediante el cálculo de la masa material requerida para lograr un porcentaje de vacíos de  $7 \pm 0.5\%$ , compactando por altura, de acuerdo a lo indicado en la Nota 3 de la sección 9.2, de la AASHTO TP 62.

El procedimiento de preparación del cilindro de prueba propiamente para el ensayo, será el mismo que se ha seguido para la realización de la prueba desde el inicio. Las variaciones estarán dadas en la ejecución de la prueba propiamente. El procedimiento a seguir será el siguiente.

1. Para agilizar el proceso de cálculo de los vacíos, se recomienda tratar los especímenes como húmedos una vez que se hayan cortado los núcleos y determinar la masa bajo el agua y la superficie saturada seca. Posteriormente se pueden dejar secar durante la noche y al día siguiente, únicamente se determina la masa seca y se puede proceder a la preparación del ensayo.
2. Para eliminar los efectos del envejecimiento, se recomienda no almacenar los especímenes por más de dos semanas antes de ensayarlos.
3. Para esta investigación se ensayarán 5 especímenes con el objetivo de reducir el coeficiente de variación y aumentar la exactitud de los resultados. Es recomendable siempre tener al menos 5 especímenes en caso de que los vacíos no se cumplan para alguna muestra.
4. El análisis será realizado para las temperaturas de 4.4, 21.1, 37.8 y 54°C a frecuencias de carga de 0.1, 0.5, 1.0, 5, 10 y 25 Hz. Cada espécimen debe ser ensayado en todas las 24 combinaciones diferentes posible, iniciando

con la temperatura más baja, hacia la más alta y en cada temperatura iniciando desde la más alta, hacia la más baja.

5. Se deberá procurar que la temperatura necesaria tenga un rango de  $\pm 0.3^{\circ}\text{C}$  y para esto, se utilizará un espécimen con una termocupla montada para garantizar esta temperatura.
6. Es imperativo que la deformación axial se mantenga entre 75 y 125  $\mu\text{strains}$  durante todo el ensayo. (AASHTO TP 79)
7. Tal y como lo indica la sección 11.7 del procedimiento AASHTO TP 62, se debe aplicar una carga dinámica al espécimen la cual debe ser ajustada para mantener la deformación indicada en el punto anterior.

Nota 1: El procedimiento es claro en que el ensayo de Módulo Dinámico es un ensayo de *carga controlada* y que debe ejecutarse para mantener un rango de deformación y no mantener una deformación constante, puesto que esto puede llevar a esfuerzos mucho menores que se salgan de los rangos sugeridos para cada temperatura.

8. El proceso conocido como “tunning” se realizará únicamente para tener una idea del esfuerzo que debe ser aplicado durante la prueba. Para este procedimiento se utilizará una deformación esperada de  $100 \pm 10 \mu\text{strains}$  con el objetivo de mantenerse dentro del rango necesario.
9. Una vez que se obtenga el esfuerzo para lograr esta deformación, se procederá a verificar que éste se encuentre dentro del rango propuesto en la tabla 4 del procedimiento AASHTO TP 62.
10. Con el esfuerzo definido, se procederá a iniciar el ensayo, comenzando con un acondicionamiento del espécimen de 200 ciclos a 25 Hz. Posteriormente se aplicará el resto de los ciclos de acuerdo a lo indicado en la Tabla 6 del procedimiento AASHTO TP 62.

Nota 2: Entre una frecuencia y otra, el período de reposo típico es de dos minutos. Este período no debe nunca exceder 30 minutos entre dos frecuencias.

11. Si la deformación permanente acumulada no recuperada es mayor a 1500  $\mu\text{strains}$ , la carga utilizada debe reducirse a la mitad. Los datos obtenidos hasta este punto pueden mantenerse y utilizarse, sin embargo el espécimen debe ser desechado y uno nuevo será utilizado a partir de la última condición medida con las condiciones de carga reducidas.