

**Puesta a punto de un ensayo de fatiga sobre ligantes bituminosos**

**Karla Patricia Cuadros López**

**Carlos David Hurtado Martinez**

**Trabajo de grado como requisito para optar el título de Ingeniero Civil**

**Director**

**Eduardo Alberto Castañeda Pinzon**

**Ph.D. en Ingeniería Civil**

**Universidad Industrial de Santander**

**Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas**

**Escuela de Ingeniería Civil**

**Bucaramanga**

**2018**

**Dedicatoria.**

*A mis padres, por haberme proporcionado la mejor educación y lecciones de vida, por haberme enseñado que con esfuerzo, trabajo y constancia todo se consigue, por cada día hacerme ver la vida de una forma diferente y confiar en mis decisiones. Con ellos, todo es posible.*

***Karla Patricia Cuadros López.***

*A mi madre, por enseñarme a amar las oportunidades y a vencer las adversidades.*

*A mi Padre, por enseñarme el valor del trabajo.*

*A ellos, a quienes todo debo, siempre han sido y serán, mis héroes y mentores.*

***Carlos David Hurtado Martinez.***

## Contenido

	<b>Pág.</b>
Introducción .....	14
1. Marco Teórico.....	15
1.1 Fatiga.....	15
1.2 Fatiga en materiales asfálticos .....	16
1.3 Fenómeno de fatiga sobre la estructura del pavimento bituminoso.....	16
1.4 Ensayos de fatiga en ligantes bituminosos.....	19
1.5 Descripción del ensayo de fatiga sobre ligantes bituminosos ideado por Galvis y Vega.....	22
2. Montaje de la prueba.....	24
3. Validación y mejoramiento del ensayo de fatiga sobre ligantes bituminosos .....	26
3.1 Ejecución completa de la prueba de fatiga .....	26
3.1.1 Cálculo tipo deformación unitaria .....	28
3.1.2 Cálculo tipo del módulo de rigidez.....	29
3.2 Facilidad en la ejecución del ensayo.....	30
3.3 Verificación de la repetibilidad de los resultados .....	33
3.4 Análisis de resultados y comparación con ensayos similares .....	34
3.4.1 Asfalto 60/70.....	34
3.4.2 Asfalto modificado.....	37
3.5 Diseño de mejoras al ensayo.....	41

---

3.5.1 Geometría de la probeta de ensayo .....	41
3.5.2 Modificación del porta muestras.....	41
4. Conclusiones.....	43
Referencias Bibliográficas .....	46
Apéndices.....	48

**Lista de Figuras**

	<b>Pág.</b>
Figura 1. Fases de degradación por el fenómeno de fatiga en mezclas asfálticas. ....	18
Figura 2. Fases de degradación por el fenómeno de fatiga en ligantes bituminosos .....	18
Figura 3. Curva de Whöler por esfuerzo controlado.....	19
Figura 4. Curva de Whöler por deformación controlada .....	19
Figura 5. Estado tensional de un pavimento bajo carga simple.....	20
Figura 6. Diferentes pruebas de laboratorio para caracterizar la fatiga. ....	21
Figura 7. Modelado de deformaciones unitaria. ....	23
Figura 8. Modelo virtual del porta muestras utilizado para el ensayo .....	24
Figura 9. Proceso de fabricación de los moldes en Caucho Silicona.....	25
Figura 10. Proceso constructivo de los Especímenes. ....	25
Figura 11. Montaje del porta muestras y el espécimen.....	25
Figura 12. Gráfica de módulo de rigidez vs ciclos de carga.....	29
Figura 13. Probeta de asfaltita fracturada .....	31
Figura 14. Manipulación excesiva al introducir la probeta en el porta muestras .....	32
Figura 15. Deformación plástica de la probeta después de 30000 ciclos de carga.....	32
Figura 16. Curvas de fatiga probetas de asfalto 60/70 a iguales condiciones.....	33
Figura 17. Reducción de rigidez en las probetas de asfalto 60/70 a iguales condiciones.....	34
Figura 18. Curva de fatiga prueba No.4.....	35

---

Figura 19. Porcentajes de disminución de rigidez prueba No. 4 .....	35
Figura 20. Curva de fatiga probeta No.5.....	36
Figura 21. Porcentajes de disminución de rigidez prueba No. 5 .....	36
Figura 22. Curva de fatiga probeta No.6.....	38
Figura 23. Curva de fatiga probeta No.7.....	39
Figura 24. Curva de fatiga probeta No.8.....	40
Figura 25. Cambio en la geometría de la probeta .....	41
Figura 26. Modificación del porta muestras .....	42
Figura 27. Prototipo en madera del porta muestras sugerido.....	42

**Lista de Tablas**

	<b>Pág.</b>
Tabla 1. Dimensiones finales establecidas para la probeta.....	23
Tabla 2. Condiciones de las probetas de asfalto 60/70 a ensayar .....	27
Tabla 3. Condiciones de las probetas de asfalto modificado a ensayar .....	27
Tabla 4. Resultados entregados por la Metravib DMA+1000 .....	28

**Lista de Apéndices**

	<b>Pág.</b>
Apéndice A. Norma para un ensayo de fatiga sobre ligantes bituminosos.....	48
Apéndice B. Manual de programación para el ensayo de fatiga sobre ligantes bituminosos en la metravib DMA+1000 .....	56
Apéndice C - Informe de resultados “norma para un ensayo de fatiga sobre ligantes bituminosos” .....	74
Apéndice D. Geometría de la probeta de ensayo propuesta para el ensayo de fatiga sobre ligantes bituminosos.....	88
Apéndice E. Modificación del porta muestras para el ensayo de fatiga sobre ligantes bituminosos.....	90

## Resumen

**Título:** Puesta a punto de un ensayo de fatiga sobre ligantes bituminosos \*

**Autores:** Karla Patricia Cuadros López  
Carlos David Hurtado Martínez \*\*

**Palabras Claves:** Ligante bituminoso, fatiga, rigidez.

En este artículo se presenta el primer montaje experimental del “ENSAYO DE FATIGA SOBRE LIGANTES BITUMINOSOS” ideado por Galvis y Vega. El montaje se ha realizado en el Laboratorio Álvaro Beltrán Pinzón de la Universidad Industrial de Santander, y su metodología consiste en someter a flexión dinámica probetas prismáticas de asfalto con el objetivo de determinar el comportamiento frente a la fatiga del material. Este procedimiento permite evaluar el desempeño del material por medio del análisis de la fuerza requerida para generar una deformación constante a lo largo del ensayo, lo que traduce en una disminución de su rigidez hasta producir el fallo por fatiga. Este trabajo de investigación presenta la metodología del procedimiento en el laboratorio, siguiendo lo establecido por los autores del ensayo, los resultados y análisis de resultados obtenidos, ventajas y desventajas del procedimiento propuesto, las principales recomendaciones y conclusiones al montaje experimental. Las recomendaciones realizadas al ensayo se sugieren en espera de un mejor y más cómodo montaje. Por otra parte, estas recomendaciones son el resultado de las observaciones realizadas en el laboratorio, esto teniendo en cuenta que el ensayo nunca había sido llevado al campo experimental. Los resultados y sus correspondientes análisis presentan un precedente teórico para futuras pruebas a partir del ensayo en cuestión.

---

\* Proyecto de grado

\*\* Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas, Escuela de Ingeniería Civil Director: Eduardo Alberto Castañeda Pinzon PhD.

## Abstract

**Title:** Tuning a fatigue test on bituminous binders \*

**Author:** Karla Patricia Cuadros López  
Carlos David Hurtado Martinez \*\*

**Keywords:** Bituminous binding, fatigue, rigidity

This article presents the first experimental assembly of the "FATIGUE TEST ON BITUMINOUS BINDERS" devised by Galvis and Vega. The assembly was carried out at the Álvaro Beltrán Pinzón Laboratory of the Industrial University of Santander, and its methodology consists of undergoing a dynamic bending, prismatic asphalt tests with the objective of determining the behavior against fatigue of the material. This procedure allows evaluating the performance of the material by means of the analysis of the force required to generate a constant deformation throughout the test, which translates into a decrease in its rigidity until fatigue failure occurs. This research work presents the methodology of the procedure in the laboratory, following the results of the analysis, the results and analysis of the results obtained, the advantages and disadvantages of the proposed procedure, the main recommendations and the results of the experimental examination. The recommendations made to the trial are more interesting than waiting. On the other hand, these recommendations are the result of the observations made in the laboratory, this taking into account that the trial was never taken to the experimental field. The results and their analysis are shown in a theoretical precedent for future tests of the test in question.

.

---

\* Project of grade

\*\* Faculty of Physical and Mechanical Engineering, School of Civil Engineering Director: Eduardo Alberto Castañeda Pinzon PhD.

## Introducción

La investigación y el desarrollo de las fracciones pesadas del petróleo y en particular de los asfaltos o ligantes bituminosos han recibido enorme atención en los últimos años. Los retos que se plantean para estos materiales tienen que ver principalmente con las nuevas exigencias que la tecnología demanda a las vías, debido a que los vehículos de transporte de carga y pasajeros son cada vez más pesados y numerosos (Adriana, 2000). La fisuración por fatiga de las capas de mezclas asfálticas es uno de los mecanismos de deterioro más frecuentes en los pavimentos flexibles. El fenómeno de fatiga en ingeniería está asociado al deterioro que se produce en un material como consecuencia de la aplicación de cargas repetidas con una magnitud inferior a la resistencia máxima que puede soportar el material (Pérez Jiménez, Valdés, Botella, Miró, & Martínez, 2011). Esto ha llevado a que exista un número apreciable de ensayos que buscan caracterizar las mezclas bituminosas frente a la fatiga, encontrándose con dificultades debido a su composición compleja; no obstante, estas dificultades no han sido impedimento para que existan procedimientos cuya función es dar un rango de conocimiento más amplio en lo que conlleva a la caracterización de la mezcla, sin embargo, aún no existe un ensayo que evalúe el desempeño exclusivamente del bitumen, tarea de mayor o igual complejidad si se tiene en cuenta la característica principal del asfalto de ser un material viscoelástico, susceptible a la temperatura y con características reológicas complejas. Por otra parte, considerando que la mayoría de veces las grietas en las mezclas bituminosas ocurren dentro del aglutinante, es fácil deducir que las propiedades del betún podrían dar información

precisa sobre el comportamiento y el desempeño de las mezclas frente a la fatiga (Chailleux, Bodin, de la Roche , Leguern, & Vignard , 2009).

Vega y Galvis en su trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Civil, idearon un ensayo de fatiga sobre ligantes bituminosos, ensayo que avanzó en su implementación teórica, quedando aun por realizar la puesta a punto en el laboratorio y el posterior análisis de resultados. Este trabajo de grado muestra el protocolo experimental seguido para la preparación de las muestras, montaje, desarrollo del ensayo, resultados obtenidos y el análisis de los mismos. De igual manera por tratarse de la primera vez que es llevado el ensayo al laboratorio se realizan sugerencias y modificaciones tanto teóricas como de montaje, en busca de un mejor y más fácil procedimiento de ensayo.

## **1. Marco Teórico**

### **1.1 Fatiga**

La fatiga es un fenómeno que se asocia con la disminución de la resistencia mecánica de un material en el tiempo cuando se le aplican esfuerzos dinámicos repetitivos que en promedio son inferiores al valor que causaría su falla instantánea. (Silvia & Siul., 2006).

## 1.2 Fatiga en materiales asfálticos

Los asfaltos son aquellas sustancias de color oscuro que pueden ser líquidas, semisólidas, o sólidas, compuestas esencialmente de hidrocarburos, procedente de yacimientos naturales u obtenidos como residuo del tratamiento de determinados crudos del petróleo por destilación o extracción cuyas cualidades aglutinantes y propiedades físicas y químicas los hacen óptimas para un gran número de aplicaciones (Rafael, José, Luis, & Alejandro., 2012).

El asfalto es un material visco elástico que presenta susceptibilidad a la temperatura y a la frecuencia de aplicación de carga, siendo estas las principales generadoras de la degradación de la rigidez del material (Rafael, José, Luis, & Alejandro., 2012).

Otros parámetros que influyen en gran medida sobre el desempeño frente a la fatiga del ligante asfáltico es su composición química, su compacidad y su naturaleza, teniendo en cuenta que estas pueden variar en gran medida de un yacimiento a otro, así estos se encuentren físicamente cercanos (Lizcano., 2009).

## 1.3 Fenómeno de fatiga sobre la estructura del pavimento bituminoso

Las solicitaciones producidas por las repetidas cargas del paso de los vehículos y las condiciones ambientales van dando lugar a un deterioro continuo de las capas bituminosas que se emplean en la estructura del firme degenerando sus propiedades mecánicas, lo que lleva consigo una pérdida estructural y funcional de las carreteras (Valdés Vidal, 2011).

Estos fallos se inician mediante micro-fisuras en el material, y a medida que progresan, la estructura se debilita, permitiendo la infiltración del agua, lo que conlleva a sufrir severos daños

estructurales en el firme y serias consecuencias económicas para los organismos encargados de la construcción y gestión de las carreteras (Valdés Vidal, 2011).

En un análisis descriptivo, Baaj y Di Benedetto (2005), señalan que el proceso de degradación de fatiga de una mezcla, se puede establecer en tres etapas o fases, figura 1. La fase I, también llamada fase de adaptación, se caracteriza por el inicio de la micro-fisuración, produciéndose un descenso rápido del módulo dinámico. La fase II, llamada también fase de fatiga, se caracteriza por el rol más preponderante que toma el deterioro por fatiga en la evolución del daño de la mezcla, apareciendo en esta las macro-fisuras producto de la unión de las micro-fisuras generadas en la fase anterior. Finalmente se encuentra la fase III, o fase de ruptura, en la cual las macro-fisuras progresan rápidamente hasta el fallo total de la mezcla (Pérez Jiménez, Valdés, Botella, Miró, & Martínez, 2011).

Un análisis similar del comportamiento a fatiga en las mezclas bituminosas realizado por Baaj y Di Benedetto (2005) es descrito por (Chailleux, Bodin, de la Roche, Leguern, & Vignard, 2009) realizado en materiales bituminosos (Figura 2), en donde se observan tres fases, una disminución rápida de la rigidez (fase 1), seguida de un proceso de daño lento (fase 2). Al final del proceso de fatiga, una disminución drástica y pronunciada de los esfuerzos se debe a la falla de la muestra (fase 3). En general, se supone que la fase 2 corresponde a la aparición de micro fisuras, mientras que la fase 3 está vinculada a la propagación de macro fisuras. El significado físico de la fase 1 todavía está bajo discusión. Podría atribuirse en parte al autocalentamiento del material o al comportamiento tixotrópico.

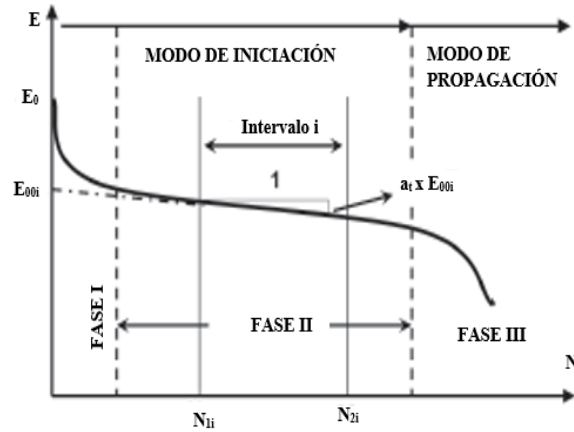


Figura 1. Fases de degradación por el fenómeno de fatiga en mezclas asfálticas.

Fuente: Evaluación del proceso de fatiga de mezclas asfálticas mediante un nuevo procedimiento cíclico de barrido de deformaciones-EBADE. Pérez Jiménez, Valdés, Botella, Miró, & Martínez. 2011

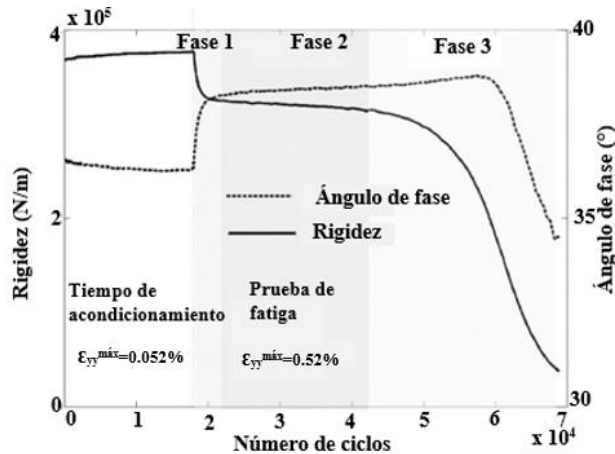


Figura 2. Fases de degradación por el fenómeno de fatiga en ligantes bituminosos

Fuente: Fatigue behaviour of bitumen in tensión-compression loading mode: Rheological analysis and comparison with mix fatigue. Chailleux, Bodin, de la Roche, Leguern, & Vignard. 2009

La determinación de la ley de fatiga de una mezcla bituminosa es una cuestión compleja que requiere arduo trabajo de laboratorio, calibraciones y posteriores modelos in situ. Por ello se suele

recurrir a los estudios genéricos realizados por laboratorios nacionales o por organizaciones con grandes recursos (González Rodríguez & Velandia Argüello, 2006).

**1.4 Ensayos de fatiga en ligantes bituminosos.**

Los ensayos experimentales para determinar la fatiga se pueden realizar de diferentes modos, uno de ellos es a esfuerzo controlado (Figura 3), el cual consiste en someter una probeta a ciclos de carga con amplitud de esfuerzo constante. Otro modo de determinar las leyes de fatiga es por deformación controlada (Figura 4), la cual consiste en someter la muestra a ciclos de carga con deformación constante (González Rodríguez & Velandia Argüello, 2006).

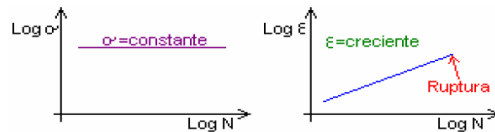


Figura 3. Curva de Whöler por esfuerzo controlado

Fuente: Concepción de un ensayo de fatiga sobre ligantes bituminosos. Galvis y Vega. 2016

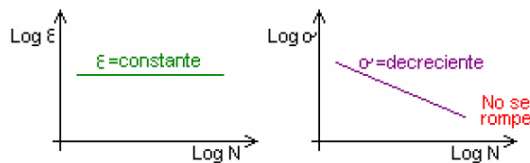
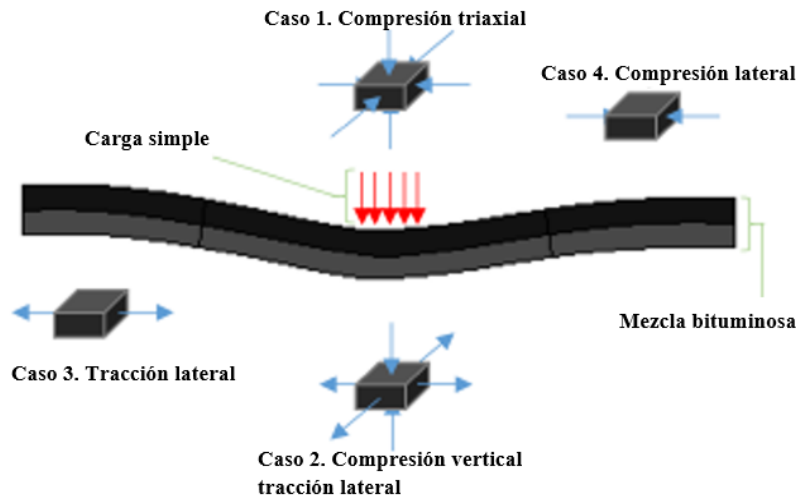


Figura 4. Curva de Whöler por deformación controlada

Fuente: Concepción de un ensayo de fatiga sobre ligantes bituminosos. Galvis y Vega. 2016

Un ensayo ideal sería aquel que fuera capaz de inducir un estado tensional similar al que se produce en la realidad; Kerkhoven y Dormon (1953) esquematizan en la figura 5 el estado de

tensiones provocado por una carga simple en la estructura de un pavimento (González Rodríguez & Velandia Argüello, 2006).



*Figura 5.* Estado tensional de un pavimento bajo carga simple.

Fuente: Concepción de un ensayo de fatiga sobre ligantes bituminosos. Galvis y Vega. 2016.

Roque, Buttlar, (1994) afirman que el comportamiento de las mezclas bituminosas es no-lineal, inelástico y depende del tiempo, también generalmente se acepta un análisis multicapa elástico lineal que proporciona datos razonables de la respuesta del firme a temperaturas inferiores a los 25 °C (González Rodríguez & Velandia Argüello, 2006).

A continuación, se realizará un análisis de los métodos más conocidos para el estudio de la fatiga en la falla de la estructura de los pavimentos. La siguiente figura muestra diferentes métodos desarrollados:

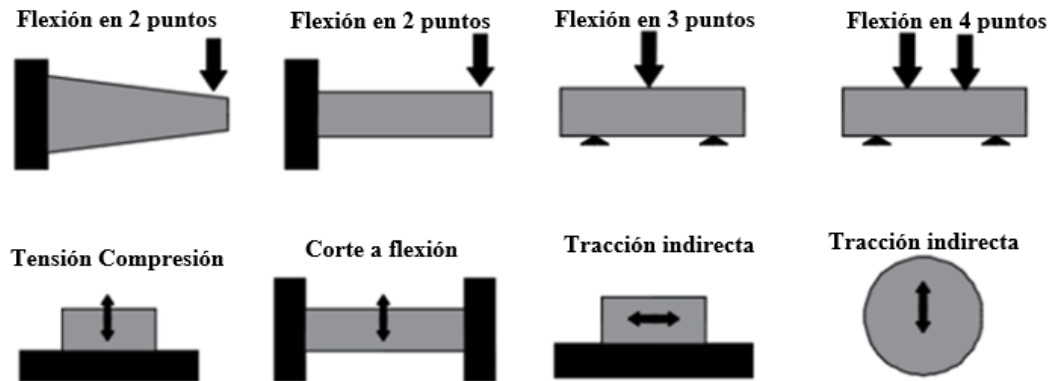


Figura 6. Diferentes pruebas de laboratorio para caracterizar la fatiga.

Fuente: Concepción de un ensayo de fatiga sobre ligantes bituminosos. Galvis y Vega. 2016

En este contexto, los ensayos de flexotracción a deformación o desplazamiento constante, que son los normalmente recomendados en las normas de ensayo para la determinación de esta propiedad de la mezcla, presentan el inconveniente de proporcionar resultados erróneos cuando se ensayan mezclas muy flexibles, ya sea, fabricadas con un alto contenido de ligante asfáltico, o bien, con ligantes modificados. Estas mezclas, en un ensayo de fatiga a flexotracción, van perdiendo carga, llegando hasta un 50% de su carga inicial, que es considerada como el límite de fallo por fatiga, pero dada su flexibilidad, están muy lejos de su fisuración por fatiga, y puede ocurrir que solo se haya producido un reacondicionamiento y readaptación de los materiales dentro de la mezcla (Pérez Jiménez, Valdés, Botella, Miró, & Martínez, 2011).

Existen diferentes ensayos de laboratorio para realizar su evaluación en la mezcla asfáltica, sin embargo, dichos ensayos consumen muchos recursos (tiempo y costo). Por este motivo, en los últimos años se han tratado de desarrollar ensayos que permitan predecir el comportamiento de la mezcla asfáltica a partir de la evaluación del ligante asfáltico (Ayala del Toro, Garnica Anguas, & Delgado Alamilla, 2016).

Muchos investigadores creen que la fatiga es un problema de la estructura del pavimento, mientras que otros creen que es un problema de la mezcla asfáltica. Sin embargo, es reconocido entre ambos grupos que la grieta por fatiga comienza y se propaga en el asfalto; por lo tanto, su estudio debe tomarse en cuenta desde el ligante asfáltico (Ayala del Toro, Garnica Anguas, & Delgado Alamilla, 2016).

### **1.5 Descripción del ensayo de fatiga sobre ligantes bituminosos ideado por Galvis y Vega.**

El procedimiento de fatiga ideado por Galvis y Vega busca generar una nueva alternativa de ensayo de flexión por deformación controlada. El nuevo ensayo plantea una probeta con extremos doblemente empotrados y que obligan a una geometría variable del elemento para que los esfuerzos y las máximas deformaciones no sucedan en el apoyo o sitio de empalme con el porta muestras.

Con el apoyo de la herramienta computacional ANSYS software, se han determinado las dimensiones para las cuales las deformaciones unitarias son máximas en las zonas de acumulación de esfuerzos.

En la figura 7 se observan los resultados del modelamiento de las deformaciones unitarias que presenta una probeta con las dimensiones finales, se evidencia que la zona en donde se presentan las máximas deformaciones unitarias son las de reducción de área, con lo cual se predispone e induce la falla en este lugar.

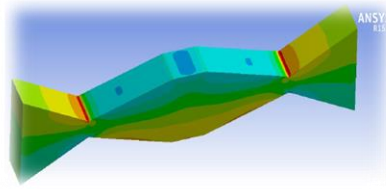


Figura 7. Modelado de deformaciones unitaria.

Fuente: Concepción de un ensayo de fatiga sobre ligantes bituminosos. Galvis y Vega. 2016.

Las dimensiones finales establecidas para la probeta del ensayo se encuentran en la tabla 1:

Tabla 1.

*Dimensiones finales establecidas para la probeta*

<b>Largo de la probeta</b>	<b>100 mm</b>
<b>Ancho de la probeta</b>	10 mm
<b>Altura en los extremos</b>	26 mm
<b>Altura en el punto medio</b>	20 mm
<b>Altura en la zona de falla</b>	5 mm

Fuente: Concepción de un ensayo de fatiga sobre ligantes bituminosos. Galvis y Vega. 2016.

De acuerdo a lo planeado teóricamente por los creadores del ensayo, se puede considerar la teoría elástica de los materiales, siempre que el mismo se realice a temperaturas inferiores a los 25 °C. De esta manera podemos calcular el módulo de elasticidad del material con la ecuación 1:

$$E = (1704 + 487 * \vartheta) * \left(\frac{F}{\Delta}\right) \tag{1}$$

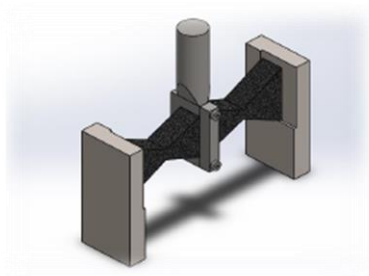
Esta ecuación permite obtener el módulo de elasticidad (E), con un coeficiente de Poisson ( $\nu$ ) a causa de la aplicación de una fuerza (F) y una deformación ( $\Delta$ ).

Haciendo uso de la ecuación 2 se puede calcular el valor de la deformación unitaria en función de la relación de Poisson ( $\nu$ ) y la deformación o desplazamiento dinámico impuesto en el ensayo ( $\Delta$ ).

$$\epsilon = (20.321 + 10.42 * \vartheta) * \Delta \tag{2}$$

El ensayo que se propone mantendría constante la sollicitación en deformación del material y se estudia la evolución de la rigidez del material con el número de ciclos de carga.

Por otra parte, los creadores del ensayo han ideado un porta muestras que está configurado de acuerdo a las dimensiones máximas de la cámara de ensayo, para lo cual se ideó el siguiente modelo:



*Figura 8.* Modelo virtual del porta muestras utilizado para el ensayo

Fuente: Concepción de un ensayo de fatiga sobre ligantes bituminosos. Galvis y Vega. 2016.

Una vez conocido la teoría y el procedimiento bajo el cual fue concebido el ensayo se procede a dar a conocer el protocolo de ensayo seguido en el laboratorio.

## 2. Montaje de la prueba

El montaje se realizó de acuerdo a lo planteado en el texto “Norma para un ensayo de fatiga sobre ligantes bituminosos”, procedimiento propuesto por Galvis y Vega que se encuentra como Anexo A.

Se fabricaron moldes en caucho silicona de acuerdo a las dimensiones establecidas por los autores de ensayo, dando como resultado lo mostrado en la figura 9.



*Figura 9.* Proceso de fabricación de los moldes en Caucho Silicona

Una vez fabricados los molde se procedía a calentar el asfalto para realizar la construcción de las probetas que se van a ensayar.



*Figura 10.* Proceso constructivo de los Especímenes.

La programación de la maquina DMA Metravib se muestra en el Anexo B, en este documento se indica el procedimiento paso a paso que se debe seguir en el software para iniciar el ensayo.

Una vez ha sido programada la máquina se procede a montar el porta muestras y la probeta objeto del ensayo, tal como se indica en la Figura 11.



*Figura 11.* Montaje del porta muestras y el espécimen

### 3. Validación y mejoramiento del ensayo de fatiga sobre ligantes bituminosos

Se realizaron pruebas con el ensayo ideado por Galvis & Vega con los siguientes objetivos:

- Ejecutar por primera vez el ensayo de fatiga ideado por Galvis y Vega sobre una muestra de asfalto producido en Refinería.
- Observar la facilidad en la ejecución del ensayo.
- Verificar la repetibilidad de los resultados.
- Comparar resultados de la prueba con ensayos similares.
- Diseñar adecuaciones y mejoras al ensayo.

A continuación, se describen los estudios y trabajos desarrollados.

#### 3.1 Ejecución completa de la prueba de fatiga

El comportamiento a fatiga tras aplicar el procedimiento del ensayo se ha analizado en cinco probetas de asfalto 60/70 y tres probetas de asfalto modificado de origen ruso suministrado por el laboratorio, con las condiciones mostradas en la tabla 2 y 3.

Tres de las probetas de asfalto 60/70 fueron probadas bajo las mismas condiciones, las dos probetas restantes se ensayaron con las mismas condiciones de ciclos de carga y frecuencia, pero con una variación en la deformación unitaria del 30%; una variación del 30% en aumento y descenso respectivamente.

Las dos primeras pruebas con asfalto modificado se realizaron con el mismo número de ciclos de carga, frecuencia y con una variación en la deformación unitaria; una de ellas con un 30% más de la deformación unitaria inicial aplicada. La tercera probeta de asfalto modificado se ejecutó a 90000 ciclos de carga en dos intervalos, el primero a 30000 ciclos y el segundo a 60000 ciclos, con un descanso entre intervalos de 2 minutos y con las mismas condiciones de la primera probeta.

Las probetas se ensayaron a una temperatura alrededor de los 23 °C, teniendo presente que esta no podría superar los 25 °C.

Tabla 2.

*Condiciones de las probetas de asfalto 60/70 a ensayar*

<b>Probeta</b>	<b>Deformación unitaria</b>	<b>Frecuencia [Hz]</b>	<b>Ciclos de carga</b>
<b>1</b>	5.00E-04	10	30000
<b>2</b>	5.00E-04	10	30000
<b>3</b>	5.00E-04	10	30000
<b>4</b>	6.48E-04	10	30000
<b>5</b>	3.54E-04	10	30000

Tabla 3.

*Condiciones de las probetas de asfalto modificado a ensayar*

<b>Probeta</b>	<b>Deformación unitaria</b>	<b>Frecuencia [Hz]</b>	<b>Ciclos de carga</b>
<b>6</b>	5.00E-04	10	50000
<b>7</b>	6.49E-04	10	50000
<b>8</b>	5.01E-04	10	90000

Las deformaciones unitarias de los ensayos fueron calculadas mediante la ecuación 2 de la siguiente manera:

**3.1.1 Cálculo tipo deformación unitaria** Se realiza el cálculo tipo para la probeta No. 1 de asfalto 60/70, con un coeficiente de Poisson ( $\nu$ ) de 0.45 y un desplazamiento dinámico ( $\Delta$ ) de  $3.16E-05$  m que es sugerido por los autores del ensayo para realizar la prueba.

$$\epsilon = (20.321 + 10.42 * \nu) * \Delta$$

$$\epsilon = (20.321 + 10.42 * 0.45) * 3.16 * 10^{-5}$$

$$\epsilon = 5.00 * 10^{-4}$$

Una vez se han calculado las condiciones de entrada del ensayo, se procede a realizar el montaje de la prueba y la programación de la Metravib DMA+1000. Los resultados entregados por la máquina luego de terminado el ensayo son el número de ciclos de carga, el desplazamiento dinámico y la fuerza dinámica necesaria para imponer la deformación unitaria, como se muestra a continuación:

Tabla 4.

*Resultados entregados por la Metravib DMA+1000*

Cycles	dyn D [m]	dyn F [N]
1	3.01E-05	0.265
7	3.03E-05	0.267
13	3.09E-05	0.272
19	3.13E-05	0.274
25	3.11E-05	0.273
31	3.14E-05	0.275
37	3.15E-05	0.275

Los resultados totales para cada ciclo que son requeridos en el informe del Ensayo de Fatiga Sobre Ligantes Bituminosos se encuentran como Anexo C, en dónde el módulo de rigidez fue calculado para cada ciclo de carga con la ecuación 1, de la siguiente manera:

**3.1.2 Cálculo tipo del módulo de rigidez** Se realiza el cálculo tipo para la probeta No. 1 de asfalto 60/70, con un coeficiente de Poisson ( $\nu$ ) de 0.45, un desplazamiento dinámico ( $\Delta$ ) de  $3.16E-05$  m que es sugerido por los autores del ensayo para realizar la prueba y una fuerza dinámica para el primer ciclo de carga de 0.265 N.

$$E = (1704 + 487 * \nu) * \left(\frac{F}{\Delta}\right)$$

$$E = (1704 + 487 * 0.45) * \left(\frac{0.265}{3.16 * 10^{-5}}\right)$$

$$E = 1.69 * 10^7 \text{ Pa}$$

Luego de calculado el módulo de rigidez para ciclo de carga, se construye una gráfica de Módulo de rigidez vs. Ciclos de carga, como se observa en la figura 12.

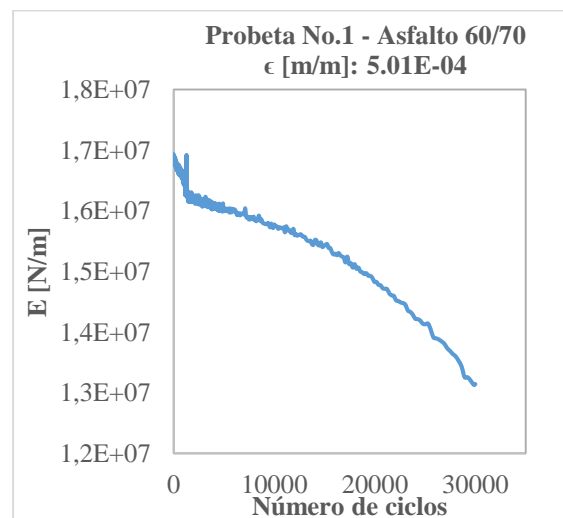


Figura 12. Gráfica de módulo de rigidez vs ciclos de carga

Galvis & Vega sugieren que se realice un ajuste en la curva “Rigidez vs número de ciclos” de características exponenciales, tal ajuste no fue posible realizarlo debido a que el material no presentó este comportamiento durante el ensayo. Se intentó ajustar la curva presentada en los resultados a un comportamiento sigmoideal, pero no fue posible ya que el material durante la ejecución del ensayo no alcanzó la fase III descrita por Baaj y Di Benedetto (2005) y Chailleux et al. (2009) pues alcanzados los 30000 ciclos no presentaba micro fisuras sino una deformación plástica causada por la temperatura.

### **3.2 Facilidad en la ejecución del ensayo**

Con base en las observaciones realizadas durante el procedimiento teórico- práctico del ensayo propuesto por Galvis y Vega se determinaron las siguientes facilidades:

- Permite una fabricación rápida de especímenes para la ejecución del ensayo. Aproximadamente se requiere de sesenta minutos para que la probeta esté lista para ensayar y se permite fabricar varias probetas al tiempo según el número de moldes que se tenga.
- No requiere gran cantidad de material para la fabricación de las probetas, se requieren aproximadamente 100 ml de asfalto para cada una.
- Permite una realización del montaje y programación de la Metravib DMA+1000 de manera rápida y sencilla, este procedimiento puede tardar aproximadamente diez minutos.
- Genera pérdida de rigidez en el material a medida que se aplican los ciclos de carga, principal objetivo de un ensayo de fatiga.
- Permite la obtención de resultados directamente del software de la máquina.

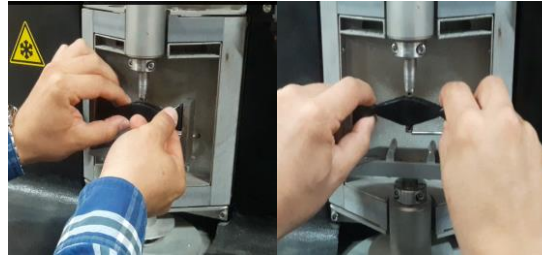
Durante el ensayo se montaron pruebas con materiales dúctiles y frágiles. Los materiales dúctiles permitieron la ejecución del ensayo, pero al intentar realizar el ensayo con un asfalto mucho más frágil, la probeta se fracturó debido al maltrato y a la manipulación excesiva que sufre al ser instalada en el porta muestras, como se muestra en la figura 13.



*Figura 13.* Probeta de asfaltita fracturada

Aunque el montaje del ensayo se pudo realizar con materiales dúctiles se observó que, debido a la geometría de sección variable de la probeta, sufre una estrangulación en su parte de área reducida que es en donde se induce la falla según lo establecido teóricamente. Esta tortura generada en el punto de falla previo al inicio del ensayo, conlleva a que el material sufra deformaciones que alteran su comportamiento durante la ejecución.

Otro de los factores que genera tortura en el material en momentos previos al ensayo es la configuración del porta muestras, la cual requiere que el material sufra un exceso de fuerza para un correcto ajuste horizontal y vertical con las placas laterales de empotramiento. La figura 14 muestra el procedimiento de manipulación para realizar el montaje.



*Figura 14.* Manipulación excesiva al introducir la probeta en el porta muestras

Otro de los inconvenientes presentados al ensayar materiales dúctiles es que alrededor de pasados 25000 ciclos a temperatura ambiente, se puede observar que la probeta sufre una deformación plástica (figura 15), lo cual deja incógnitas frente al comportamiento del material si es ensayado a una mayor cantidad de ciclos, dudas que deberán ser despejadas en posteriores estudios. Este comportamiento puede originarse por el acomodamiento de las partículas debido a una alta temperatura de ensayo, por lo cual sugerimos que se realicen ensayos con temperaturas entre 10 °C y 15 °C.



*Figura 15.* Deformación plástica de la probeta después de 30000 ciclos de carga

### 3.3 Verificación de la repetibilidad de los resultados

En las figuras 16 y 17, se observan los resultados obtenidos en el ensayo de fatiga de las probetas con asfalto 60/70, que fueron probadas bajo las mismas condiciones de ciclos de carga, frecuencia y deformación unitaria. En estas figuras se han representado la evolución del módulo de elasticidad calculado con la ecuación 1 propuesta en el ensayo de fatiga frente a los ciclos de carga aplicados y el porcentaje de disminución de rigidez con respecto a la rigidez máxima evaluado cada 5000 ciclos, respectivamente.

Una vez se superponen los resultados de las tres probetas se observa una tendencia similar en el comportamiento del material y cuando se presenta la disminución de la rigidez en porcentaje evaluada cada 5000 ciclos es evidente que estos porcentajes de reducción de las tres probetas frente al número de ciclos aplicado son similares.

De esta manera es posible demostrar que cuando el material se somete a las mismas condiciones de ensayo se observa repetitividad en los resultados, característica fundamental en el proceso de puesta a punto de un nuevo ensayo o prueba de laboratorio.

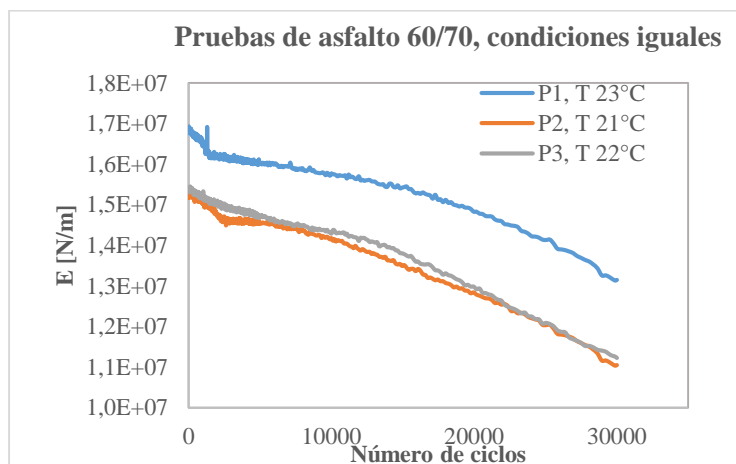


Figura 16. Curvas de fatiga probetas de asfalto 60/70 a iguales condiciones

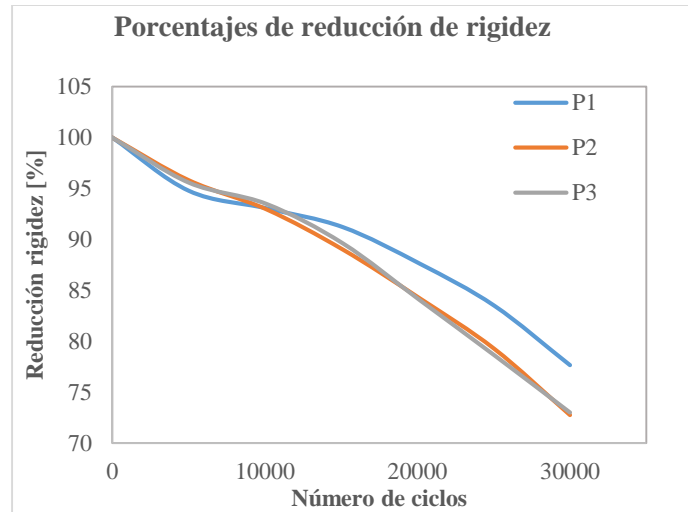


Figura 17. Reducción de rigidez en las probetas de asfalto 60/70 a iguales condiciones

### 3.4 Análisis de resultados y comparación con ensayos similares

El fenómeno de fatiga es una de las principales causas del daño de las mezclas bituminosas, de ahí la importancia de su estudio. Múltiples autores han definido su comportamiento y han evaluado su proceso mediante la ejecución de ensayos de laboratorio con la aplicación de tensiones, deformaciones o desplazamientos controlados en forma cíclica, sin embargo, se ha estudiado menos el betún como causa de dicho proceso (Reyes Ortiz & Pérez Jiménez, 2009).

**3.4.1 Asfalto 60/70** En las figuras 18 y 19 se presentan la curva de fatiga y los porcentajes de reducción de rigidez de la probeta de asfalto 60/70 ensayada a una deformación aumentada a 30% de la inicial, en donde se evidencia un comportamiento a fatiga del material y una disminución superior a las obtenidas anteriormente, resultado que teóricamente se esperaba debido a que la deformación unitaria que se le impuso fue mayor. El material, alcanzados los 30000 ciclos tuvo una reducción de su rigidez inicial al 56%.

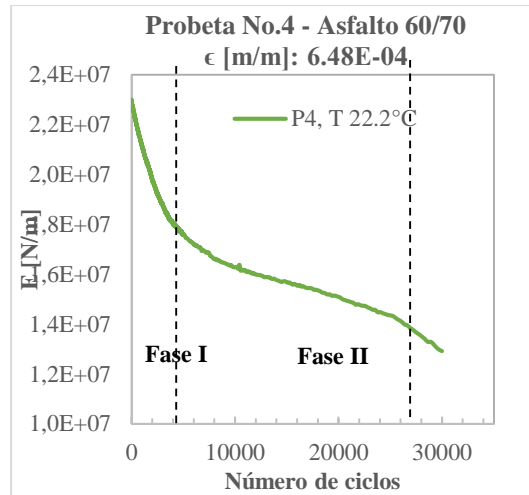


Figura 18. Curva de fatiga prueba No.4

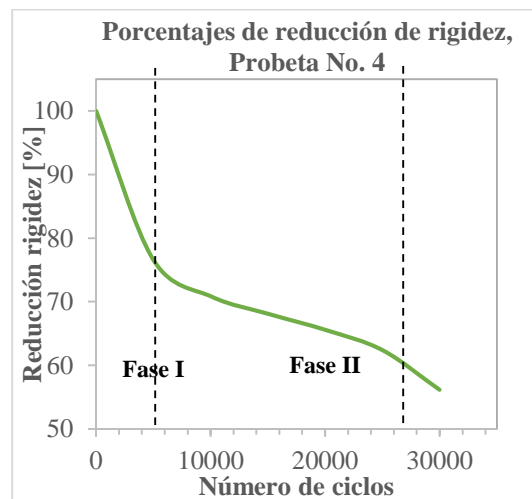


Figura 19. Porcentajes de disminución de rigidez prueba No. 4

La siguiente probeta con asfalto 60/70 se realizó con una deformación unitaria disminuida 30% de la deformación inicial. El ensayo, aunque presenta un comportamiento que va de acuerdo con la teoría de fatiga en los materiales bituminosos no es coherente con los ensayos realizados anteriormente, pues era de esperarse que al imponer una deformación unitaria menor la disminución de su rigidez fuera menor y según los resultados de las figuras 20 y 21 su porcentaje de disminución de rigidez alcanzó el 44% respecto al valor inicial; comportamiento que podría ser

posible por variaciones en la temperatura del ensayo, imperfecciones en el montaje de la probeta, ya sea por una mala adherencia al porta muestras o por falta de horizontalidad y verticalidad en la probeta. Otra posible causa de este resultado y la que se considera más probable es por una manipulación excesiva en el material que genera deterioro en la probeta al instalarla en el porta muestras.

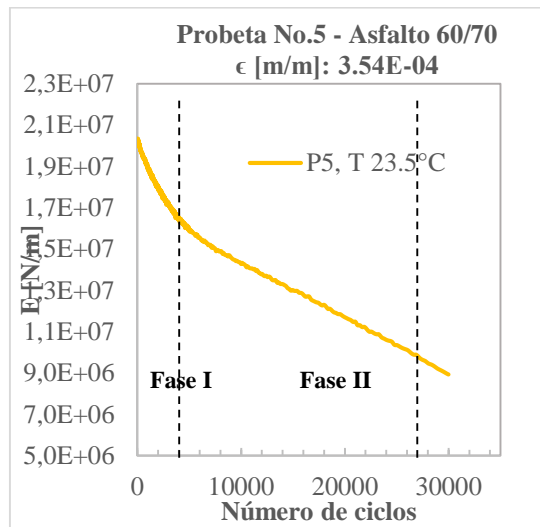


Figura 20. Curva de fatiga probeta No.5

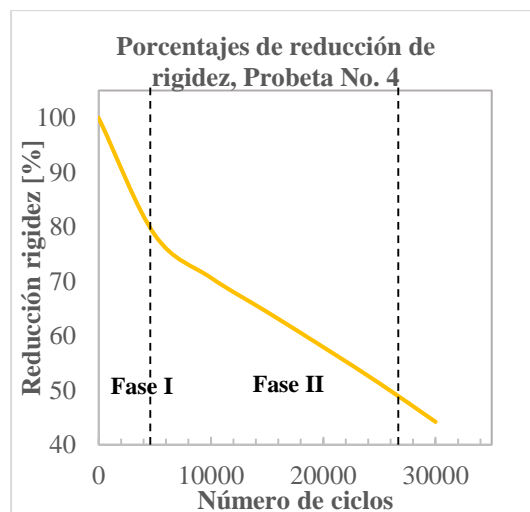


Figura 21. Porcentajes de disminución de rigidez prueba No. 5

La observación y el análisis del comportamiento del material muestra una pérdida de rigidez a medida que los ciclos de carga aumentan, comportamiento similar a los análisis descritos por Baaj y Di Benedetto (2005) y Chailleux et al. (2009), en donde se evidencia que el material en el proceso de degradación de los materiales bituminosos alcanza en 8000 ciclos la fase I y la fase II en 30.000 ciclos en las dos probetas el material disminuye alrededor del 60% de su rigidez inicial, evidencia clara de que el ensayo está cumpliendo con su objetivo principal que es generar fatiga en el betún.

**3.4.2 Asfalto modificado** Los resultados con las probetas de asfalto modificado se presentan a continuación. Para el análisis de éstos se han establecido tres fases de acuerdo a lo observado gráficamente, la fase I corresponde a un proceso de pérdida de rigidez inicial, en la fase II se presenta un endurecimiento del material al llegar de nuevo a su rigidez inicial y, por último, la fase III en dónde se inicia el proceso de degradación de rigidez final.

En la figura 22 que corresponde a la curva de fatiga de la probeta No.6 se evidencia un comportamiento en el material que se puede dividir en las tres fases mencionadas. En la primera fase se presenta una pérdida de su rigidez inicial del 1% durante los primeros 5000 ciclos, en la segunda fase se evidencia que el material transcurridos 10000 ciclos llega nuevamente a su rigidez inicial y en la tercera fase se inicia el proceso de degradación de rigidez final del material alcanzando un 97% de su rigidez inicial terminados los 50000 ciclos de aplicación de carga. Este comportamiento en el betún puede ser generado por el tipo de polímero utilizado en el proceso de modificación del asfalto.

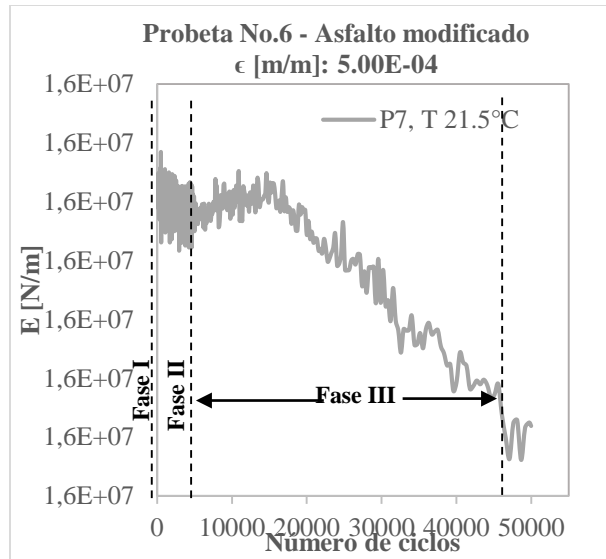


Figura 22. Curva de fatiga probeta No.6

La siguiente probeta ensayada con asfalto modificado a una deformación unitaria aumentada al 30% de la deformación inicial, inicia su evolución en la rigidez en lo que se ha denominado la segunda fase, que corresponde al proceso de endurecimiento para su posterior degradación de la rigidez en la fase tres. El material durante los primeros 40000 ciclos presenta un aumento en su rigidez de aproximadamente el 15% y en los últimos 10000 ciclos presenta una disminución en la rigidez del 1%, como se muestra en la figura 23.

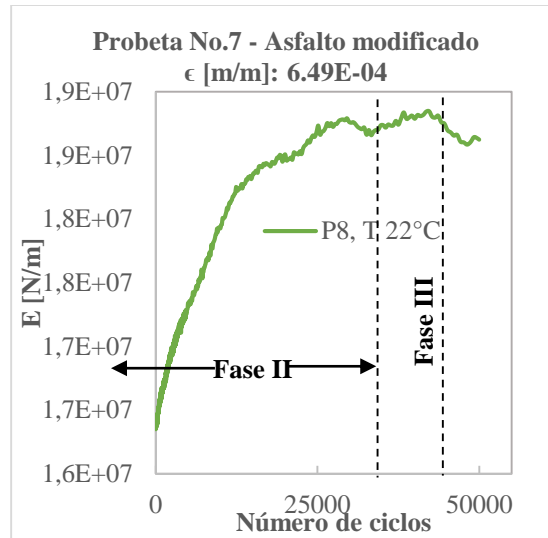


Figura 23. Curva de fatiga probeta No.7

Para terminar las pruebas con el asfalto modificado, se ensayó el betún con dos intervalos de aplicación de carga, el primero de ellos a 30000 ciclos con un descanso posterior de dos minutos y el intervalo final con una aplicación de carga de 60000 ciclos. En la figura 24 se presentan los resultados obtenidos después de realizar el ensayo, en donde se evidencia en los primeros 30000 ciclos un proceso de endurecimiento del material del 4%, posterior a este hay un descanso del material de dos minutos y se inicia un nuevo período de carga de 60000 ciclos, en el cual los primeros 35000 se muestra nuevamente un endurecimiento del material que corresponde al 4% y después de éstos ciclos se inicia la tercera fase que corresponde al proceso de degradación del material.

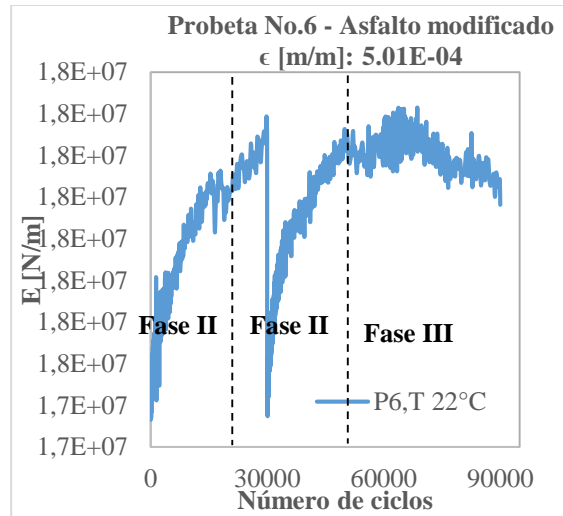


Figura 24. Curva de fatiga probeta No.8

El comportamiento atípico frente a la evolución por fatiga del asfalto modificado en comparación a lo presentado en el asfalto 60/70, puede ser causado por el tipo de aditivo con el cuál se ha modificado el betún. Estos aditivos pueden ser polímeros que sufren un proceso de endurecimiento al momento de ganar energía debido a la fricción interna del material al ser sometido a las sollicitaciones de carga en el ensayo, aunque, no se descartan posibles problemas en la ejecución del ensayo, teniendo en cuenta que, en la primera prueba se presenta el proceso de disminución de la rigidez durante los 50000 ciclos de carga aplicados.

Este y otros comportamientos que resultan extraños se deberán estudiar una vez se hayan hecho las adecuaciones necesarias al Ensayo de Fatiga Sobre Ligantes Bituminosos para un mejor y más exacto funcionamiento en su procedimiento.

**3.5 Diseño de mejoras al ensayo**

De acuerdo a lo observado en el ensayo y a los resultados obtenidos durante su ejecución, se sugieren que se realicen los siguientes cambios al ensayo:

**3.5.1 Geometría de la probeta de ensayo** Se sugiere que en investigaciones posteriores se realice un cambio de geometría en la probeta, manteniendo una sección de área variable, cuidando que la variación no sea tan marcada para que no se genere estrangulación en la probeta y que su zona de falla no se presente en los empotramientos.

Teniendo en cuenta lo anterior, se propone la siguiente geometría para el espécimen (Anexo D):

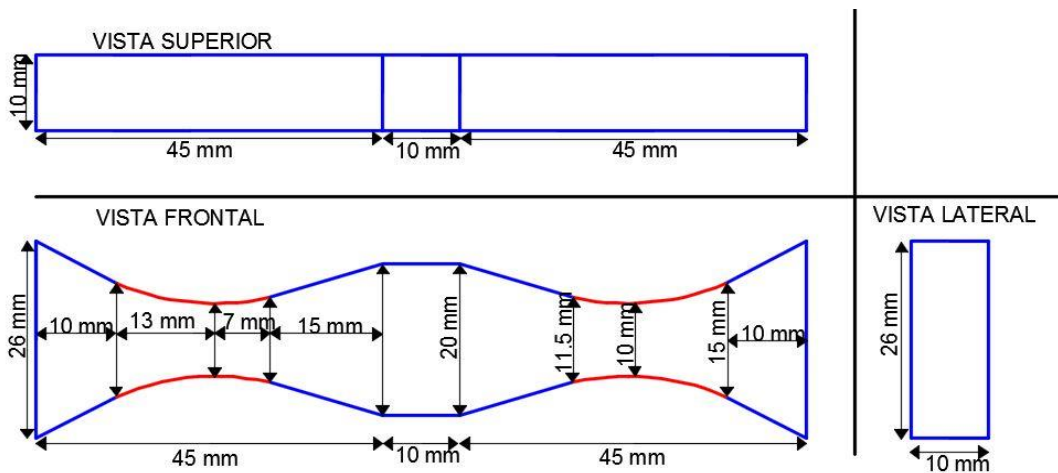


Figura 25. Cambio en la geometría de la probeta

**3.5.2 Modificación del porta muestras** Lo que se sugiere es una modificación en el porta muestras que permita introducir la probeta en su parte central inicialmente y un posterior ajuste de

las placas laterales que evite la manipulación excesiva en ella. De acuerdo a lo anterior la configuración propuesta para el porta muestras es la siguiente (Anexo E):

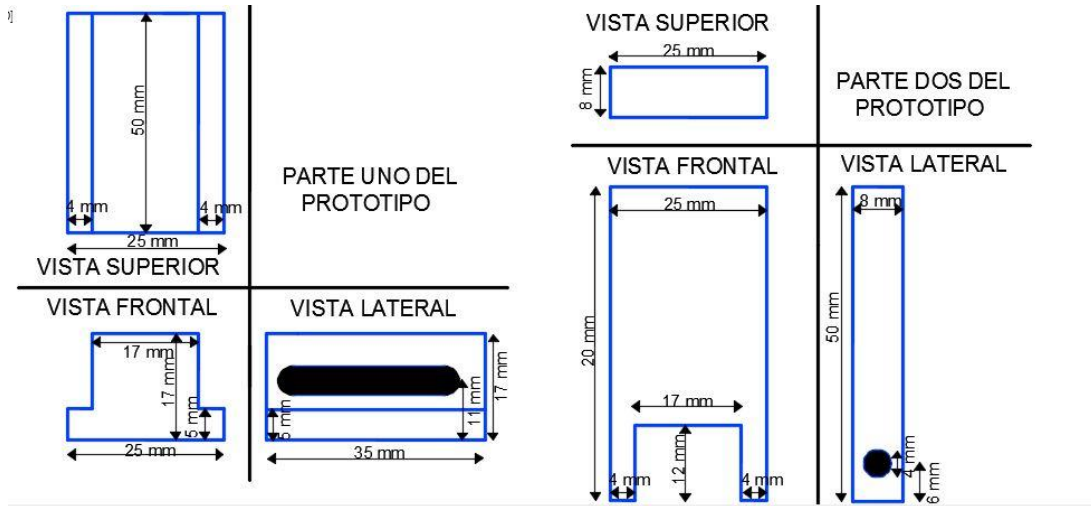


Figura 26. Modificación del porta muestras

Se realizó un prototipo en madera de cómo quedaría el nuevo porta muestras sugerido y fue montado en la Metravib DMA+1000, como se muestra en la siguiente figura:

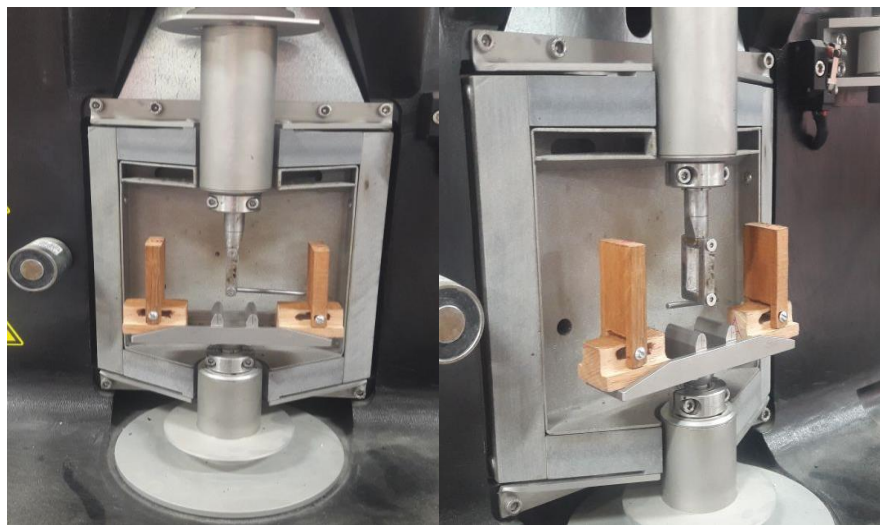


Figura 27. Prototipo en madera del porta muestras sugerido

Una vez realizados los cambios de geometría en la probeta y el porta muestras, se sugiere que se realicen ensayos a:

- Mayores ciclos de carga que expongan el material a una mayor sollicitación por fatiga.
- Esfuerzo constante, ya que a esta condición los ciclos de falla son más definidos, los datos generan menos dispersión y la vida frente a la fatiga generalmente es más corta, lo que da otro punto de vista del comportamiento del material frente al ensayo de fatiga ideado por Galvis y Vega.
- Temperatura controlada, para evitar un fallo en el material debido a ésta y no a los ciclos de carga. Se sugieren temperaturas cercanas a los 5°C.

Además, se sugiere que una vez afinado el ensayo se estudie el comportamiento frente a la fatiga de materiales asfálticos dúctiles, frágiles y modificados.

#### **4. Conclusiones**

- Se realizó el primer montaje experimental del Ensayo de Fatiga Sobre Ligantes Bituminosos ideado por Galvis & Vega.
- El ensayo presenta facilidades en el proceso de montaje, preparación de los especímenes, obtención y análisis de resultados.
- Cómo se evidencia en los resultados obtenidos en las probetas No. 1, 2 y 3 realizados sobre un mismo material con las mismas condiciones de frecuencia, deformación unitaria y ciclos

de carga, el ensayo presenta repetitividad en los resultados, característica fundamental en el proceso de puesta a punto de un nuevo ensayo o prueba de laboratorio.

- Los ensayos de fatiga sobre ligantes bituminosos no suelen hacerse con frecuencia debido al complejo análisis causado por sus características reológicas y a la duración en la ejecución de los mismos, el Ensayo de Fatiga Sobre Ligantes Bituminosos presenta una menor duración para evaluar la respuesta a la fatiga sobre el betún.
- Aunque el ensayo presenta condiciones sencillas en el proceso de montaje, la configuración del porta muestras demanda de una manipulación excesiva sobre el espécimen de asfalto, lo cual genera una tortura previa al ensayo y que se cree es en primera instancia la principal consecuencia de la distorsión de los resultados, tal como se observa en la probeta No. 5, la cual fue sometida a una deformación unitaria menor y presentó mayor fatiga en comparación a las probetas que se les aplicó mayor deformación unitaria.
- Se recomienda una configuración al porta muestras que haga más sencillo el montaje y genere menos tortura sobre el material previo al ensayo, tal como se indicia en la figura 26.
- Un cambio en la geometría de la probeta sería favorable para evitar el punto de estrangulamiento tan marcado sobre ésta al ingresarla en el porta muestras y al ejecutar el ensayo de fatiga, se sugiere una geometría como se indica en la figura 25.
- Debido a la susceptibilidad de los asfaltos convencionales a la temperatura, se hace necesario que el ensayo se realice bajo condiciones ambientales controladas, manteniendo una temperatura entre  $\pm 10^{\circ}\text{C}$  y  $15^{\circ}\text{C}$ .
- Una vez se encuentre afinado por completo el ensayo, se recomiendan realizar estudios al comportamiento de asfaltos dúctiles, frágiles y modificados frente a la fatiga.

- El estudio de los materiales asfálticos debe ser abordado con mayor interés, pues, aunque en la mayoría de casos la falla por fatiga presentada en el pavimento inicia en el ligante bituminoso, son muy pocos los ensayos y la información disponible para evaluar el desempeño del betún.
- El comportamiento del material frente al ensayo evidencia una pérdida de rigidez a medida que transcurren los ciclos de aplicación de carga, lo cual genera motivación y expectativas para continuar el proceso de afinamiento del ensayo y continuar el estudio de los materiales bituminosos frente a la fatiga.
- El resultado obtenido al ejecutar el ensayo de fatiga sobre asfaltos modificados merece atención ya que como se evidencia en las figuras 22, 23 y 24 presenta comportamientos que no son acordes a la teoría de la fatiga debido a los componentes del material con el cuál fue modificado. Este y otros comportamientos que resultan extraños son motivo para que se ejecuten nuevas investigaciones que aborden la complejidad del comportamiento de materiales bituminosos frente a la fatiga.
- Se hace entrega de un manual que indica el procedimiento paso a paso de la programación y montaje del ensayo en la Metravib DMA+1000, que se encuentra como Anexo B.

### Referencias Bibliográficas

- Adriana, M. (2000). *Aseguramiento de la Calidad de Mezclas Bituminosas mediante la Aplicación del Ensayo de Tracción Indirecta en el Control de su Ejecución*. Barcelona, España: Universitat Politècnica de Catalunya.
- Ayala del Toro, Y., Garnica Anguas, P., & Delgado Alamilla, H. (2016). Efecto de la Temperatura en la Evaluación de la Fatiga en Ligantes Asfálticos. *Infraestructura Vial*, 9.
- Chailleux, E., Bodin, D., de la Roche, C., Leguern, M., & Vignard, N. (2009). Fatigue behaviour of bitumen in tension-compression loading mode: Rheological analysis and comparison with mix fatigue. En A. Loizos, I. L. Al-Qadi, M. N. Partl, & T. Scarpas, *Advanced Testing and Characterization of Bituminous Materials* (pág. 11). London: Taylor & Francis Group.
- González Rodríguez, S. V., & Velandia Argüello, S. E. (2006). *Estado del arte en el estudio de la fatiga de materiales bituminosos*. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander.
- Leiva Villacorta, F., Aguiar Moya, J. P., Villegas Villegas, R. E., Salazar Delgado, J., & Loría Salazar, L. G. (2010). *Nano-materiales en el desempeño del Asfalto*. San José, Costa Rica: Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales LanammeUCR, Universidad de Costa Rica.
- Lizcano, F. A. (2009). *Diseño Racional de Pavimentos*. Bogotá: Escuela Colombiana de Ingeniería.
- Pérez Jiménez, F., Valdés, G., Botella, R., Miró, R., & Martínez, A. (2011). Evaluación del proceso de fatiga de mezclas asfálticas mediante un nuevo procedimiento cíclico de barrido de deformaciones - EBADE. *Revista de la Construcción*, 11.
- Rafael, V., José, A., Luis, L., & Alejandro, N. (2012). DE LA CONSISTENCIA AL DESEMPEÑO Nueva tendencia en la compra, control de calidad y diseño de los asfaltos en Latinoamérica. *Asfaltos y pavimentos*, 25(ISSN 0123-8574), 5-11.

Reyes Ortiz, O. J., & Pérez Jiménez, F. E. (2009). *COMPORTAMIENTO A FATIGA DE BETUNES MEDIANTE EL USO DEL DSR*. Barcelona - España: Universidad Politécnica de Cataluña.

Silvia, G., & Siul., V. (2006). *Estado del Arte en el Estudio de la Fátiga de Materiales Bituminosos*. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander.

Valdés Vidal, G. A. (2011). *Evaluación del proceso de fisuración en las mezclas bituminosas mediante el desarrollo de un nuevo ensayo experimental -Ensayo FÉNIX-*. Barcelona-España: Universidad Politécnica de Cataluña.

## Apéndices

## Apéndice A. Norma para un ensayo de fatiga sobre ligantes bituminosos.

## Objeto

1.1 Estudiar la fatiga en ligantes bituminosos y en mezclas asfálticas con agregados finos.

1.2 Las dimensiones del espécimen están dadas, ver **Figura 1**.

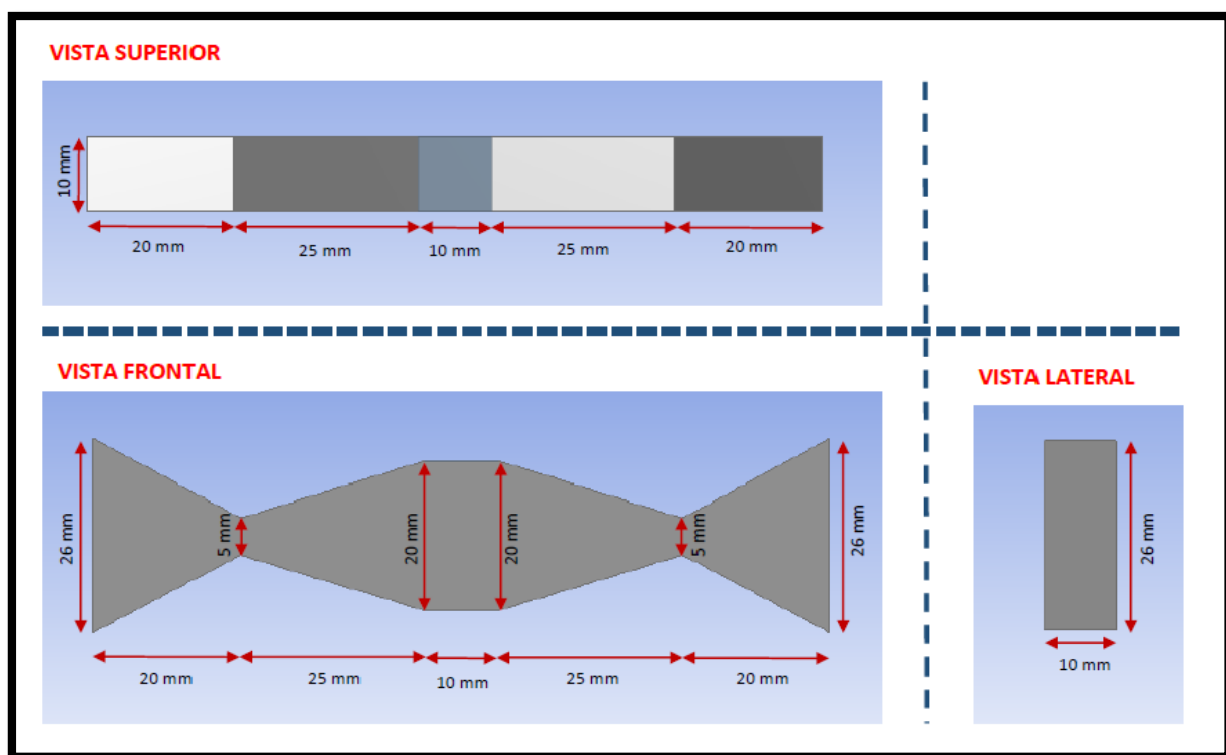


Figura 28. Geometría del espécimen

Fuente: Concepción de un ensayo de fatiga sobre ligantes bituminosos. Galvis y Vega. 2016.

## RESUMEN DEL ENSAYO

Esta norma exhibe los procedimientos para la determinación de la fatiga de muestras de asfaltos o másticos asfálticos, sometidos a flexión dinámica en vigas experimentales.

### EQUIPO.

Descripción del equipo: el equipo está basado en un mecanismo de flexión dinámica, con una cámara de ambientación y un amplio sistema de control para la recolección de **datos**.

Rigidez y frecuencia del equipo: Identificar los rangos de rigidez y frecuencia en los que trabaja el equipo, para no exceder sus límites y obtener resultados acordes a las prestaciones del equipo.

Dispositivo de aplicación de carga: El Sistema de ensayo debe incluir un componente de carga controlado por el computador, el cual se ajusta y aplica una carga tal, que el espécimen experimenta un nivel constante de deformación durante cada ciclo y medición. El dispositivo debe ser capaz de producir cargas repetidas en una frecuencia definida por el usuario, aunque comúnmente se usa una frecuencia de 10[Hz]. Se debe asegurar que el espécimen y el portamuestras están firmemente adheridos con resina en los extremos empotrados y en el actuador de carga, de forma que se permita la aplicación de fuerza alternada de compresión y tracción sobre la probeta.

Cámara ambiental: (opcional) la cámara ambiental debe ser capaz de mantener las condiciones presentadas durante el ensayo, con temperaturas desde -10 °C hasta 40 °C, con una precisión de más o menos 0.1 °C.

Sistema de control y medición: Durante cada ciclo de carga, el sistema debe ser capaz de medir la deflexión del espécimen dada, computar sus deformaciones y ajustar la carga de manera que el espécimen experimente un nivel constante de deformación en cada ciclo de carga.

### Preparación de especímenes de ensayo.

La mezcla empleada para el desarrollo del ensayo puede ser de asfalto puro o una mezcla de asfalto con agregado fino, para la cual el tamaño máximo del agregado no debe exceder de 0.8 [mm], debido a la dimensión de la zona de falla (5 [mm]).

La preparación del número de probetas consiste en la fundición preliminar con el fin de obtener especímenes de asfalto o mezclas asfálticas con agregados finos en la geometría planteada en el ensayo. Para ello, es necesario que previamente se hayan elaborado unos moldes de silicona que permitan un retiro práctico de las probetas sin alterar su forma y sin adherencia a las superficies del mismo. Previamente se calienta el asfalto hasta que tome una consistencia líquida, para luego verterlo sobre los moldes, se deja reposar el material durante 20 minutos y se lleva a la nevera por 20 minutos más. Después de este tiempo es posible retirar los especímenes de los moldes y disponer de ellos para el ensayo, ver **Figura 2**.



**Figura 29.** Especímenes del ensayo

**Fuente:** Concepción de un ensayo de fatiga sobre ligantes bituminosos. Galvis y Vega. 2016.

**Procedimiento.**

Montaje de las piezas y preparación de la máquina para la probeta experimental: para llevar a cabo la prueba, se crea un Proyecto Nuevo en el software del equipo. El objetivo de la prueba es que el informe final devuelva los valores de la fuerza que requiere la máquina para suministrar el desplazamiento constant deseado, para despues calcular los modulos E del material, se procede ajustar las piezas fijas y moviles, se asegura la posición de las piezas de tal manera que la posición sea la indicada para posteriormente acoplar la probeta usando resina. Ver Figura 3.



**Figura 3.** Montaje del ensayo.

**Fuente:** Concepción de un ensayo de fatiga sobre ligantes bituminosos. Galvis y Vega. 2016.

**Condiciones iniciales del ensayo:** Se ingresan las condiciones iniciales deseadas por el usuario, tanto en desplazamiento, frecuencia y ciclos de carga.

**Temperatura de ensayo:** Se coloca el espécimen correspondiente; para un ligante asfáltico o de mástico asfáltico una temperatura entre -10 °C hasta 40 °C, durante el tiempo para finalizar el ensayo.

**Ejecución del ensayo:** Una vez seleccionados los parámetros apropiados del ensayo, se da inicio al mismo. Se activan los componentes de medida, de manera que los resultados del ensayo, en unos intervalos de ciclo de carga seleccionados, sean monitoreados y grabados, asegurando con ello que el sistema de ensayo opera correctamente. Cuando el espécimen experimente una reducción de más del 50% de su rigidez, el ensayo se da por concluido.

### **Cálculos**

Se deben realizar los siguientes cálculos para los intervalos del ciclo de carga especificados en el operador para los especímenes para obtener Módulo E vs Frecuencias.

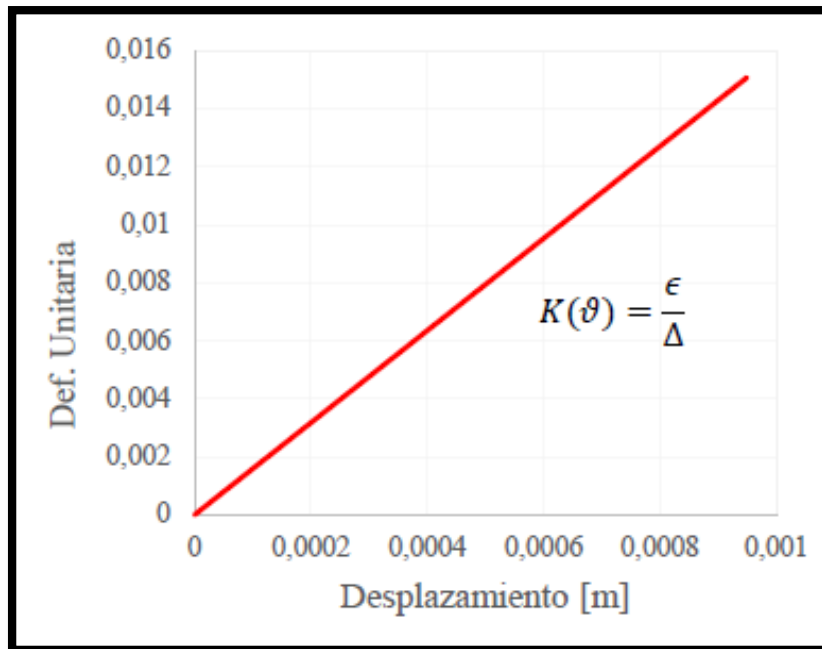
**Deformación unitaria ( $\epsilon$ ):** La ecuación (2) permite controlar la deformación unitaria del ensayo en los especímenes experimental, para cualquier ligante o mástico asfáltico que se quiera probar, en la cual el desplazamiento es calculado despejando  $\Delta$  de la ecuación (2), ver Gráfica 1.

$$\epsilon = (20.321 - 10.42\vartheta) * \Delta \quad (2)$$

Dónde:  $\epsilon$ : Deformación unitaria

$\vartheta$  : Coeficiente de Poisson del material

$\Delta$  : Desplazamiento máximo de la probeta experimental.



Gráfica 1. Deformación unitaria

**Desplazamiento máximo de flexión ( $\Delta$ ):**

$$\Delta = (1704 + 487 * \vartheta) * \left(\frac{F}{E}\right) \quad (3)$$

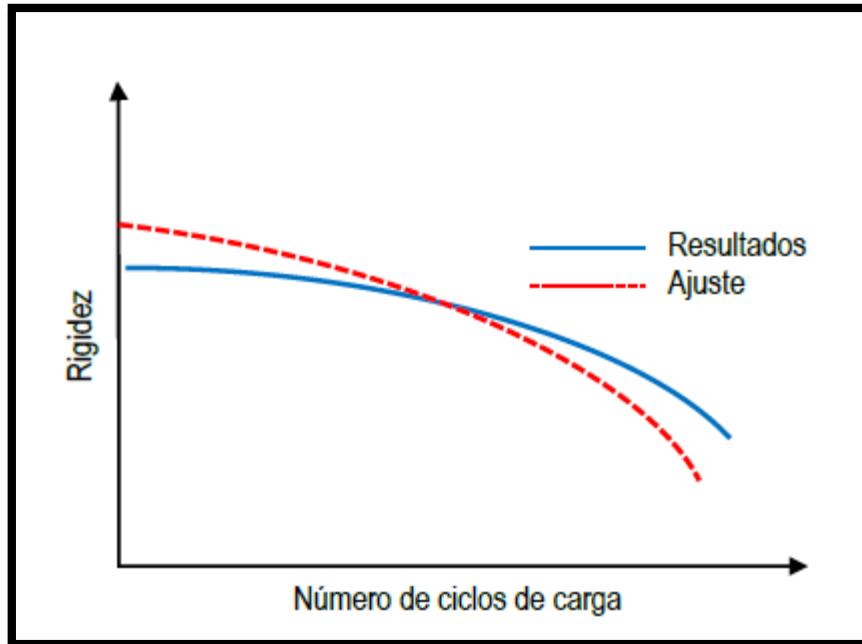
Dónde: F: Carga aplicada en Newton

$\vartheta$ : Coeficiente de Poisson del material E: Módulo de elasticidad

**Rigidez inicial (PA):** Rigidez inicial se determina graficando la rigidez (S) contra los ciclos de carga (n) y se ajusta la curva a una función exponencial de la forma mostrada en la gráfica 2.

$$S = A * e^{bn}$$

Dónde : e: Base del logaritmo natural A, b: Constantes.



**Gráfica 2.** Curva de fatiga

**Ciclos de falla:** La falla es definida como el punto en el cual la rigidez del espécimen es reducida el 50% de la rigidez inicial. El ciclo de carga para el cual la falla ocurre, se obtiene al graficar la rigidez vs número de ciclos suministrados a la probeta.

$$nf, 50 = \frac{\left[ \ln \frac{Sf, 50}{A} \right]}{b}$$

Donde: Sf, 50: 50% de la rigidez inicial, Pa;

Sf,50/A: 0.5 por definición

### **Informe.**

Se debe presentar la siguiente información:

Descripción del material asfáltico, tipo y contenido de ligante, gradación de los agregados y el porcentaje de vacíos con aire.

Dimensiones del espécimen: la Longitud y los valores promedios del ancho, altura y espesor, en metros, con tres dígitos significativos.

**Tabla 5. Información requerida del ensayo**

Ciclo de carga	Deformación Unitaria en tracción	Desplazamiento $\Delta$ [m]	Fuerza [N]	Rigidez [Mpa]

Temperatura del ensayo, con una aproximación de 0.2 °C.

Se anotan los siguientes resultados del ensayo con 3 dígitos significativos:

### **Observaciones**

Las condiciones previas en la elaboración del ensayo, son determinantes para el grado de exactitud de en los resultados, debido a la influencia del ajuste de los elementos y la probeta al equipo, contra el valor real del material y la precisión de los mismos al realizar el ensayo.

En caso de usar una mezcla, verifique que le agregado fino se reparta de manera homogénea en la probeta, con el fin de que el material describa un comportamiento isotrópico.

## Apéndice B. Manual de programación para el ensayo de fatiga sobre ligantes bituminosos en la metravib DMA+1000

**Objetivo:** Aprender a programar el Ensayo de Fatiga Sobre Ligantes Bituminosos ideado por Galvis y Vega en la METRAVIB DMA+1000.

**Herramientas claves:** Multitest

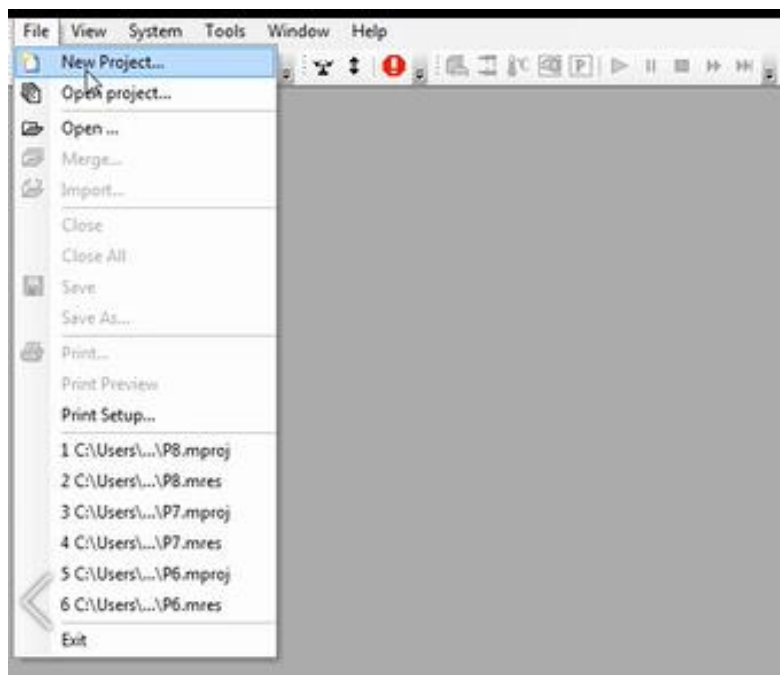
Para iniciar **Multitest** haga click en **Inicio > Todos los programas > Multitest** o ingrese directamente desde la pantalla de navegación de su computador (Figura 1), inmediatamente se abrirá el programa y se podrá observar una ventana de diálogo con el nombre *Multitest* (Figura 2), en la cuál se especifica que la cámara de temperatura no está conectada y la prueba se hará a temperatura ambiente, de click en **Ok**.

**Figura 30. Pantalla de navegación**



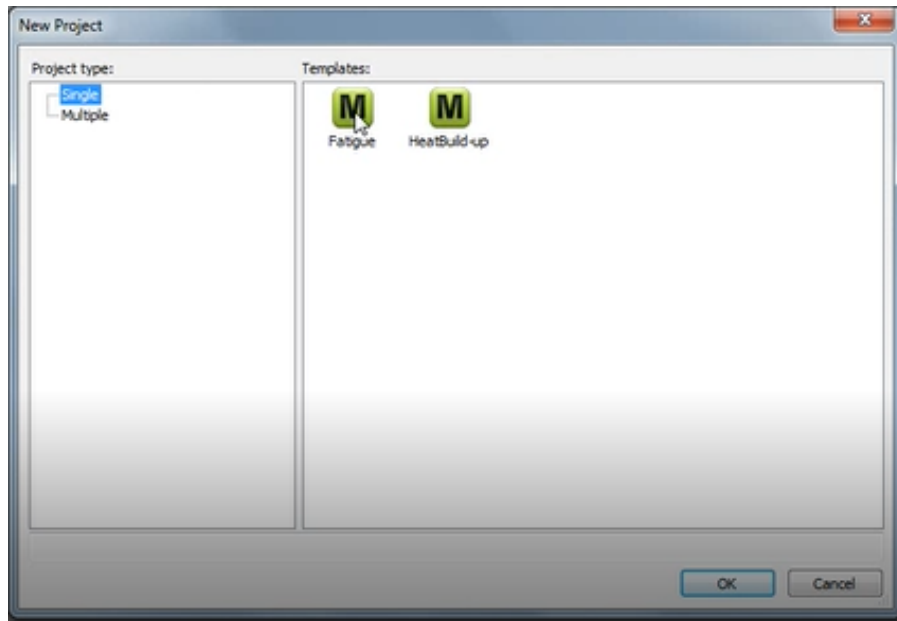
**Figura 31. Multitest****Iniciar el nuevo ensayo de fatiga.**

- ❖ Seleccione de la barra de herramientas File > New Project (Figura 3).

**Figura 32. Iniciar el ensayo**

- ❖ Se desplegará una ventana con el nombre *New Project*, en **Project type** de click en Single y en **Templates** escoja Fatigue (Figura 4).

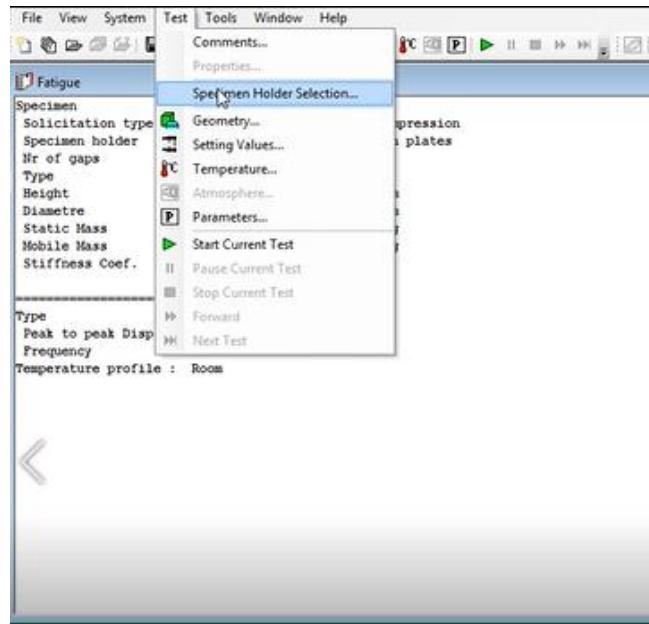
**Figura 33. New project**



**Configurar el porta muestras a utilizar e ingresar las dimensiones de las probetas.**

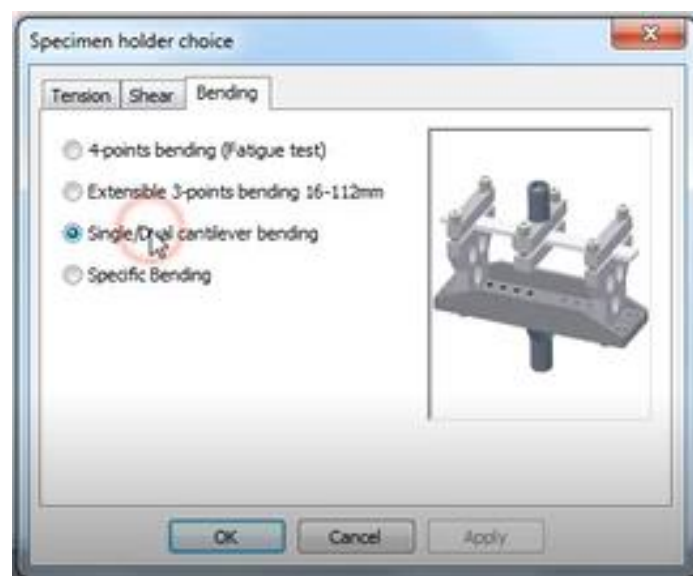
- ❖ Para ingresar la configuración del porta muestras a utilizar, en la barra de herramientas de click en Test > Specimen Holder Selection (Figura 5).

Figura 34. Configurar el porta muestras



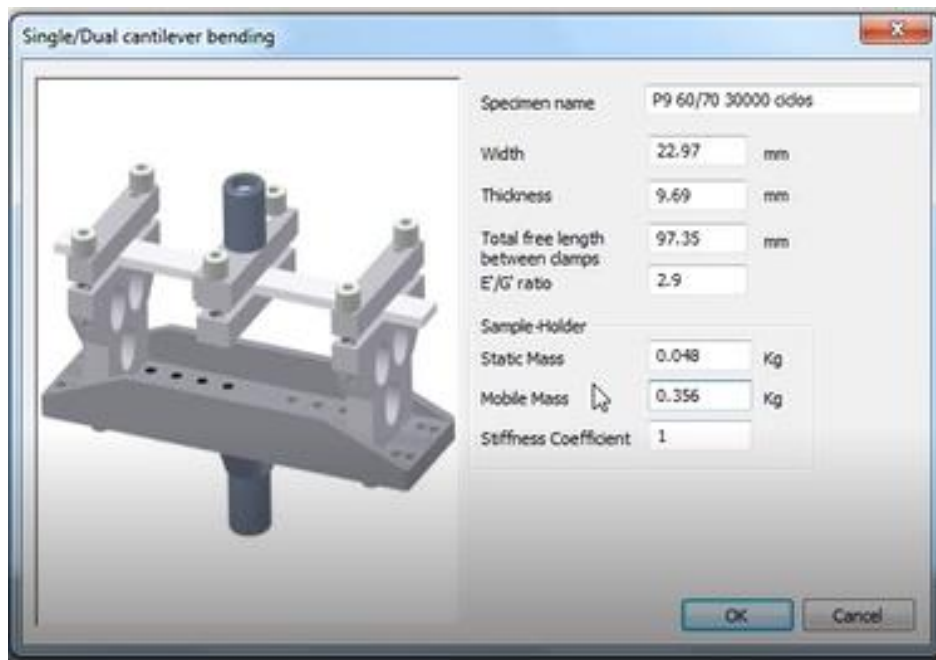
- ❖ A continuación se desplegará una ventana llamada *Specimen holder choice*, seleccione **Single/Dual cantilever bending** (Figura 6).

Figura 35. Specimen holder choice



- ❖ Aparecerá una ventana llamada *Single/Dual cantilever bending*, en donde se debe colocar el nombre de la probeta a ensayar, ancho, espesor, la longitud total libre entre las abrazaderas, relación E'/G', masa estática, masa móvil y coeficiente de rigidez del porta muestras (Figura 7).

**Figura 36. Single/Dual cantilever bending**



La relación E'/G' se determina de la siguiente fórmula:

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)}$$

Dónde:

**G:** Módulo de corte

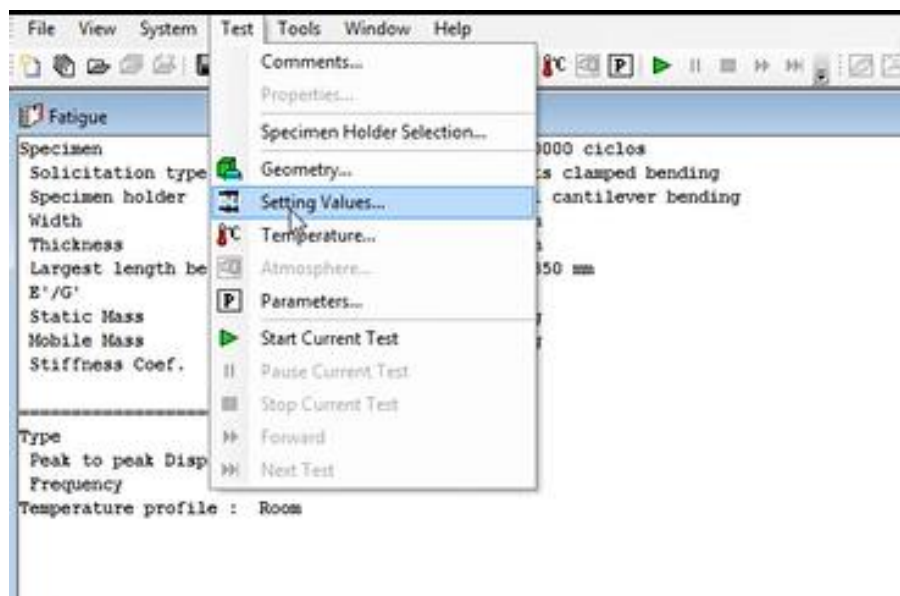
**E:** Módulo de Young

**$\nu$ :** Relación de Poisson

Dar las condiciones iniciales del ensayo (frecuencia, deformación pico a pico, forma de la onda).

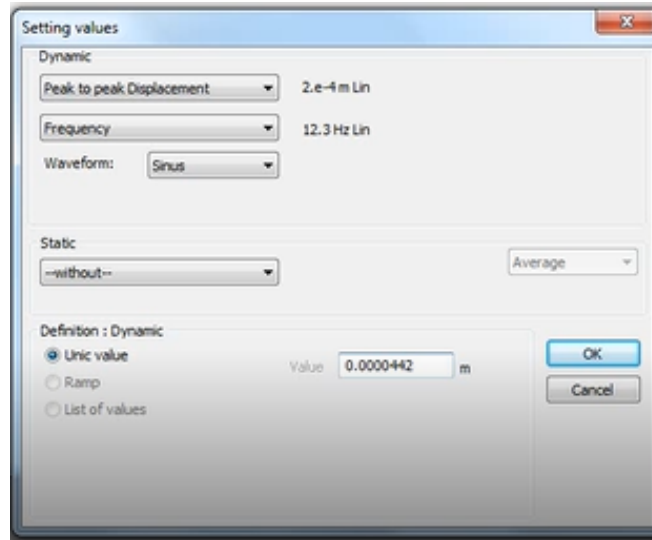
- ❖ Para configurar los valores del ensayo, es decir, dar las condiciones a las cuáles se va a evaluar el comportamiento a fatiga de la probeta, en la barra de herramientas de click en Test > Setting Values (Figura 8).

Figura 37. Dar condiciones iniciales al ensayo



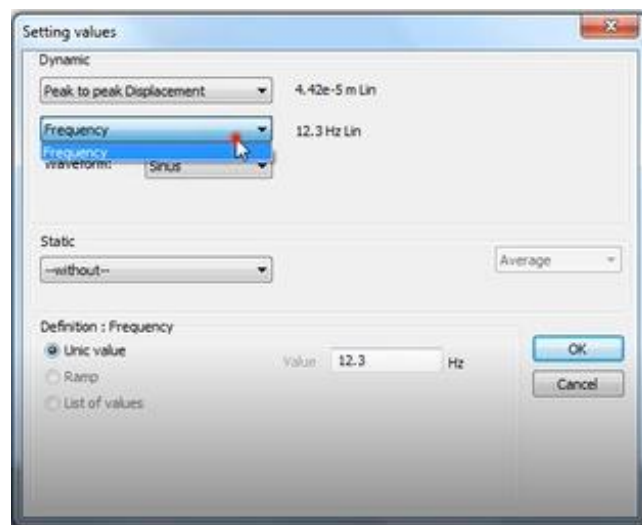
- ❖ En la ventana *Setting values*, se colocan las condiciones iniciales del ensayo. Seleccione en el primer menú desplegable de la sección *Dynamic* > Peak to peak Displacement y verifique que en la sección *Definition* después de los dos puntos aparezca la sección de la cuál desplegó el menú (en este caso *Dynamic*) como se muestra en la Figura 9.
- ❖ Una vez haya hecho esta verificación, seleccione en la sección *Definition* > Unic value y escriba en **Value** el desplazamiento pico a pico que se le aplicará a la prueba.

Figura 38. Setting values



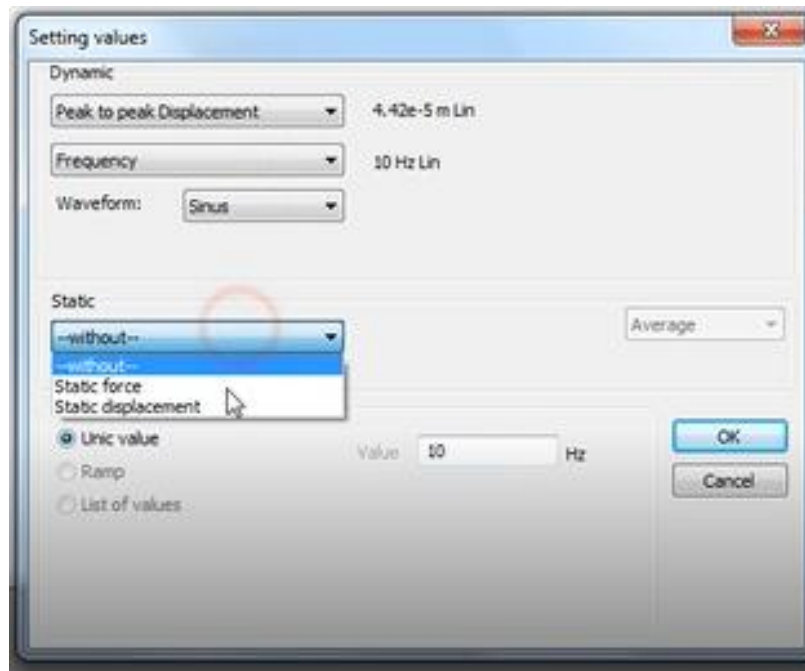
- ❖ Seleccione en el segundo menú desplegable de la sección *Dynamic* > Frequency, haga la verificación del punto anterior en la sección *Definition* (en este caso debe aparecer después de los puntos, Frequency), si es así, escriba en el campo **Value** la frecuencia que se le dará al ensayo (Figura 10)

Figura 39. Frequency



- ❖ En la sección *Waverfrom* escoja la función de longitud de onda que se le aplicará al ensayo, en este caso **Sinus** (Figura 11).

**Figura 40. Sinus**



- ❖ En la sección *Static*, en el menú desplegable verifique que la fuerza estática y el desplazamiento estático sean iguales a cero (Figura 12 y 13).

Figura 41. Static force

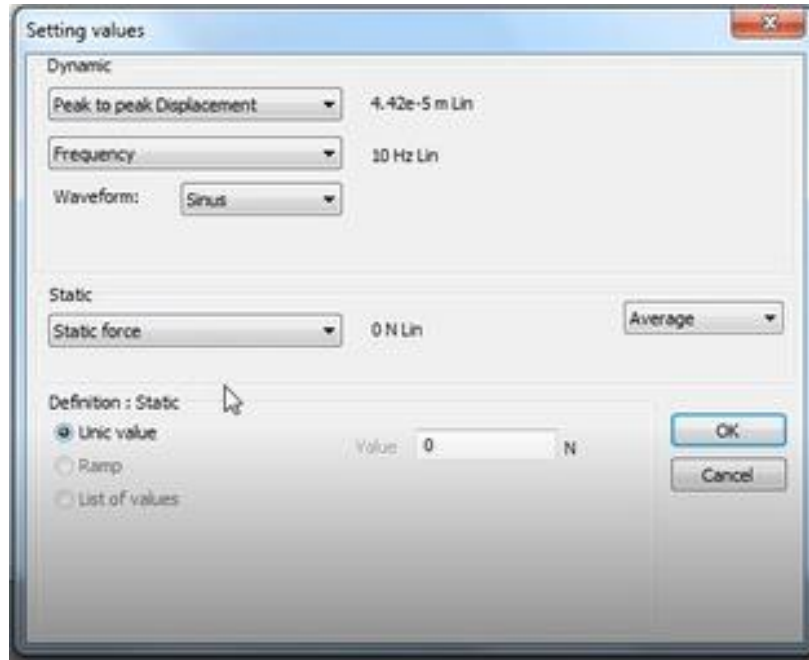
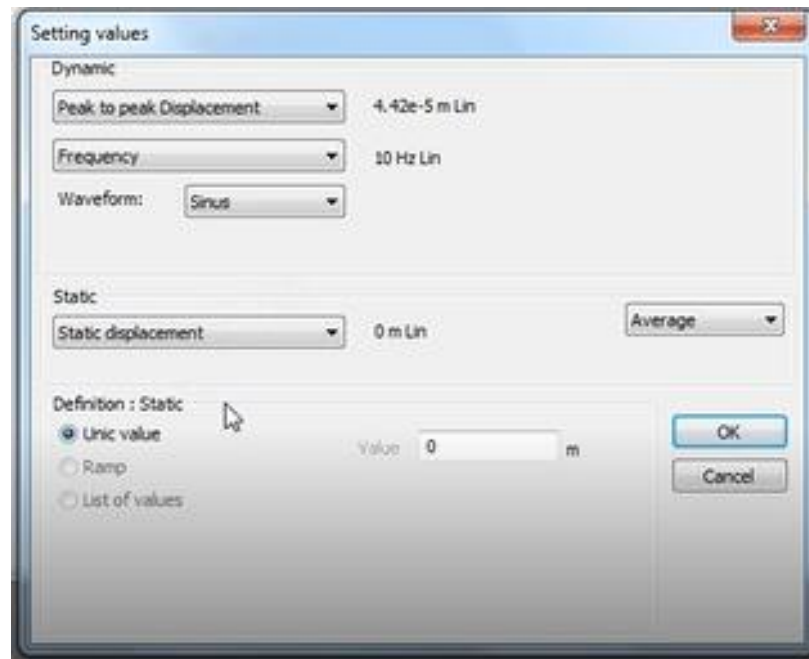
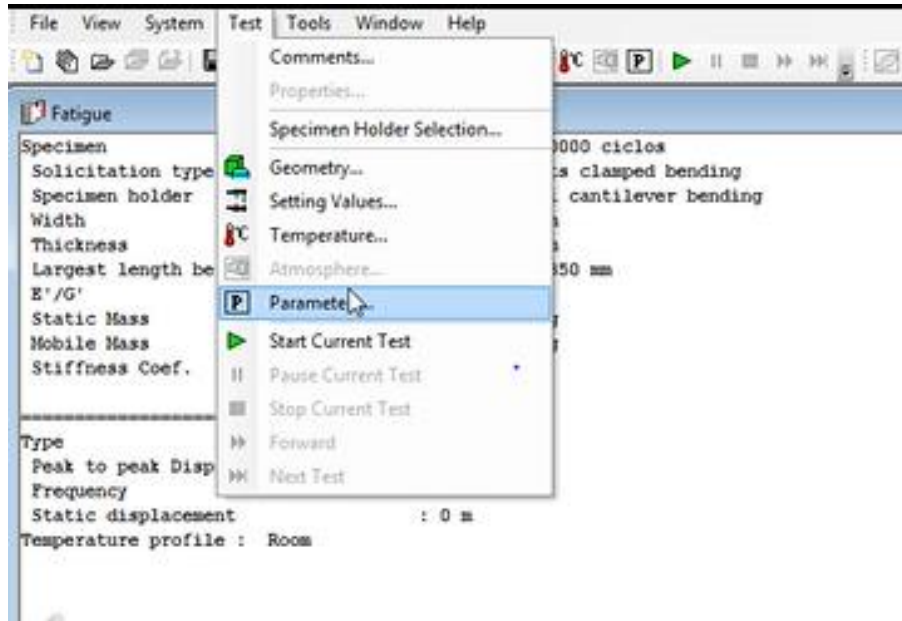


Figura 42. Static displacement



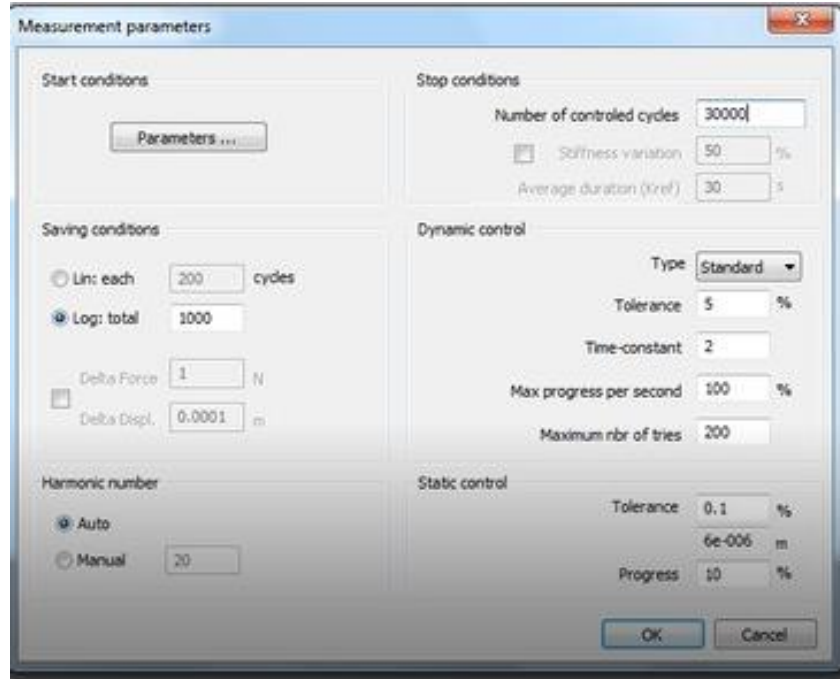
**Establecer los parámetros de medición y dar inicio al ensayo.**

- ❖ Para escoger los parámetros de medición del ensayo, en la barra de herramientas dé click en **Test > Parameters** (Figura 14).

**Figura 43. Parámetros de medición**

- ❖ Aparecerá una ventana llamada *Measurement parameters*, aquí solo hay que colocar dos valores, en la sección **Saving conditions** dar click en Log: total y colocar el número de datos que usted quiere se tomen en el ensayo, en este ensayo 1000.
- ❖ En la sección **Stop conditions**, en el campo Number of controled cycles colocar el número de ciclos a los que se va a evaluar el ensayo (Figura 15).

Figura 44. Measurement parameters



### Verificación de seguridad de la máquina y dar inicio al ensayo


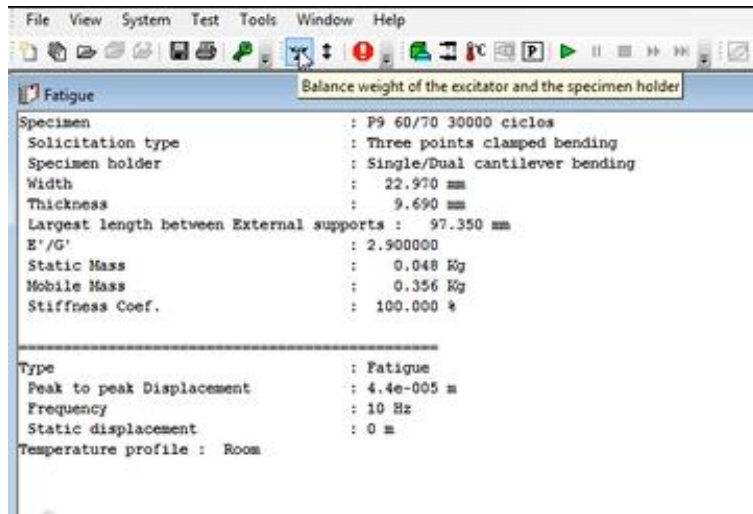
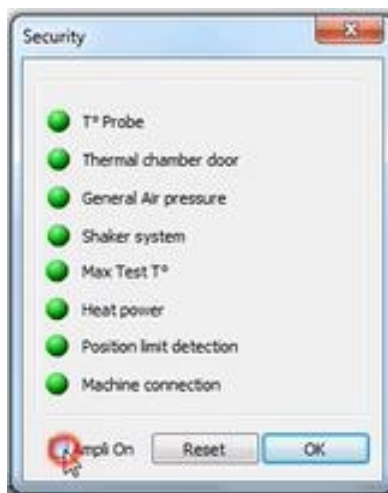
- ❖ Para dar inicio al ensayo hay que verificar primero que la máquina esté funcionando correctamente, seleccione el ícono >  llamado *Balance weight of the excitator and specimen holder* (Figura 16).

Figura 45. Verificación seguridad de la máquina



- ❖ A continuación, emergerá una ventana llamada *Security*, en dónde se debe verificar que todos los puntos se encuentren en color verde (*Nota: Si los puntos están en color rojo, llamar al encargado de la máquina*).
- ❖ Después de verificado el paso anterior, se selecciona el recuadro **Ampli On** y dar Ok, esto quiere decir que se ha encendido la máquina (Figura 17).

Figura 46. Ampli On



- ❖ Aparecerá una ventana llamada *Balancing*, dé click en Position ( $\mu\text{m}$ ) > Zero y luego en Start. Cuando el programa se balancee, dé click en Ok (Figura 18).

**Figura 47. Balancing**




- ❖ Nuevamente se debe realizar el paso de verificación de la máquina, en este caso se da click en el botón >  y aparecerá la ventana *Security* en donde se verifica que los botones estén en color verde, como se especifica en las figuras 19 y 20.

Figura 48. Security

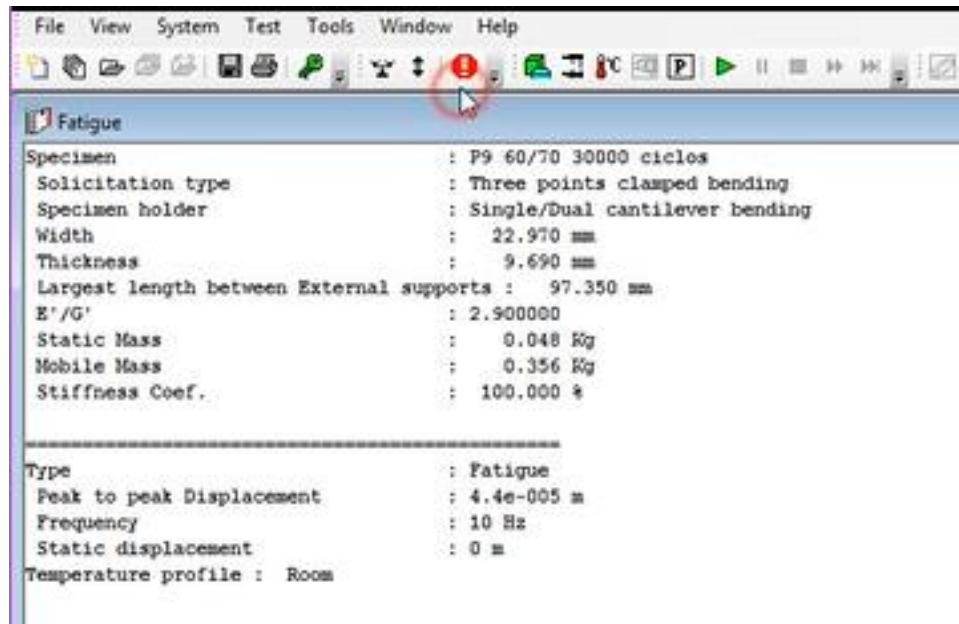


Figura 49. Ampli On



- ❖ Después de todos los pasos realizados, se puede dar inicio al ensayo en el botón **Reproducir** (Figura 21) y aparecerán cuatro ventanas (Figura 22) que muestran el avance del ensayo.

Figura 50. Reproducir

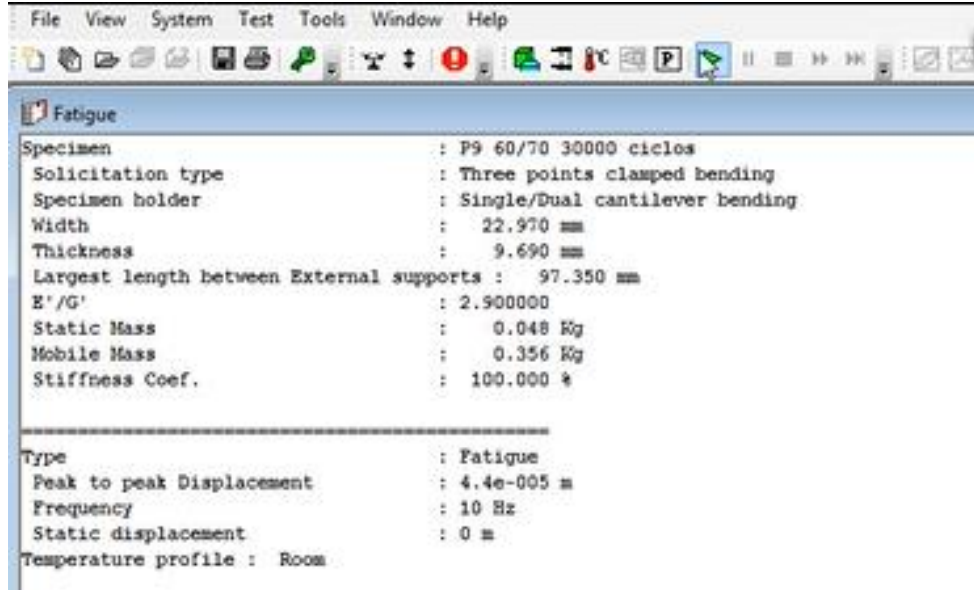
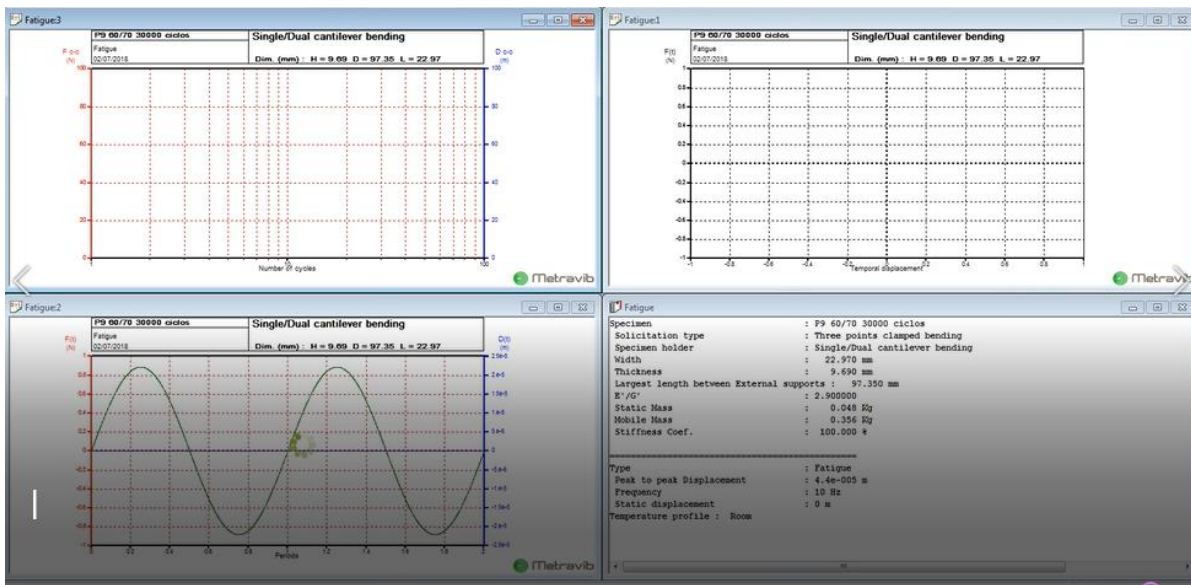


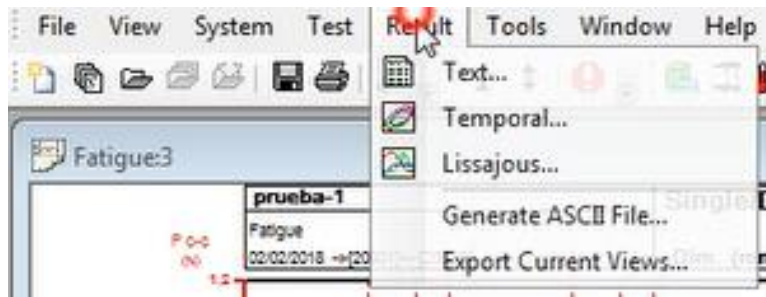
Figura 51. Ensayo iniciado



**Extraer los resultados del ensayo de la Metravib DMA+1000**

- ❖ Para extraer los resultados del ensayo en la barra de herramientas dé click en *Result* > Generate ASCII File...

**Figura 52. Result**



- ❖ Seleccione los datos que usted necesita del ensayo. Para este ensayo son necesarios el número de ciclos (Cycles), la fuerza dinámica (Dynamic force) y el desplazamiento dinámico (Dynamic displacement).

**Figura 53. Datos necesarios**

Time (Time s)
Frequency (Freq Hz)
Number of cycles (Cycles)
Temperature (T °C)
Control temperature (Tr °C)
Peak to peak Displacement (D c-c m)
Peak to peak Strain (t def c-c)
Peak min Displacement (Dmin m)
Peak max Displacement (Dmax m)
Dynamic displacement (dyn D m)
Dynamic strain (Dyn str.)
Static displacement (stat D m)
Peak to peak Force (F c-c N)
Peak to peak Stress (Stre p-p N/m <sup>2</sup> )
Peak min force (Fmin N)
Peak max force (Fmax N)
Dynamic force (dyn F N)
Dynamic stress (Stre dyn N/m <sup>2</sup> )
Static force (stat F N)
Stiffness modulus (K N/m)
Loss angle (measured) (δ °)
Stiffness (real part) (K' N/m)
Loss factor (measured) (Tan δ)
Stiffness (imaginary part) (K'' N/m)
Young modulus (E Pa)

- ❖ Dele nombre a su archivo (figura 25), se le guardará como un archivo de texto tipo CSV file (\*.csv), usted debe pasarlo a archivo Excel y obtendrá una tabla como la mostrada en la figura 26.

**Figura 54. Tipo de archivo**

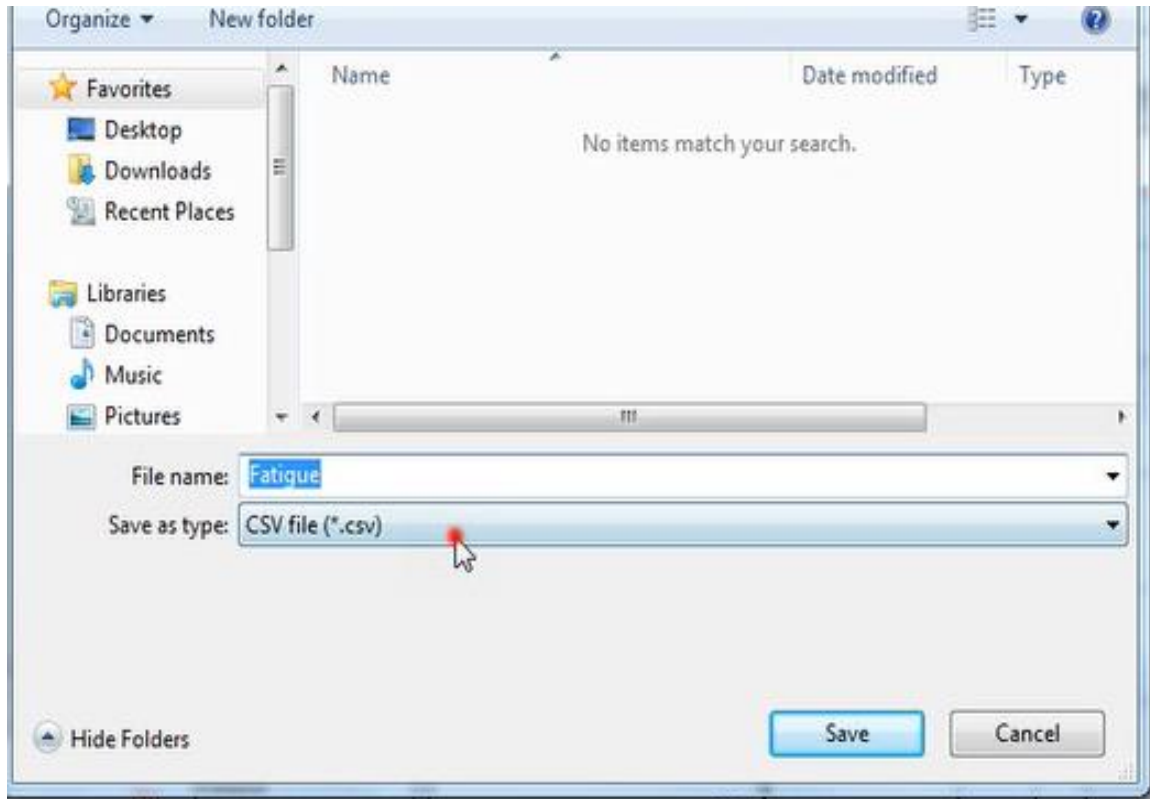


Figura 55. Datos en excel

	A	B	C	D	E	F	G
1					Cycles	dyn D m	dyn F N
2	File				1	3.01E-05	0.265215
3	Version	Multitest 7.25			7	3.03E-05	0.266575
4	Measurement	2/06/2018			13	3.09E-05	0.272023
5	Machine	1			19	3.13E-05	0.274416
6					25	3.11E-05	0.272926
7	Solicitation type	Three points clamped bending			31	3.14E-05	0.275311
8	Specimen height	Single/Dual cantilever bending			37	3.15E-05	0.275216
9	Width	22.36 mm			43	3.17E-05	0.276496
10	Thickness	10.08 mm			49	3.14E-05	0.275755
11	Largest length	96.68 mm			55	3.17E-05	0.277142
12	E'/G'	2.9			61	3.15E-05	0.275979
13	Static Mass	0.048 Kg			67	3.17E-05	0.278105
14	Mobile Mass	0.356 Kg			73	3.16E-05	0.276938
15	Stiffness Coefficient	100 %			79	3.15E-05	0.275779
16					85	3.16E-05	0.276959
17	Solicitation type	Three points clamped bending			91	3.15E-05	0.276336
18	Specimen height	Single/Dual cantilever bending			97	3.17E-05	0.277215
19	Width	22.36 mm			103	3.16E-05	0.277032
20	Thickness	10.08 mm			109	3.15E-05	0.276496
21	Largest length	96.68 mm			115	3.17E-05	0.276702
22	E'/G'	2.9			121	3.12E-05	0.274132
23	Static Mass	0.048 Kg			127	3.18E-05	0.276833
24	Mobile Mass	0.356 Kg			133	3.17E-05	0.276956
25	Stiffness Coefficient	100 %			139	3.15E-05	0.275957

## Apéndice C - Informe de resultados “norma para un ensayo de fatiga sobre ligantes bituminosos”



Facultad de Ingenierías Físico Mecánicas  
Escuela de Ingeniería Civil



### ANEXO C - INFORME DE RESULTADOS “NORMA PARA UN ENSAYO DE FATIGA SOBRE LIGANTES BITUMINOSOS”

KARLA PATRICIA CUADROS LÓPEZ  
ESTUDIANTE DE INGENIERÍA CIVIL  
UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
[KARLACUADROS-0920@HOTMAIL.COM](mailto:KARLACUADROS-0920@HOTMAIL.COM)

CARLOS DAVID HURTADO MARTÍNEZ  
ESTUDIANTE DE INGENIERÍA CIVIL  
UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
[CARLITOS\\_D\\_12@HOTMAIL.COM](mailto:CARLITOS_D_12@HOTMAIL.COM)

#### RESUMEN.

En este artículo se presenta el informe de los resultados del “ENSAYO DE FATIGA SOBRE LIGANTES BITUMINOSOS” ideado por Galvis y Vega. El procedimiento se ha realizado en el Laboratorio Álvaro Beltrán Pinzón de la Universidad Industrial de Santander, y su metodología consiste en someter a flexión dinámica probetas prismáticas de asfalto con el objetivo de determinar el comportamiento frente a la fatiga del material. Este procedimiento permite evaluar el desempeño del material por medio del análisis de la fuerza requerida para generar una deformación constante a lo largo del ensayo, lo que traduce en una disminución de su rigidez hasta producir el fallo por fatiga.

**PALABRAS CLAVE:** Ligante bituminoso, fatiga, rigidez.

#### ABSTRACT

This article presents the report of the results of the “FATIGUE TEST ON BITUMINOUS BINDERS” devised by Galvis and Vega. The procedure has been carried out at the Álvaro Beltrán Pinzón Laboratory of the Industrial University of Santander, and its methodology consists in submitting a dynamic flexion to the asphalt prismatic tests in order to determine the behavior against fatigue of the material. This procedure allows evaluating the performance of the material by means of the analysis of the force required to generate a constant deformation throughout the test, which translates into a decrease in its rigidity until fatigue failure occurs.

**KEY WORDS:** Bituminous binding, fatigue, rigidity.



## 1 INTRODUCCIÓN

La investigación y el desarrollo de las fracciones pesadas del petróleo y en particular de los asfaltos o ligantes bituminosos han recibido enorme atención en los últimos años. Los retos que se plantean para estos materiales tienen que ver principalmente con las nuevas exigencias que la tecnología demanda a las vías, debido a que los vehículos de transporte de carga y pasajeros son cada vez más pesados y numerosos (Adriana, 2000). La fisuración por fatiga de las capas de mezclas asfálticas es uno de los mecanismos de deterioro más frecuentes en los pavimentos flexibles. El fenómeno de fatiga en ingeniería está asociado al deterioro que se produce en un material como consecuencia de la aplicación de cargas repetidas con una magnitud inferior a la resistencia máxima que puede soportar el material (Pérez Jiménez, Valdés, Botella, Miró, & Martínez, 2011). Esto ha llevado a que existan un número apreciable de ensayos que buscan caracterizar las mezclas bituminosas frente a la fatiga, encontrándose con dificultades debido a su composición compleja; no obstante, estas dificultades no han sido impedimento para que existan procedimientos cuya función es dar un rango de conocimiento más amplio en lo que conlleva a la caracterización de la mezcla, sin embargo, aún no existe un ensayo que evalúe el desempeño exclusivamente del bitumen, tarea de mayor o igual complejidad si se tiene en cuenta la característica principal del asfalto de ser un material viscoelástico, susceptible a la temperatura y con características reológicas complejas. Es por ello que en este informe se presenta el informe del “Ensayo de Fatiga Sobre Ligantes Bituminosos” ideado por Galvis & Vega con sus respectivos resultados y conclusiones.

## 2 OBJETIVO

Estudiar la fatiga en ligantes bituminosos y en mezclas asfálticas con agregados finos.

## 3 INFORMES

### 3.1 Descripción del material asfáltico

El comportamiento a fatiga tras aplicar el procedimiento del ensayo se ha analizado en cinco probetas de asfalto 60/70 y tres probetas de asfalto modificado de origen ruso suministrado por el laboratorio, con las condiciones mostradas en la tabla 1 y 2.

**Tabla 1. Condiciones de las probetas de asfalto 60/70 a ensayar**

Probeta	Deformación unitaria	Frecuencia [Hz]	Ciclos de carga
1	5.00E-04	10	30000
2	5.00E-04	10	30000
3	5.00E-04	10	30000
4	6.48E-04	10	30000
5	3.54E-04	10	30000

**Tabla 2. Condiciones de las probetas de asfalto modificado a ensayar**

Probeta	Deformación unitaria	Frecuencia [Hz]	Ciclos de carga
6	5.00E-04	10	50000
7	6.49E-04	10	50000
8	5.01E-04	10	90000

### 3.2 Dimensiones del espécimen

Las dimensiones de las probetas ensayadas se presentan a continuación:

**Tabla 3. Dimensiones de las probetas ensayadas**

Probetas	Ancho [mm]	Altura [mm]	Espesor [mm]
1	22	97	10
2	23	99	10
3	22	97	9
4	24	96	9
5	23	97	10
6	23	97	10
7	23	99	10
8	22	99	10



**3.3 Temperatura del ensayo**

La temperatura ambiente medida en los ensayos por la Metravib DMA+1000 fueron las siguientes:

**Tabla 4. Temperatura ambiente medida en los ensayos**

Probetas	Temperatura [°C]
1	23
2	21
3	22
4	22.2
5	23.5
6	21.5
7	22
8	22

**4 CÁLCULOS TIPO**

**4.1 Deformación unitaria (ε):**

Se calcula la deformación unitaria para el primer ciclo de carga de la primera probeta ensayada, en donde la Metravib DMA+1000 arrojó un desplazamiento máximo de la probeta (Δ) de 3.01E-05 m:

$$\epsilon = (20.321 - 10.42\theta) * \Delta$$

$$\epsilon = (20.321 - 10.42 * 0.45) * 3.01 * 10^{-5}$$

$$\epsilon = 4.71 * 10^{-4}$$

**4.2 Módulo de elasticidad (E):**

Se calcula el módulo de elasticidad para el primer ciclo de carga de la primera probeta ensayada, en donde la Metravib DMA+1000 arrojó un desplazamiento máximo de la probeta (Δ) de 3.01E-05 m y una carga aplicada (F) de 0.265 N:

$$E = (1704 + 487 * \theta) * \left[ \frac{F}{\Delta} \right]$$

$$E = (1704 + 487 * 0.45) * \left[ \frac{0.265}{3.01 * 10^{-5}} \right]$$

$$E = 1.69 * 10^7 N/m$$

Los valores de deformación unitaria y módulo de elasticidad se calculan para cada ciclo de carga aplicado en el ensayo.

**5 RESULTADOS DE LOS ENSAYOS**

Se anotan los resultados del ensayo con 3 dígitos significativos para cada una de las probetas en las tablas mostradas a continuación (completas en el archivo Excel), con sus respectivas curvas “Rigidez vs Número de ciclos de carga”. (Ver Anexo 1).

**6 OBSERVACIONES Y CONCLUSIONES**

El ajuste de la curva “Rigidez vs Número de ciclos de carga” no fue posible realizarse ya que la curva no experimenta un comportamiento exponencial, esto puede darse porque el ensayo no fue llevado a la cantidad de ciclos de carga en que falla el material. Es necesario que el ensayo de fatiga presentado se someta a los ajustes presentados en la tesis que contiene este documento, para que puedan analizarse los resultados obtenidos y se haga un ajuste de curva asociado a su comportamiento.

**7 REFERENCIAS**

Adriana, M. (2000). *Aseguramiento de la Calidad de Mezclas Bituminosas mediante la Aplicación del Ensayo de Tracción Indirecta en el Control de su Ejecución*. Barcelona, España: Universitat Politècnica de Catalunya.

Chailleux, E., Bodin, D., de la Roche, C., Leguern, M., & Vignard, N. (2009). Fatigue behaviour of bitumen in tension-compression loading mode: Rheological analysis and comparison with mix fatigue. En A. Loizos, I. L. Al-Qadi, M. N. Partl, & T. Scarpas, *Advanced Testing and Characterization of Bituminous Materials* (pág. 11). London: Taylor & Francis Group.



Universidad  
Industrial de  
Santander

Facultad de Ingenierías Físico Mecánicas  
Escuela de Ingeniería Civil



Pérez Jiménez, F., Valdés, G., Botella, R.,  
Miró, R., & Martínez, A. (2011).  
Evaluación del proceso de fatiga de  
mezclas asfálticas mediante un nuevo

procedimiento cíclico de barrido de  
deformaciones - EBADE. *Revista de  
la Construcción*, 11.



Facultad de Ingenierías Físico Mecánicas  
Escuela de Ingeniería Civil



ANEXO 1. RESULTADOS DEL ENSAYO DE FATIGA SOBRE LIGANTES BITUMINOSOS

- PROBETA No. 1

Tabla 5. Resultados probeta 1

Cycles	$\epsilon$ [m/m]	dyn D m	dyn F N	E [N/m]
1	4.711E-04	3.014E-05	0.265	1.692E+07
...	...	...	...	...
5011	4.907E-04	3.139E-05	0.262	1.604E+07
...	...	...	...	...
10105	4.907E-04	3.139E-05	0.257	1.575E+07
...	...	...	...	...
15109	4.929E-04	3.153E-05	0.253	1.544E+07
...	...	...	...	...
21019	4.969E-04	3.179E-05	0.243	1.471E+07
...	...	...	...	...
25045	5.001E-04	3.199E-05	0.238	1.413E+07
...	...	...	...	...
30001	4.989E-04	3.192E-05	0.222	1.314E+07



Facultad de Ingenierías Físico Mecánicas  
Escuela de Ingeniería Civil

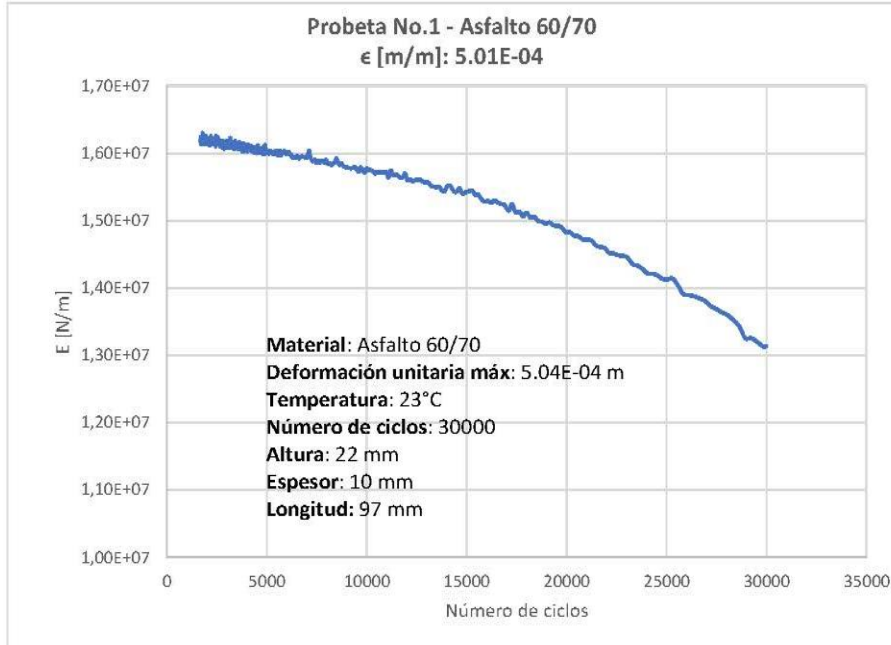


Figura 1. Curva de fatiga probeta 1

- PROBETA No. 2

Tabla 6. Resultados probeta 2

Cycles	$\epsilon$ [m/m]	dyn D m	dyn F N	E [N/m]
1	4.709E-04	3.012E-05	0.238	1.518E+07
...	...	...	...	...
5011	4.936E-04	3.158E-05	0.239	1.454E+07
...	...	...	...	...
10105	4.935E-04	3.157E-05	0.232	1.411E+07
...	...	...	...	...
15109	4.919E-04	3.147E-05	0.221	1.351E+07
...	...	...	...	...
20167	4.908E-04	3.140E-05	0.209	1.278E+07
...	...	...	...	...
25045	4.955E-04	3.169E-05	0.198	1.203E+07
...	...	...	...	...



Facultad de Ingenierías Físico Mecánicas  
Escuela de Ingeniería Civil



30001	4.942E-04	3.162E-05	0.182	1.104E+07
-------	-----------	-----------	-------	-----------

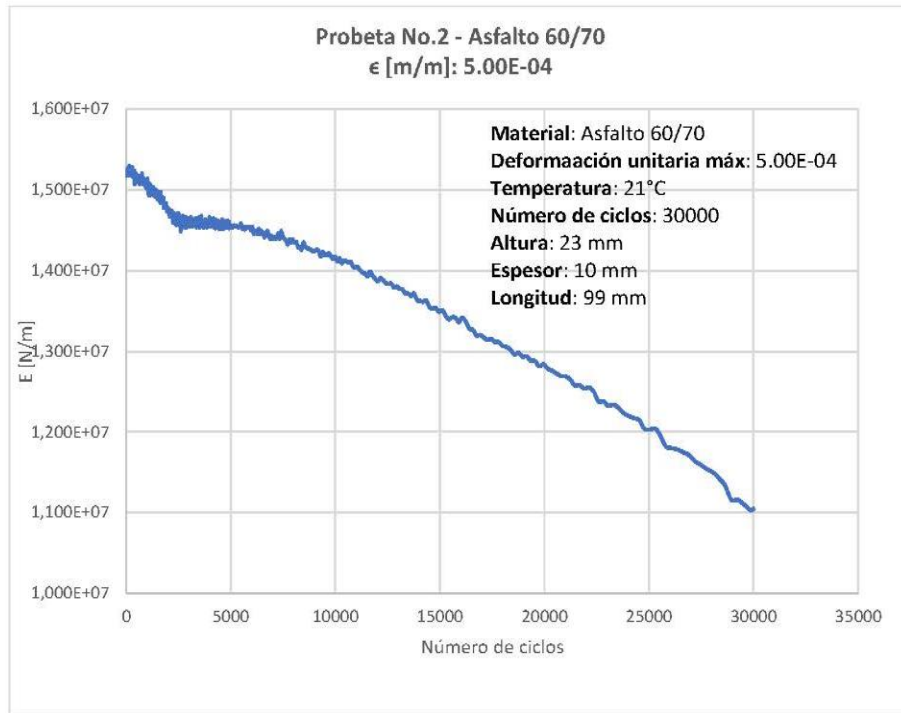


Figura 2. Curva de fatiga probeta 2

- **PROBETA No. 3**

Tabla 7. Resultados probeta 3

Cycles	$\epsilon$ [m/m]	dyn D m	dyn F N	E [N/m]
1	4.968E-04	3.178E-05	0.254	1.538E+07
...	...	...	...	...
5011	4.940E-04	3.160E-05	0.241	1.470E+07
...	...	...	...	...
10105	4.918E-04	3.146E-05	0.235	1.437E+07
...	...	...	...	...
15109	4.943E-04	3.162E-05	0.227	1.378E+07
...	...	...	...	...



Facultad de Ingenierías Físico Mecánicas  
Escuela de Ingeniería Civil



20167	4.937E-04	3.158E-05	0.212	1.292E+07
...	...	...	...	...
25045	6.419E-04	4.107E-05	0.306	1.435E+07
...	...	...	...	...
30001	4.936E-04	3.158E-05	0.184	1.123E+07

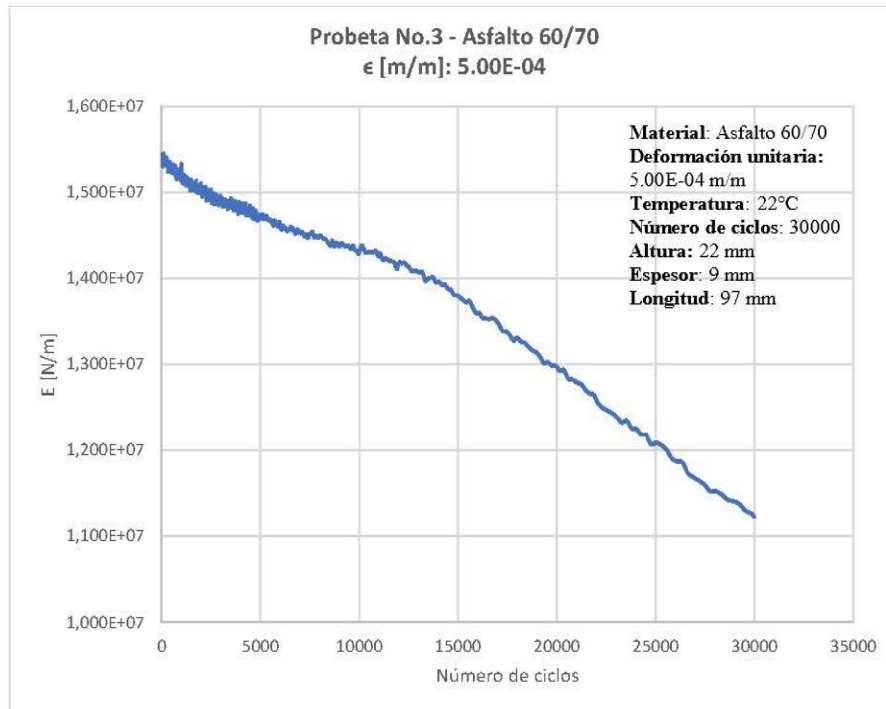


Figura 3. Curva de fatiga probeta 3

• **PROBETA No. 4**

Tabla 8. Resultados probeta 4

Cycles	$\epsilon$ [m/m]	d <sub>yn</sub> D m	d <sub>yn</sub> F N	E [N/m]
1	6.164E-04	3.943E-05	0.472	2.301E+07
...	...	...	...	...
5011	6.415E-04	4.104E-05	0.376	1.761E+07
...	...	...	...	...



Facultad de Ingenierías Físico Mecánicas  
Escuela de Ingeniería Civil



10105	6.413E-04	4.103E-05	0.347	1.629E+07
...	...	...	...	...
15109	6.406E-04	4.098E-05	0.334	1.566E+07
...	...	...	...	...
20167	6.420E-04	4.107E-05	0.322	1.507E+07
...	...	...	...	...
25045	4.964E-04	3.176E-05	0.200	1.209E+07
...	...	...	...	...
30001	6.411E-04	4.101E-05	0.275	1.292E+07

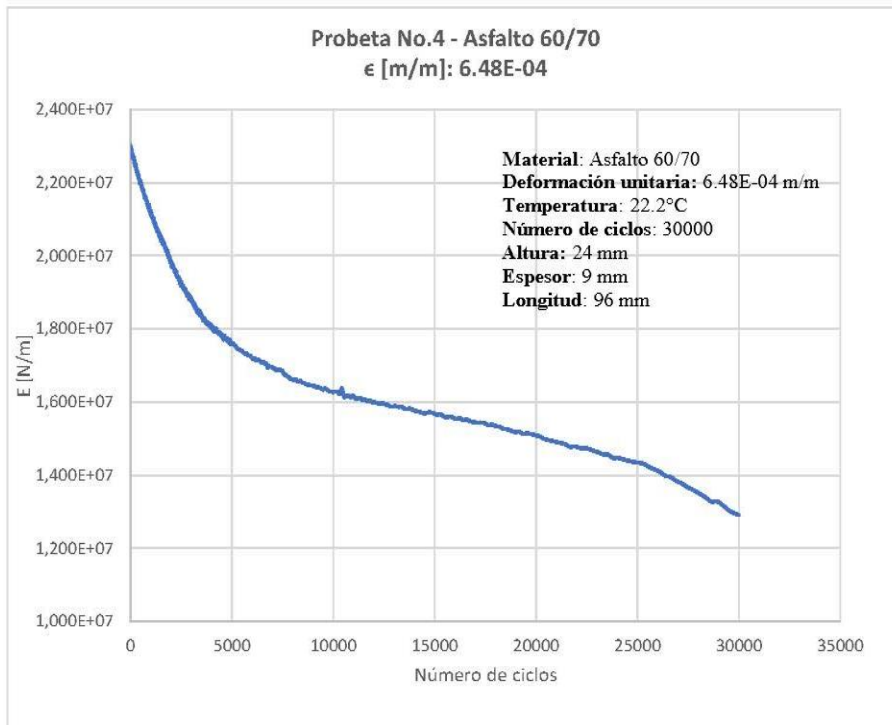


Figura 4. Curva de fatiga probeta 4

- **PROBETA No. 5**

Tabla 9. Resultados probeta 5

Cycles	$\epsilon$ [m/m]	dyn D m	dyn F N	E [N/m]
1	3.292E-04	2.106E-05	0.221	2.020E+07



Facultad de Ingenierías Físico Mecánicas  
Escuela de Ingeniería Civil



...	...	...	...	...
5009	3.483E-04	2.228E-05	0.184	1.586E+07
...	...	...	...	...
10001	3.448E-04	2.205E-05	0.164	1.427E+07
...	...	...	...	...
15107	3.489E-04	2.232E-05	0.151	1.298E+07
...	...	...	...	...
20165	3.450E-04	2.207E-05	0.134	1.166E+07
...	...	...	...	...
25049	3.452E-04	2.208E-05	0.119	1.034E+07
...	...	...	...	...
30001	3.434E-04	2.197E-05	0.102	8.925E+06

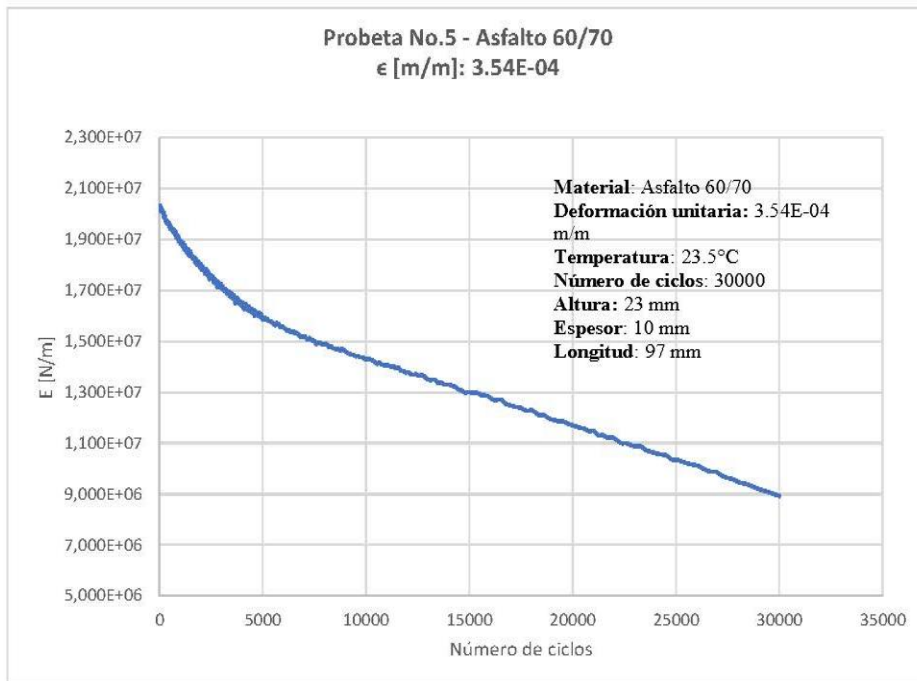


Figura 5. Curva de fatiga probeta 5



Facultad de Ingenierías Físico Mecánicas  
Escuela de Ingeniería Civil



- PROBETA No. 6

Tabla 10. Resultados probeta 6

Cycles	$\epsilon$ [m/m]	dyn D m	dyn F N	E [N/m]
1	4.926E-04	3.151E-05	0.263	1.604E+07
...	...	...	...	...
5011	4.951E-04	3.167E-05	0.263	1.595E+07
...	...	...	...	...
10015	4.954E-04	3.169E-05	0.264	1.601E+07
...	...	...	...	...
20023	4.952E-04	3.168E-05	0.263	1.594E+07
...	...	...	...	...
30219	4.917E-04	3.145E-05	0.260	1.588E+07
...	...	...	...	...
40047	4.910E-04	3.141E-05	0.256	1.569E+07
...	...	...	...	...
50001	4.923E-04	3.149E-05	0.256	1.562E+07



Facultad de Ingenierías Físico Mecánicas  
Escuela de Ingeniería Civil

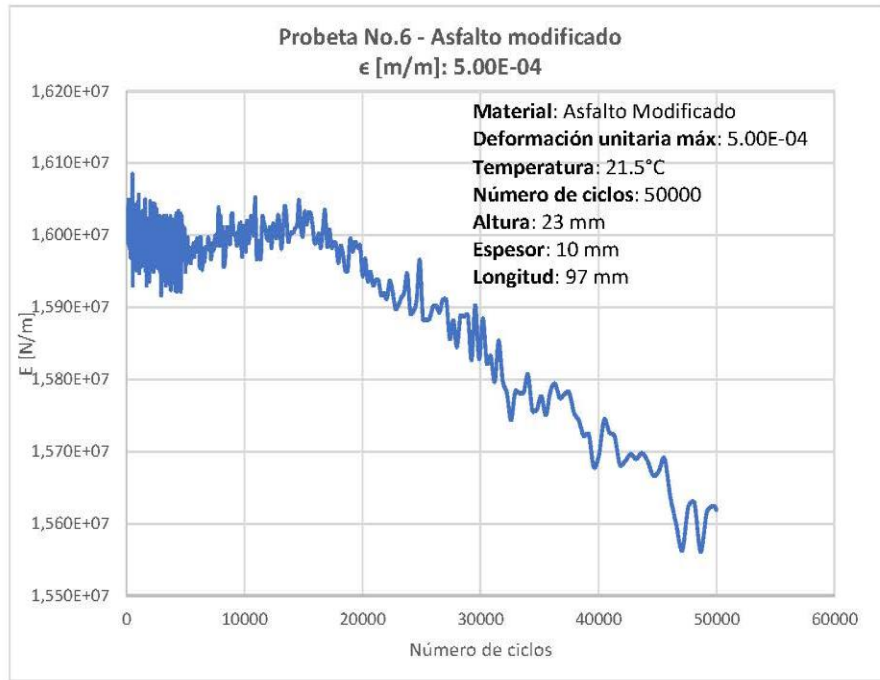


Figura 6. Curva de fatiga probeta 6

- **PROBETA No. 7**

Tabla 11. Resultados probeta 7

Cycles	$\epsilon$ [m/m]	$d_{\text{dyn}} D$ m	$d_{\text{dyn}} F N$	E [N/m <sup>2</sup> ]
1	6.432E-04	4.115E-05	0.351	1.639E+07
...	...	...	...	...
5011	6.409E-04	4.100E-05	0.370	1.734E+07
...	...	...	...	...
10011	6.436E-04	4.118E-05	0.384	1.793E+07
...	...	...	...	...
20025	6.418E-04	4.106E-05	0.395	1.851E+07
...	...	...	...	...
30219	6.424E-04	4.109E-05	0.401	1.876E+07
...	...	...	...	...
40047	6.466E-04	4.136E-05	0.404	1.879E+07



Facultad de Ingenierías Físico Mecánicas  
Escuela de Ingeniería Civil



...	...	...	...	...
50001	6.438E-04	4.118E-05	0.399	1.862E+07

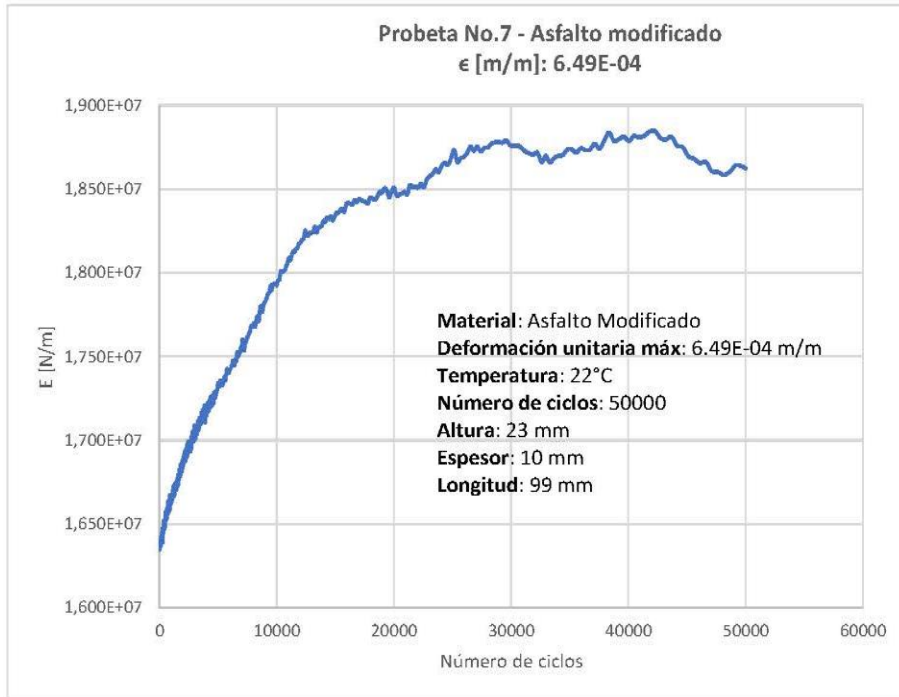


Figura 7. Curva de fatiga probeta 7

- **PROBETA No. 8**

Tabla 12. Resultados probeta 8

Cycles	$\epsilon$ [m/m]	dyn D m	dyn F N	E [N/m]
1	4.785E-04	3.061E-05	0.277	1.739E+07
...	...	...	...	...
15107	4.916E-04	3.145E-05	0.293	1.792E+07
...	...	...	...	...
30001	4.978E-04	3.185E-05	0.299	1.805E+07
...	...	...	...	...



Facultad de Ingenierías Físico Mecánicas  
Escuela de Ingeniería Civil



45109	4.959E-04	3.172E-05	0.296	1.795E+07
...	...	...	...	...
60001	4.924E-04	3.150E-05	0.295	1.801E+07
...	...	...	...	...
75109	4.961E-04	3.174E-05	0.298	1.803E+07
...	...	...	...	...
90001	4.945E-04	3.163E-05	0.294	1.788E+07

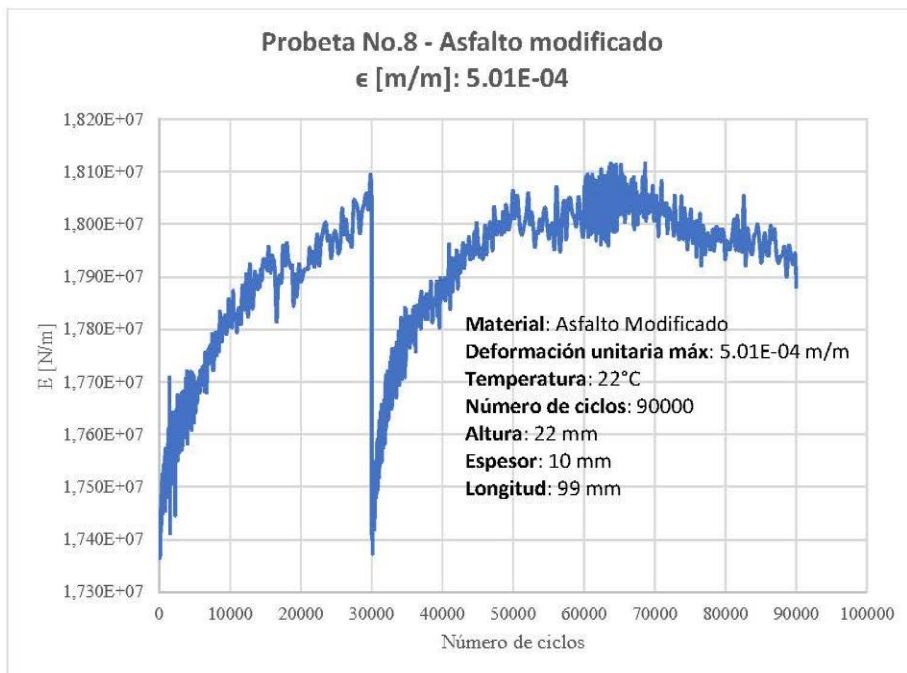


Figura 8. Curva de fatiga probeta 8

Apéndice D. Geometría de la probeta de ensayo propuesta para el ensayo de fatiga sobre ligantes bituminosos

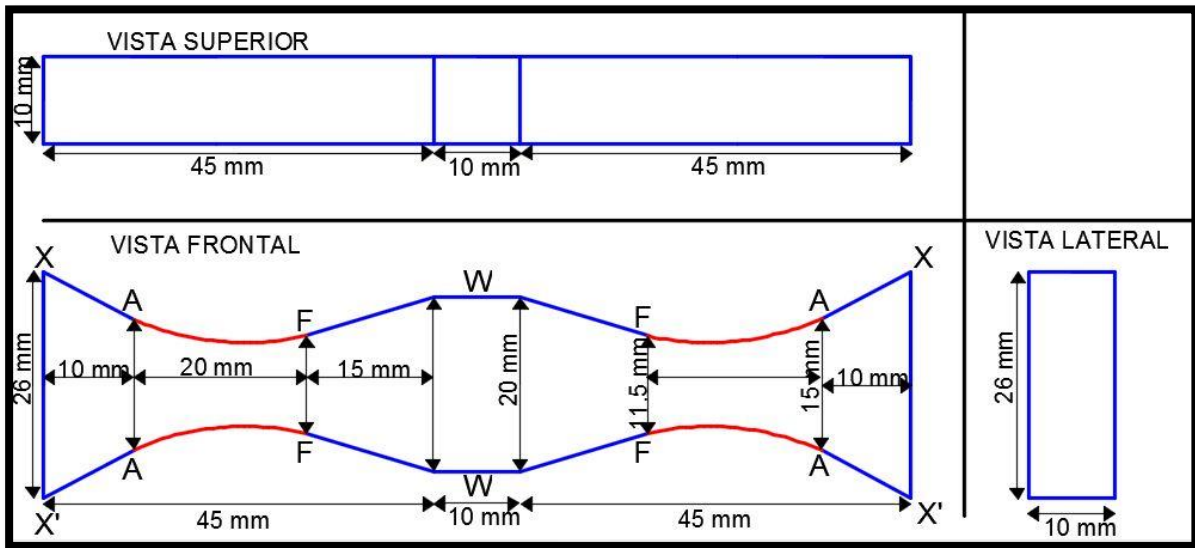


Figura 56. Detalle nueva geometría propuesta

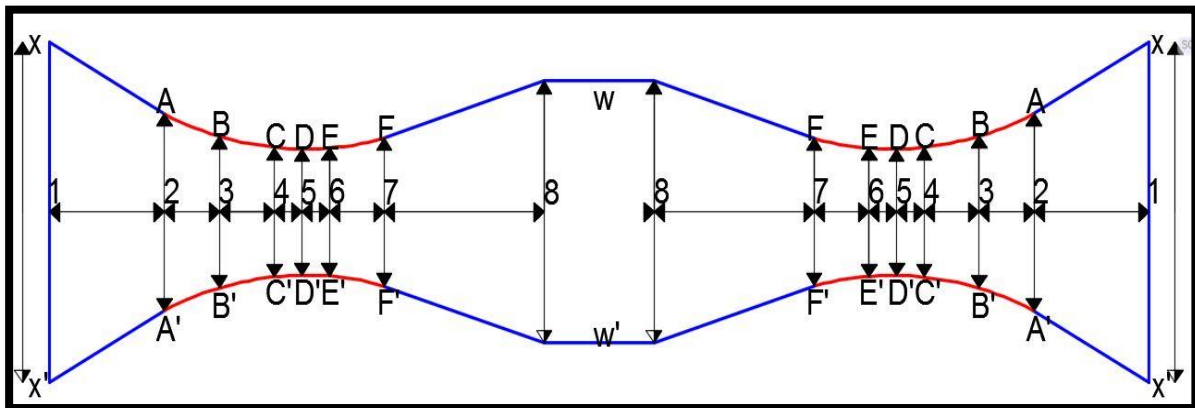


Figura 57. Detalle de medidas interiores de la parte lateral del modelo de probeta.

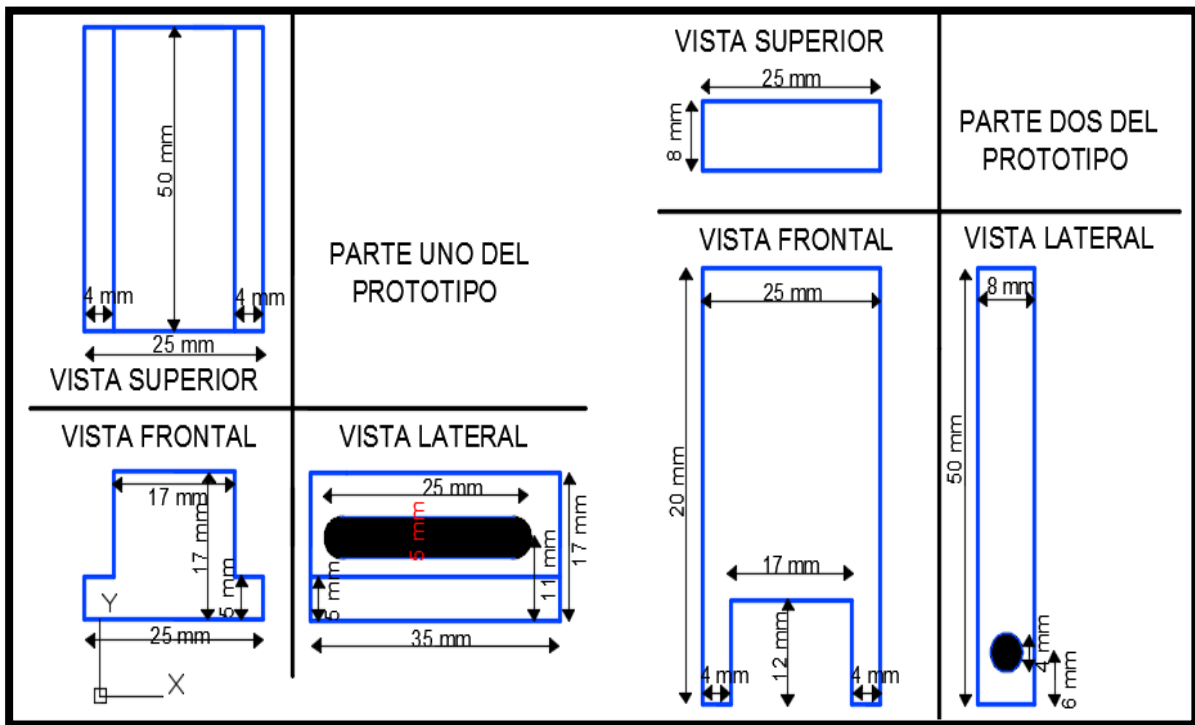
Tabla 6. Dimensiones modificación de la probeta

<b>SEGMENTO VERTICAL [mm]</b>	
<b>AA'</b>	15
<b>BB'</b>	11.5
<b>CC'</b>	10
<b>DD'</b>	9.5
<b>EE'</b>	10
<b>FF'</b>	11.5
<b>XX'</b>	26
<b>WW'</b>	20
<b>SEGMENTO HORIZONTAL [mm]</b>	
<b>1--2</b>	10
<b>2--3</b>	5
<b>3--4</b>	5
<b>4--5</b>	2.5
<b>5--6</b>	2.5
<b>6--7</b>	5
<b>7--8</b>	15
<b>8--8</b>	10

**Apéndice E. Modificación del porta muestras para el ensayo de fatiga sobre ligantes bituminosos**

**bituminosos**

A continuación, se muestra el detalle modelo del porta muestras que se sugiere para el “Ensayo de Fatiga Sobre Ligantes Bituminosos” ideado por Galvis & Vega.



**Figura 58. Detalle modelo del porta muestras que se sugiere.**



Figura 59. Madera física en madera del prototipo.

A continuación, se muestra el detalle individual del componente uno de porta muestra:

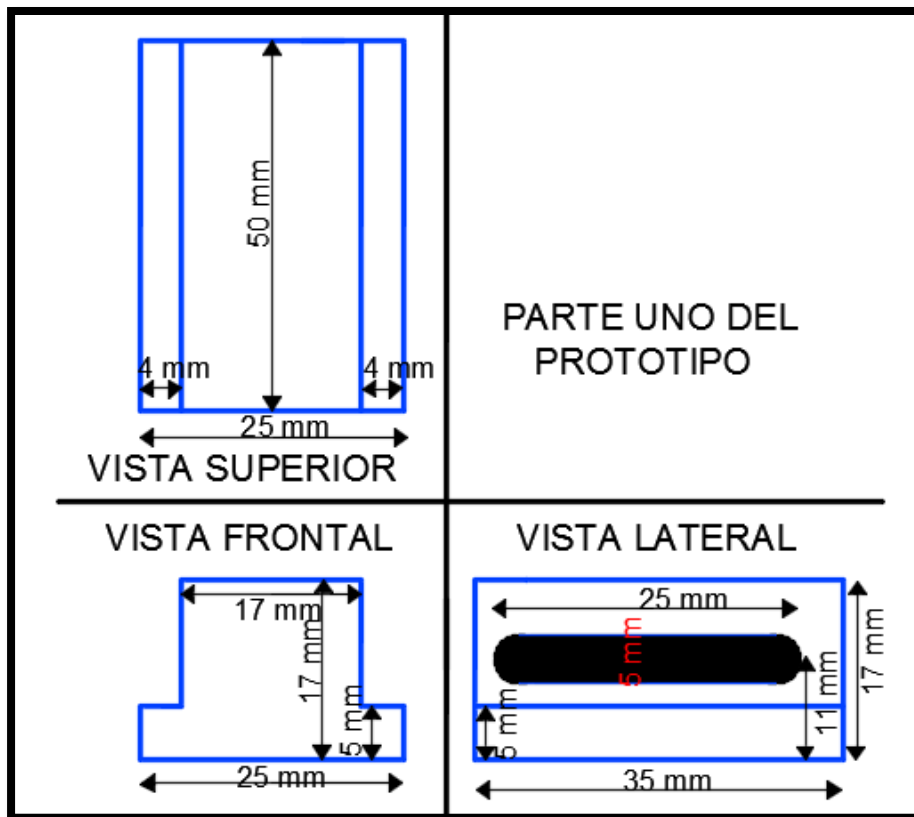


Figura 60. Detalle individual componente 1.

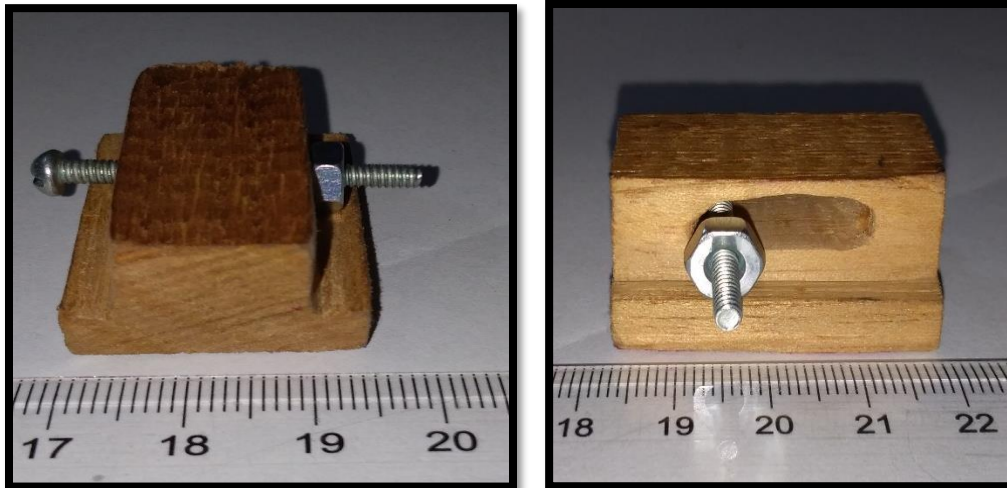


Figura 61. Componente 1 realizado en madera.

A continuación, se muestra el detalle individual del componente dos de porta muestra:

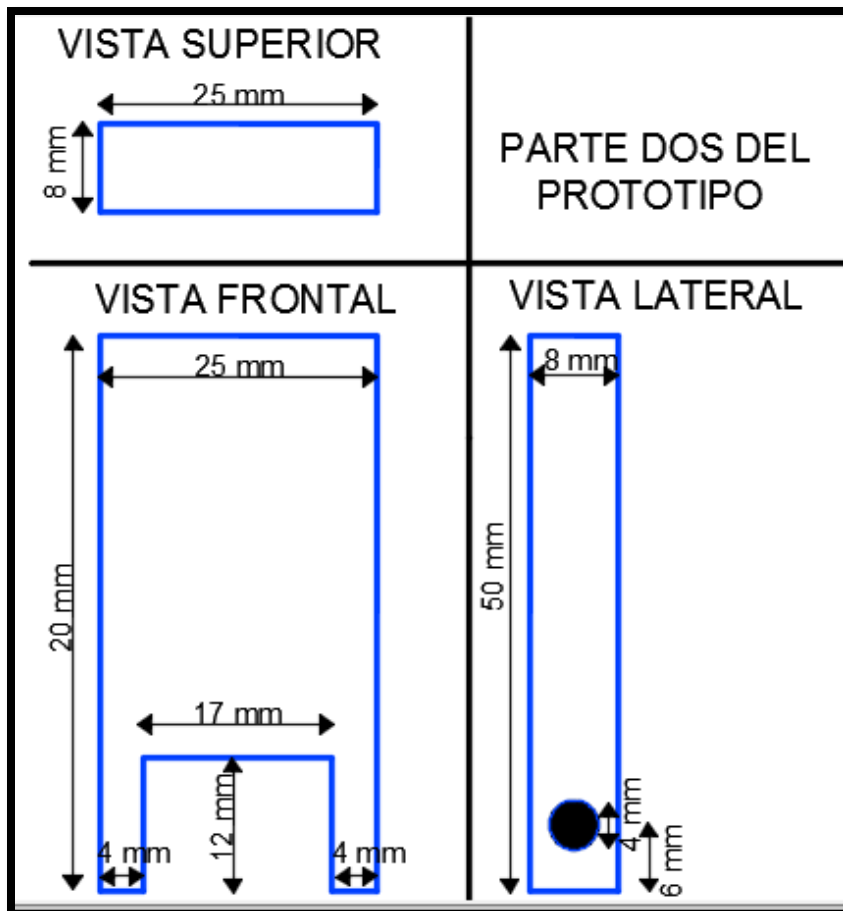
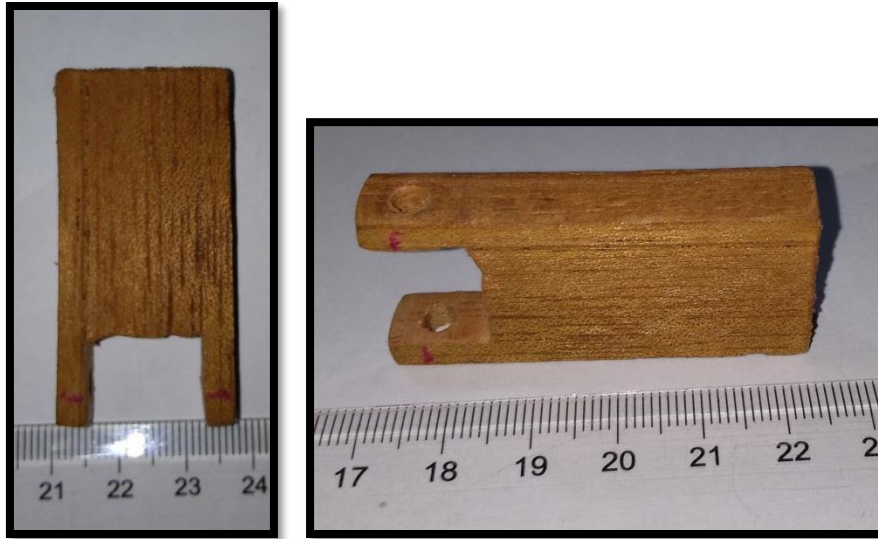


Figura 62. Detalle individual componente dos.



**Figura 63. Componente dos realizado en madera.**

A continuación, se presentan imágenes de los componentes ensamblados:



*Figura 64. Componente ensamblados 1*

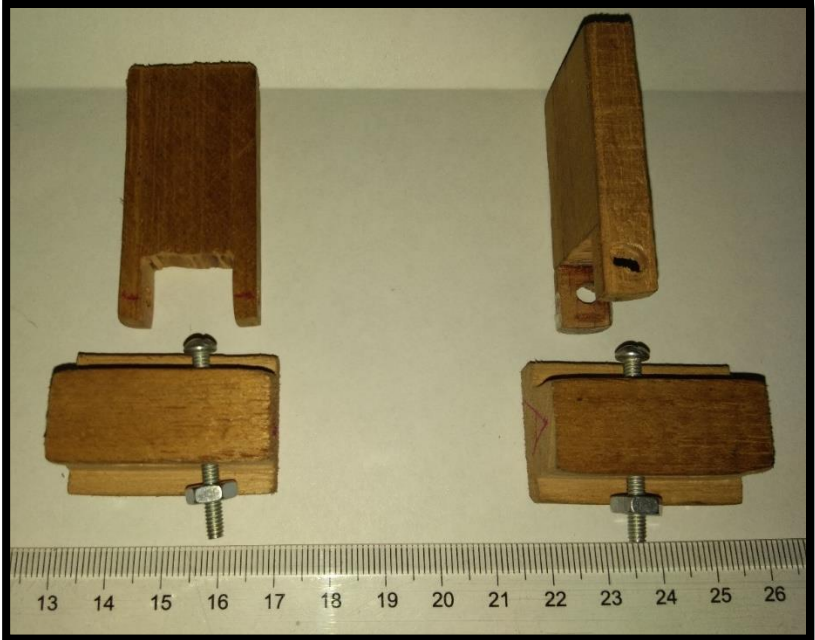


Figura 65. Componente ensamblados 2



Figura 66. Componente ensamblados 3