

DISEÑO DE VARIANTES PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE UN ENSAYO DE
FATIGA EN LIGANTES BITUMINOSOS

DIANA FERNANDA RIVERA FONCE
DEIBY ANDRÉS ROJAS LEAL

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
BUCARAMANGA

2019

DISEÑO DE VARIANTES PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE UN ENSAYO DE
FATIGA EN LIGANTES BITUMINOSOS

DIANA FERNANDA RIVERA FONCE
DEIBY ANDRÉS ROJAS LEAL

Trabajo de grado para optar el título de Ingeniero Civil

DIRECTOR
EDUARDO ALBERTO CASTAÑEDA PINZÓN
Doctorado en Ingeniería Civil

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
BUCARAMANGA

2019

DEDICATORIA

A Dios por permitirme culminar esta etapa, darme fortaleza en los momentos de adversidad y guiarme para tomar las mejores decisiones.

A mis padres Marina y Esau por la educación que me han brindado, por todas sus oraciones, amor y apoyo incondicional, a ustedes les debo todo lo que soy.

A mis hermanos por su cariño infinito, consejos y confianza.

A mis sobrinos por todo el amor y alegría que han traído a mi vida, son mi orgullo.

A las personas maravillosas que encontré en este camino, Vane, Jenni, Titi, Duvan, Ronaldo, Ferney, Diego y especialmente a Deiby, por su comprensión, confianza y paciencia durante este proyecto.

A los mejores amigos del mundo, Yan, Xime y Joseph, quienes han estado presentes brindándome su apoyo y amor incondicional.

A Juan José, el amor de mi vida, quien ha sido mi fuente de inspiración y mi mayor motivación para culminar esta etapa, A ti hijo hermoso te dedico este título con todo el amor del mundo, eres tú el mejor regalo de mi vida.

Diana Fernanda Rivera Fonce.

DEDICATORIA

A Dios que todo lo puede.

A mis padres por enseñarme el significado de cualquier triunfo en la vida, por su responsabilidad, honestidad, sinceridad y compromiso.

A mis hermanos que han sido personas importantes y me brindan su apoyo incondicional.

A mis amigos por ese apoyo mutuo en todo el proceso de formación académica.

Gracias.

Deiby Andrés Rojas Leal.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Industrial de Santander, por la formación profesional recibida.

Al profesor Eduardo Alberto Castañeda Pinzón, por su compromiso, acompañamiento y asesoría durante el desarrollo de este proyecto de investigación.

A los auxiliares de laboratorio por su colaboración.

A todas las personas que alguna manera contribuyeron con el desarrollo de este proyecto.

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	17
1. OBJETIVOS.....	19
1.1 OBJETIVO GENERAL	19
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	19
2. MARCO TEÓRICO	20
2.1 LIGANTE BITUMINOSO	20
2.2 FATIGA.....	20
2.3 ENSAYOS DE FATIGA DE CONCRETOS ASFÁLTICOS.....	21
2.4 ENSAYO DE FATIGA SOBRE LIGANTES BITUMINOSOS	24
2.4.1 Prueba de tensión / compresión.	24
2.4.2 Ensayo de flexión sobre ligantes bituminosos.	25
3. METODOLOGÍA	28
3.1 SELECCIÓN DE LA GEOMETRÍA DE LAS PROBETAS	28
3.2 ENSAYO A DEFORMACIÓN CONTROLADA	29
3.3 CÁLCULO DE LA DEFORMACIÓN UNITARIA	30
3.4 PREPARACIÓN DE ESPECÍMENES	31
3.5 EQUIPO Y MATERIALES	33
3.5.1. Equipo.....	33
3.5.2 Materiales	33
3.6 EJECUCIÓN DEL ENSAYO DE FATIGA.....	34
4. RESULTADOS.....	37
4.1 FASE L. ENSAYOS CON BITUMEN.	39

4.2 FASE LL. ENSAYOS CON ASFALTO OXIDADO.....	40
4.3 FASE LLL. ENSAYOS CON MÁSTICOS ASFALTICOS DE GRANO GRUESO	41
4.3.1 Ensayos sobre másticos de grano grueso composición 60-40.	42
4.3.1.1 Variación del módulo de rigidez de másticos asfálticos de grano grueso. .	43
4.3.2 Ensayos sobre másticos de grano grueso composición 70-30.	45
4.4 FASE LV. ENSAYOS CON MÁSTICOS ASFALTICOS FINOS.	45
5. CONCLUSIONES	49
6. RECOMENDACIONES	50
BIBLIOGRAFIA	51
ANEXOS	53

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Fases de degradación por fatiga en mezclas asfálticas.....	21
Figura 2. Función sinusoidal.	22
Figura 3. Variación de las solicitaciones en ensayo de fatiga a deformación controlada	23
Figura 4. Pruebas de laboratorio para caracterizar la resistencia a la fatiga en mezclas asfálticas.....	24
Figura 5. Diagrama prueba tensión/compresión.	25
Figura 6. Modelo de probeta propuesto por Galvis y Vega.	26
Figura 7. Modificaciones propuestas en la geometría de la probeta.	27
Figura 8. Probeta prismática propuesta.	29
Figura 9. Probeta cilíndrica propuesta.	29
Figura 10. Asfalto caliente	31
Figura 11. Moldes de silicona	32
Figura 12. Molde con bitumen.....	32
Figura 13. Probeta en estado sólido.	32
Figura 14. Maquina Metravib DMA+1000	33
Figura 14. Montaje de probetas	34
Figura 15. Montaje de probeta en el equipo.	37
Figura 16. Variación del grado de rigidez.	38
Figura 17. Porcentaje reducción de la rigidez probetas prismáticas.	39
Figura 18. Porcentaje reducción de la rigidez probetas cilíndricas.	40
Figura 19. Porcentaje reducción de la rigidez probeta prismáticas de asfalto oxidado.	41
Figura 20. Curva de fatiga probetas prismáticas con arena gruesa 60-40.....	42
Figura 21. Diagrama Módulo de Elasticidad- deformación probeta prismática.	43
Figura 22. Diagrama de Rigidez probeta prismática.	44

Figura 23. Diagrama Rigidez Metravib DMA+1000.....	44
Figura 24. Curva de fatiga probetas prismática con arena gruesa 70-30.	45
Figura 25. Porcentaje reducción de la rigidez probetas prismáticas con arena fina 60-40.....	46
Figura 26. Porcentaje reducción de la rigidez probetas cilíndricas con arena fina 60-40.....	47

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Dimensiones Modelo experimental.	26
Tabla 2. Especificaciones técnicas arena de grano grueso.	34
Tabla 3. Especificaciones técnicas arena de grano fino.	34

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
Anexo A. Manual de Procedimiento para la Preparación de Especímenes de un Ensayo de Fatiga Sobre Ligantes Bituminosos	53
Anexo B. Manual de Programacion para el Ensayo de Fatiga Sobre Ligantes Bituminosos en la Maquina Metravib DMA+1000	57

RESUMEN

TITULO: DISEÑO DE VARIANTES PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE UN ENSAYO DE FATIGA EN LIGANTES BITUMONOSOS.*

AUTOR: DIANA FERNANDA RIVERA FONCE, DEIBY ANDRÉS ROJAS LEAL**

PALABRAS CLAVES: FATIGA, LIGANTE BITUMINOSO, TRACCIÓN-COMPRESIÓN, RIGIDEZ.

DESCRIPCIÓN:

Este documento presenta un procedimiento experimental para realizar ensayos de fatiga mecánica sobre ligantes bituminosos. Las pruebas fueron ejecutadas en los laboratorios de la Universidad Industrial de Santander. La metodología del ensayo consiste en someter a tracción-compresión probetas de ligante bituminoso con diferentes sollicitaciones, aplicando ciclos de carga sobre las probetas, por medio de un ensayo de deformación controlada y constante, este procedimiento permite analizar el comportamiento del material frente a la fatiga y estudiar la reducción de la rigidez del ligante. En este trabajo se da a conocer un protocolo para la implementación de un ensayo de fatiga en ligantes bituminosos, en donde se presenta, una ecuación para determinar el módulo de elasticidad en función de la fuerza aplicada y la deformación implantada, la metodología realizada en la ejecución sobre probetas con diferentes geometrías y modificaciones en los materiales, para lograr evaluar la repetibilidad en el resultado de los ensayos practicados y se comprueba que el material se encuentre en el rango elástico-lineal. A su vez, se evidencian los resultados obtenidos, el análisis de los mismos y las principales conclusiones de la investigación, adicionalmente se presentan recomendaciones para futuras investigaciones que pretendan evaluar la resistencia a la fatiga de ligantes bituminosos, y que tengan como precedente teórico el protocolo presentado.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Director: Eduardo Alberto Castañeda Pinzón. Doctorado en Ingeniería Civil.

ABSTRACT

TITULO: DESIGN OF VARIANTS FOR THE IMPLEMENTATION OF A FATIGUE TEST ON BITUMINOUS BINDERS.*

AUTOR: DIANA FERNANDA RIVERA FONCE, DEIBY ANDRÉS ROJS LEAL**

PALABRAS CLAVES: FATIGUE, BITUMINOUS BINDER, TRACCION-COMPRESSION, STIFFNESS.

DESCRIPCIÓN:

This document presents an experimental procedure for fatigue testing of bituminous binders. The tests were carried out in the laboratories of the Industrial University of Santander. The test methodology consists of subjecting bituminous binder specimens to traction-compression at different stresses, applying load cycles to the specimens, by means of a controlled and constant deformation test. This procedure makes it possible to analyse the behaviour of the material in the face of fatigue and to study the reduction of the binder stiffness. This paper presents a protocol for the implementation of a fatigue test on bituminous binders, where it is presented, an equation to determine the module of elasticity based on the applied force and deformation implanted, the methodology carried out in the execution of the test on specimens with different geometries and modifications of materials is presented, in order to evaluate the repetibilidad in the result of the tests carried out and it is verified that the material is in the elastic-linear range. At the same time, the results obtained, their analysis and the main conclusions of the investigation are evidenced. In addition, recommendations are presented for future investigations that aim to evaluate the fatigue resistance of bituminous binders, and that have as a theoretical precedent the protocol presented.

* Bachelor Thesis

** Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Director: Eduardo Alberto Castañeda Pinzón. Doctorado en Ingeniería Civil.

INTRODUCCIÓN

En los últimos años las investigaciones sobre los fenómenos de fatiga en mezclas de asfalto o ligantes bituminosos han ido incrementado, sin embargo, en el contexto nacional aún no existen suficientes investigaciones sobre los fenómenos que se producen en los asfaltos durante su funcionamiento, ya que ha sido limitado por escasez de equipo y poco presupuesto para la investigación¹.

El fenómeno de fatiga es una de las principales causas del daño de las mezclas bituminosas empleadas en la construcción de pavimentos, de ahí la importancia de su estudio. Este fenómeno se presenta cuando los materiales que conforman la estructura del pavimento sufren algún tipo de agrietamiento o fisuración al ser sometido a repeticiones de carga, es decir la falla relaciona la deformación de la estructura con el número de repeticiones².

Múltiples autores han evaluado este fenómeno que se produce en el pavimento durante su funcionamiento mediante la ejecución de ensayos en el laboratorio con aplicación de tensiones, deformaciones o desplazamientos controlados.

Realizar modelos que se ajusten a las condiciones de esfuerzos al que se encuentra sometido el material para medir la resistencia a la fatiga, puede caracterizar de forma casi precisa el comportamiento de mezclas asfálticas en campo, ya que una de las variables que más afecta el comportamiento de la mezcla asfáltica es la calidad del ligante bituminoso.

¹ GALVIS, Jeisson; y VEGA, Ingrid. Concepción de un ensayo de fatiga sobre ligantes bituminosos. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander, 2016.

² PEREZ-JIMÉNEZ, Félix Edmundo, et al. Evaluación del proceso de fatiga de mezclas asfálticas mediante un nuevo procedimiento cíclico de deformaciones-EBADE. En: Revista de la construcción, 2011, vol. 10, no. 2, pp. 55-65.

Lo ideal sería incluir dentro de los parámetros que caracterizan los ligantes bituminosos los ensayos de fatiga, dado que seguramente la resistencia a la fatiga de los concretos asfálticos depende significativamente de la resistencia a la fatiga de los ligantes bituminosos³.

En el artículo *Concepción de un ensayo de fatiga sobre ligantes bituminosos*⁴, investigación que expone los efectos de una prueba preliminar realizada bajo parámetros definidos y elementos diseñados con el propósito de evaluar el módulo de Young en probetas elaboradas con ligantes asfálticos, muestran la metodología y elementos necesarios para la implementación de la práctica. En la realización de las pruebas en *Puesta a punto de un ensayo de fatiga*⁵, los autores dan a conocer el protocolo experimental acompañado de la preparación de las muestras montaje, desarrollo del ensayo, obtención y análisis de resultados, donde sugieren que se realicen cambios al ensayo en la geometría de la probeta y en modificaciones del porta muestras.

Con base en los estudios previos por los autores nombrados, y con el propósito de diseñar una probeta apta para un ensayo de fatiga sobre ligantes bituminosos se hace un nuevo montaje del ensayo con diversas modificaciones que consisten en, cambio del tipo de ensayo, geometría de las probetas y la incorporación de materiales granulares. Basado en los ensayos realizados se propone un protocolo para realizar pruebas de fatiga sobre ligantes bituminosos.

³ AYALA, Yelitza; GARNICA, Paul; y DELGADO, Horacio. Efecto de la Temperatura en la Evaluación de la Fatiga en Ligantes Asfálticos. En: *Infraestructura Vial*, 2016, vol. 18, no. 31, pp. 05-13.

⁴ GALVIS y VEGA, Óp. Cit.

⁵ CUADROS, Karla; y HURTADO, Carlos. *Puesta a punto de un ensayo de fatiga sobre ligantes bituminosos*. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander, 2018.

1. OBJETIVOS

1.1 OBJETIVO GENERAL

Diseñar las modificaciones e implementar los ajustes de un ensayo de fatiga mecánica sobre ligantes bituminosos.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Modificar las probetas y el portamuestras del ensayo de fatiga en bitúmenes con dimensiones adaptadas a la maquina DMA Metravib, para una adecuada realización del ensayo.
- Ejecutar el ensayo de estudio de fatiga de ligantes bituminosos sobre muestras de asfaltos puros y másticos asfálticos.
- Validar los resultados del ensayo de fatiga mediante su correspondencia con valores de rigidez de los asfaltos.

2. MARCO TEÓRICO

2.1 LIGANTE BITUMINOSO

El ligante bituminoso es el residuo no destilable resultante de la destilación del petróleo y es el material mediante el cual se mantienen los agregados unidos en una mezcla asfáltica⁶.

2.2 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, aunque éstos sean inferiores al valor de cedencia⁷.

Se puede estudiar el fenómeno de fatiga observando los cambios que se producen en la rigidez del material con la aplicación de esfuerzos repetidos.

En las mezclas asfálticas, las repeticiones de carga inducen la generación de microfisuras en el material. Con la repetición de dichas cargas, se generan fisuras mayores que se propagan a todo el material⁸.

De acuerdo con Baaj H, Di Benedetto H; Chaverot P. (2013)⁹, durante el proceso de agrietamiento por fatiga se distinguen tres fases. (Figura 1)

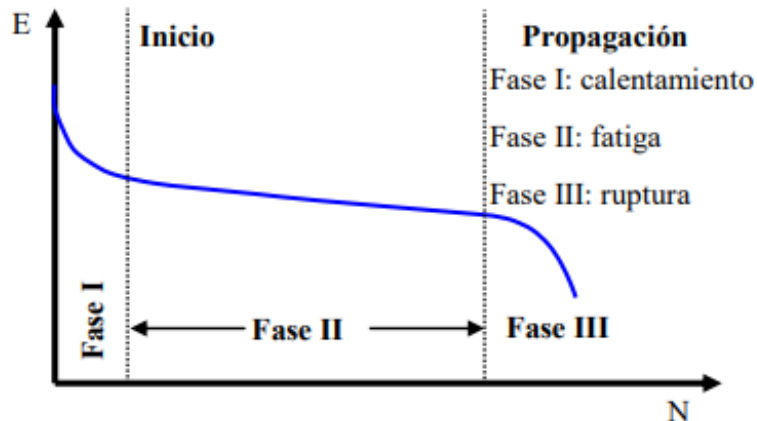
⁶ LLANO MUÑOZ, José Luis. Efecto de los agregados en el envejecimiento de la mezcla asfáltica. Santiago de Cali: Pontificia Universidad Javeriana, 2017.

⁷ GONZÁLES, Silvia; y VELANDIA, Siul. Estado del arte en el estudio de la fatiga de materiales bituminosos. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander, 2006.

⁸ RONCALLO, Sandra; y BAUTISTA, Freddy. Desempeño a fatiga y ahuellamiento de mezclas en servicio en la ciudad de Bogotá, comparadas con mezclas envejecidas en el laboratorio Cámara UV. Bogotá D.C: Pontificia Universidad Javeriana, 2013.

⁹ BAAJ, H; DI BENEDETTO, H; y CHAVEROT, P. Effect of binder characteristics on fatigue of asphalt pavement using an intrinsic damage approach: Road material pavement. Waterloo, Canada: University of Waterloo, 2013.

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



Fuente: FLORES FLORES, Mayra; DELGADO ALAMILLA, Horacio, GARNICA ANGUAS, Paul. Determinación de la resistencia a la fatiga en mezclas asfálticas. Investigación Instituto Mexicano del Transporte.

Fase I: Por tratarse de un material visco elástico, al deformarse repetidamente, parte de la energía se disipa como calor, provocando aumento en la temperatura del material, como el ligante asfáltico es un material que cambia su consistencia con la temperatura, la rigidez del material disminuye, pero esta reducción no está asociada a un deterioro de la capacidad mecánica del material.

Fase II: En esta fase la reducción de la rigidez está controlada principalmente por la fatiga del material, se forman micro fisuras.

Fase III: Ocurre una falla global y la unión de estas micro-fisuras forman una grieta¹⁰.

2.3 ENSAYOS DE FATIGA DE CONCRETOS ASFÁLTICOS

Los ensayos experimentales para determinar la fatiga se pueden realizar de diferentes maneras:

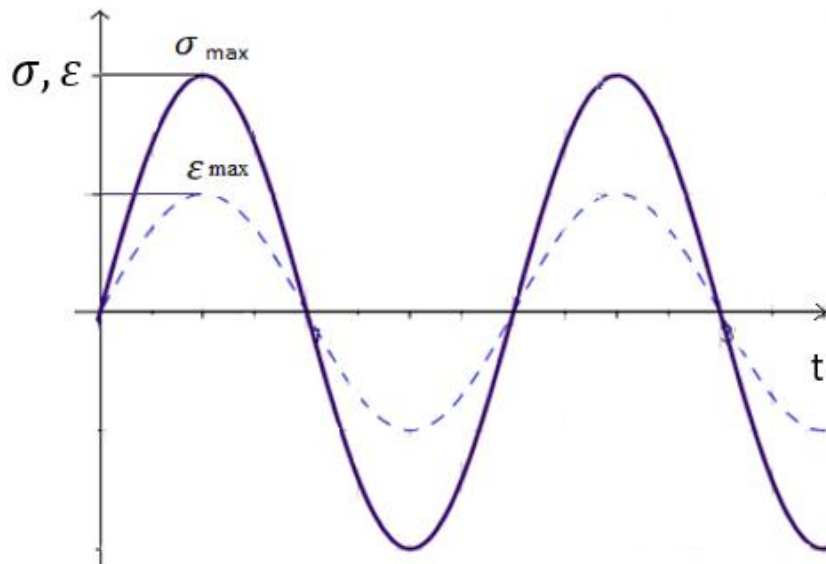
¹⁰ FLORES, Mayra; DELGADO, Horacio; y GARNICA, Paul. Determinación de la resistencia a la fatiga en mezclas asfálticas. Investigación Instituto Mexicano del Transporte.

- **Ensayo a esfuerzo controlado**
- **Ensayo a deformación controlada**

En el ensayo de fatiga a esfuerzo controlado se somete una probeta a ciclos de carga con amplitud de esfuerzo constante mientras que en el ensayo a deformación controlada en cada ciclo de carga se controla la deformación de la probeta, la cual debe ser constante.

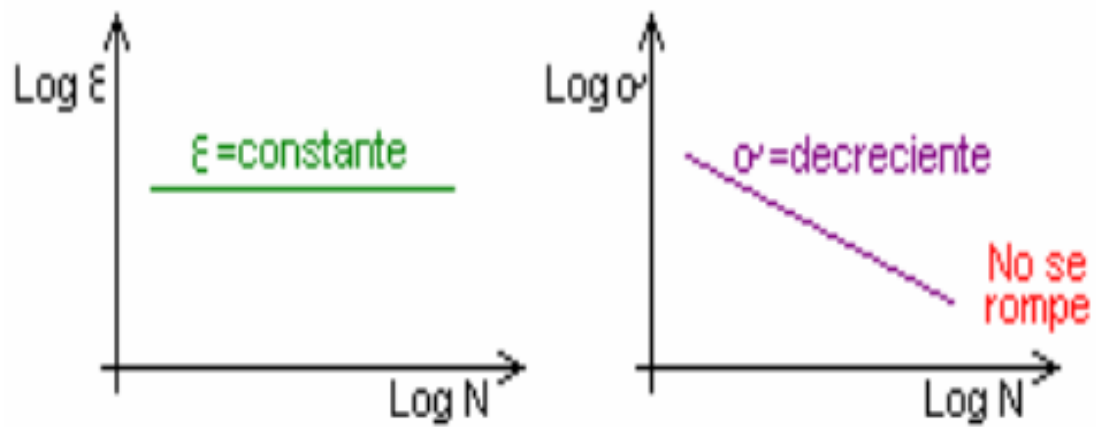
En cada ciclo de carga la probeta se somete a una sollicitación que varía en el tiempo, las formas de variación más usualmente empleadas son de cargas que varían como una función sinusoidal en el tiempo de la magnitud deformación aplicada.

Figura 2. Función sinusoidal.



En la figura 2 se evidencia el esfuerzo (σ) y deformación máxima (ϵ_{max}), y en la figura 3 se observa que la deformación máxima siempre es constante respecto al número de ciclos. (Ensayo de deformación controlada).

Figura 3. Variación de las solicitaciones en ensayo de fatiga a deformación controlada



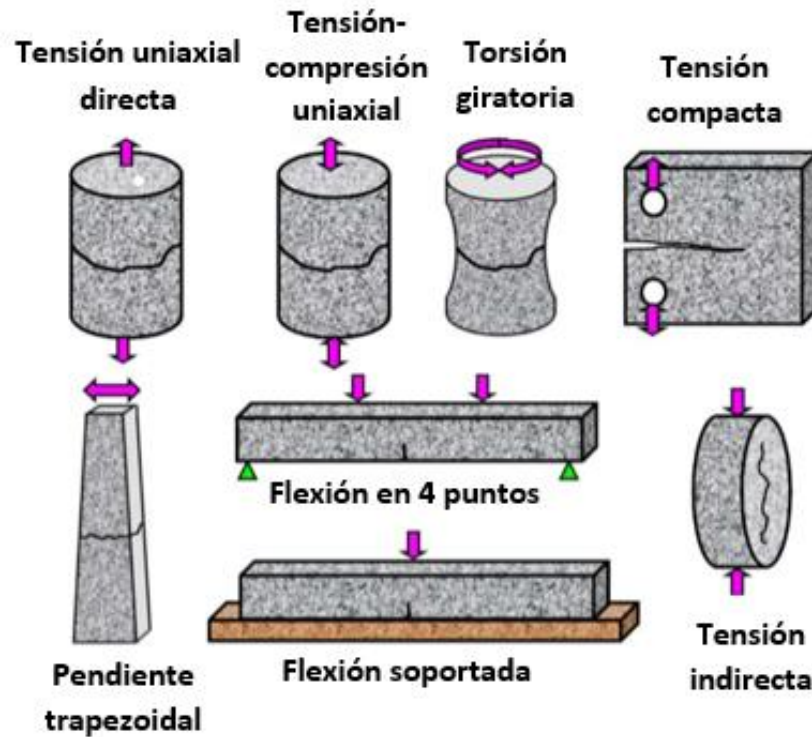
Fuente: GONZÁLES RODRÍGUEZ, Silvia Viviana; VELANDIA ARGÜELLO, Siul Enith. Estado del arte en el estudio de la fatiga de materiales bituminosos. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander, 2006.

Los principales métodos empleados para la evaluación de la vida útil de la fatiga de las mezclas de asfalto son: tensión uniaxial directa, tensión-compresión uniaxial, torsión giratoria, flexión en 4 puntos y trayectoria de la rueda, entre otros¹¹.

La figura 4, presenta diagramas esquemáticos que muestran la mayoría de las pruebas de fatiga disponibles actualmente.

¹¹ QABUR, Ali. Fatigue Characterization of Asphalt Mixes with Polymer Modified Asphalt Cement. Waterloo, Canada: University of Waterloo, 2018.

Figura 4. Pruebas de laboratorio para caracterizar la resistencia a la fatiga en mezclas asfálticas.



Fuente: QABUR, Ali. Fatigue Characterization of Asphalt Mixes with Polymer Modified Asphalt Cement. University of Waterloo, Canadá, 2018.

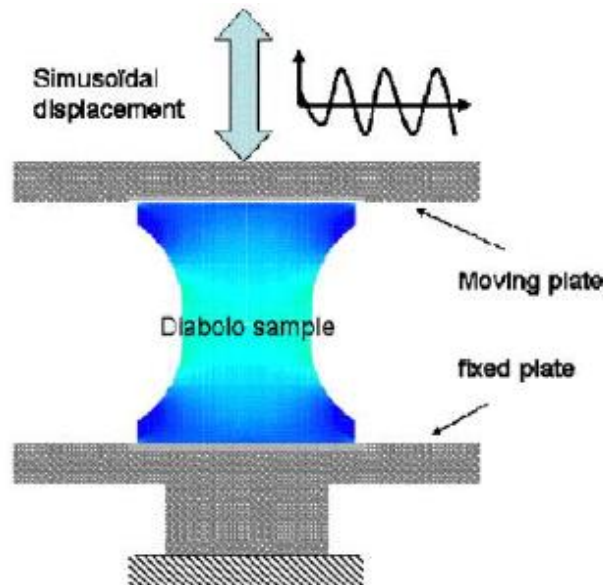
2.4 ENSAYO DE FATIGA SOBRE LIGANTES BITUMINOSOS

Se han propuesto diferentes tipos de pruebas para estudiar el comportamiento de fatiga del bitumen.

2.4.1 Prueba de tensión / compresión. E. Chailleux propone un ensayo para estudiar el comportamiento de fatiga del bitumen, a través de esfuerzos uniaxiales generados con carga de tensión-compresión¹².

¹² CHAILLEUX, Emmanuel, et al. Fatigue behaviour of bitumen in tension-compression loading mode: Rheological analysis and comparison with mix fatigue. France: Advanced Testing and Characterization of bituminous Materials, 2009.

Figura 5. Diagrama prueba tensión/compresión.



Fuente: CHAILLEUX, Emmanuel, *et al.* Fatigue behaviour of bitumen in tensión-compression loading mode: Rheological analysis and comparison with mix fatigue. Advanced Testing and Characterization of bituminous Materials, France, 2009.

En la realización de este ensayo de fatiga se aplican ciclos de carga en los que se controla la deformación de la probeta, al aplicar esfuerzos de compresión y de tracción.

En esta prueba se utiliza un ciclo de carga sinusoidal que puede llegar a simular un pulso de carga similar al observado en campo (compresión/tensión/compresión)¹³.

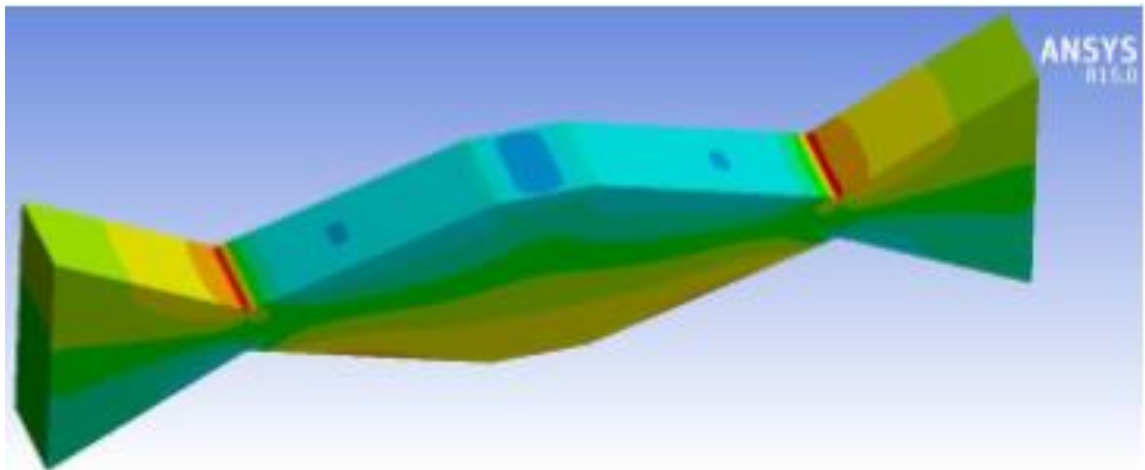
2.4.2 Ensayo de flexión sobre ligantes bituminosos. Con el propósito de clasificar los ligantes bituminosos según su resistencia a la fatiga, Galvis Flórez y Vega Jiménez¹⁴, describen el procedimiento de un estudio de fatiga que busca generar una nueva alternativa de ensayo de flexión por deformación controlada,

¹³ WITCZAK, Matthew. Project N° NCHRP 9-44a Validating an endurance Limit for HMA pavements: Laboratorty Experiment and Algorithm Development. Washington: National cooperative highway research program transportation research board of the national academies, 2013.

¹⁴ GALVIS y VEGA, Óp. Cit.

donde se plantea una probeta con sus extremos empotrados, que imponen a que la geometría del elemento se presente variada para que los esfuerzos y deformaciones no actúen en sus apoyos (Tabla 1).

Figura 6. Modelo de probeta propuesto por Galvis y Vega.



Fuente: GALVIS FLÓREZ, Jeisson Eduardo; VEGA JIMÉNEZ, Ingrid Katherine. Concepción de un ensayo de fatiga sobre ligantes bituminosos. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. (2016).

Tabla 1. Dimensiones Modelo experimental.

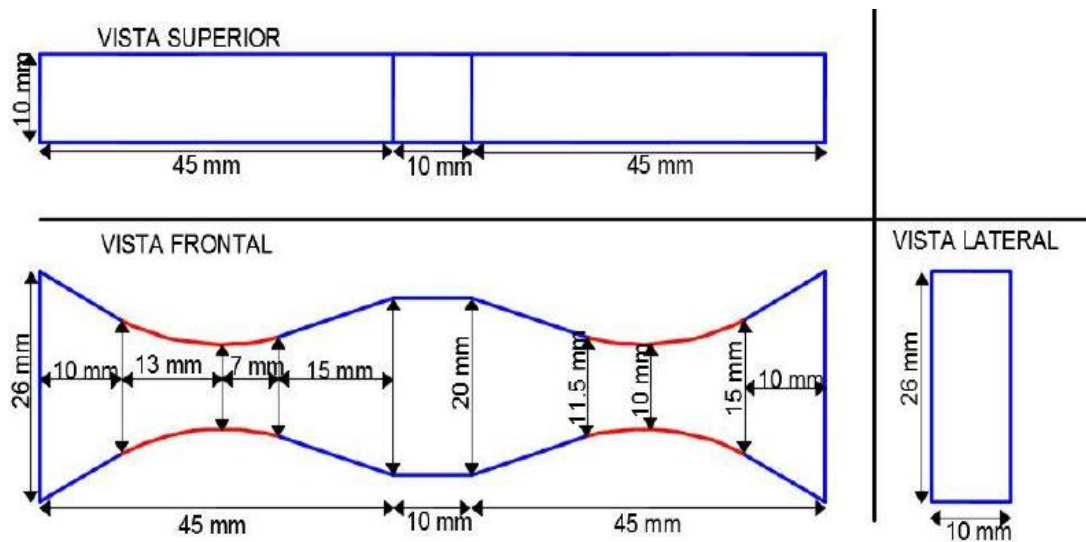
Largo de la probeta	100 mm
Ancho de la probeta	10 mm
Altura en los extremos	26 mm
Altura en el punto medio	20 mm
Altura en la zona de falla	5 mm

Fuente: GALVIS FLÓREZ, Jeisson Eduardo; VEGA JIMÉNEZ, Ingrid Katherine. Concepción de un ensayo de fatiga sobre ligantes bituminosos. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. (2016).

Cuadros López y Hurtado Martínez¹⁵ presentan el primer montaje experimental del ensayo ideado por Galvis y Vega¹⁶, en este documento se expone la metodología, los ensayos realizados, análisis de resultados obtenidos, ventajas y desventajas del procedimiento, como resultado de las observaciones realizadas en el laboratorio.

Adicionalmente en la investigación realizada por cuadros y hurtado, se observó que, debido a la geometría variable de la probeta, el material sufría deformaciones que alteraban el comportamiento durante la ejecución del ensayo. Debido a esto se sugieren cambios en la geometría de la probeta y portamuestras, modificaciones que se presentan en la figura 7.

Figura 7. Modificaciones propuestas en la geometría de la probeta.



Fuente: CUADROS LÓPEZ, Karla Patricia; HURTADO MARTÍNEZ, Carlos David. Puesta a punto de un ensayo de fatiga sobre ligantes bituminosos. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander, 2018.

¹⁵ CUADROS y HURTADO, Óp. Cit.

¹⁶ GALVIS y VEGA, Óp. Cit.

3. METODOLOGÍA

A continuación se describe el procedimiento realizado para evaluar el fenómeno de fatiga sobre ligantes bituminosos.

3.1 SELECCIÓN DE LA GEOMETRÍA DE LAS PROBETAS

Considerando la geometría de la probeta propuesta por Cuadros y Hurtado, se llega a la conclusión de que el montaje de la probeta es complicado y las alteraciones que puedan darse durante el mismo, por muy pequeñas que parezcan, afectaran los resultados de la prueba. Por esta razón en esta investigación se propone una probeta con geometría más sencilla, lo cual implica el cambiar el tipo de ensayo de flexión a un ensayo de tracción-compresión.

El cambio del tipo de ensayo sugiere que para el montaje de las probetas se utilicen las placas originales de ajuste del equipo, esto significa que el portamuestras adecuado para realizar la prueba es el que posee la máquina para ensayos de tracción-compresión.

Se probaron dos tipos de probetas (Figuras 8 y 9) con sección transversal variable, con el propósito de lograr una zona de falla claramente definida.

Figura 8. Probeta prismática propuesta.

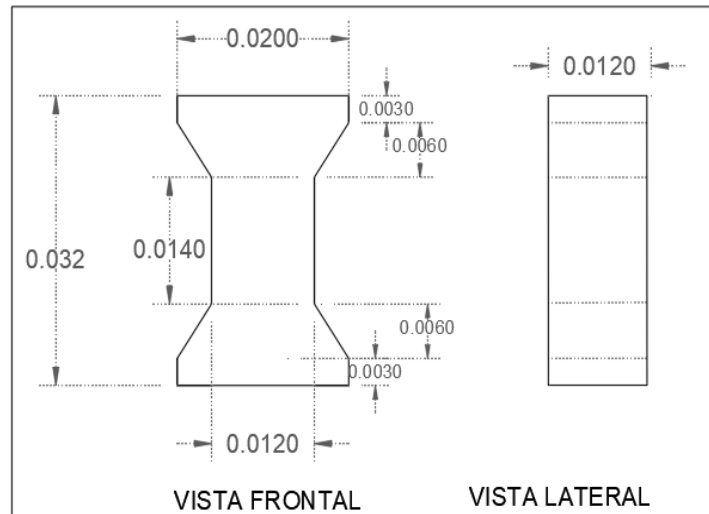
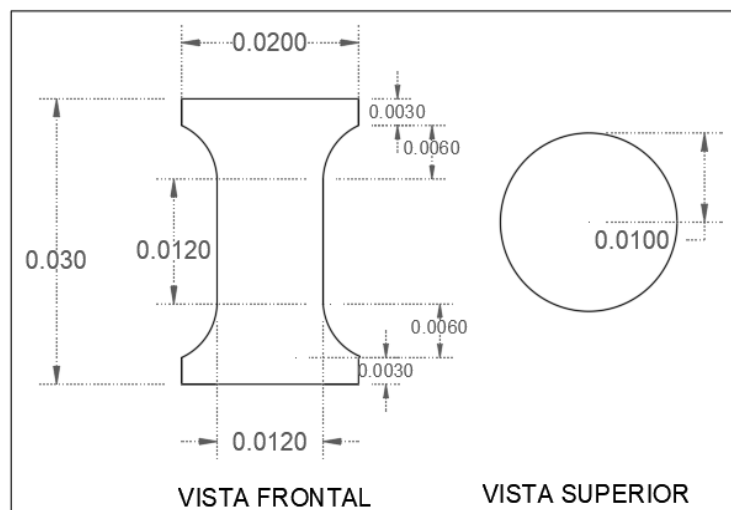


Figura 9. Probeta cilíndrica propuesta.



3.2 ENSAYO A DEFORMACIÓN CONTROLADA

Se ejecutaron ensayos a deformación controlada. En este ensayo de fatiga se aplican ciclos de carga con deformación constante a la probeta, en cada repetición se requiere calcular el módulo de rigidez del material, a continuación, se deducen las ecuaciones que permiten hacerlo.

Con base en la ley de Hooke,

$$\sigma = E * \varepsilon \quad (1)$$

En donde σ corresponde al esfuerzo, E es el módulo de rigidez y ε es la deformación unitaria.

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (2)$$

Y la deformación unitaria longitudinal,

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} \quad (3)$$

Teniendo en cuenta la variación de la sección transversal de las probetas respecto a la longitud y reemplazando las ecuaciones 1,2 y 3, se establece la siguiente integral

$$E = \int_0^{\ell} \frac{F dy}{\Delta * A(y)} \quad (4)$$

Conociendo variables como, F (fuerza), L (longitud), Δ (desplazamiento) y A (área de la sección transversal), al resolver la anterior integral, se obtienen las expresiones para calcular el módulo de rigidez E en las probetas prismática y cilíndrica.

Ecuación probeta prismática

$$E = 186,1 \frac{F}{\Delta} \quad (5)$$

Ecuación probeta cilíndrica

$$E = 194,7 \frac{F}{\Delta} \quad (6)$$

3.3 CÁLCULO DE LA DEFORMACIÓN UNITARIA

Aplicando principios de la mecánica de materiales se logró determinar la relación entre el desplazamiento impuesto Δ y la deformación unitaria ε en la zona de falla.

$$\Delta = k * \varepsilon \quad (7)$$

En donde ε es la deformación unitaria longitudinal y Δ es el desplazamiento introducido en la máquina.

k : es igual a 0.02197 y 0.02679 para la probeta cilíndrica y prismática respectivamente.

$$\Delta = 0.02197 * \varepsilon \quad (8)$$

$$\Delta = 0.02679 * \varepsilon \quad (9)$$

3.4 PREPARACIÓN DE ESPECÍMENES

El montaje se realizó según la metodología propuesta en el presente documento, “Manual de procedimiento para la preparación de especímenes de ensayo de fatiga sobre ligantes bituminosos” (Anexo A).

El procedimiento consiste en calentar el bitumen hasta conseguir un estado líquido, supervisando que la temperatura no supere los 150 °C.

Figura 10. Asfalto caliente



Seguidamente se vierte el bitumen en moldes de silicona adaptados a las geometrías expuestas anteriormente (Figura 11).

Figura 11. Moldes de silicona



Se deja reposar la mezcla por aproximadamente 20 minutos y posteriormente se conserva la probeta a baja temperatura ($0^{\circ}\pm 5$) por 20 minutos más.

Figura 12. Molde con bitumen.



Cuando el asfalto se encuentra en un estado de mayor consistencia se procede a retirar la probeta del molde.

Figura 13. Probeta en estado sólido.



3.5 EQUIPO Y MATERIALES

3.5.1. Equipo. El equipo para el montaje de la prueba es una maquina Dynamique Mechanical Analyser (DMA).

Figura 14. Maquina Metravib DMA+1000



La capacidad que tiene el equipo Metravib DMA+1000 de generar fuerza sobre un elemento para originar una deformación se encuentra en el rango de 10 [N/m] y 10E+6 [N/m], la frecuencia con el que el equipo es capaz de suministrar la carga varía desde 5[Hz] hasta 1000 [Hz].

3.5.2 Materiales

- Bitumen convencional 60/70.
- Asfalto oxidado, también conocido como brea asfáltica.
- Arena normalizada de grano grueso.

Tabla 2. Especificaciones técnicas arena de grano grueso.

Nombre	Sikadur 506
Tipo Arena	Gruesa
Tamaño [mm]	0,84-1,0
Gradación	Pasa tamiz N° 18, retiene N°20
Forma de los granos	Redondeados.

- **Arena normaliza de grano fino**

Tabla 3. Especificaciones técnicas arena de grano fino.

Nombre	Sikadur 504
Tipo Arena	Fina
Tamaño [mm]	0,075-0,15
Gradación	Pasa tamiz N° 100, retiene N°200
Forma de los granos	Redondeados.

3.6 EJECUCIÓN DEL ENSAYO DE FATIGA

El primer paso para la ejecución del ensayo era el montaje de especímenes en la máquina, pegando los extremos de la probeta a las placas de la maquina con pegamento instantáneo, para simular un empotramiento de la probeta, como se indica en la figura 14.

Figura 14. Montaje de probetas



Posteriormente al montaje de especímenes se procede con la programación para realizar el ensayo sometiendo las probetas a cargas alternadas de tracción y compresión. La programación de la máquina Metravib DMA+1000 se encuentra en el anexo B; en este documento se indica el paso a paso que se debe seguir para realizar el ensayo.

El comportamiento en fatiga del bitumen fue estudiado en 34 probetas de asfalto convencional 60/70, divididas en 4 fases con diferentes condiciones.

La fase I consistió en ensayar 3 probetas prismáticas y 3 probetas cilíndricas fabricadas, bajo las siguientes condiciones:

Material: Bitumen convencional 60/70

Número de ciclos de carga: 30000

Frecuencia: 10 Hz

Temperatura: Ambiente (22°-23°)

Deformación impuesta: 3000, 5000, 7000 micrómetros/metro.

En la Fase II se ejecutaron ensayos con asfalto oxidado, con el propósito de que las probetas alcanzaran la falla más rápida, dado que este es un material que se fatiga más fácilmente. En este grupo se ensayaron 6 probetas manteniendo las deformaciones, frecuencia y el número de ciclos.

En los ensayos realizados en la fase II las probetas no alcanzaron la falla. Para tratar de reducir el tiempo se decidió trabajar con probetas que incluyeran asfalto mezclado con agregado que permitiera aumentar la rigidez de la probeta y así lograr una falla en fatiga en menor cantidad de tiempo.

En la fase III, las probetas se fabricaron con un alto contenido de asfalto, ocupando 60-70% del volumen y un contenido de agregado de 30- 40% del volumen total de

la probeta. Se seleccionó un alto volumen de bitumen para garantizar una probeta sin contenido de aire. Se realizaron varias pruebas para verificar la repetibilidad de los resultados.

De los anteriores ensayos se evidenció que la mejor relación era 60% bitumen y 40% arena, ya que las probetas falladas con un volumen mayor de bitumen presentaban un incremento en la rigidez del material alrededor de los 10000 ciclos; por lo cual, en la fase IV, 12 probetas fueron ensayadas con las siguientes condiciones:

Material: Bitumen convencional 60/70 mezclado con material granular fino

Número de ciclos de carga: 100000

Frecuencia: 10 Hz

Temperatura: Ambiente

Deformación impuesta: 100, 300, 500, 3000, 5000, 7000 micrómetros/metro.

En las primeras pruebas el rango de temperatura en el que se ejecutó el ensayo, la temperatura estuvo entre 21°C y 23°C, por lo que se controló la hora de realización del ensayo para que la temperatura no tuviera una variación importante.

4. RESULTADOS

En el ensayo, el equipo induce ciclos de carga repetidos en los que en cada segundo se aplican 10 ciclos de esfuerzo, controlando la deformación que sucede en la probeta.

Figura 15. Montaje de probeta en el equipo.



Como resultado, el equipo informa la fuerza y el desplazamiento en cada ciclo, y con base en estos datos se determina la rigidez, asumiendo que el material es de comportamiento elástico- lineal.

Se realiza el cálculo del módulo de rigidez tanto para la probeta prismática y cilíndrica con las ecuaciones 5 y 6 respectivamente. A continuación, se presenta un cálculo tipo del módulo de rigidez para cada una de las probetas, con deformación unitaria de 7000 micrómetro/metro, con un desplazamiento de 0,0019 m y 0.0015 m para la probeta prismática y cilíndrica respectivamente.

✓ **Probeta prismática**

$$E = 186,1 \frac{F}{\Delta}$$

$$E = 186,1 * \frac{31,86}{0,00019} = 3,12E7$$

$$E = 3.12E7 \frac{N}{m^2}$$

✓ **Probeta cilíndrica**

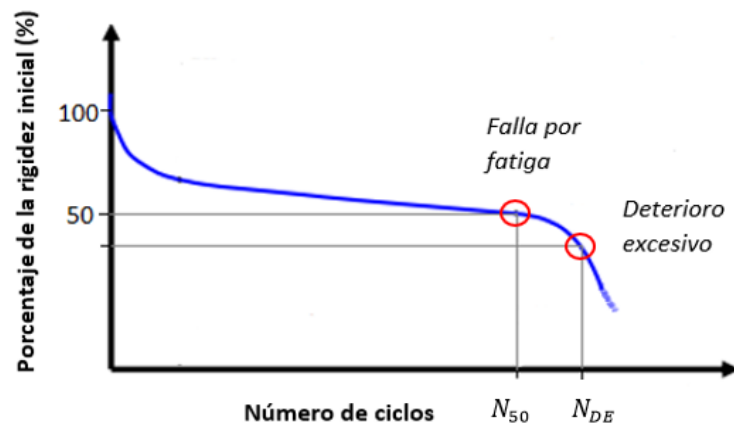
$$E = 194,7 \frac{F}{\Delta}$$

$$E = 194,7 * \frac{24,34}{0,00015} = 3,16E7$$

$$E = 3.16E7 \frac{N}{m^2}$$

Con los resultados que se obtienen a partir de las ecuaciones se puede construir la siguiente gráfica.

Figura 16. Variación del grado de rigidez.



En los concretos asfálticos normalmente se considera que un material ha fallado cuando la rigidez se ha reducido al 50% de la rigidez inicial¹⁷.

Otro criterio que se podría considerar es el número de ciclos necesarios para que se produzca una inflexión en la curva y el deterioro aumente de manera excesiva.

¹⁷ PEREZ-JIMÉNEZ, et al. Óp. Cit.

4.1 FASE L. ENSAYOS CON BITUMEN.

Como se puede evidenciar en las figuras 17 y 18, en donde se indica la variación de la rigidez para las probetas prismáticas y cilíndricas respectivamente, la rigidez inicia disminuyendo gradualmente hasta llegar al 45%- 80% de la rigidez inicial y cerca a los 12000 ciclos, las curvas empiezan a aumentar, lo cual se considera que no es un comportamiento normal en ensayo de fatiga.

Figura 17. Porcentaje reducción de la rigidez probetas prismáticas.

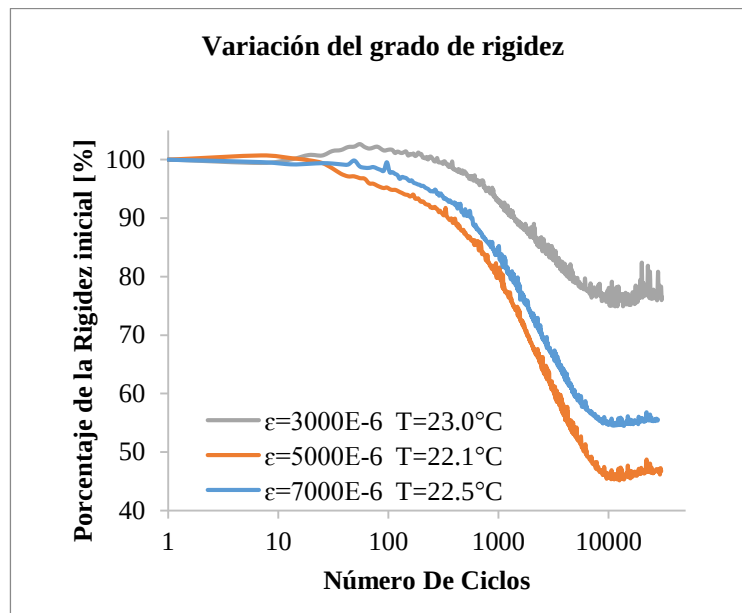
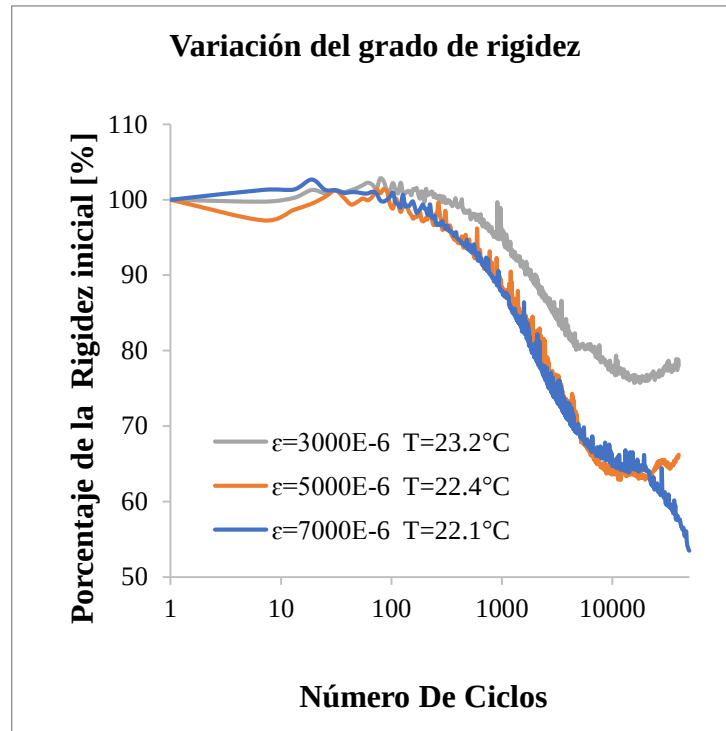


Figura 18. Porcentaje reducción de la rigidez probetas cilíndricas.

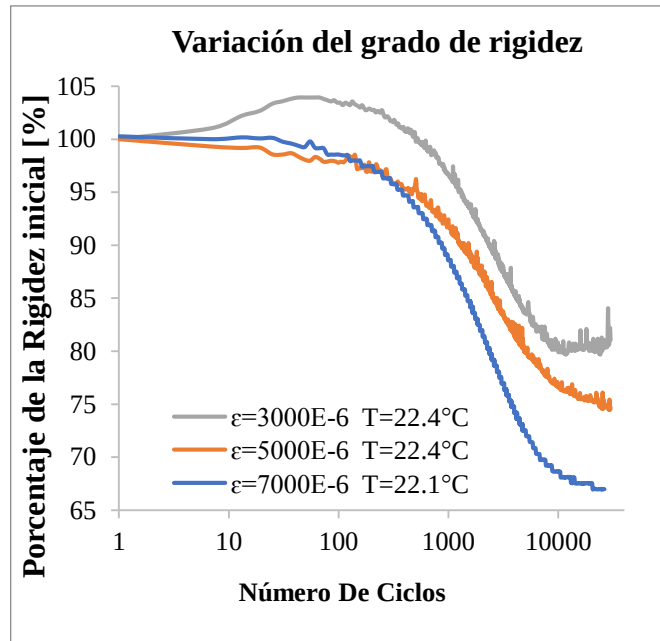


Considerando las observaciones realizadas en los ensayos con bitumen, se resolvió modificar la prueba.

4.2 FASE LL. ENSAYOS CON ASFALTO OXIDADO

Se estudiaron también asfaltos conocidos por tener una baja resistencia a la fatiga, con los cuales se logró verificar la repetibilidad de resultados. En esta fase los resultados presentan coherencia inicialmente, no obstante, en una de las probetas se observa un comportamiento errático al aumentar la rigidez, y el deterioro no continuo en progreso por lo que se tomó la decisión de trabajar con probetas aún más rígidas. El aumento de rigidez se logró al involucrar material granular fino en la conformación de la probeta.

Figura 19. Porcentaje reducción de la rigidez probeta prismáticas de asfalto oxidado.



Es un hecho que los materiales visco-elásticos, sometidos a deformaciones repetidas liberan parte de la energía convirtiéndola en calor, en consecuencia, en los ensayos sucesivos se controló que la temperatura no variase de $22,5^{\circ} \pm 0,5^{\circ}$.

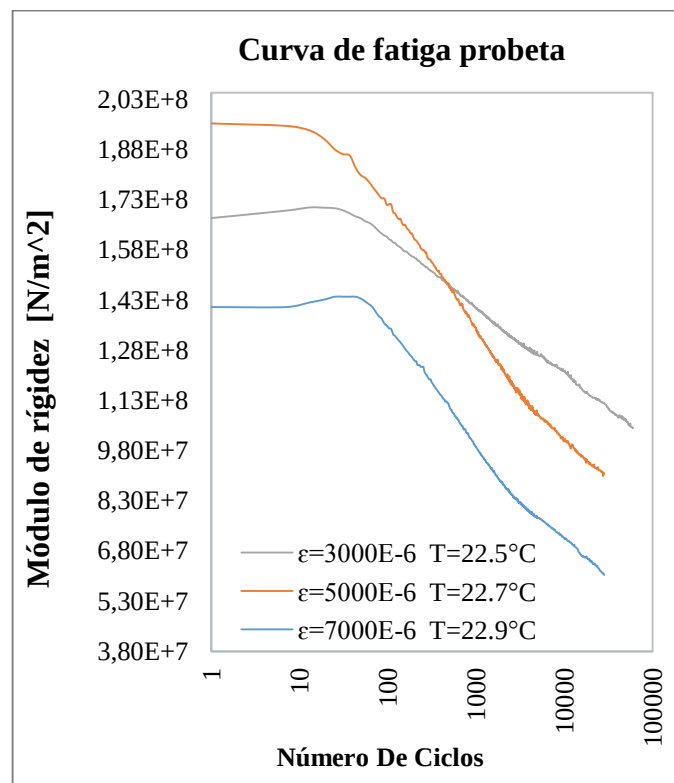
4.3 FASE LLL. ENSAYOS CON MÁSTICOS ASFÁLTICOS DE GRANO GRUESO

Se resolvió utilizar arena normalizada de gran pureza especialmente seleccionada y gradada. Este tipo de arena se utiliza para fabricar probetas de mortero en cemento para probar la resistencia del mismo, es una arena comúnmente manipulada en ensayos de laboratorio. En la tabla 2 se presentan especificaciones de la arena.

Se realizaron pruebas sobre másticos asfálticos con una composición de 60% de bitumen y 40% de agregado del volumen total de la probeta.

4.3.1 Ensayos sobre másticos de grano grueso composición 60-40. En el ensayo se observa el comportamiento de las fases del ensayo de fatiga de degradación por el fenómeno de fatiga asfáltica (figura 1). Debido al número de repeticiones establecido no se logra evidenciar el proceso de degradación completo. Se presenta gran variación en la magnitud del módulo de rigidez para las diferentes deformaciones impuestas.

Figura 20. Curva de fatiga probetas prismáticas con arena gruesa 60-40



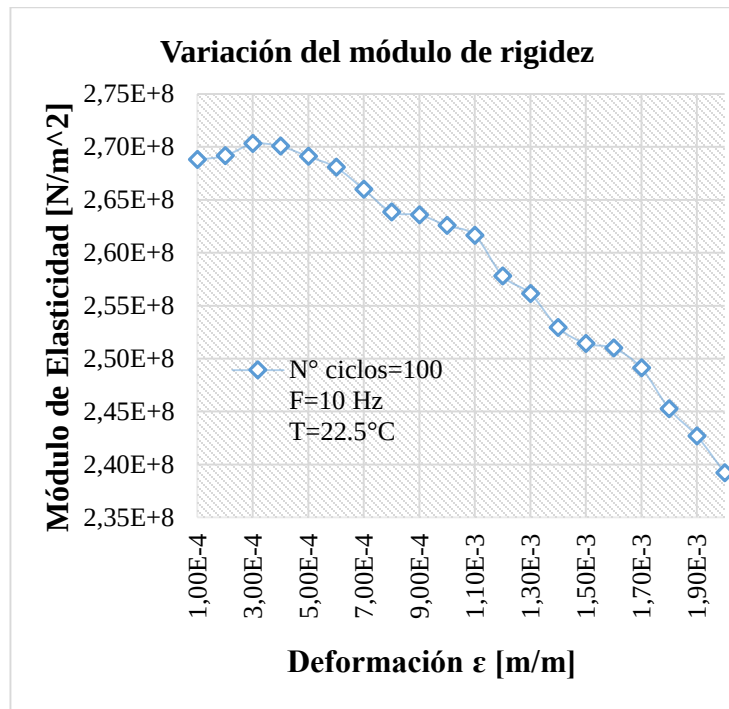
Preocupaba que la magnitud del módulo de rigidez inicial de la probeta variara significativamente con la magnitud de la deformación aplicada. Este comportamiento podría deberse a que las solicitaciones que se estaban imponiendo al material estuvieran ubicadas en el rango visco- elástico no lineal del comportamiento del material.

Se resolvió realizar ensayos del módulo de rigidez sometiendo la probeta a diferentes niveles de deformación unitaria de magnitudes muy bajas.

4.3.1.1 Variación del módulo de rigidez de másticos asfálticos de grano grueso. Con base en los resultados mostrados en la figura 21, se puede afirmar que cuando las deformaciones unitarias son superiores a 1 milímetro/metro se observa una gran reducción en el módulo de rigidez de la probeta.

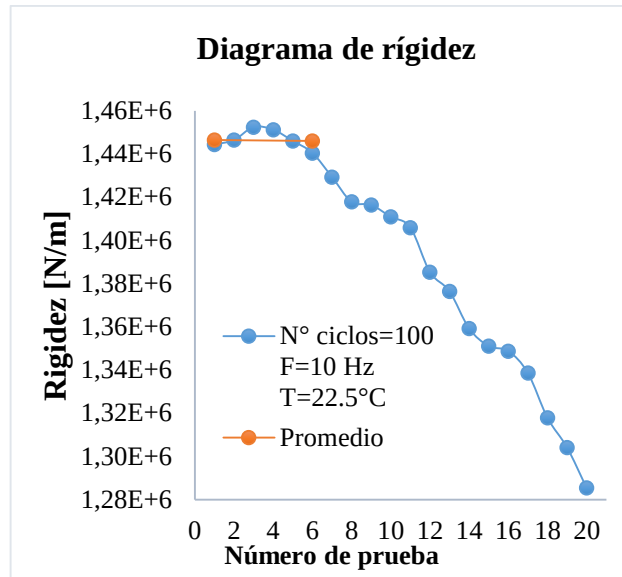
Se considera que para deformaciones inferiores a 1 milímetro/metro el módulo de rigidez medido, está en el rango visco elástico- lineal del material.

Figura 21. Diagrama Módulo de Elasticidad- deformación probeta prismática.



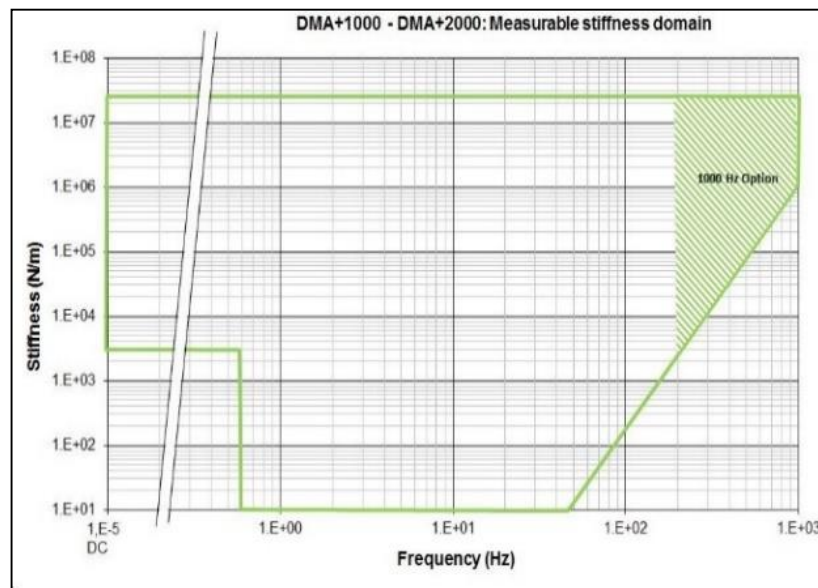
Para estas deformaciones tan pequeñas se verificó que la maquina lograra dar resultados satisfactorios. Se podría considerar que al realizar pruebas con deformaciones menores o iguales a 500 micrómetro/metro, no debería haber variación en el módulo de rigidez.

Figura 22. Diagrama de Rigidez probeta prismática.



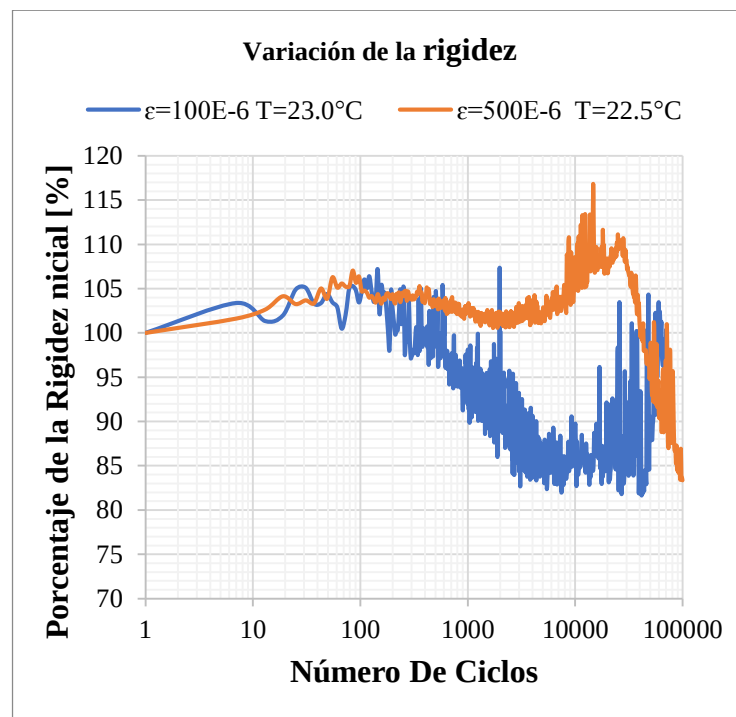
Adicionalmente se comprueba el dominio de rigidez dado por la maquina METRAVIB DMA+1000, teniendo en cuenta el rango de rigidez medible, en la figura 23 se evidencia que los resultados de los ensayos a deformaciones bajas presentan valores que están en el intervalo en que trabaja la máquina.

Figura 23. Diagrama Rigidez Metravib DMA+1000



4.3.2 Ensayos sobre másticos de grano grueso composición 70-30. Para una relación de 70% bitumen y 30% arena gruesa, se evidencia resultados atípicos en donde según el comportamiento del material, éste no se encuentra el rango elástico-lineal. Lo anterior puede ser provocado por la segregación del material, al ocurrir este fenómeno el material puede dejar de presentar características homogéneas.

Figura 24. Curva de fatiga probetas prismática con arena gruesa 70-30.



Como no se lograron mayores reducciones en los ensayos realizados, se cambió el agregado natural por uno de menor diámetro.

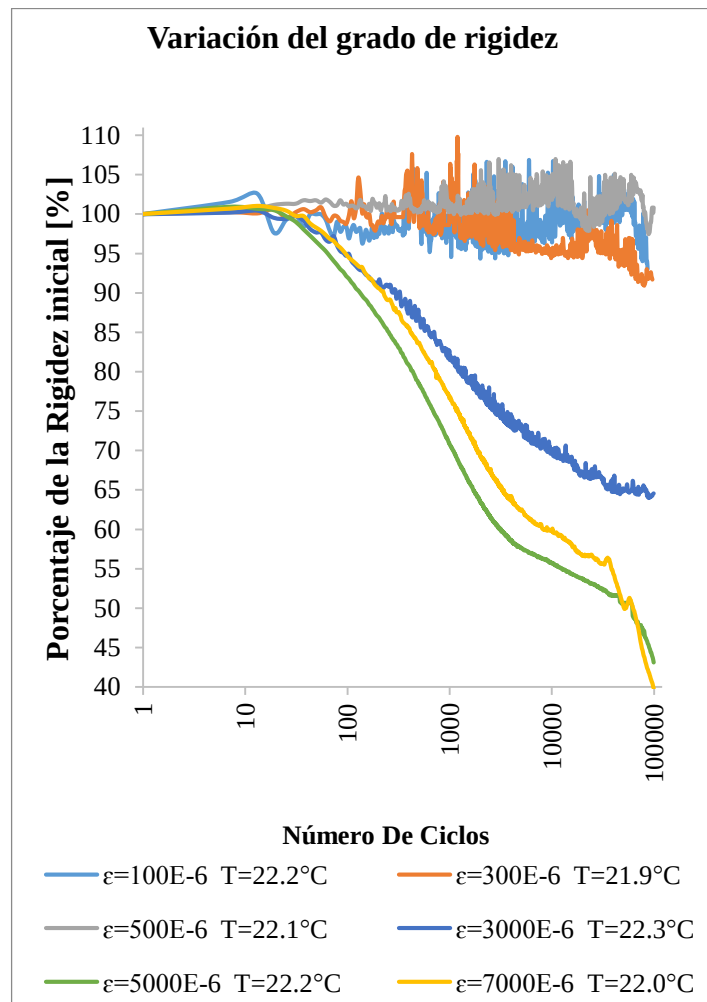
4.4 FASE LV. ENSAYOS CON MÁSTICOS ASFALTICOS FINOS.

De acuerdo con los resultados de las pruebas anteriores, se realizan ensayos con una arena de tamaño granulométrico menor, pero manteniendo la relación 60% bitumen y 40% arena.

En la tabla 3 se detallan las especificaciones técnicas de la arena utilizada.

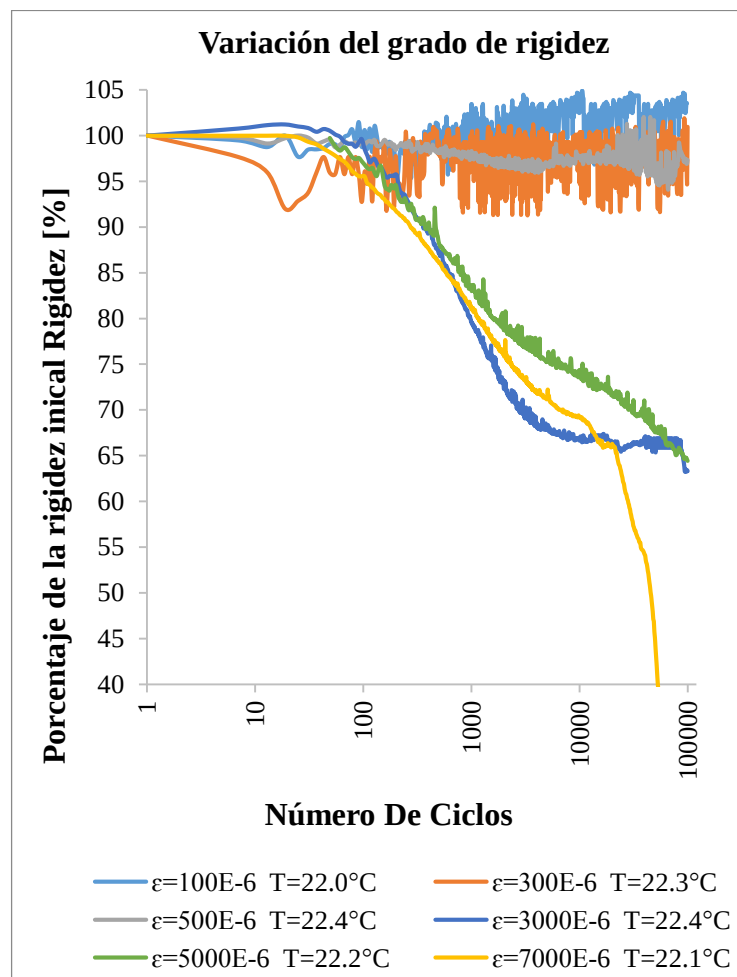
Como se trata de un material visco-elástico el comportamiento del material debe ser lineal, por lo cual se realizaron ensayos para la comprobación, utilizando probetas con características iguales, pero con diferentes deformaciones y aumentado el número de ciclos.

Figura 25. Porcentaje reducción de la rigidez probetas prismáticas con arena fina 60-40.



Al analizar las figuras 25 y 26, donde se analizan las probetas prismáticas y cilíndricas respectivamente, se evidencia que los resultados para las probetas con deformaciones unitarias menores e iguales 500 micrómetro/metro, presentan un comportamiento similar en todas las pruebas realizadas, lo cual permite confirmar que el material se encuentra en el rango elástico-lineal.

Figura 26. Porcentaje reducción de la rigidez probetas cilíndricas con arena fina 60-40.



Por tratarse de deformaciones muy pequeñas, no se presenta reducción en el esfuerzo con el número de repeticiones, sin embargo, se constata que para

deformaciones mayores es factible determinar el número de ciclos necesarios para que el material falle por fatiga.

En las probetas con deformaciones mayores se observa que se logra la reducción de la rigidez. A pesar de ello las probetas prismáticas con deformaciones superiores son las únicas que presentan una reducción superior al 50%, sin embargo, es posible demostrar las tres fases de degradación por el fenómeno de fatiga en este tipo de probetas.

5. CONCLUSIONES

Se alcanzaron resultados en los que la curva de fatiga tiene un comportamiento tradicional, es decir presenta las tres fases descritas por Baaj y Di Benedetto (2005) y se evidencia la reducción al 50% de la rigidez inicial.

En los ensayos ejecutados a másticos asfálticos de grano fino con composición 60% bitumen y 40% arena, se observa mayor homogeneidad en los resultados.

Los estudios realizados indican que la probeta prismática presenta mejores características respecto a la probeta cilíndrica, para realización de pruebas de fatiga sobre ligantes bituminosos.

Se planteó un protocolo para ejecutar ensayos de fatiga sobre ligantes bituminosos con base en las observaciones realizadas, presentando facilidades en el proceso de preparación de especímenes, montaje y ejecución de la prueba.

El ensayo propuesto puede ser considerado como un primer avance en la ejecución de estudios para establecer la relación de la resistencia a la fatiga de los ligantes bituminosos con la resistencia a la fatiga de los concretos asfálticos.

6. RECOMENDACIONES

Para continuar con un proyecto que establezca una norma de ensayo para estudiar la fatiga en los ligantes bituminosos se recomienda:

- ✓ Validar las pruebas sometiendo las probetas a ensayos en diferentes condiciones de temperatura, variando de 5 a 20 °C.
- ✓ Estudiar la fatiga en los ligantes bituminosos con probetas de forma similar a las estudiadas, pero de dimensiones superiores.
- ✓ Efectuar ensayos con el propósito de avanzar en una investigación que relacione la resistencia a la fatiga de ligantes bituminosos con la resistencia a la fatiga de los concretos asfálticos

BIBLIOGRAFIA

AYALA, Yelitza; GARNICA, Paul; y DELGADO, Horacio. Efecto de la Temperatura en la Evaluación de la Fatiga en Ligantes Asfálticos. *En: Infraestructura Vial*, 2016, vol. 18, no. 31, pp. 05-13.

BAAJ, H; DI BENEDETTO, H; y CHAVEROT, P. *Effect of binder characteristics on fatigue of asphalt pavement using an intrinsic damage approach: Road material pavement*. Waterloo, Canada: University of Waterloo, 2013.

CHAILLEUX, Emmanuel, *et al.* *Fatigue behaviour of bitumen in tension-compression loading mode: Rheological analysis and comparison with mix fatigue*. France: Advanced Testing and Characterization of bituminous Materials, 2009.

CUADROS, Karla; y HURTADO, Carlos. *Puesta a punto de un ensayo de fatiga sobre ligantes bituminosos*. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander, 2018.

FLORES, Mayra; DELGADO, Horacio; y GARNICA, Paul. *Determinación de la resistencia a la fatiga en mezclas asfálticas*. Investigación Instituto Mexicano del Transporte.

GALVIS, Jeisson; y VEGA, Ingrid. *Concepción de un ensayo de fatiga sobre ligantes bituminosos*. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander, 2016.

GONZÁLES, Silvia; y VELANDIA, Siul. *Estado del arte en el estudio de la fatiga de materiales bituminosos*. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander, 2006.

LLANO MUÑOZ, José Luis. *Efecto de los agregados en el envejecimiento de la mezcla asfáltica*. Santiago de Cali: Pontificia Universidad Javeriana, 2017.

PEREZ-JIMÉNEZ, Félix Edmundo, *et al.* Evaluación del proceso de fatiga de mezclas asfálticas mediante un nuevo procedimiento cíclico de deformaciones-EBADE. *En: Revista de la construcción*, 2011, vol. 10, no. 2, pp. 55-65.

QABUR, Ali. *Fatigue Characterization of Asphalt Mixes with Polymer Modified Asphalt Cement*. Waterloo, Canada: University of Waterloo, 2018.

RONCALLO, Sandra; y BAUTISTA, Freddy. *Desempeño a fatiga y ahuellamiento de mezclas en servicio en la ciudad de Bogotá, comparadas con mezclas envejecidas en el laboratorio Cámara UV*. Bogotá D.C: Pontificia Universidad Javeriana, 2013.

WITCZAK, Matthew. Project N° NCHRP 9-44^a Validating an endurance Limit for HMA pavements: Laboratory Experiment and Algorithm Development. Washington: National cooperative highway research program transportation research board of the national academies, 2013.

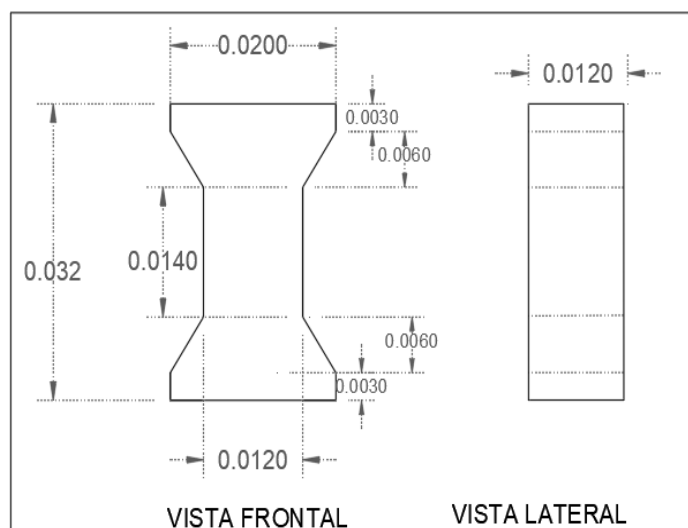
ANEXOS

Anexo A. Manual de Procedimiento para la Preparación de Especímenes de un Ensayo de Fatiga Sobre Ligantes Bituminosos

GEOMETRIA DE LAS PROBETA

La geometría presentada (Figura 1) es el resultado de múltiples ensayos realizados sobre diferentes probetas, el estudio concluye que esta es la geometría más recomendable para realizar el ensayo de fatiga.

Figura 1. Geometría de la probeta.



Altura de la probeta: 32 mm

Largo en los extremos: 20 mm

Ancho de la probeta: 12 mm

PREPARACIÓN DE LAS PROBETAS

Para la elaboración de las probetas se deben tener materiales como: Arena normalizada fina (Tabla 1) y bitumen. Una vez seleccionados los materiales se

miden las cantidades necesarias de cada uno, tomando las proporciones en volumen ya establecidas, 60% de bitumen y 40 % del agregado fino.

Tabla 1. Especificación Arena Fina

Nombre	Sikadur 504
Tipo Arena	Fina
Tamaño [mm]	0,075-0,15
Gradación	Pasa tamiz N° 100, retiene N°200
Forma de los granos	Redondeados.

Para la probeta es necesario preparar un volumen de 33,3 ml de mezcla. Este volumen es repartido en 20 ml de bitumen y 13.3 ml de agregado fino. Sabiendo que la gravedad específica del agregado fino es de 2,65 se calcula la masa correspondiente para este volumen que es 35,33 g.

Al tener las cantidades de los materiales ya calculadas, se procede con la medición de los mismos, pesando la cantidad requerida de Arena fina en una balanza y midiendo en un recipiente la cantidad de bitumen necesaria (Figura 2).

Figura 2. Medida de materiales.



Seguidamente se calienta el bitumen, supervisando que la temperatura siempre sea inferior a 150°C, cuando el bitumen se encuentre en estado líquido se incorpora la arena y se revuelve, hasta obtener una mezcla homogénea.

Figura 3. Vertimiento y mezcla de materiales



Se vierte la mezcla en el molde de la probeta rápidamente, antes de que la mezcla tome consistencia e inicie el proceso de solidificación (Figura 4).

Figura 4. Vertimiento de la mezcla.



Posteriormente se limpian los residuos que quedan sobre el molde de la probeta y se deja reposar por 20 minutos a temperatura ambiente y luego 20 minutos en una nevera a temperatura $0^{\circ}\pm 5^{\circ}$.

Figura 5. Probeta en reposo.



Pasados los 40 minutos de reposo se extrae la probeta del molde y se procede con la preparación del equipo, siguiendo el procedimiento descrito en “Manual de programación para un ensayo de fatiga sobre ligantes bituminoso en la maquina Metravib DMA+1000.

Anexo B. Manual de Programacion para el Ensayo de Fatiga Sobre Ligantes Bituminosos en la Maquina Metravib DMA+1000

Recomendaciones para antes de iniciar con el ensayo

- **Verifique que la presión del aire comprimido esté controlada a 6 Bar.**
- **Revise que la válvula de nitrógeno líquido debe estar orientada hacia la salida del refrigerante. Si el ensayo se va a realizar a temperatura ambiente, omita este numeral.**
- **Chequee que los brakers internos estén en modo ON cuando el switch se active en posición ON.**
- **Revisar que el switch rojo de apagado de emergencia este afuera.**

PROCEDIMIENTO

Para realizar el procedimiento adecuado, primero encienda el computador y la máquina, instale el portamuestras de la probeta en la cámara de ejecución de ensayos, verificando que permanezca completamente asegurado.

Figura 1. Ajuste del Porta muestras.



Seguidamente ingrese directamente desde la pantalla de navegación del computador a la herramienta **Multitest** (Figura 3), de inmediato se abrirá una ventana de dialogo que especifica que la cámara de temperatura no está conectada y por lo tanto el ensayo se realizara a temperatura ambiente, se da click en **Ok** y se continua (Figura 4).

Figura 2. Selección programa.



Figura 3. Aviso multitest.



Verificación de seguridad de la máquina y balance

Para verificar que la maquina esté funcionando correctamente, se selecciona el icono de color rojo que se encuentra en la barra de herramientas. (Figura 5)

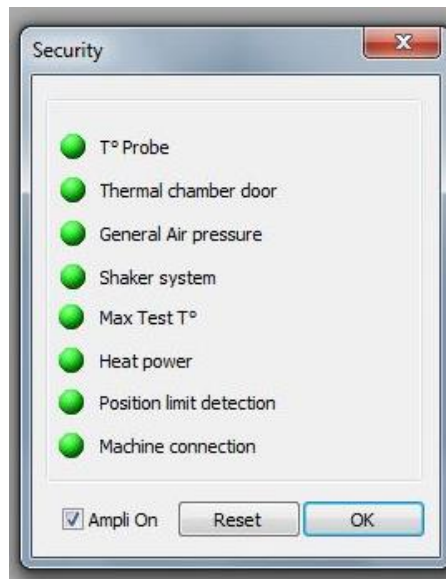
Figura 4. Icono de verificación.



Inmediatamente emergerá una ventana de seguridad **Security** (figura 6), en donde se debe verificar que todos los puntos se encuentren en color verde (si los puntos están en color rojo, por favor llamar al encargado de la máquina).

Posteriormente de verificar el paso anterior se selecciona el recuadro **Ampli On** y se da Click en **OK**, para que se active la turbina.

Figura 5. Verificación de seguridad.

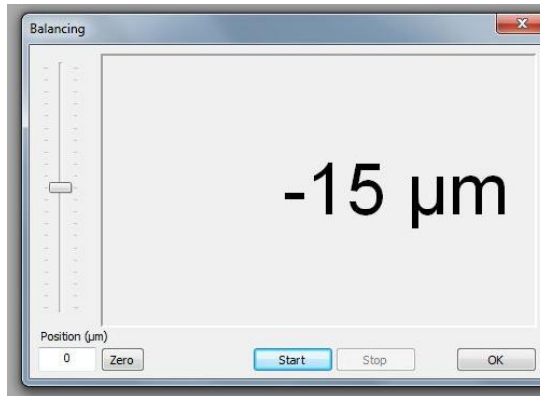


Seleccione en la barra de herramientas el icono **Balance weight of the excitator and specimen holder** (Figura 7) y emergerá una ventana llamada **Balancing** (figura 8), dé click en **Position > Zero** y luego en **Start** y se espere hasta que el programa se balancee es decir que no se estén presentando variaciones en el valor de la posición y se da click en **Ok**.

Figura 6. Icono de Balance.



Figura 7. Balanceo de la máquina.



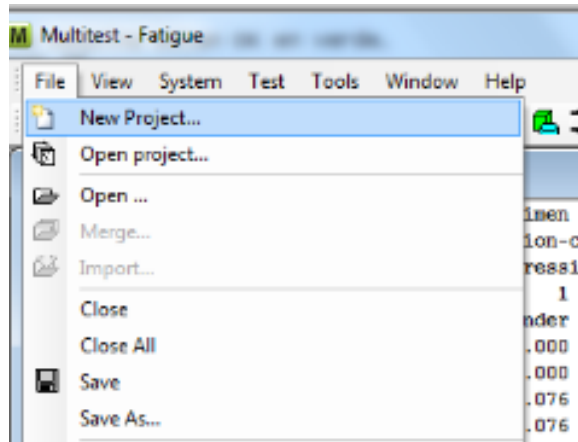
Ya balanceada la máquina, se sitúa la probeta asegurándola con un poco de pegante instantáneo en sus extremos para generar un empotramiento y así poder iniciar con el ensayo.

Figura 8. Probeta situada en la máquina.



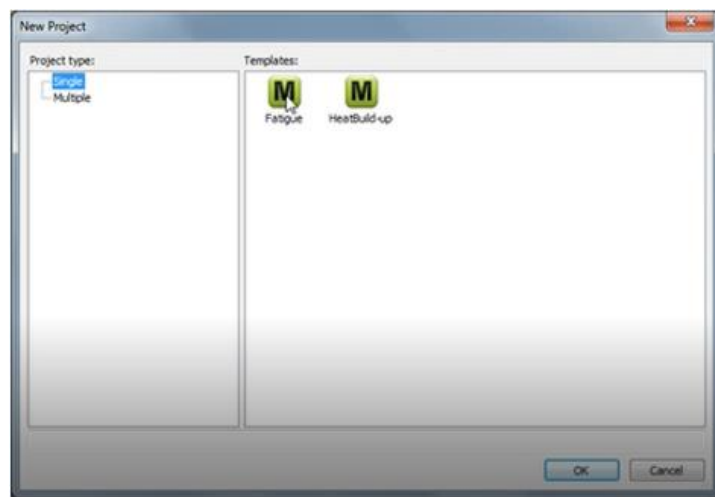
Seleccione en la barra de herramienta **File> New Project** (Figura 10).

Figura 9. Nuevo proyecto.



Surgirá una ventana nombrada **New Project**, en **Project type**, de click en **Single** y posteriormente en **Fatigue** como lo indica la figura 11.

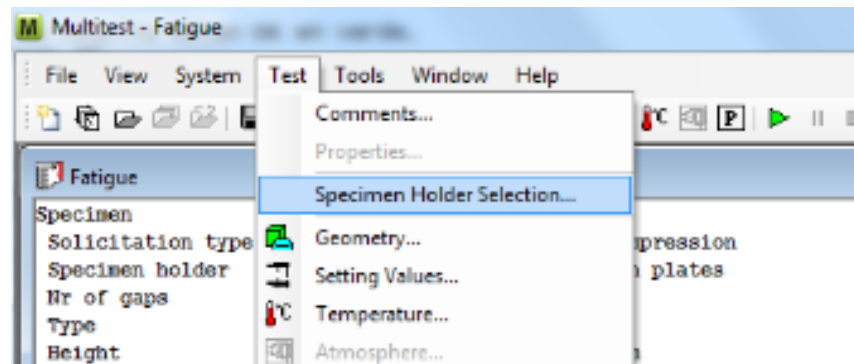
Figura 10. Seleccionar el tipo de proyecto.



Configurar las dimensiones de las probetas

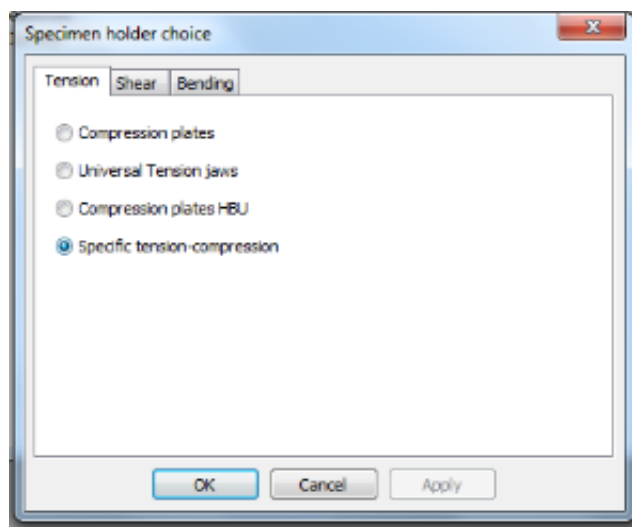
Vaya a la barra de herramientas en la opción **Test > Specimen Holder Selection** (Figura 12).

Figura 11. *Seleccionar la herramienta.*



Aparecerá una ventana llamada **Specimen holder choice** (Figura 13), vaya a la pestaña **Tension** y seleccione **Specific tension- compression** y de click en Ok.

Figura 12. *Seleccionar el tipo de ensayo.*



Observará que se abre una pestaña llamada **Specific tensión-compression**, en donde se debe ingresar el nombre y las dimensiones de la probeta a ensayar (Figura 14).

Figura 13. Ingresar las dimensiones.

Specific tension-compression

Specimen name: prueba 1

Specimen height: 30 mm

Shape factor #1: 0.001 1/mm

Shape factor #2: 0 $N.s^2/mm^2$

Sample Holder:

Static Mass: 0.081 Kg

Mobile Mass: 0.81 Kg

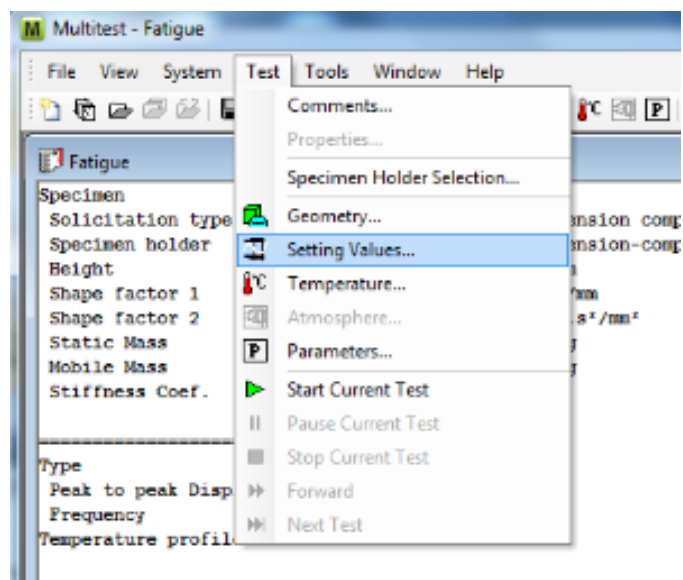
Stiffness Coefficient: 1

OK Cancel

Condiciones iniciales del ensayo

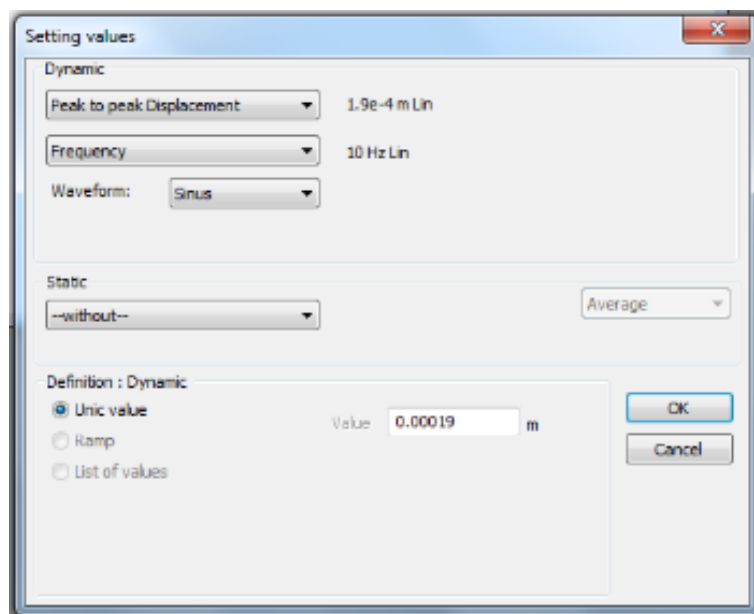
Nuevamente vaya a la barra de herramientas en la opción **Test** de click en **Setting Values** (Figura 15).

Figura 14. Seleccionar herramienta para condiciones iniciales.



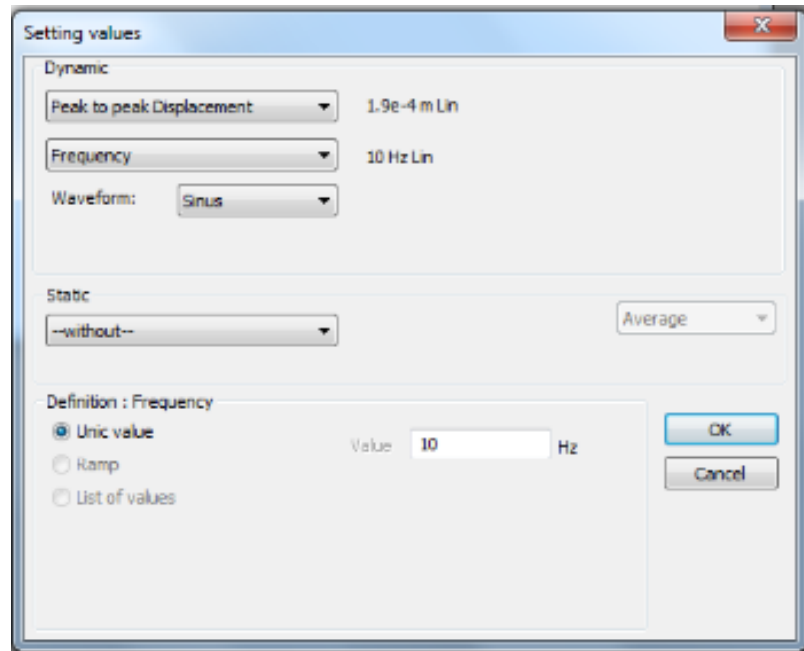
Emergerá una ventana **Setting Values** (Figura 16), en donde se ingresaran las condiciones iniciales del ensayo. En el primer menú desplegable de la sección **Dynamic**, seleccione **Peak to Peak Displacement**, seguidamente en la sección **Definition** verifique que aparezca **Definition: Dynamic** y seleccione la opción **Unic Value** y escriba en el recuadro **Value** el desplazamiento pico a pico que se aplicará en la prueba.

Figura 15. Ingresar desplazamiento.



Ahora en el segundo menú desplegable de la sección **Dynamic**, seleccione **Frequency** y realice la verificación en **Definition**, e ingrese el valor de la frecuencia en el recuadro **Value**, tal como se indica en la figura 17.

Figura 16. Ingresar frecuencia.



Seguidamente en la sección **Waveform** seleccione la función de longitud de onda que se le aplicará al ensayo, en este caso **Sinus** y verifique que la fuerza estática y el desplazamiento estático sean iguales a cero en la sección **Static** (Figura 18).

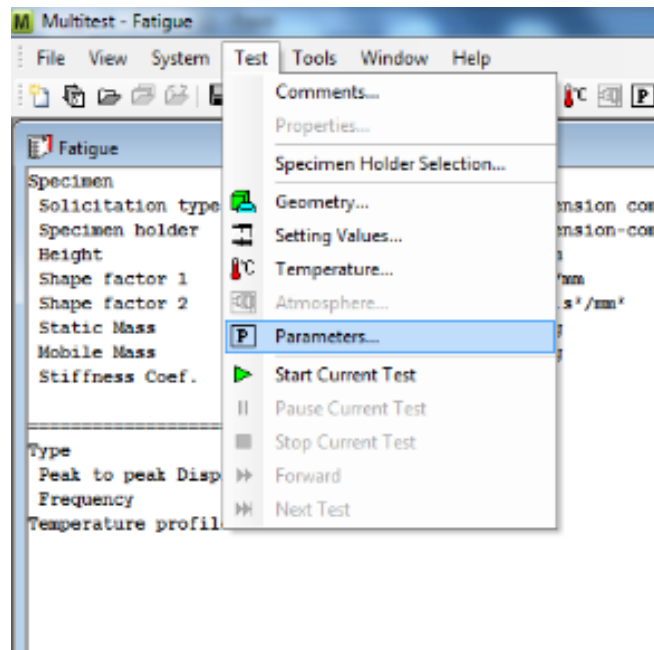
Figura 17. Verificación de fuerzas.



Parámetros de medición

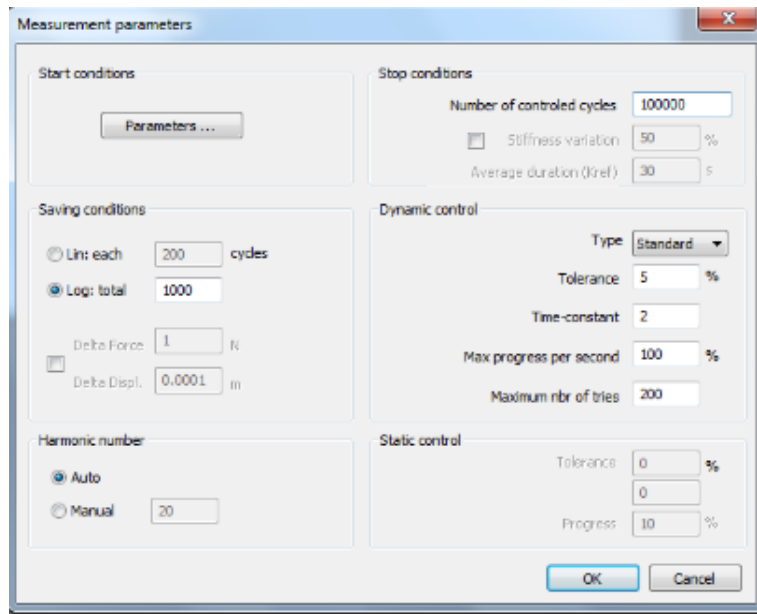
En la barra de herramientas en la opción **Test** de Click sobre **Parameters** (Figura 19).

Figura 18. Seleccionar la herramienta parámetros.



Observará una ventana llamada **Measurement parameters**, en donde deberá ingresar el número de ciclos en la sección **Stop Conditions**, en el campo **Number of controled cycles** y en el menú **Saving conditions** dar click en **Log: total** y colocar el número de datos que quiera que tomen en el ensayo (Figura 20).

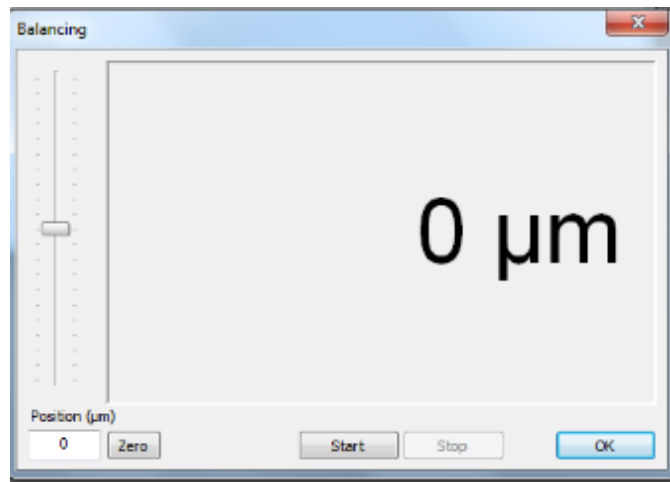
Figura 19. Ingresar parámetros.



The 'Measurement parameters' dialog box is divided into several sections for configuring the measurement process. The 'Start conditions' section contains a 'Parameters ...' button. The 'Stop conditions' section includes 'Number of controlled cycles' (100000), 'Stiffness variation' (50%), and 'Average duration (tref)' (30 s). The 'Saving conditions' section has radio buttons for 'Lin: each' (200 cycles) and 'Log: total' (1000), along with 'Delta Force' (1 N) and 'Delta Displ.' (0.0001 m). The 'Harmonic number' section has radio buttons for 'Auto' and 'Manual' (20). The 'Dynamic control' section includes a 'Type' dropdown (Standard), 'Tolerance' (5%), 'Time-constant' (2), 'Max progress per second' (100%), and 'Maximum nbr of tries' (200). The 'Static control' section includes 'Tolerance' (0%) and 'Progress' (10%). 'OK' and 'Cancel' buttons are at the bottom right.

Nuevamente se debe realizar el paso de verificación de balanceo de la máquina, realizando el mismo procedimiento, dar click en **Position > Zero** y luego en **Start**, esperar hasta que el programa se balancee y dar click en **Ok**. (Figura 21).

Figura 20. Balanceo de la máquina.



The 'Balancing' dialog box features a vertical slider on the left and a large central display showing '0 μm'. At the bottom left, there is a 'Position (μm)' label with a '0' input field and a 'Zero' button. At the bottom right, there are 'Start', 'Stop', and 'OK' buttons.

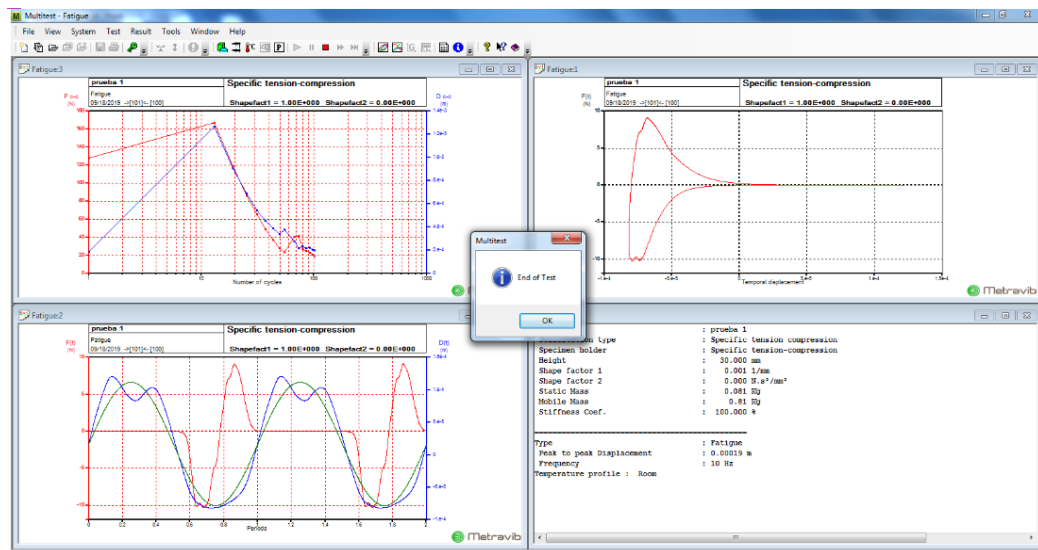
INICIO DEL ENSAYO

Después de realizar los pasos anteriormente mencionados, se da inicio al ensayo, en la barra de herramientas en la opción **Play** (Figura 22), en la pantalla aparecerán cuatro ventanas que muestran el desarrollo del ensayo (Figura 23).

Figura 21. Seleccionar herramienta para reproducir.



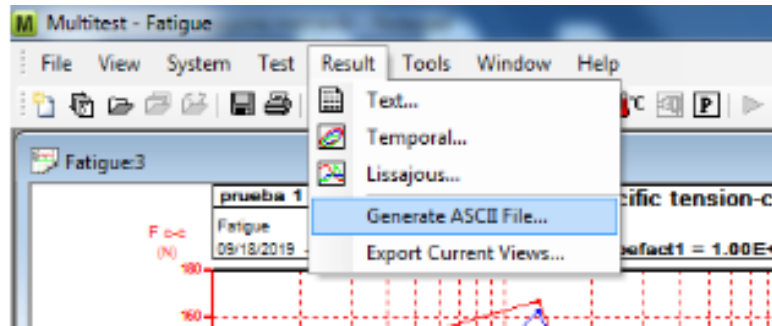
Figura 22. Ventanas de desarrollo de la prueba.



Extracción de resultados

Para extraer los resultados del ensayo vaya a la barra de herramientas y seleccione la opción **Result** y luego **Generate ASCII File** como se muestra en la figura 24.

Figura 23. Herramienta para extraer resultados.



Escoja los datos que necesita como **número de ciclos (Number of cycles)**, **temperatura (Temperature)**, **desplazamiento pico a pico (Peak to peak Displacement)**, **fuerza pico a pico (Peak to peak Force)**, (Figura 25).

Finalmente asigne el nombre a su archivo y seleccione la ubicación en donde desea guardar los datos de los resultados, este archivo se guardará en formato CSV File (figura 26), por lo tanto deberá pasarlo a un archivo Excel y obtendrá una tabla, en donde se especificarán los datos.

Figura 24. Seleccionar datos necesarios.

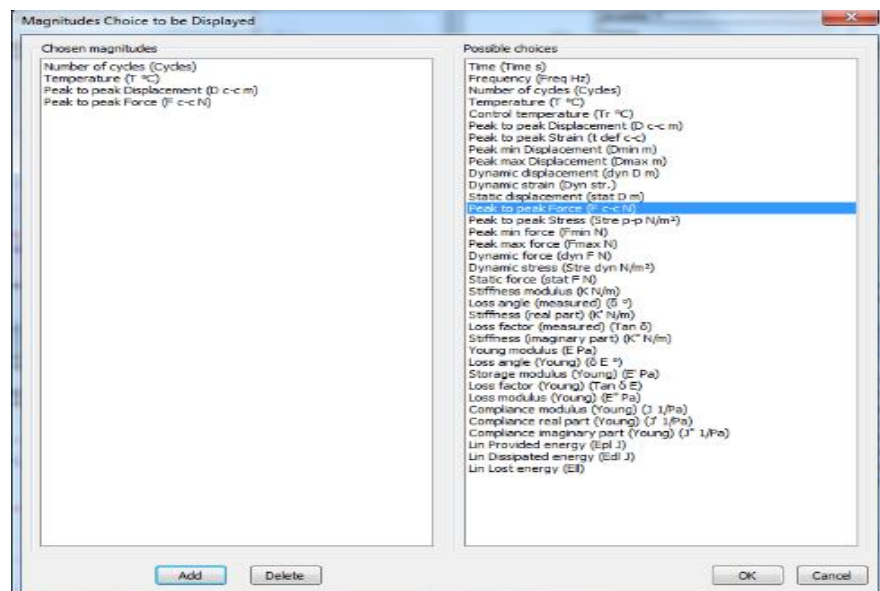


Figura 25. Guardar archivo

