

**CONCEPCIÓN DE UN ENSAYO DE FATIGA SOBRE LIGANTES
BITUMINOSOS**

**JEISSON EDUARDO GALVIS FLOREZ
INGRID KATHERINE VEGA JIMÉNEZ**

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

2016

**CONCEPCIÓN DE UN ENSAYO DE FATIGA SOBRE LIGANTES
BITUMINOSOS**

**JEISSON EDUARDO GÓMEZ FLOREZ
INGRID KATHERINE VEGA JIMÉNEZ**

Trabajo de Grado para optar al título de Ingeniero Civil

Director

**EDUARDO ALBERTO CASTAÑEDA PINZÓN
Ingeniero Civil, M.Sc, PhD.**

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

2016

DEDICATORIA

A Dios por cuanto soy, he sido y seré...

A mis padres, Jorge Galvis y Esperanza Florez, por su amor incondicional...

A mis hermanos, Adriana, Giovanni, Oscar y Ricardo, por su cariño...

A mi familia entera, porque nuestros valiosos lazos fraternales nunca acaben...

A mis amigos por el apoyo y el afecto en nuestras alegrías y tristezas...

...Infinitas gracias

Jeisson Eduardo Galvis Florez

DEDICATORIA

A Dios por darme Fortaleza en los momentos de adversidad.

A mi madre por sus oraciones, por su amor y apoyo incondicional en mi vida.

A mi padre y mis hermanos por su infinito cariño y apoyo incondicional.

A Jairo Hernández agradecerle por sus buenos consejos, su constante cariño y el
aprecio que siempre me ha brindado.

A personas que ofrecieron su confianza y apoyo durante el transcurso de mi
carrera.

Gracias.

Ingrid Katherine Vega Jiménez

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan sus más sinceros agradecimientos:

A la Universidad Industrial de Santander, por la formación profesional recibida, forjada en los principios de la ética y el sentido crítico por lo que nos rodea.

Al Ingeniero Eduardo Alberto Castañeda Pinzón, Director del proyecto, por su valiosa orientación y dedicación en el desarrollo de esta investigación, por compartir sus amplios conocimientos y experiencia.

Al ingeniero Octavio Andrés González, de la escuela de la ingeniería mecánica, por su colaboración.

A los técnicos de laboratorio Jairo Hernández Salazar, Jaime Cadena Pardo y German Hernández Cadena por su colaboración a cada momento para continuar con nuestras labores.

A todas las personas que de una u otra manera, contribuyeron al desarrollo de este trabajo de investigación.

JEISSON EDUARDO GALVIS FLOREZ
INGRID KATHERINE VEGA JIMÉNEZ

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	15
1. PLANTEAMIENTO Y JUSTIFICACIÓN DEL PROBLEMA	17
2. OBJETIVOS.....	19
2.1 OBJETIVO GENERAL	19
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	19
3. ESTADO DEL ARTE EN EL ESTUDIO DE FATIGA EN MATERIALES ASFÁLTICOS.....	20
3.1 RIGIDEZ	20
3.2 FATIGA EN LIGANTES ASFÁLTICOS	21
4. CONCEPCIÓN DE UN ENSAYO DE FATIGA PARA EVALUAR BITUMEN	28
4.1 DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO DE PRUEBAS DINÁMICAS	28
4.1.1 Rigidez y frecuencia del equipo METRAVIB DMA+1000	29
4.2 GEOMETRÍA DE LAS PROBETAS	29
4.3 CÁLCULO DEL DESPLAZAMIENTO	33
4.4 CONTROL DE LA DEFORMACIÓN UNITARIA.....	34
4.5 DISEÑO ADAPTABLE DEL PORTAMUESTRA	35
5. VERIFICACIÓN DEL FUNCIONAMIENTO DEL ENSAYO	38
5.1 PREPARACIÓN DE LAS PROBETAS.....	38
5.2 MONTAJE DE LAS PIEZAS Y PREPARACIÓN DE LA MÁQUINA	39
5.3 PRUEBAS DE VALIDACIÓN DEL ENSAYO	40
5.4 RESULTADOS.....	41
5.4.1 Control teórico de la prueba.....	41
5.4.2 Verificación del módulo E.....	43
6. CONCLUSIONES	48

7. PERSPECTIVAS	49
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	50
BIBLIOGRAFÍA.....	52
ANEXOS	54

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Reducción de la rigidez con el número de ciclos de carga.	16
Figura 2. Estado tensional de un pavimento bajo carga simple	22
Figura 3. Ensayo de viga trapezoidal.....	23
Figura 4. Flexión en cuatro puntos.....	24
Figura 5. Maquina torsional para ensayo de viga rotatoria	24
Figura 6. Ensayo diametral	25
Figura 7. Weel track test	26
Figura 8. Ensayo de fatiga a escala real.....	26
Figura 9. Ensayo de fatiga en ligante bituminoso	27
Figura 10. Maquina Metravib DMA+1000	29
Figura 11. Simetría de la probeta.....	30
Figura 12. Diagrama de deformación unitaria máx	32
Figura 13. Constante de proporcionalidad	35
4.5 DISEÑO ADAPTABLE DEL PORTAMUESTRA	35
Figura 14. Diseño preliminar mediante el modelamiento en SolidWorks	36
Figura 15. Prototipos de las piezas adaptables y probeta a la Metravib DMA+1000	37
Figura 16. Espécimen del ensayo.....	38
Figura 17. Montaje final de las piezas y probeta.....	40
Figura 18. Montaje de los cilindros	41
Figura 19. Módulo de Elasticidad Vs Frecuencia – Valores teóricos	42
Figura 20. Módulo de elasticidad Vs frecuencia – Valores experimentales	44
Figura 21. Comparación de los ángulos de fase.....	45
Figura 22. Superposición de gráfico teórico y gráfico experimental.....	46

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Metodología de diseño de la probeta.....	31
Tabla 2. Dimensiones iniciales de las placas laterales de empotramiento	36
Tabla 3. Dimensiones iniciales de la aplicación de carga	36
Tabla 4. Módulos de Elasticidad teóricos.....	42
Tabla 5. Valores de fuerzas en probeta experimental.....	43
Tabla 6. Valores de módulos de elasticidad de probeta experimental	43
Tabla 7. Ángulos de fase obtenidos.....	44
Tabla 8. Porcentajes de error	46

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
ANEXO A. Norma para un ensayo de fatiga sobre ligantes bituminosos.....	54
ANEXO B. Modelamiento computacional en el software ANSYS de las probetas	
ANEXO C. Modelamiento computacional en el software SOLIDWORKS de los elementos adaptables a la Metravib DMA +1000	
ANEXO D. Planos de AUTOCAD de los elementos adaptables a la Metravib DMA +1000	

NOTA: Los Anexos **B** al **D** de este proyecto pueden consultarse en la Biblioteca UIS: Sala Base de Datos.

RESUMEN

TITULO: CONCEPCIÓN DE UN ENSAYO DE FATIGA SOBRE LIGANTES BITUMINOSOS*

AUTOR: JEISSON EDUARDO GALVIS FLOREZ**
INGRID KATHERINE VEGA JIMÉNEZ

PALABRAS CLAVES: FATIGA, LIGANTES ASFÁLTICOS, CARGAS DIMÁNICAS, MODELACIÓN MATEMÁTICA.

DESCRIPCIÓN:

Los incidentes en el deterioro de una capa asfáltica en la estructura de un pavimento flexible son en gran parte por efecto de fatiga en las mezclas asfálticas, generando un agrietamiento en la estructura, relacionada con la deformación por tracción en la base de cada capa, estos factores por lo tanto equivalen a la pérdida estructural y funcional de las carreteras debido a la degeneración de sus propiedades mecánicas, este comportamiento es dado ante una serie de cargas cíclicas por acción del tránsito. Por tal razón, en este trabajo se plantea un ensayo de fatiga alternativo, atendiendo las consideraciones de cálculo debido al comportamiento viscoelástico de estos materiales, y con ayuda de los recursos disponibles en la universidad.

Esta investigación presenta los resultados de una prueba preliminar, ejecutada con elementos diseñados para este ensayo y bajo los parámetros definidos para llevarlo a cabo, además de la evaluación del módulo de Young en probetas preparadas con ligantes asfálticos. Originalmente, se identifican los parámetros más influyentes en el comportamiento en fatiga de mezclas asfálticas y se obtiene una ecuación para el control de desplazamiento de la probeta en función de la fuerza aplicada sobre la misma, directamente relacionado con la resistencia a fisuración, y apoyados también en el uso de un modelo de elementos finitos en la herramienta computacional ANSYS software. Dependiendo de la viabilidad del ensayo, se dictan las normativas para desarrollarlo posteriormente.

* Trabajo de investigación

** Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Director: Eduardo A. Castañeda Pinzón, Ingeniero Civil, PhD.

ABSTRACT

TITLE: CONCEPTION OF A FATIGUE TEST ON ASPHALT BINDERS*

AUTHORS: JEISSON EDUARDO GALVIS FLOREZ**
INGRID KATHERINE VEGA JIMENEZ

KEYWORDS: FATIGUE, ASPHALT BINDERS, DYNAMIC LOADS, MATHEMATICAL MODELING.

DESCRIPTION:

Incidents in the deterioration of an asphalt layer on a flexible pavement structure are largely due to the effect of fatigue on asphalt mixtures, creating a crack in the structure, related to the tensile strain at the base of each layer; These factors therefore equivalent to the structural and functional loss of the roads due to the change of mechanical properties, this behavior is given to a series of cyclic loads per share of traffic. For this reason, this work presents an alternative fatigue test, based on the calculus considerations due to the viscoelastic behavior of these materials, and using the resources available at the university.

This research presents the results of a preliminar trial, executed with elements designed for this test, and under defined parameters to carry it out, also the evaluation of Young modulus at specimens made with asphalt binders. Originally, the most influential parameters are identified in the fatigue behavior of asphalt mixtures and an equation for controlling displacement of the test piece as function of the applied force over it, directly related to the crack resistance, and also supported by the use a finite element model in ANSYS computational tool software. Depending on the viability of the test, are issued regulations for developpe it later.

* Bachelor Thesis

** Physics Mechanical Engineering Faculty. Civil Engineering School. Director: Eduardo A. Castañeda Pinzon, Civil Engineer, PhD.

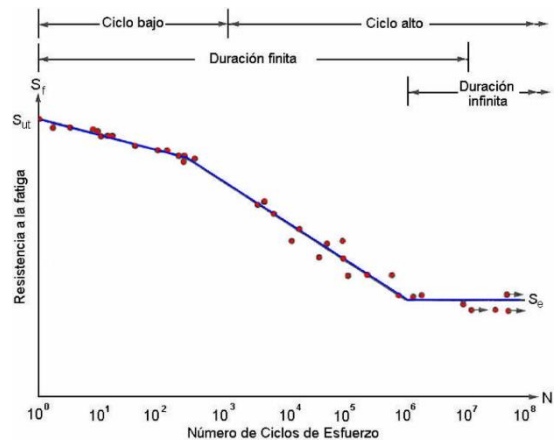
INTRODUCCIÓN

La fatiga en los materiales es una pérdida progresiva en la resistencia mecánica de los mismos a causa del sometimiento a esfuerzos de algún tipo (Axial, Flexión, Cortante, Torsión), un fenómeno que difiere de las condiciones ideales de la teoría elástica, y que por ello se considera importante dentro de los parámetros de diseño estructural.

La fatiga en los materiales asfálticos, es el tipo de falla más común que experimentan las superficies de rodadura debido a la exposición de estos a cargas cíclicas (vehiculares); la falla generalmente inicia en las fibras inferiores de las capas del pavimento y se extiende progresivamente sobre la estructura hasta dañarla completamente.

Para el dimensionamiento de las estructuras de rodamiento vehicular el estudio de la fatiga en ligantes asfálticos busca llevar el diseño a un valor óptimo que cumpla con el tiempo de servicio solicitado para el mismo. Algunos autores consideran que ocurre la falla por fatiga cuando el material ha perdido el 50% de su rigidez mecánica, ver Figura 1, pero esta es solo una aproximación clásica, que debe ser mejorada con la realización de ensayos y experimentos que conduzcan a una aproximación consecuente a la que se presenta en la realidad. [1]

Figura 1. Reducción de la rigidez con el número de ciclos de carga.



Fuente. González, S. & Velandia, S. Estado del arte en el estudio de la fatiga de materiales bituminosos, 2006.

Este trabajo propone un ensayo alternativo, que se espera pueda diferenciar los ligantes bituminosos según su resistencia a la fatiga. Este documento describe como se concibió la probeta para la prueba y las comprobaciones que se hicieron y que permiten asegurar que el ensayo puede ser una herramienta útil en la identificación de las propiedades mecánicas de los ligantes asfálticos.

1. PLANTEAMIENTO Y JUSTIFICACIÓN DEL PROBLEMA

Existen en el mundo, diversas instituciones encargadas de evaluar y codificar los numerosos estudios de materiales usados en todos los procesos ingenieriles que impliquen su utilización. En el caso de la ingeniería civil, vemos como en los procesos constructivos es de entera necesidad para la ejecución de obras de infraestructura, el uso de materiales como los agregados pétreos, sintéticos, aglomerantes, algunos derivados del petróleo, entre otros; de esta forma organizaciones como la ASTM (American Society for Testing Materials), AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials), trabajan constantemente en mejorar y estandarizar los estudios que se realizan para garantizar un rendimiento óptimo de los materiales en su utilización o transformación. Dentro la diversa gama de materiales de construcción, se encuentran los ligantes asfálticos, que son aglomerantes obtenidos naturalmente o manufacturados, indispensables en la estructura de los pavimentos, y de los cuales la ASTM por ejemplo ha establecido parámetros de estudio como su rendimientos en base a la temperatura, duración y mezcla con otros componentes.

En Colombia, el Instituto Nacional de Vías (INVIAS) es el órgano encargado de brindar el apoyo técnico en la ejecución de los proyectos de infraestructura de la red vial nacional, recopilando una serie de especificaciones generales de construcción de carreteras, referenciadas en la normas establecidas por organizaciones como ASTM, AASHT, entre otras; pero INVIAS realiza poca información en materiales necesarios en la construcción no solo de vías, sino de obras de infraestructura en general. En el contexto nacional las investigaciones sobre el estudio del fenómeno de fatiga en mezclas asfálticas ha sido limitado primordialmente por escasez de equipos adecuados para la contribución en el estudio de mediciones tanto en campo y en laboratorio, y falta de interés presupuestal para la investigación.

La iniciativa en el estudio de las propiedades de los materiales en Colombia, ha estado a cargo de grupos de investigación de las universidades públicas y privadas, especificando en muchos casos características únicas de materiales de origen nacional y extranjero. La Universidad Industrial de Santander por su parte, ha adelantado investigación en el estudio de arcillas propias de la región, y otros estudios en propiedades de materiales plásticos, sintéticos y aislantes. Se puede evidenciar entonces que pocas investigaciones tanto a nivel local y nacional, se han centrado en el estudio de los ligantes asfálticos, ignorando la relevancia en el conocimiento de sus propiedades con el fin de brindar condiciones óptimas en su utilización como por ejemplo en los pavimentos, en donde el país requiere aun de buena inversión en infraestructura vial.

Algunos autores han determinado, que el daño en la estructura de un pavimento se ocasiona en gran parte por el efecto de fatiga de la mezcla asfáltica (materiales que conforman la estructura del pavimento), por ellos, y con el interés de caracterizar este fenómeno en ligantes bituminosos, se pueden plantear las siguientes inquietudes: si se conoce que el comportamiento de las muestras de fatiga en los ligantes asfálticos depende de la calidad de los materiales, ¿Es posible concebir un ensayo de fatiga sobre ligantes asfálticos que permita establecer niveles de comportamientos en campo?, ¿ El ensayo de fatiga de ligantes asfálticos, es un parámetro que permite caracterizar de mejor manera el comportamiento de las mezclas asfálticas?

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GENERAL

Proponer un ensayo de estudio de la fatiga de los ligantes asfálticos.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Definir una metodología para realizar un ensayo de flexión o un ensayo de tracción, para estudiar fatiga en ligantes asfálticos.
- Diseñar un portamuestras adaptable a la máquina DMA Metravib, que permita ejecutar el ensayo de fatiga en ligantes asfálticos.

3. ESTADO DEL ARTE EN EL ESTUDIO DE FATIGA EN MATERIALES ASFÁLTICOS

Según su procedencia, los materiales asfálticos pueden ser de dos tipos: materiales asfálticos naturales y materiales asfálticos manufacturados (derivados del petróleo). Se entiende como naturales, aquellos que han surgido de la volatilización del petróleo al migrar hacia la superficie terrestre. Por otro lado, los materiales asfálticos manufacturados son los obtenidos artificialmente del proceso de destilación del petróleo, y se clasifican como betunes asfálticos, betunes fluidificados y emulsiones [2]. Estos materiales presentan un comportamiento viscoelástico, es decir, que sus deformaciones al ser cargado se puede representar por dos componentes, una de ellas elástica como el de un sólido y la otra viscosa como un líquido, por lo tanto su rigidez está ligada a la variable tiempo. [3]

Los autores Roque, Buttlar en el año de 1994, concluyeron que el comportamiento de la rigidez de las mezclas bituminosas se puede considerar como un modelo no lineal, inelástico y que varía respecto del tiempo. Sin embargo, también afirman que estos materiales aceptan un análisis elástico lineal, si este se realiza a temperaturas inferiores a los 25°C, con lo cual se pueden obtener resultados razonables. [4]

3.1 RIGIDEZ

El módulo de elasticidad, o también llamado módulo de Young, relaciona la tensión necesaria para deformar un material en una unidad de longitud. Cuando el comportamiento del material es elástico, este valor es una constante entre el

esfuerzo y la deformación unitaria producida sobre el mismo. En materiales asfálticos, este valor puede variar desde 1×10^{-4} [N/m] hasta los 2.5×10^9 [N/m]. [5]

3.2 FATIGA EN LIGANTES ASFÁLTICOS

Las propiedades mecánicas de los ligantes asfálticos varían de acuerdo al tiempo de servicio que se le da en un pavimento. A uno de estos cambios en la resistencia mecánica de los materiales se le denomina fatiga, y se define como una disminución en la resistencia mecánica de los materiales debido a la acción de cargas cíclicas.

El modelo tradicional de fatiga en mezclas asfálticas determina que la falla inicia en la fibra inferior de la estructura, y se extiende progresivamente hasta dañar la totalidad de las capas. El estudio de este fenómeno usualmente se hace mediante ensayos de aplicación de cargas dinámicas repetidas, controlando la deformación o el esfuerzo.

El ensayo por esfuerzo controlado, describe a través del tiempo un aumento progresivo en la deformación manteniendo un valor de esfuerzo constante. Análogamente, el ensayo por deformación controlada, describe a través del tiempo una disminución progresiva del esfuerzo necesario para mantener dicho desplazamiento constante, lo que se traduce en la disminución de su módulo de rigidez.

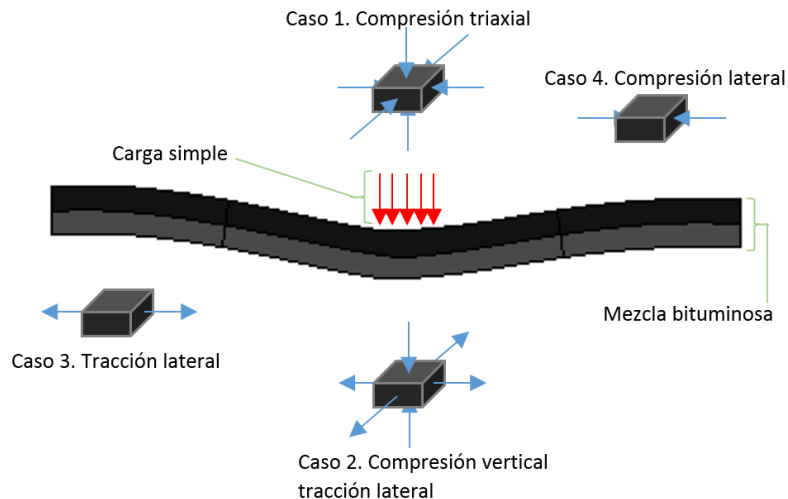
De acuerdo a los planteamientos teóricos, un ensayo ideal es aquel capaz de influir un estado tensional similar al que se produce en condición ambiente. Roque y Buttlar [4], Figura 2, presentaron el estado de tensiones provocado por una

carga simple en la estructura de un pavimento; En el diagrama, se observan los siguientes casos:

1. Compresión triaxial en la superficie inmediata bajo la rueda.
2. Tracción longitudinal y transversal combinada con la compresión vertical en la parte inferior de la capa bituminosa bajo la rueda.
3. Tracción longitudinal o transversal en la superficie a una cierta distancia de la carga.

Compresión longitudinal o transversal en el fondo de la capa bituminosa a una cierta distancia de la carga.

Figura 2. Estado tensional de un pavimento bajo carga simple



Fuente: Association of Asphalt Paving Technologists (AAPT), R. y Buttlar, W.G. 1992

Tradicionalmente, el estudio de la fatiga de las estructuras de pavimento, se hace por medio de ensayos sobre concretos asfálticos. Estos ensayos se agrupan en cuatro categorías: ensayos de flexión, ensayos diametrales, ensayos triaxiales y ensayos de pista.

En los ensayos de flexión, se busca representar el paso repetitivo de los vehículos sobre el pavimento, mediante la aplicación de cargas cíclicas de flexión. Los ensayos más comunes en esta categoría son:

1. Ensayo de flexión en dos puntos o ensayo de la viga trapezoidal en voladizo: Desarrollado por el LCPC (Laboratoire Central des Ponts et Chaussées), y muy utilizado en Francia y Bélgica. **Figura 3.**

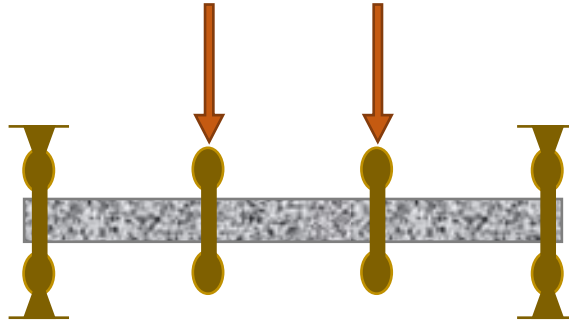
Figura 3. Ensayo de viga trapezoidal



Fuente: de la Roche, C. LCPC, 2005

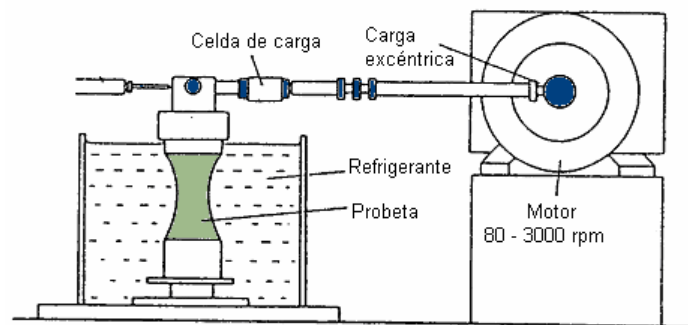
2. Ensayo de flexión en vigas con aplicación central de carga (Shell Laboratory) o en los tercios medios (Strategic Highway Research Program). Figura 4.

Figura 4. Flexión en cuatro puntos



Ensayo de la viga rotatoria en voladizo: Implementado en la universidad de Nottingham, Reino Unido. Figura 5.

Figura 5. Máquina torsional para ensayo de viga rotatoria



Fuente. González, S. & Velandia, S. Estado del arte en el estudio de la fatiga de materiales bituminosos, 2006

En los ensayos diametrales, se busca emular un estado de esfuerzos biaxial sobre probetas cilíndricas. Figura 6.

Figura 6. Ensayo diametral



Fuente. Deformación permanente de mezclas asfálticas, UNR, 2006

Los ensayos de pista pretenden simular el efecto del paso de las llantas sobre el pavimento, permitiendo una observación más amplia del inicio y la propagación de la fisura. Existen dos tipos de ensayos de pista:

1. Ensayo de pista en laboratorio o Weel-Track test (WTT): Para este ensayo se creó un equipo en el que una rueda con neumático se desplaza sobre una losa de concreto asfáltico. Figura 7.

Figura 7. Weel track test



2. Ensayo de pista a escala natural: Este es quizás el que ofrece la mejor representación de los efectos de interacción entre el sistema carga-pavimento. Para llevarlo a cabo se requiere el diseño y construcción de pistas longitudinales o circulares, sobre las que circulan vehículos o carruseles. Figura 8.

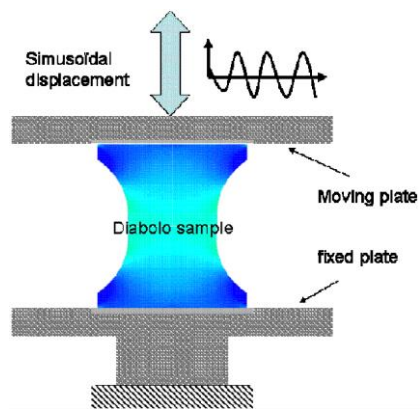
Figura 8. Ensayo de fatiga a escala real



Fuente. Internet, IFSTTAR

Algunos estudios han optado por abordar el estudio de la fatiga únicamente en el ligante que compone las mezclas asfálticas. E. Chailleux [6], ha propuesto un ensayo para estudiar el comportamiento de fatiga del bitumen, a través de esfuerzos uniaxiales generados con cargas de tensión-compresión sobre probetas con forma de “diabolo”. Figura 9.

Figura 9. Ensayo de fatiga en ligante bituminoso



Fuente. Advanced Testing and Characterization of Bituminous Materials, LCPC, 2009

4. CONCEPCIÓN DE UN ENSAYO DE FATIGA PARA EVALUAR BITUMEN

Este trabajo busca generar una nueva alternativa de ensayo de flexión por deformación controlada, teniendo en cuenta los recursos disponibles en la Universidad Industrial de Santander para llevarlo a cabo. El laboratorio de pavimentos cuenta actualmente con un equipo DMA (Dynamic Mechanical Analysis), con el cual es posible aplicar cargas dinámicas sobre probetas de pequeñas dimensiones controlando la fuerza o la deformación del material. Esta máquina y sus prestaciones, sirven como punto de referencia para el dimensionamiento de las probetas a utilizar y de los elementos necesarios para simular el efecto deseado.

4.1 DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO DE PRUEBAS DINÁMICAS

El equipo para el montaje de la prueba es un Dynamique Mechanical Analyser (DMA), Figura 10.

Figura 10. Maquina Metravig DMA+1000



4.1.1 Rigidez y frecuencia del equipo METRAVIB DMA+1000. La rigidez en el equipo DMA Metravig se define como la capacidad que tiene la máquina de producir fuerza sobre un cuerpo para generar una deformación. Esta magnitud (K) va desde 1×10^1 [N/m] hasta 1×10^7 [N/m], y es importante la verificación del mismo, puesto que para un valor dentro de este rango, se presume que los resultados que genera el equipo son altamente confiables. Por otro lado, la frecuencia con la que el equipo es capaz de suministrar la carga varía desde 1×10^{-5} [Hz] hasta 1×10^2 [Hz].

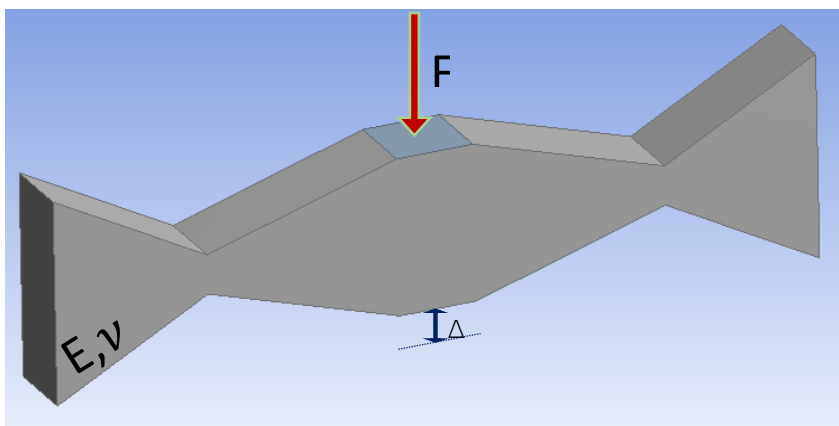
4.2 GEOMETRÍA DE LAS PROBETAS

El equipo DMA posee una cámara para la ejecución de ensayos en ambiente de temperatura controlada, de las siguientes dimensiones: Alto 120 mm, Ancho 140 mm y Fondo 75 mm. Estos valores son un factor importante para considerar el dimensionamiento de las probetas, puesto que se contempla la modificación del accesorio de soporte para ensayos de flexión (disponible en la máquina) para el

montaje de la muestra, además del espacio libre que debe tener la probeta para su desplazamiento en la ejecución del ensayo.

Para el desarrollo del ensayo de fatiga, se plantea una nueva geometría simétrica en la probeta para una prueba de flexión. Configurar el elemento portamuestra para un ensayo de flexión sobre viga simplemente apoyada requiere de un complicado sistema en los apoyos para que estos permitan la rotación y el desplazamiento del elemento de prueba por lo que se seleccionó una viga con extremos doblemente empotrados y que obligan a una geometría variable del elemento de prueba para que los esfuerzos y las máximas deformaciones no se sucedan en el apoyo o sitio de empalme con el portamuestra. La sección transversal es rectangular y las dimensiones de la base y la altura mayor se seleccionaron con base en las dimensiones de la cámara y del recorrido del actuador de carga de la máquina. Para generar el sitio de mayor sollicitación en la probeta, se reduce la sección en dos puntos equidistantes del punto de carga y de los apoyos de la probeta. Figura 11.

Figura 11. Simetría de la probeta



El soporte para ensayos de flexión posee un ancho de 114 mm, sobre los cuales es necesario apoyar la probeta mediante empotramiento, por ello se establece un ancho de 100 mm para la probeta. Por otra parte, el ensayo tendrá un único punto de aplicación de carga en el centro de la probeta, por ello se predisponen dos zonas de área reducida con el fin de concentrar esfuerzos allí y alejar la falla del punto de aplicación de carga y de la zona de empotramiento.

Para determinar la localización de las mayores solicitaciones y de los valores de las mismas, se modeló en un código de elementos finitos el elemento de prueba y por iteraciones sucesivas se establecieron las dimensiones definitivas de la probeta. En la Tabla 1 se ilustra sobre la metodología que se empleó para el diseño de la probeta.

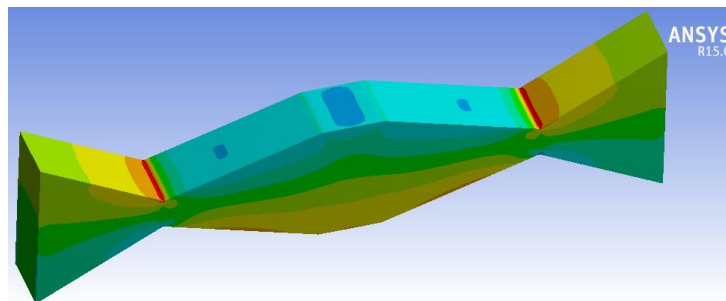
Tabla 1. Metodología de diseño de la probeta

A [mm]	B[mm]	C [mm]	Ubicación del punto de mayor solicitación	Def. Unit.v	Δ [mm]	v/D [1/mm]
20	20	20	0 mm del apoyo	6,9E-06	2,3E-04	3,0E-02
20	20	15	0 mm del apoyo	8,2E-06	5,2E-04	1,6E-02
20	20	10	0 mm del apoyo	7,1E-06	6,3E-04	1,1E-02
20	20	5	17 mm del apoyo	8,9E-06	8,9E-04	1,0E-02
26	20	5	25 mm del apoyo	2,6E-04	1,6E-02	1,7E-02

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 12 se observan resultados del modelamiento de las deformaciones unitarias que presenta una probeta con las dimensiones finales, simulada con un asfalto de módulo de elasticidad $2.5E+9$ [N/m²] y un coeficiente de Poisson de 0.35; se evidencia que la zona en donde se presentan las máximas deformaciones unitarias son las de reducción de área, con lo cual se predispone en la probeta a que la falla aparezca en esa zona.

Figura 12. Diagrama de deformación unitaria máx



Las dimensiones finales establecidas para la probeta del ensayo son las siguientes:

Largo de la probeta: 100mm

Ancho de la probeta: 10mm

Altura en los extremos (A): 26mm

Altura en el punto medio (B): 20mm

Altura en la zona de falla (C): 5mm

4.3 CÁLCULO DEL DESPLAZAMIENTO

Como se ha mencionado anteriormente, para el ensayo se puede considerar la teoría elástica de los materiales, siempre que el mismo se realice en temperaturas inferiores a los 25°C. Como el control del ensayo se realizará mediante una deformación, es necesario calcular el desplazamiento que presentaría la probeta en el punto medio al ser sometida a una carga. La solución se estableció empleando el teorema de Castigliano, que es uno de los métodos de energía en el análisis estructural clásico. Los métodos de energía en el análisis estructural se basan en el principio de conservación de la energía que presenta un cuerpo al ser sometido a un régimen de deformación mediante momentos, carga axial, torsión y cortante. En el ensayo, se someterá la probeta a un régimen de deformación mediante momentos y cortante a través de la ecuación (1):

$$\Delta = \frac{1}{E} \int_0^l \frac{Mx * \partial Mx}{I} dx + \frac{2(1 + \vartheta)}{E} \int_0^l \frac{Vx * \partial Vx}{Ar} dx \quad (1)$$

Cualquiera de estos patrones, realiza una contribución de energía al cuerpo y ocasiona finalmente la deformación o el giro. Para simplificar el problema, se contempla que el estado tensional crítico del material se presenta cuando este está sometido bajo carga simple, se plantea el modelo correspondiente y se calcula el desplazamiento en la probeta de dimensiones anteriormente reseñadas, cuando esta se encuentra empotrada en sus extremos:

$$\Delta = (1704.026441 + 487.3297586 * \vartheta) \left[\frac{F}{E} \right] \quad (2)$$

La ecuación (2) permite obtener el desplazamiento en el punto medio de un probeta fabricada con un material de módulo de elasticidad (E) y con un coeficiente de Poisson (q) a causa de la aplicación de una fuerza (F).

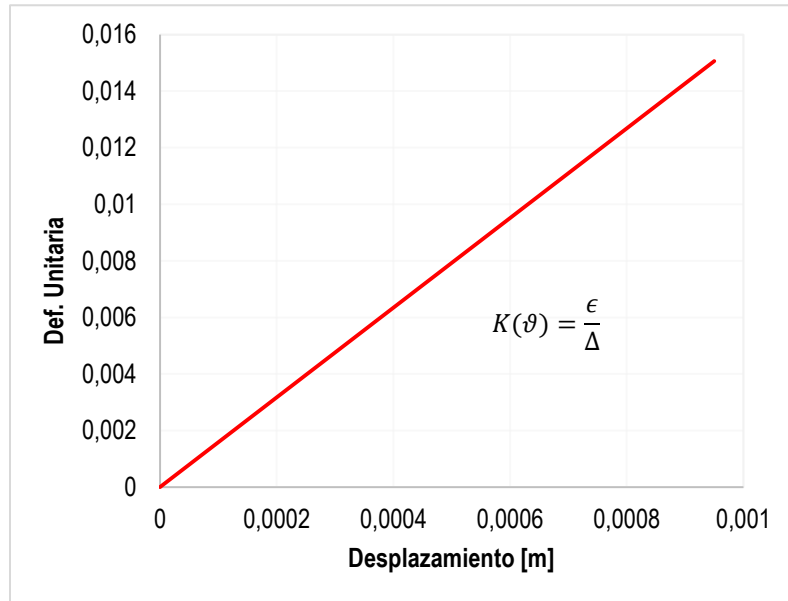
4.4 CONTROL DE LA DEFORMACIÓN UNITARIA

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.

Para determinar la relación que guardan el desplazamiento aplicado a la probeta y la deformación unitaria longitudinal en la zona de falla se estableció mediante el análisis de elementos finitos una ecuación Figura 13. La ecuación (3) permite controlar la deformación unitaria del ensayo, para cualquier ligante o mezcla asfáltica que se quiera probar fijando la deformación que se le impone a la probeta, e ingresando el coeficiente de Poisson del material.

$$\epsilon = \frac{(20.321 - 10.42\vartheta)}{K} * \Delta \quad (3)$$

Figura 13. Constante de proporcionalidad



4.5 DISEÑO ADAPTABLE DEL PORTAMUESTRA

Debido a la geometría establecida, los apoyos ofrecidos en los accesorios de la Metravib DMA no son los más indicados para ofrecer el desarrollo del ensayo al generar los empotramientos y un máximo desplazamiento, a causa de esto se hace necesario plantear nuevas piezas adaptables considerando la necesidad para el desarrollo del estudio [8]. Una vez establecida la necesidad se realizó recolección de datos cuantitativos y cualitativos; como valores máximos de carga, la duración, la velocidad y la frecuencia de los esfuerzos para realizar un diseño preliminar en la Metravib DMA como lo muestra en la Tabla 1 y Tabla 2, determinando la geometría y acabados de las mismas, mediante un diseño preliminar en SolidWorks como lo ilustra la Figura 14.

Figura 14. Diseño preliminar mediante el modelamiento en SolidWorks

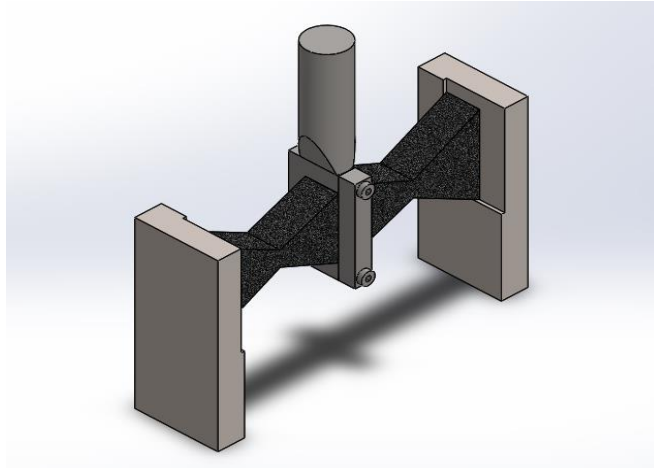


Tabla 2. Dimensiones iniciales de las placas laterales de empotramiento

Dimensiones iniciales	
Altura	5.5 cm
Espesor	0.8 cm
Ancho	2.5 cm

Tabla 3. Dimensiones iniciales de la aplicación de carga

Dimensiones iniciales	
Diámetro	1.1 cm
Altura	3.0 cm
Espesor	0.5 cm
Ancho	1.5 cm

Considerando los parámetros para el diseño básico se realiza la selección del material idóneo, conociendo las condiciones a la que se verá sometida la pieza, identificando las propiedades del ambiente de trabajo, como la temperatura (mín.-máx.), la humedad y el contacto con el material de la probeta [8-9], en este caso el

asfalto; por consideración de diseño se selecciona el acero inoxidable. Conociendo materiales y geometría se realiza prototipos en la cámara para posteriormente construir las piezas, Figura 15.

Figura 15. Prototipos de las piezas adaptables y probeta a la Metravib DMA+1000



Para el diseño definitivo se realizó simulación estructural de las piezas con ayuda del software SOLIDWORK 2015 para obtener mediante el análisis de elementos finitos (FEA) con carga dinámica las deformaciones y tensiones que actúan, determinando factores de seguridad como la relación entre la carga que produce la falla y la máxima carga aplicada, se estimó FS aceptable a consideración del diseño de los autores entre 65-80, una vez los resultados son confiables se procede a la fabricación y posteriormente al montaje del sistema en la maquina Metravib DMA.

5. VERIFICACIÓN DEL FUNCIONAMIENTO DEL ENSAYO

5.1 PREPARACIÓN DE LAS PROBETAS

La preparación de las probetas consiste en la fundición preliminar que se realiza con el fin de obtener especímenes de asfalto con la geometría estudiada 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 16.

Figura 16. Especímen del ensayo



5.2 MONTAJE DE LAS PIEZAS Y PREPARACIÓN DE LA MÁQUINA

Para llevar a cabo la prueba se montan el portamuestra, compuesto de dos piezas. La pieza móvil tiene una masa de 0,3195 [Kg] y la pieza estática una masa de 0,048 [Kg]. El objetivo de la prueba es imponer un desplazamiento constante deseado y se mide la evolución de los valores de fuerza que se requiere, para después calcular los módulos E del material con ayuda de la ecuación (2).

Con el proyecto creado, se procede a instalar el portamuestras en la máquina, procurando un buen ajuste del mismo en las abrazaderas del equipo. Una vez ajustadas, se coloca la probeta en el portamuestras y se adhiere a las paredes de las placas con pegante instantáneo, al igual que en la superficie interna de la pieza estática. Al momento del secado del pegante se atornilla el cierre de la pieza estática. Finalmente se obtiene un montaje como el que muestra la Figura 17.

La máquina DMA posee una cámara ambiental que permite generar condiciones específicas de temperatura al realizar un ensayo. Estas temperaturas son posibles a través del suministro de nitrógeno líquido en el equipo. Para las pruebas se optó por usar la temperatura ambiente en los ensayos, siguiendo los lineamientos acerca de las condiciones en las que los ligantes presentan resultados que describen comportamientos de predominio elástico. Con el montaje Figura 16, y la preparación de la máquina terminados se da inicio a la ejecución de la prueba.

Figura 17. Montaje final de las piezas y probeta



5.3 PRUEBAS DE VALIDACIÓN DEL ENSAYO

Para verificar que el ensayo es capaz de determinar de manera correcta las propiedades mecánicas de un material, se ensayó el mismo material en la prueba diseñada y en ensayo de compresión simple sobre probeta cilíndrica. Se evalúa si los módulos de elasticidad obtenidos en los dos ensayos son comparables.

Las frecuencias utilizadas en la prueba son 1, 2, 3, 5, 10, 15 y 25 [Hz], esto con el fin de someter la probeta a un espectro de frecuencias bajas y altas. Los periodos empleados en el ensayo corresponden a los predeterminados que asigna el equipo para las frecuencias dadas.

Para que la sollicitación impuesta al material sea similar, se calcularon los desplazamientos tanto de la probeta de compresión simple como de la probeta ensayada en flexión.

El desplazamiento impuesto en la prueba de flexión fue de $3.16E-5[m]$ que corresponde a una deformación unitaria máxima de 500×10^{-6} , ecuación (3). Los desplazamientos impuestos a las probetas cilíndricas de $30[mm]$ de altura, fueron de $1.5 \times 10^{-5}[m]$, $9E-6[m]$ y $6E-6[m]$, que equivalen a una deformación unitaria de $500E10^{-6}$, $300E-6$ y $200E-6$ respectivamente. En las dos pruebas el material fue sometido a esfuerzos alternados de compresión y tracción.

5.4 RESULTADOS

5.4.1 Control teórico de la prueba. El control teórico de la prueba se ha llevado a cabo mediante la aplicación de cargas dinámicas de compresión y tracción a 3 cilindros. Figura 18.

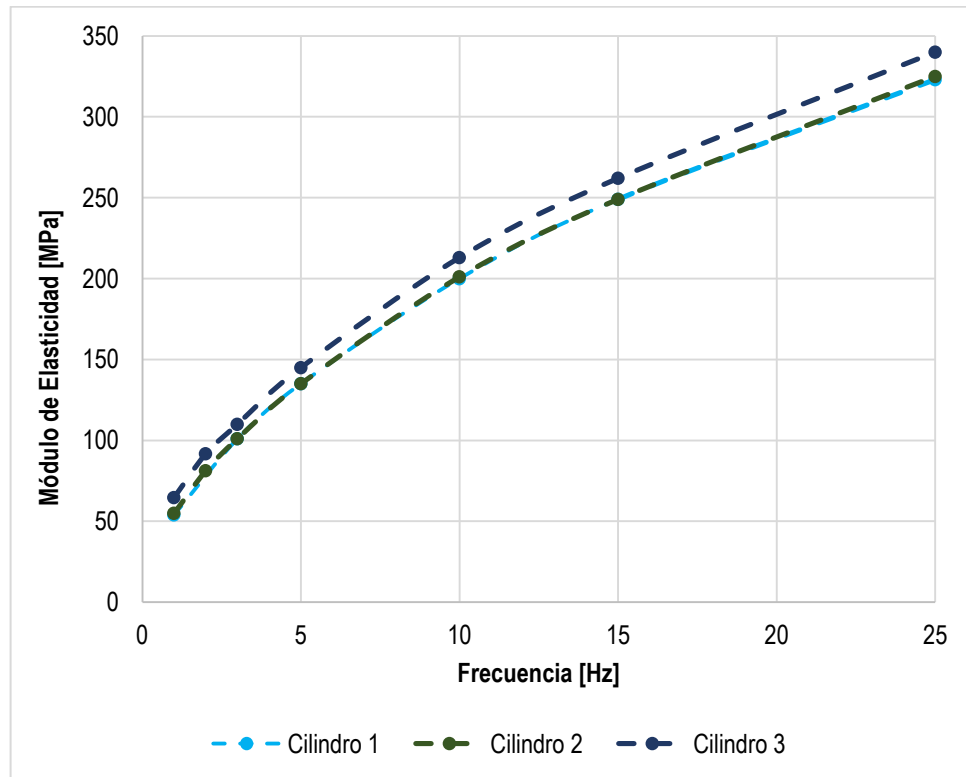
Figura 18. Montaje de los cilindros



Tabla 4. Módulos de Elasticidad teóricos

Frecuencia [Hz]	Módulo de Elasticidad E (MPa)		
	Cilindro 1	Cilindro 2	Cilindro 3
1	53,90	54,90	64,70
2	80,90	81,20	91,70
3	101,00	101,00	110,00
5	135,00	135,00	145,00
10	200,00	201,00	213,00
15	249,00	249,00	262,00
25	323,00	325,00	340,00

Figura 19. Módulo de Elasticidad Vs Frecuencia – Valores teóricos



5.4.2 Verificación del módulo E. Las fuerzas aplicadas por la máquina a las probetas, organizadas de acuerdo a las frecuencias solicitadas, se ilustran en la Tabla 5.

Con la ecuación (2), se calcularon los valores E, ver Tabla 6, de las probetas, y se muestran en la Figura 20, para realizar la comparación con los valores obtenidos en ensayo sobre probetas cilíndricas.

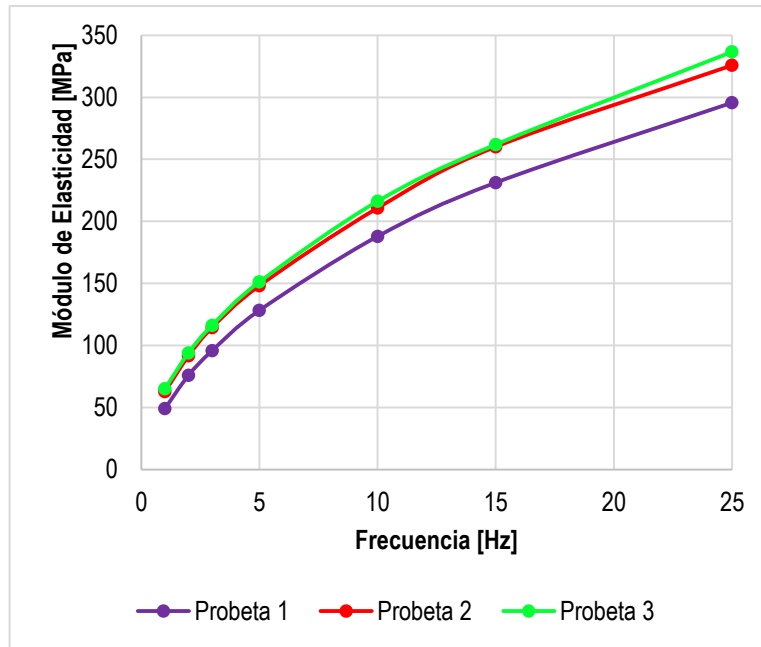
Tabla 5. Valores de fuerzas en probeta experimental

Frecuencia [Hz]	Fuerza [N]		
	Test 1	Test 2	Test 3
1	0,814	1,04	1,08
2	1,26	1,52	1,56
3	1,59	1,9	1,93
5	2,13	2,46	2,51
10	3,12	3,5	3,59
15	3,84	4,32	4,35
25	4,91	5,41	5,59

Tabla 6. Valores de módulos de elasticidad de probeta experimental

Frecuencia [Hz]	Módulo de Elasticidad E (MPa)		
	Test 1	Test 2	Test 3
1	49,009	62,616	65,025
2	75,862	91,516	93,924
3	95,731	114,395	116,201
5	128,243	148,112	151,122
10	187,849	210,728	216,146
15	231,198	260,098	261,905
25	295,621	325,725	336,562

Figura 20. Módulo de elasticidad Vs frecuencia – Valores experimentales

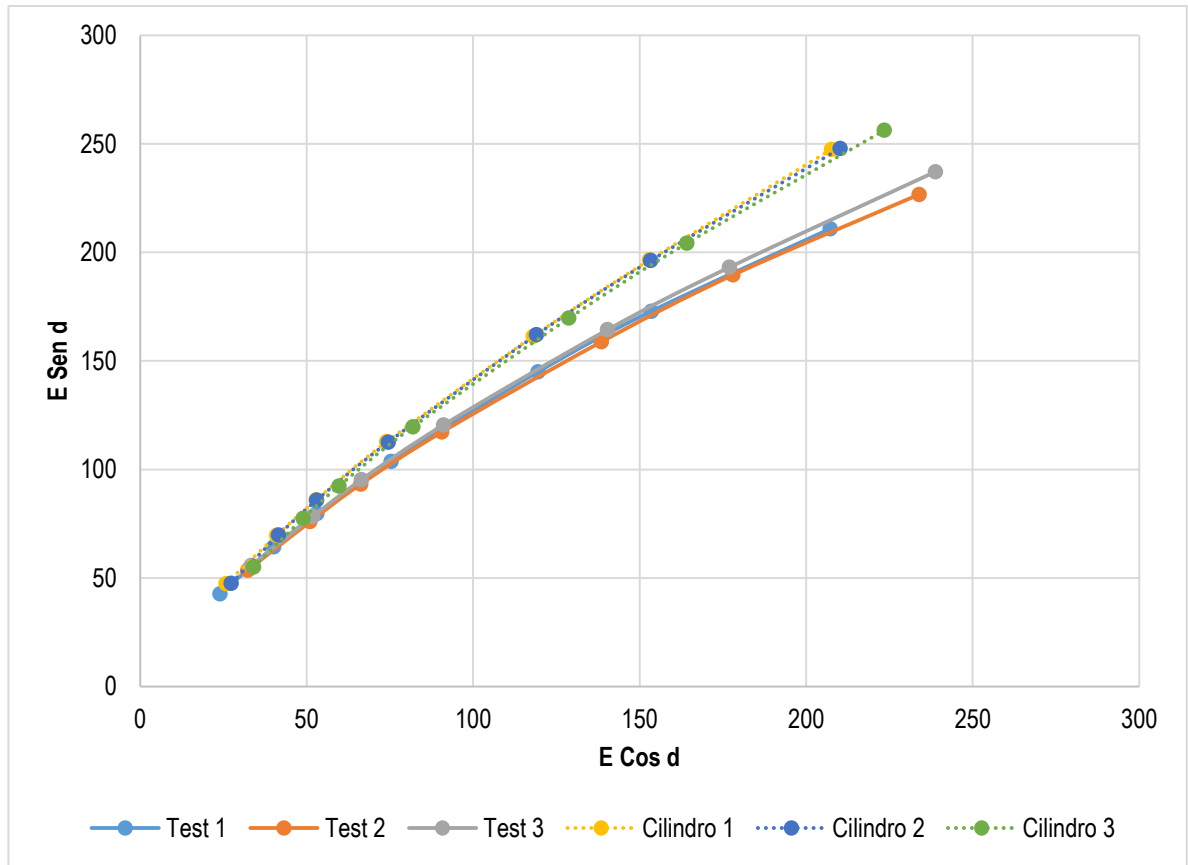


La Tabla 7 muestra los valores de los ángulos de fase obtenidos en las pruebas, adicionalmente la Figura 20., ilustra resultados similares entre los ángulos de fase obtenidos para las probetas y los obtenidos en los cilindros.

Tabla 7. Ángulos de fase obtenidos

Ángulos de fase					
Probetas			Cilindros		
Test 1	Test 2	Test 3	Cilindro 1	Cilindro 2	Cilindro 3
60,60	58,90	59,10	61,40	60,10	58,20
58,00	56,10	56,50	59,50	59,20	57,70
56,30	54,60	55,10	58,40	58,30	57,10
54,00	52,30	52,90	56,70	56,50	55,60
50,50	48,90	49,50	53,80	53,70	52,80
48,40	46,80	47,50	52,10	52,00	51,20
45,50	44,10	44,80	50,00	49,70	48,90

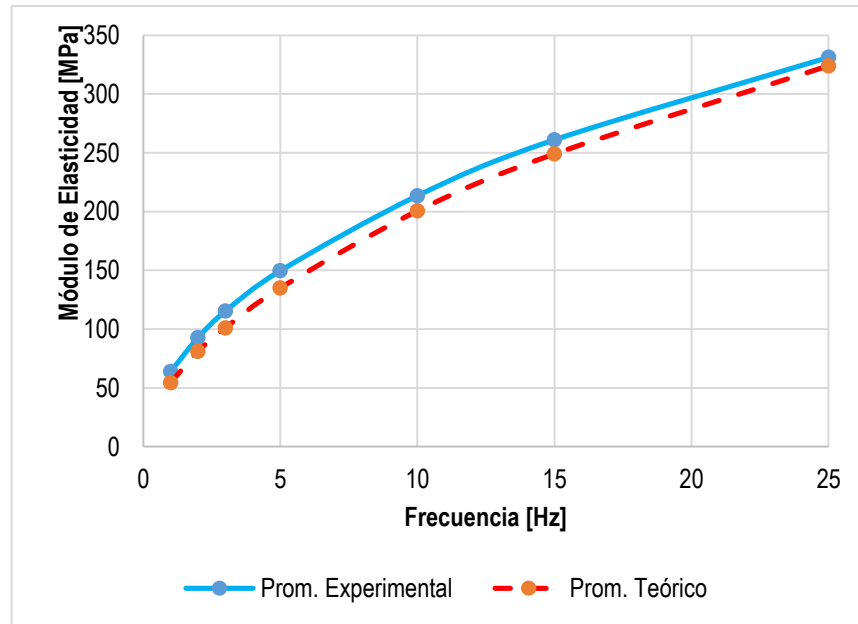
Figura 21. Comparación de los ángulos de fase



Los resultados de la probeta 1 presentan una variación de mayor magnitud, debido a que hubo problemas en el ajuste correcto de la abrazadera sobre la pieza fija, este hecho ocasiona una serie de desplazamientos internos que ocurren en el contacto con la máquina al momento de ejecutar el ensayo.

En la Figura 21, se muestra la diferencia de rigideces medidas para un resultado promedio de la probeta diseñada y el resultado promedio medido con probetas cilíndricas.

Figura 22. Superposición de gráfico teórico y gráfico experimental



Los porcentajes de error para cada test fueron calculados teniendo en cuenta el valor que resulta del promedio de los dos valores más cercanos de E para los cilindros, y como valor experimental el promedio de los dos valores más cercanos de la nueva probeta. Los resultados son los siguientes, ver Tabla 8:

Tabla 8. Porcentajes de error

Error	
Frecuencia [Hz]	%
1	17,3
2	14,4
3	14,2
5	10,8
10	6,5
15	4,8
25	2,2

Según estos valores, se puede afirmar que el margen de error se reduce considerablemente al trabajar con materiales de mayor rigidez, esto se podría explicar cómo que los ligantes, con menor rigidez, su comportamiento puede ser más viscoso y menos próximo a un material de comportamiento elástico lineal.

6. CONCLUSIONES

- Se logró diseñar una probeta y un portamuestras, para estudiar mediante un ensayo de flexión, la fatiga en ligantes bituminosos.
- El ensayo permite evaluar la resistencia a la fatiga de materiales bituminosos, y establecer una clasificación entre materiales con alta resistencia y materiales con baja resistencia.
- Se redactó un proyecto de norma del ensayo propuesto. Ver Anexo A.

7. PERSPECTIVAS

Los resultados de este trabajo permiten plantear algunas perspectivas para continuar con el estudio de fatiga en ligantes bituminosos:

- Realizar estudios comparativos entre los asfaltos producidos en Colombia, y los asfaltos producidos en otros países.
- Estudiar el efecto de aditivos sobre el asfalto, comparando el asfalto original y el asfalto aditivado.
- Establecer si existe relación directa entre la resistencia a la fatiga del bitumen con la resistencia a la fatiga del mastic y de la mezcla asfáltica.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] GONZÁLEZ RODRÍGUEZ Silvia Viviana, VELANDIA ARGÜELLO Siul Enith. Estado del arte en el estudio de la fatiga de materiales bituminosos. [Tesis de Pregrado]. Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, 2006.

[2] MIRO RECASENS Jorge-Rodrigo. Metodología para la caracterización de ligantes asfálticos mediante el empleo del ensayo cántabro. [Tesis de Doctorado]. Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, 1994.

[3] Modelo de Kelvin-Voigt de comportamiento viscoelástico; Universitat Politècnica de València. Disponible: <http://hdl.handle.net/10251/1203> [Citado 29 de Junio de 2016].

[4] Roque R. y Buttlar, W.G. (1992). The Development of Measurement and Analysis System to Accurately Determine Asphalt Concrete Properties Using the Indirect Tensile Mode. Asphalt paving Technology, Journal of the Association of Asphalt Paving Technologist, Proceedings of the Technical Sessions, St Louis, Missouri, Vol 61, pp 304-332.

[5] SIERRA BOLAÑO Yulani Mariet. Diseño de pavimentos de la cra 46, entre calles 75 y 77 sur, Sabaneta. [Tesis de Especialización]. Universidad Nacional de Colombia, Medellín, 2009.

[6] E. Chailleux, D. Bodin, C. De La Roche, M. Leguern, N. Vignard. Fatigue behaviour of bitumen in tension-compression loading mode: Rheological analysis and comparison with mix fatigue. Advanced Testing and Characterization of Bituminous Materials, May 2009, France. pp 773-783, 2009.

[7] METRAVIB DMA+1000. Disponible: <http://metravib.acoemgroup.fr>. [Citado 01 de Julio de 2016].

[8] Groover Mikell P. Fundamentos de Manufactura Moderna; Materiales, procesos y sistemas. Mc Graw Hill, 3ª Edición, México D.F. 2007. pp 194-203

[9] Doyle L.E. Procesos de Manufactura y Materiales para Ingeniería. Prentice Hall. México. 1988. Pp 130-156.

BIBLIOGRAFÍA

DOYLE L.E. Procesos de Manufactura y Materiales para Ingeniería. Prentice Hall. Mexico. 1988. Pp 130-156.

Chailleux, E. Bodin, D. De La Roche, C. Leguern, M. Vignard, N.. Fatigue behaviour of bitumen in tension-compression loading mode: Rheological analysis and comparison with mix fatigue. Advanced Testing and Characterization of Bituminous Materials, May 2009, France. pp 773-783, 2009.

GONZÁLEZ RODRÍGUEZ Silvia Viviana, VELANDIA ARGÜELLO Siul Enith. Estado del arte en el estudio de la fatiga de materiales bituminosos. [Tesis de Pregrado]. Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, 2006.

GROOVER MIKELL, P. Fundamentos de Manufactura Moderna; Materiales, procesos y sistemas. Mc Graw Hill, 3ª Edición, Mexico D.F. 2007. pp 194-203

METRAVIB DMA+1000. Disponible: <http://metravib.acoemgroup.fr>. [Citado 01 de Julio de 2016].

MIRO RECASENS, Jorge-Rodrigo. Metodología para la caracterización de ligantes asfálticos mediante el empleo del ensayo cántabro. [Tesis de Doctorado]. Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, 1994.

Modelo de Kelvin-Voigt de comportamiento viscoelástico; Universitat Politècnica de València. Disponible: <http://hdl.handle.net/10251/1203> [Citado 29 de Junio de 2016].

ROQUE R. y BUTTLAR, W.G. (1992). The Development of Measurement and Analysis System to Accurately Determine Asphalt Concrete Properties Using the Indirect Tensile Mode. Asphalt paving Technology, Journal of the Association of Asphalt Paving Technologist, Proceedings of the Technical Sessions, St Louis, Missouri, Vol 61, pp 304-332.

SIERRA BOLAÑO, Yulani Mariet. Diseño de pavimentos de la cra 46, entre calles 75 y 77 sur, Sabaneta. [Tesis de Especialización]. Universidad Nacional de Colombia, Medellín, 2009.

ANEXOS

ANEXO A. Norma para un ensayo de fatiga sobre ligantes bituminosos

1 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**.

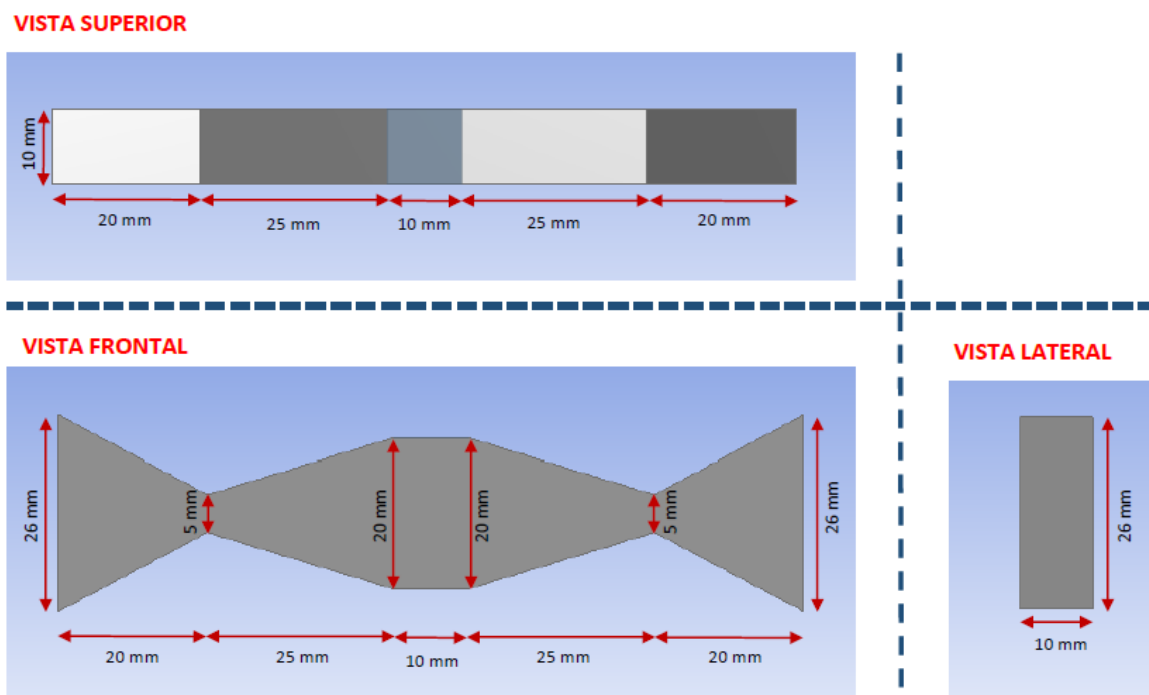


Figura 1. Geometría del espécimen

2 RESUMEN DEL ENSAYO

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

3 EQUIPO

3.1 *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.

3.1.1 *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.

3.1.2 *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 portamuestra 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.

3.1.3 *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 $\pm 0.1^\circ \text{C}$.

3.1.4 *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.

4 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 2. Especímenes del ensayo

5 PROCEDIMIENTO

5.1. 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 fuerza que requiere la máquina para suministrar el desplazamiento constante deseado, para después calcular los módulos E del material, se procede a ajustar las piezas fijas y móviles, 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 4. Montaje de las piezas móvil y fija con la probeta experimental

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

5.3 Temperatura de ensayo: se coloca el espécimen correspondiente; para un ligante asfáltico o de mastico asfáltico una temperaturas de entre -10°C hasta 40°C , durante el tiempo para finalizar el ensayo.

5.4 *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 ciclos 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.

6 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.

6.1. *Deformación unitaria* (ϵ): La ecuación (2) permite controlar la deformación unitaria del ensayo en los especímenes experimental, para cualquier ligante o mastico asfáltico que se quiera probar, en la cual el desplazamiento es calculado despejando Δ de la ecuación (2), ver **Grafica 1**.

$$\epsilon = \frac{(20.321 - 10.42\nu)}{K} * \Delta \quad (2)$$

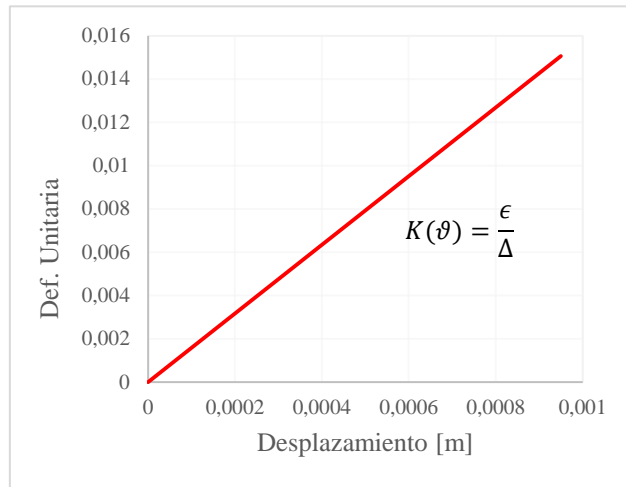
Si se desconoce el valor de ν , asumir el valor de $K=15.845$ [1/m]

Dónde : ϵ : Deformación unitaria , [m/m]

K : Constante de proporcionalidad

ν : Coeficiente de Poisson del material

Δ : Desplazamiento máximo de la probeta experimental



6.2. Desplazamiento máxima de flexión (Δ):

$$\Delta = (1704.026441 + 487.3297586 * \vartheta) \left[\frac{F}{E} \right] \quad (3)$$

Donde : F: Carga aplicada en [N]

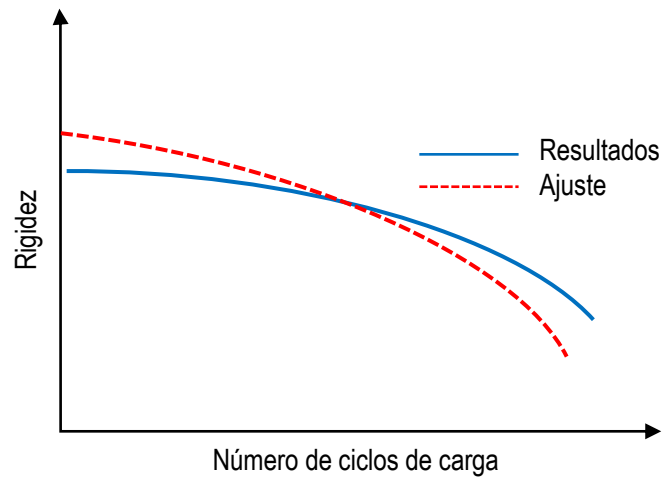
ϑ : Coeficiente de Poisson del material

E: Módulo de elasticidad

6.3. 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**.

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

Donde: e: Base del logaritmo natural;
A,b: Constantes.



Gráfica 2. Ajuste de curva - Rigidez Vs Número de ciclos

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

$$n_{f,50} = \frac{\left[\ln \frac{S_{f,50}}{A} \right]}{b}$$

Donde: $S_{f,50}$: 50% de la rigidez inicial, Pa;

$S_{f,50}/A$: 0.5 por definición

7 INFORME

7.1 Se debe presentar la siguiente información:

7.1.1 *Descripción del material asfáltico*- Tipo y contenido de ligante, gradación de los agregados y el porcentaje de vacíos con aire.

7.1.2 *Dimensiones del espécimen* – La longitud y los valores promedios del ancho, altura y espesor, en metros, con tres dígitos significativos.

7.1.3 *Temperatura del ensayo*, con una aproximación de 0.2 °C

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

Ciclo de carga	Deformación Unitaria en tracción	Desplazamiento Δ [m]	Fuerza [N]	Rigidez [Mpa]

8 OBSERVACIONES

8.1 Las condiciones previas en la elaboración del ensayo, son determinantes para el grado de exactitud 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.

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