

**IMPLEMENTACIÓN DE UN ENSAYO PARA MEDIR EL MÓDULO DE  
RIGIDEZ COMPLEJO EN MEZCLAS ASFÁLTICAS**

**FABIO ARMANDO NARANJO SALAZAR**

**JAVIER ALBERTO RUEDA ZAMBRANO**

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

**2011**

**IMPLEMENTACIÓN DE UN ENSAYO PARA MEDIR EL MÓDULO DE  
RIGIDEZ COMPLEJO EN MEZCLAS ASFÁLTICAS**

**FABIO ARMANDO NARANJO SALAZAR**

**JAVIER ALBERTO RUEDA ZAMBRANO**

**Trabajo de grado modalidad Investigativa**

**Para optar al título de:**

**Ingeniero Civil**

**Director:**

**EDUARDO ALBERTO CASTAÑEDA PINZÓN**

**Ingeniero Civil, M. Sc., Ph. D.**

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

**2011**

*Dedicado a Mis Padres Mercedes y José Reinaldo*

*A Mis Hermanos Laura e Ivan*

*A Mis Sobrinos Samuel e Isabella*

*A Mi Abuela María*

*Por Ser Mi Apoyo Incondicional y las Personas Que Más Quiero*

*Y Especialmente, dedico mi trabajo a Javier Alberto,*

*Colega y Amigo.*

*Fabio Armande Naranjo Salazar*

*Dedicado a Benjamin, Leticia, Néstor y Yolanda...*

*Los motivos más grandes de mi felicidad.*

*Y Especialmente, dedico mi trabajo a Fabio Armando,*

*Colega y Amigo.*

*Javier Alberto Rueda Zambrano*

## **AGRADECIMIENTOS**

Los autores expresan su agradecimiento a:

Ing. Eduardo Castañeda, director de este proyecto, quien gracias a su tiempo y disposición, fue el guía necesario para el feliz término de la tesis.

Ingenieras Viviana Pérez y Lina Polanco quienes nos acompañaron en el desarrollo del proyecto brindándonos su amistad, apoyo y conocimientos.

Ing. María Cristina Olarte, quien nos ayudo y dedico el tiempo para sacarnos de los apuros en los momentos en los momentos difíciles.

CORASFALTOS, especialmente al Ing. Edgar Peña por su aporte a la realización del proyecto.

Jairo, Germán y Jaime quienes siempre estuvieron para colaborarnos con la disposición de los laboratorios.

La planta docente de la escuela de ingeniería civil, especialmente a Leocadio, el profe Cruz.

Y a Nuestros Familiares y Amigos, especialmente a Platuchis, Morita, Pechi, Vomitín, Maga, el Gordo, Pintu, Forrito, Cebolla, Jorginho, Camilo, el choncho, la Tigri y la Hdez por estar ahí durante estos cinco años.

# CONTENIDO

<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>19</b>
<b>OBJETIVOS</b> .....	<b>21</b>
OBJETIVOS GENERALES .....	21
OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	21
<b>1. MEZCLAS ASFÁLTICAS</b> .....	<b>22</b>
1.1. COMPORTAMIENTO DE LA MEZCLA EN LA CARPETA ASFÁLTICA... 23	
1.1.1. Efecto del tráfico.....	24
1.1.2. Efecto de la temperatura .....	25
1.2. MATERIALES VISCO-ELÁSTICOS.....	26
1.2.1. Características de los materiales visco-elásticos .....	27
1.2.1.1. Rigidez en materiales visco-elásticos .....	27
1.2.1.2. Linealidad de de los materiales visco-elásticos .....	28
1.3. MÓDULO COMPLEJO EN MATERIALES VISCO-ELÁSTICOS .....	29
1.3.1. Determinación del Módulo Complejo.....	30
1.3.2. Representación grafica de módulo complejo en el plan Cole-Cole ....	33
1.4. ENSAYOS PARA DETERMINAR EL MÓDULO DE RIGIDEZ COMPLEJO EN MEZCLAS ASFÁLTICAS .....	34
<b>2. IMPLEMENTACIÓN DE ENSAYO EN VIGAS DE CONCRETO ASFÁLTICO</b> .....	<b>37</b>
2.1. METODOLOGÍA DE ENSAYO .....	37
2.1.1. Descripción del ensayo de flexión en cuatro puntos .....	37
2.1.2. Diseño y montaje del dispositivo estructural .....	40
2.2. FABRICACIÓN DE PROBETAS .....	45
<b>3. ENSAYO DE MÓDULO COMPLEJO EN VIGAS DE CONCRETO ASFÁLTICO</b> .....	<b>49</b>

3.1. PRUEBAS DE ADAPTACIÓN .....	49
3.1.1. Preparación de vigas y realización del ensayo .....	51
<b>4. ANALISIS DE RESULTADOS .....</b>	<b>54</b>
4.1. IDENTIFICACIÓN DE LOS DATOS.....	54
4.2. TRATAMIENTO DE LOS DATOS OBTENIDOS.....	55
4.3. DISEÑO DEL SOFTWARE PARA EL ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	58
4.4. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS .....	61
4.4.1. Comportamiento visco-elástico de las mezclas.....	62
4.4.2. Evolución esperada del módulo .....	62
4.4.2.1. Incidencia de la Temperatura en la Rigidez Compleja.....	64
4.4.2.2. Incidencia de la Frecuencia en la Rigidez Compleja.....	65
<b>5. CONCLUSIONES .....</b>	<b>68</b>
<b>6. RECOMENDACIONES .....</b>	<b>70</b>
<b>7. BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>71</b>
<b>ANEXOS.....</b>	<b>73</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1-1: Estructura del pavimento flexible .....	22
Figura 1-2: Comportamiento de una mezcla asfáltica en función de su deformación y temperatura.....	24
Figura 1-3: Deformación permanente y ahuellamiento en pavimentos flexibles ....	25
Figura 1-4: Relación Esfuerzo-Deformación para dos Valores Diferentes de Tiempo de Aplicación de Carga.....	28
Figura 1-5: Comportamiento de una mezcla asfáltica, según la deformación y el número de ciclos aplicados.....	29
Figura 1-6: Señales de Carga y Deformación .....	31
Figura 1-7: Representación general del Módulo Complejo. ....	32
Figura 1-8: Módulo Complejo en el plano Cole-Cole para una mezcla asfáltica ....	33
Figura 2-1: Deflexión en la viga .....	38
Figura 2-2: Apoyo en 4 puntos y aplicación de carga .....	39
Figura 2-3: Material Test System MTS-810 (Partes del Equipo- frente) .....	40
Figura 2-4: Material Test System MTS-810 (Partes del Equipo- atrás).....	41
Figura 2-5: Dispositivo estructural.....	42
Figura 2-6: Dimensiones de la Viga o Probeta .....	43
Figura 2-7: Diseño Elemento Estructural .....	44
Figura 2-8: Montaje en la MTS-810 .....	44
Figura 2-9: Corte del Pavimento (Extracción de Especímenes en Campo) .....	45
Figura 2-10: Molde para la Realización de Vigas.....	46
Figura 2-11: Placas Compactadas.....	46
Figura 2-12: Maquina Compactadora de placa .....	47
Figura 2-13: Cortadora de Placas .....	48
Figura 3-1: Ensayos preliminares .....	49
Figura 3-2: Modelo en SAP 2000.....	50
Figura 3-3: Identificación de las muestras .....	51
Figura 3-4: Ensayo de Flexión en 4 Puntos (Módulo Complejo).....	53
Figura 4-1: Ejemplo de Identificación de las pruebas .....	54
Figura 4-2: Datos de salida tras un ensayo .....	55
Figura 4-3: Ajuste de curvas en EXCEL .....	56
Figura 4-4: Cálculo del módulo complejo.....	58
Figura 4-5: Interfaz inicial.....	59
Figura 4-6: Datos generales del programa .....	59
Figura 4-7: Datos de la prueba .....	60

Figura 4-8: Resultados en el programa.....	61
Figura 4-9: Curva CARGA y DESPLAZAMIENTO vs TIEMPO.....	62
Figura 4-10: Plano Cole-Cole para el material UNO.....	63
Figura 4-11: Plano Cole-Cole para el material DOS.....	63
Figura 4-12: Comparación del módulo dinámico con la temperatura (Probeta UNO) .....	64
Figura 4-13: Comparación del módulo dinámico con la temperatura (Probeta DOS) .....	65
Figura 4-14: Comparación del módulo dinámico con la frecuencia (Probeta UNO) .....	66
Figura 4-15: Comparación del módulo dinámico con la frecuencia (Probeta DOS) .....	66

## LISTA DE ECUACIONES

Ecuación 1-1: Esfuerzo sinusoidal .....	30
Ecuación 1-2: Deformación sinusoidal desfasada. ....	30
Ecuación 1-3: Módulo complejo .....	31
Ecuación 1-4: (a) Amplitud compleja del esfuerzo, (b) Amplitud compleja de la deformación y (c) Módulo complejo en forma exponencial .....	31
Ecuación 1-5: Módulo complejo en forma general .....	32
Ecuación 1-6: (a) Módulo elástico y (b) Módulo viscoso .....	34
Ecuación 4-1: Ecuación de ajuste de la carga .....	55
Ecuación 4-2: Ecuación de ajuste del desplazamiento .....	55
Ecuación 4-3: Ecuación del esfuerzo .....	56
Ecuación 4-4: Ecuación de la deformación unitaria .....	57
Ecuación 4-5: Factor de forma para vigas .....	57

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1-1: Control de los efectos de la temperatura en mezclas asfálticas .....	26
Tabla 1-2: Tipos de ensayos para determinar el módulo complejo en mezclas asfálticas .....	35
Tabla 3-1: Especificaciones de las Muestras .....	52
Tabla 3-2: Protocolo de Ensayo.....	53

## LISTA DE ANEXOS

Anexo A – PLANOS PARA LA REALIZACIÓN DEL DISPOSITIVO ESTRUCTURAL .....	73
Anexo B – VALORES DEL MÓDULO COMPLEJO PARA LOS ENSAYOS DE LA MUESTRA UNO .....	77
Anexo C y Anexo D (Formato Digital) .....	81

## RESUMEN

### TITULO:

IMPLEMENTACIÓN DE UN ENSAYO PARA MEDIR EL MÓDULO DE RIGIDEZ COMPLEJO EN MEZCLAS ASFÁLTICAS\*

### AUTORES:

NARANJO SALAZAR, Fabio Armando  
RUEDA ZAMBRANO, Javier Alberto\*\*

### PALABRAS CLAVES:

ENSAYOS, MÓDULO COMPLEJO, RIGIDEZ, MEZCLAS ASFÁLTICAS, FRECUENCIA DE CARGA, TEMPERATURA.

### DESCRIPCIÓN:

En Colombia, el incremento de los volúmenes de tránsito y las diferentes condiciones climáticas, hacen necesaria la construcción de carreteras con mayor capacidad, durabilidad y confort para los usuarios. En los pavimentos flexibles, uno de los principales factores que se deben garantizar es la rigidez de la capa de rodadura, puesto que es un indicador determinante de la durabilidad de las vías.

Caracterizar un material mediante ensayos y pruebas de laboratorio es importante para determinar sus propiedades y conocer su comportamiento bajo las diferentes condiciones a las que se solicita. En el caso de los concretos asfálticos, la naturaleza visco-elástica del bitumen es determinante en la respuesta del material para diferentes sollicitaciones de carga y temperatura. En este sentido, el módulo de rigidez complejo surge como una solución que permite caracterizar las mezclas asfálticas de acuerdo a sus componentes de rigidez elástica y viscosa.

En el presente estudio se ha llevado a cabo la implementación del ensayo no destructivo de flexión en cuatro puntos, para el laboratorio de la UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER; con el fin de determinar el módulo de rigidez complejo en mezclas asfálticas y su variación con respecto de la frecuencia de carga y la temperatura. De esta manera, la metodología planteada constituye una nueva herramienta en la caracterización de los materiales bituminosos, que permitirá optimizar las metodologías de diseño y control de los pavimentos flexibles en nuestro país.

\*Trabajo de Investigación.

\*\*Faculta de Ciencias Físico-Mecánicas, Escuela de Ingeniería Civil, Eduardo Castañeda.

## ABSTRACT

### TITLE:

IMPLEMENTATION OF A TEST FOR MEASURING COMPLEX STIFFNESS MODULUS OF ASPHALT MIXTURES\*

### AUTHORS:

NARANJO SALAZAR, Fabio Armando  
RUEDA ZAMBRANO, Javier Alberto\*\*

### KEYWORDS:

TESTS, COMPLEX MODULE, STIFFNESS, ASPHALT MIXTURES, FREQUENCY OF LOAD, TEMPERATURE.

### DESCRIPTION:

In Colombia, the increase in traffic volumes and the different climatic conditions, require the construction of roads with greater capacity, durability and comfort for users. In flexible pavements, one of the main factors to ensure is the stiffness of the surface course, since it is a decisive indicator of the lifetime of the roads.

Characterize materials by laboratory testing is important to determine their properties and understand their behavior under the different conditions it is sought. In the case of asphalt concrete, viscoelastic nature of the bitumen is decisive in the response of the material to different requests of load and temperature. In this sense, the complex modulus arises as a solution to characterize the asphalt mixtures according to the components of elastic and viscous stiffness.

In the present study was carried out the implementation of non-destructive, four point bending test in the laboratory of the UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER, in order to determine the complex modulus of asphalt mixtures and its variation about loading frequency and temperature. Thus, the proposed methodology provides a new tool in the characterization of bituminous materials, which will optimize the design and control methodologies for flexible pavements in our country.

\*Trabajo de Investigación.

\*\*Faculta de Ciencias Físico-Mecánicas, Escuela de Ingeniería Civil, Eduardo Castañeda.

## INTRODUCCIÓN

En Colombia, el desarrollo económico y social exige una infraestructura vial de excelentes condiciones técnicas, acordes con los crecientes volúmenes de tránsito y las características geográficas y topográficas del país. En este sentido, para garantizar la capacidad, durabilidad y el confort en las carreteras, se hace necesario profundizar en la investigación de los componentes de la estructura del pavimento.

El estudio del concreto asfáltico ha permitido implementar ensayos de módulo de rigidez complejo que, apoyados en teorías de elasticidad y leyes de fatiga, muestran el comportamiento de las mezclas bituminosas en la estructura de los pavimentos. Dichos ensayos constituyen herramientas esenciales en la caracterización y el control de los materiales bajo condiciones reales.

Este documento presenta la metodología de implementación del ensayo de flexión en cuatro puntos para determinar el módulo de rigidez complejo en vigas de sección rectangular y el análisis de los datos obtenidos a partir de este.

En el primer capítulo se presenta una revisión bibliográfica de las mezclas asfálticas, su comportamiento visco elástico y su caracterización mediante el módulo complejo. El segundo capítulo contiene la metodología que describe el ensayo, muestra el proceso de realización y la implementación dentro del laboratorio de materiales de la Universidad Industrial de Santander, también establece las mínimas consideraciones para que sea implementado en otros

laboratorios interesados en la caracterización de las mezclas asfálticas o para estudios futuros de profundización en esta rama de la investigación.

El tercer capítulo presenta los resultados obtenidos a partir de la realización del ensayo, para diferentes condiciones de temperatura y frecuencia de carga, con su respectivo análisis. Para finalizar se encuentran las conclusiones y recomendaciones donde se exponen puntos de vista, para dar claridad al objetivo de esta tesis.

## **OBJETIVOS**

### **OBJETIVOS GENERALES**

- Implementar una metodología de laboratorio que permita medir el módulo de rigidez, mediante un ensayo de módulo complejo en vigas rectangulares de mezclas asfálticas densas en caliente.

### **OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

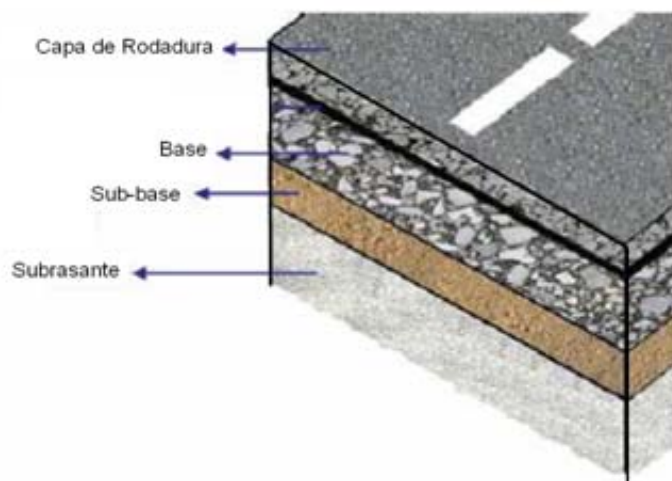
- Definir el elemento para realizar el montaje del ensayo para apoyar las vigas sometidas a flexión con probetas en concreto asfáltico.
- Proponer los parámetros y establecer una metodología de ensayo de modulo complejo variando temperatura y frecuencias de carga.
- Diseñar un software de análisis de resultados para vigas de concreto asfáltico sometidas a ensayos de flexión.

# 1. MEZCLAS ASFÁLTICAS

Un pavimento es una estructura multicapa construida para permitir la circulación cómoda y segura de los vehículos en una carretera. Existen principalmente dos tipos de pavimentos: flexibles y rígidos. Los pavimentos flexibles son los más empleados y su estructura es en capas de materiales pétreos y mezcla asfáltica. La mezcla asfáltica es la encargada de resistir directamente las cargas transmitidas por el tráfico de vehículos y soportar los efectos climáticos a los que está expuesta; la base y la sub-base cumplen la función de distribuir los esfuerzos al suelo.

El concreto asfáltico es un material constituido por agregados pétreos de gradación determinada y un ligante bituminoso. El asfalto recubre las partículas del agregado, induciéndoles cierto grado de cohesión. La adhesividad entre los materiales determina la rigidez y otras propiedades físicas de la mezcla. (CASTAÑEDA, 2004)

**Figura 1-1: Estructura del pavimento flexible**



**Fuente:** (BARRA SALGADO, 2009)

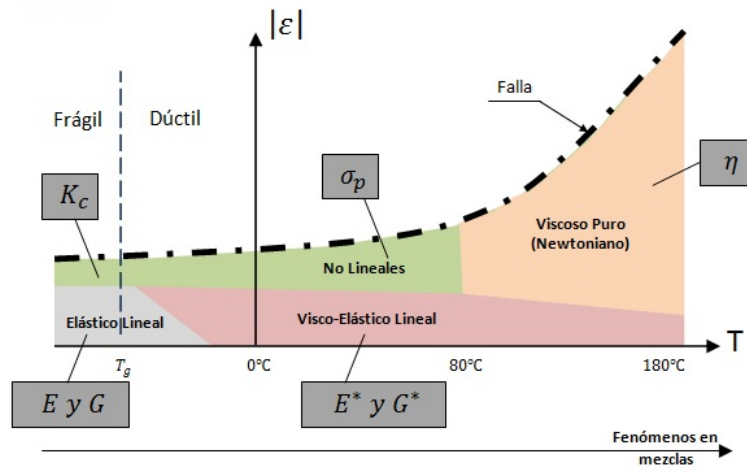
La Figura 1-1 muestra la estructura común de los pavimentos flexibles, en los que las cargas aplicadas por el paso del tránsito son transmitidas a la sub-rasante por medio de la carpeta asfáltica, la base y la sub-base; las cuales se encargan de reducir el esfuerzo aplicado al suelo.

## **1.1. COMPORTAMIENTO DE LA MEZCLA EN LA CARPETA ASFÁLTICA**

La mezcla asfáltica es un material visco-elástico; (es decir con características viscosas y elásticas simultáneamente). El comportamiento del concreto asfáltico depende de la temperatura, por ejemplo a elevadas temperaturas presenta propiedades de un fluido viscoso, mientras que a bajas temperaturas su comportamiento es como un sólido y a una temperatura intermedia se encuentra en una condición prevista para el pavimento, de fluido viscoso y sólido elástico. (Asphalt Institute, 2006)

Para facilitar su análisis y caracterización, las mezclas asfálticas pueden ser consideradas como homogéneas, isotrópicas y lineales para ciertos rangos de esfuerzo-deformación. La Figura 1-2 muestra los diferentes rangos de comportamiento de un concreto asfáltico, según las deformaciones y temperaturas a las cuales es sometido. Para condiciones térmicas normales y deformaciones pequeñas, el comportamiento de la mezcla es visco elástico lineal. En estas condiciones sólo se tiene en cuenta el comportamiento del ligante y no la interacción entre las partículas del agregado.

**Figura 1-2: Comportamiento de una mezcla asfáltica en función de su deformación y temperatura**



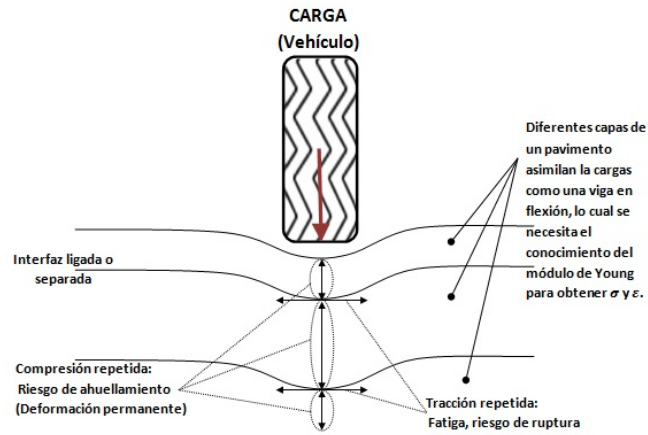
Fuente: (OLARD, 2003)

En la estructura del pavimento flexible, la carpeta asfáltica se ve sometida directamente a la acción de las cargas del tránsito y a la variación de las condiciones climáticas. La respuesta de la capa de rodadura varía según la sollicitación aplicada, causando en muchos casos la falla prematura del pavimento. La acción del tráfico y el efecto la temperatura son los principales agentes que afectan el comportamiento del pavimento.

### 1.1.1. Efecto del tráfico

Las mezclas asfálticas deben ser diseñadas para resistir ante las posibles fallas inducidas por el continuo flujo vehicular. Una de las más comunes es la deformación permanente, que se traduce en el fenómeno de ahuellamiento. Como se puede observar en la Figura 1-3, el efecto de la carga compresiva repetitiva genera abultamiento del material alrededor de la línea de tráfico. Esta deformación permanente puede ser una combinación de la deformación viscosa del bitumen y de la deformación plástica del agregado, causada por el desplazamiento relativo de sus partículas.

**Figura 1-3: Deformación permanente y ahuellamiento en pavimentos flexibles**



Fuente: (OLARD, 2003)

Cuando se presenta acumulación de la deformación permanente, se producen asentamientos que desembocan en la formación de huellas longitudinales. Este fenómeno de ahuellamiento suele presentarse en pavimentos sometidos a cargas de larga duración. (Dussan & Falutero, 2005)

### 1.1.2. Efecto de la temperatura

El concreto asfáltico es un material visco elástico, por lo tanto, la temperatura es un factor determinante en el comportamiento de la mezcla. Para bajas temperaturas, el bitumen entra en el rango elástico; razón por la cual, la mezcla es más frágil y susceptible a la falla por fractura. A este fenómeno se le conoce como Fisuración Térmica. Cuando se presentan altas temperaturas, el asfalto se comporta como un fluido viscoso. En este caso, la carpeta asfáltica es susceptible a deformaciones grandes y puede fallar por ahuellamiento. (OLARD, 2003) Para controlar los efectos de la temperatura, la Tabla 1-1 expone las características de las mezclas requeridas dependiendo de las condiciones de temperatura.

**Tabla 1-1: Control de los efectos de la temperatura en mezclas asfálticas**

<b>Para temperaturas:</b>	<b>Característica del pavimento:</b>	<b>Resistente a:</b>	<b>Solución:</b>
Altas	Más rígido	Ahuellamiento	Asfalto de menor penetración
Bajas	Más flexible	Fisuración	Asfalto de mayor penetración

*Fuente: Elaboración propia*

## **1.2. MATERIALES VISCO-ELÁSTICOS**

En la caracterización de los materiales, es importante establecer hipótesis ideales de comportamiento que permitan identificar correctamente sus propiedades y características. Según su naturaleza, los materiales pueden presentar diferente respuesta ante una solicitud de carga. Idealmente, existen tres comportamientos mecánicos que son:

- **Comportamiento Elástico:** Los materiales con este comportamiento no sufren cambios termodinámicos. Se caracterizan por recuperar las deformaciones producidas al retirar la carga externa. (Garriga, 2002)
- **Comportamiento Plástico:** Un material con esta característica presenta cambios termodinámicos en su estructura. Por esto, se deforma de manera irreversible ante las fuerzas aplicadas.
- **Comportamiento Viscoso:** Los materiales viscosos, al igual que los plásticos, se deforman de manera permanente. Pero se caracterizan porque la rapidez de deformación es proporcional al esfuerzo aplicado. (Garriga, 2002)

En la práctica, rara vez se encuentra un material con estas características. Por el contrario, se pueden observar diferentes combinaciones entre estas. Estas

combinaciones intermedias dependen directamente de factores externos como la temperatura, el rango de esfuerzo-deformación alcanzado, las condiciones de carga, etc. Que modifican la respuesta de los materiales ante las solicitaciones requeridas. Una de estas combinaciones es el comportamiento visco-elástico.

### **1.2.1. Características de los materiales visco-elásticos**

Un material visco-elástico es aquel presenta los dos comportamientos (elástico y viscoso) al mismo tiempo. Por un lado el componente elástico permitirá que el material recupere parte de la condición inicial, mientras el componente viscoso disipará parte de la energía produciendo una deformación irreversible.

#### **1.2.1.1. Rigidez en materiales visco-elásticos**

La cohesión interna entre las partículas de un sólido deformable, permite que presente resistencia ante las solicitaciones de carga. El módulo de rigidez representa el grado de cohesión de un material, por consiguiente, es un indicador de su resistencia.

Generalmente, los materiales regidos por un comportamiento elástico presentan una cohesión intermolecular estable, bajo condiciones térmicas y de carga normales. En estos casos, el comportamiento mecánico es representado correctamente por el módulo de elasticidad. Por otro lado, en los materiales visco-elásticos, dichas condiciones inciden notablemente en el grado de cohesión interna de las partículas.

Cuando las condiciones de temperatura y frecuencia de carga varían sustancialmente, el comportamiento del material tiende a los extremos (Elástico o Viscoso). El estudio de la reología del material elasto-viscoso permite definir una

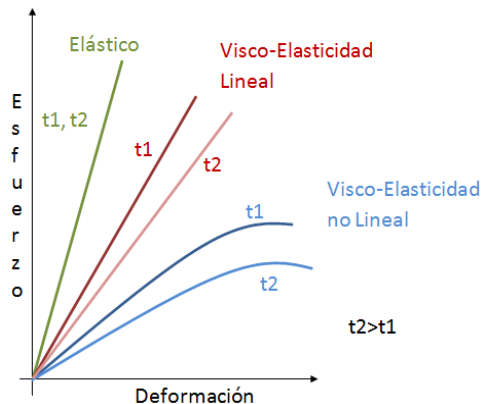
relación entre el esfuerzo y la deformación bajo las diversas condiciones de temperatura y periodo de carga. (Carter & Perraton, 2002)

### 1.2.1.2. Linealidad de de los materiales visco-elásticos

Un material es lineal cuando su rigidez es independiente del esfuerzo de carga aplicado. En este caso, la relación entre el esfuerzo y la deformación puede ser descrita en función del tiempo mediante ecuaciones diferenciales lineales de coeficientes constantes. Para que un material visco-elástico mantenga un comportamiento en el rango lineal, las magnitudes de los esfuerzos y deformaciones solicitadas deben ser lo suficientemente pequeñas. (Garriga, 2002)

Cuando el material es sometido a deformaciones grandes para entrar en el rango no lineal, se debe considerar la incidencia del esfuerzo de carga aplicada en la relación esfuerzo-deformación y esta pueda ser representada mediante una ecuación diferencial de orden superior. En la Figura 1-4 se aprecia la variación en la rigidez para diferentes materiales, para diferentes tiempos de aplicación de carga. Para materiales visco-elásticos, la rigidez disminuye con la ampliación en el tiempo de aplicación de carga.

**Figura 1-4: Relación Esfuerzo-Deformación para dos Valores Diferentes de Tiempo de Aplicación de Carga**



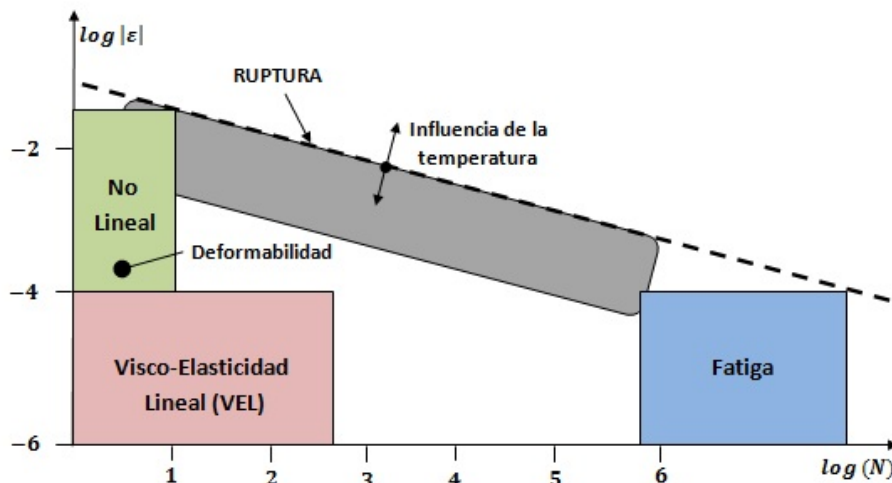
Fuente: Elaboración Propia

### 1.3. MÓDULO COMPLEJO EN MATERIALES VISCO-ELÁSTICOS

Los materiales visco-elásticos presentan una relación tensión deformación definida por un número complejo  $E^*$  denominado módulo complejo o módulo de Young, matemáticamente está dado por la relación entre la tensión dinámica ( $\sigma_0$ ) y la deformación unitaria ( $\varepsilon_0$ ). (Witczak, Kaloush, & Pellinen, 2002)

La hipótesis de la visco elasticidad lineal de un material propone la superposición de los efectos del comportamiento elástico y viscoso en un régimen lineal, bajo la acción de cargas y deformaciones lo suficientemente pequeñas que garanticen proporcionalidad entre el esfuerzo y la deformación. En la Figura 1-5 se presenta una evaluación del dominio de la visco-elasticidad lineal para mezclas bituminosas; considerando, en escala logarítmica, la deformación y el número de ciclos aplicados.

**Figura 1-5: Comportamiento de una mezcla asfáltica, según la deformación y el número de ciclos aplicados**



Fuente: (Di Benedetto, 1990)

Como se puede apreciar, el rango de visco-elasticidad lineal para las mezclas asfálticas se presenta a un bajo número de ciclos de carga y deformaciones pequeñas. En este caso, la relación esfuerzo-deformación puede ser definida mediante un número complejo. A esta relación se le conoce como el Módulo Complejo ( $E^*$ ).

### 1.3.1. Determinación del Módulo Complejo

Según la hipótesis anterior, la respuesta de un material visco elástico lineal sometido a carga sinusoidal es también sinusoidal. Pero, debido a sus características visco elásticas, la deformación se retrasa respecto del esfuerzo, generando un ángulo de desfase. (DE LA ROCHE, 1996)

De esta manera, si se somete un material visco elástico a un esfuerzo sinusoidal de amplitud ( $\sigma_0$ ) y frecuencia ( $\omega$ ); la deformación tendrá una amplitud ( $\varepsilon_0$ ), la misma frecuencia  $\omega$  y un ángulo de desfase ( $\phi$ ). La Ecuación 1-1 y la Ecuación 1-2 describen, en el tiempo, el esfuerzo y la deformación respectivamente

$$\sigma(t) = \sigma_0 * \sin(\omega \cdot t)$$

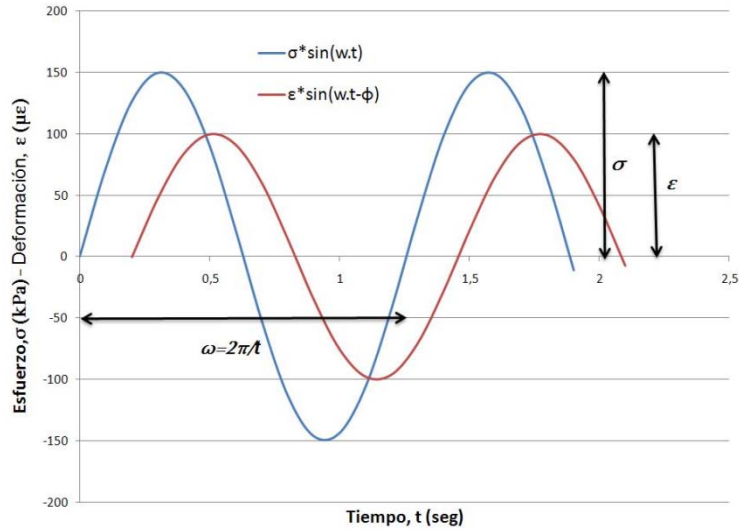
**Ecuación 1-1: Esfuerzo sinusoidal**

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_0 * \sin(\omega \cdot t - \phi)$$

**Ecuación 1-2: Deformación sinusoidal desfasada.**

La Figura 1-6 muestra un ejemplo gráfico de la Ecuación 1-1 y Ecuación 1-2 la para el caso de mezclas asfálticas, donde la señal de carga y de deformación presenta amplitudes diferentes con el mismo periodo y un desfase acorde al comportamiento visco-elástico del material.

**Figura 1-6: Señales de Carga y Deformación**



Fuente: (OLARD, 2003)

La relación esfuerzo-deformación, que representa la rigidez del material, es en este caso el módulo complejo.

$$E^* = \frac{\sigma_o * \sin(\omega \cdot t)}{\epsilon_o * \sin(\omega \cdot t - \phi)}$$

**Ecuación 1-3: Módulo complejo**

Al expresar esta relación en forma exponencial, con la amplitud compleja del esfuerzo y la deformación, se obtiene:

(a)  $\sigma(t) = \text{Im}[\sigma^*(t)]$  con  $\sigma^*(t) = \sigma_o \cdot e^{i(\omega t)}$

(b)  $\epsilon(t) = \text{Im}[\epsilon^*(t)]$  con  $\epsilon^*(t) = \epsilon_o \cdot e^{i(\omega t - \phi)}$

(c)  $E^* = \frac{\sigma_o}{\epsilon_o \cdot e^{-i\phi}} \rightarrow E^* = |E^*| \cdot e^{i\phi}$

**Ecuación 1-4: (a) Amplitud compleja del esfuerzo, (b) Amplitud compleja de la deformación y (c) Módulo complejo en forma exponencial**

Donde  $|E^*|$  es la magnitud del módulo complejo conocida como el módulo dinámico. Como se puede observar, el módulo complejo no es una función del tiempo sino que depende de la frecuencia  $\omega$  para una temperatura determinada del material.

Otra notación para algebraica para el módulo complejo es:

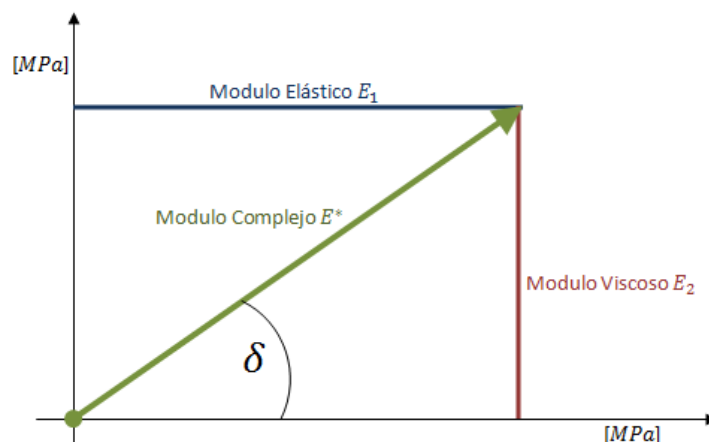
$$|E^*| = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} \quad y \quad e^{i\phi} = \cos(\phi) + i \cdot \sin(\phi)$$

$$E^* = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} \cdot \cos(\phi) + i \left( \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} \cdot \sin(\phi) \right)$$

**Ecuación 1-5: Módulo complejo en forma general**

Donde la componente real ( $E_1$ ) representa el comportamiento elástico (Módulo elástico) y la componente imaginaria ( $E_2$ ) representa el comportamiento viscoso (Módulo viscoso), (Ver Figura 1-7). Dependiendo del ensayo realizado estos componentes pueden verse modificados por factores de forma y de masa.

**Figura 1-7: Representación general del Módulo Complejo.**

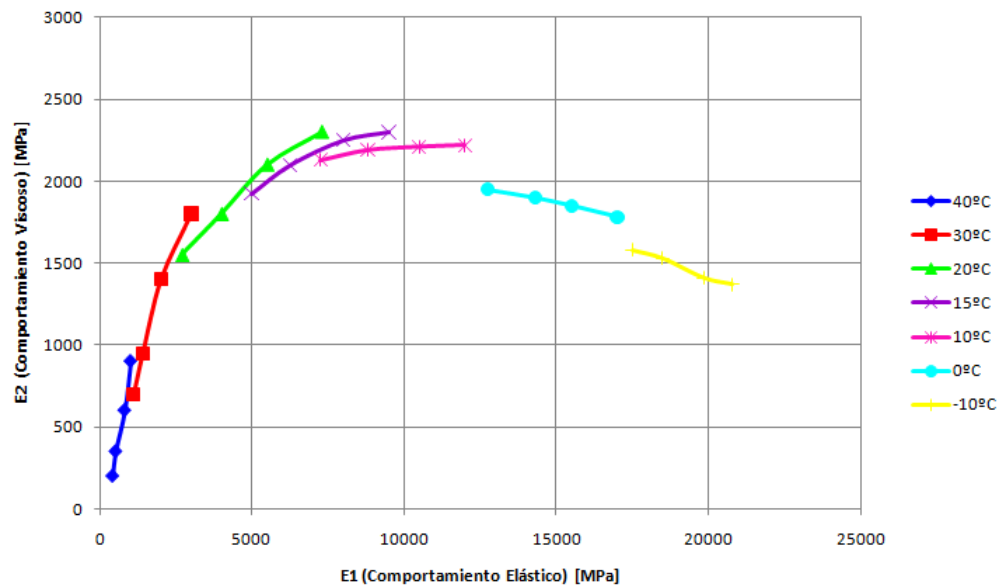


Fuente: Elaboración Propia.

### 1.3.2. Representación grafica de módulo complejo en el plan Cole-Cole

El plano Cole-Cole relaciona la parte real e imaginaria del módulo complejo ( $E^*$ ), ambas en escala aritmética, en función de la temperatura y la frecuencia de carga, obteniendo una curva semejante al arco de un círculo, en la se aprecia un ejemplo del plano Cole-Cole para mezclas asfálticas. (BARRA SALGADO, 2009)

**Figura 1-8: Módulo Complejo en el plano Cole-Cole para una mezcla asfáltica**



*Fuente: Elaboración Propia.*

En el plano, cada una de las líneas indica una temperatura del material y cada punto representa la relación entre los comportamientos (Elástico y Viscoso) para una frecuencia determinada. La Figura 1-8 presenta los resultados de ensayos realizados con cuatro frecuencias para siete temperaturas diferentes. Como se puede apreciar, a temperaturas altas, existe predominio del comportamiento viscoso y a bajas temperaturas su comportamiento es más elástico.

## 1.4. ENSAYOS PARA DETERMINAR EL MÓDULO DE RIGIDEZ COMPLEJO EN MEZCLAS ASFÁLTICAS

Existen dos tipos de ensayos para determinar el módulo complejo en mezclas asfálticas:

- Ensayos homogéneos:

Se pueden obtener directamente los esfuerzos y las deformaciones.

- Ensayos No-homogéneos:

Primero se debe postular una ley constitutiva. Para el caso del módulo complejo se debe garantizar un comportamiento visco elástico lineal. Además, se tienen en cuenta los cálculos de la geometría del espécimen.

El módulo complejo debe ser determinado, para cualquiera de los ensayos, usando dos factores:

- Factor de forma: ( $\gamma$ )

Depende de las dimensiones de espécimen.

- Factor de masa (En caso de ser necesario): ( $\mu$ )

Considera los efectos de la inercia de la masa del espécimen en movimiento.

Teniendo en cuenta lo anterior, la parte real E1 e imaginaria E2 del módulo complejo se definen a continuación:

$$(a) \quad E1 = \cdot \left( \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} \cdot \cos(\phi) + \mu\omega^2 \right)$$

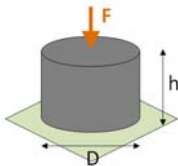
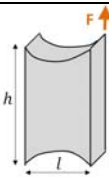
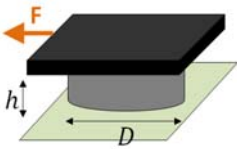
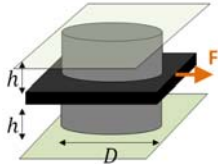
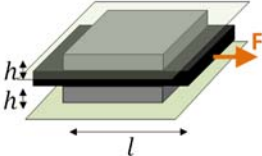
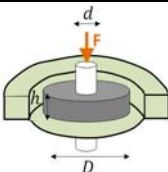
$$(b) \quad E2 = \cdot \left( \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} \cdot \sin(\phi) \right)$$

***Ecuación 1-6: (a) Módulo elástico y (b) Módulo viscoso***

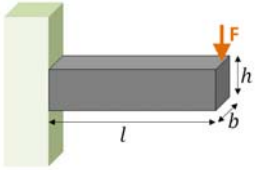
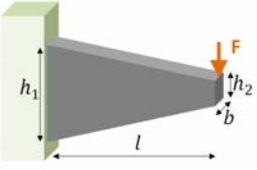
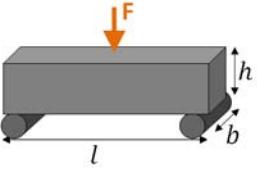
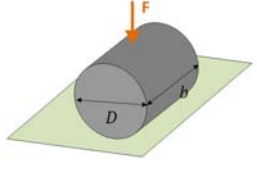
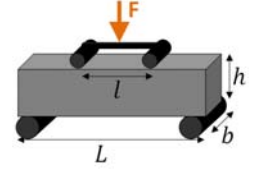
A continuación se presenta la Tabla 1-2, que muestra los ensayos homogéneos y no-homogéneos utilizados para determinar el módulo complejo.

**Tabla 1-2: Tipos de ensayos para determinar el módulo complejo en mezclas asfálticas**

**Ensayos homogéneos:**

Ensayos Homogéneos	Ensayo	Principio	Factor de Forma ( $\gamma$ )	Referencia
	Tensión Compresión (con o sin limitar presión)		$\frac{h}{\pi D^2}$	Charif Dubbaneh Witczak
	Ensayo Cortante		$\frac{l}{he}$	Assi De la Roche
	Ensayo Cortante con Altura Constante		$\frac{h}{\pi D^2}$	Souce
	Ensayo Cortante con Maquina		$\frac{h}{\pi D^2}$	Lambe
			$\frac{h}{2Lb}$	
	Ensayo de Corte Co-axial		$\frac{\ln\left(\frac{D}{d}\right)}{2\pi h}$	Gubler

**Ensayos no homogéneos:**

Ensayo	Principio	Factor de Forma ( $\gamma$ )	Referencia
Flexión en 2 Puntos		$\frac{4L^3}{bh^3}$	Francken
		$\frac{12L^3}{b(h_1 - h_2)^3} \left[ \left( 2 - \frac{h_2}{2h_1} \right) \frac{h_2}{h_1} - \frac{3}{2} \ln \left( \frac{h_2}{h_1} \right) \right]$	Huet Chauvin
Flexión en 3 Puntos		$\frac{24L^3}{\pi^4 bh^3}$	Souce
Ensayo de Tensión Indirecta		$\frac{1}{b}(v + 0.27)$	Brown Kennedy Tayebali
Flexión en 4 Puntos		$\frac{2L^3 - 3Ll^2 + l^3}{8bh^3}$	Pronk

Fuente: (H. Di Benedetto, 2001)

Según (H. Di Benedetto, 2001), si la mezcla ensayada tiene comportamiento visco elástico lineal, los ensayos no-homogéneos, como el de flexión en 4 puntos (objeto de este estudio), arrojan mejores resultados. El factor de forma presentado, tiene incidencia en ambos componentes del módulo; mientras que el factor de masa sólo afecta el comportamiento elástico (Para flexión en 4 puntos, no se considera factor de masa).

## **2. IMPLEMENTACIÓN DE ENSAYO EN VIGAS DE CONCRETO ASFÁLTICO**

El desarrollo de este estudio busca evaluar el módulo de rigidez complejo en vigas de concreto asfáltico y definir una metodología que sirva de apoyo para investigaciones futuras. Razón por la cual, se hizo necesario el uso de las herramientas del laboratorio de Caracterización de Materiales de la Universidad industrial de Santander, el cual cuenta con una maquina de ensayos universales del tipo Material Test System (MTS-810), idónea para este tipo de pruebas.

Para la realización e implementación del ensayo se deben tener en cuenta las normas, procesos y estudios existentes sobre el módulo de rigidez complejo en mezclas bituminosas y su obtención.

### **2.1. METODOLOGÍA DE ENSAYO**

El ensayo de flexión en cuatro puntos está normalizado para Europa en la norma NF-EN 12697-26, (CEN, 2005) y para América por la AASTHO T321-03 (TP8-94), (AASHTO, 2002). En estas normas se definen las dimensiones del espécimen, las condiciones de aplicación de carga y otros aspectos referenciados en este trabajo.

#### **2.1.1. Descripción del ensayo de flexión en cuatro puntos**

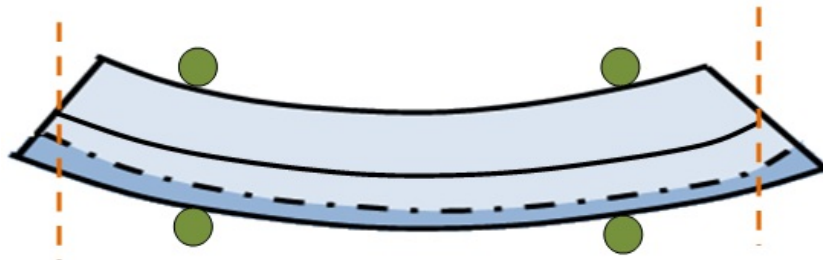
El objetivo al desarrollar este ensayo es determinar el módulo de rigidez complejo de muestras de concreto asfáltico extraídas en campo o hechas en laboratorio, mediante un ensayo no destructivo de flexión en cuatro puntos. Los ciclos de aplicación de carga y las deformaciones sobre la muestra deben ser controlados para garantizar el comportamiento del material dentro del rango visco-elástico

lineal. De esta forma, los resultados obtenidos con este ensayo son usados para determinar la resistencia y describir el comportamiento de las capas de pavimento asfáltico afectadas con cargas de tráfico real. Al determinar estos parámetros se pueden optimizar los métodos de diseño de las mezclas asfálticas.

Para realizar el ensayo se debe contar con una máquina capaz de transmitir cargas cíclicas a la muestra, y que permita ajustar la temperatura de las probetas y un sistema de adquisición de datos. (INVIAS, I.N.V. E-754 Módulo Dinámico en Mezclas Asfálticas, 2007)

La muestra se debe sujetar de tal forma que tenga dos apoyos y dos puntos de carga; los apoyos deben permitir el movimiento horizontal, la libre rotación y mantener la muestra sin desplazamientos verticales. En la Figura 2-1 se aprecia la condición de giro libre para los apoyos.

**Figura 2-1: Deflexión en la viga**

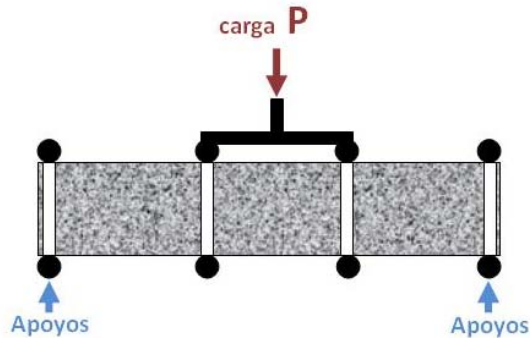


*Fuente: Elaboración propia*

Las cargas y deflexiones aplicadas en los diferentes ciclos deben ser guardadas por el sistema de adquisición de datos y traducidas a una tabla de datos compatible con un software comercial para ver su evolución.

En la prueba, la muestra se apoya en dos puntos y la carga se aplica en los tercios medios. Como se mencionó anteriormente, en los apoyos hay una restricción al movimiento vertical lo cual genera flexión en la viga, (ver Figura 2-2).

**Figura 2-2: Apoyo en 4 puntos y aplicación de carga**



*Fuente: Elaboración Propia*

Para obtener los resultados deseados, es importante verificar las condiciones iniciales de las muestras. Aspectos como la compactación del material y las condiciones de borde de las vigas deben ser garantizados. Una vez obtenidas las probetas, estas deben acondicionarse a la temperatura determinada para el ensayo, posteriormente se monta el espécimen en la estructura y se realiza la prueba.

Para determinar los parámetros de la prueba; se deben comparar y concordar las normas en cuanto a rangos de frecuencia de la aplicación de la carga, acondicionamiento de las muestras y disposición de los sensores y actuadores.

Durante la realización del ensayo, se deben tomar lecturas de la carga y la deformación que permitan ajustar una curva para determinar el desfase y así calcular el módulo complejo. Terminada la prueba, se debe ajustar el sistema a otras condiciones de frecuencia y temperatura. Con los datos obtenidos, se

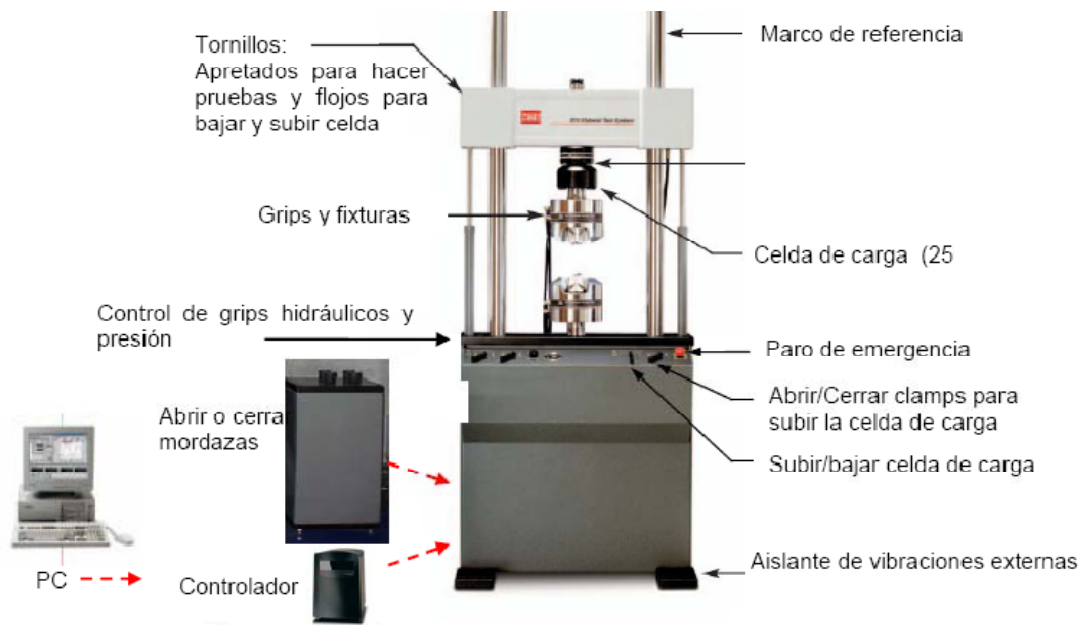
analiza la evolución de la rigidez en el plano Cole-Cole para ver el comportamiento del espécimen probado.

### 2.1.2. Diseño y montaje del dispositivo estructural

El equipo de ensayos de la Universidad Industrial de Santander, la MTS-810, está diseñado para realizar pruebas de cargas estáticas y dinámicas en diferentes materiales; además, posee una celda de carga capaz de controlar diferentes grados de esfuerzo y deformación. El sistema que se encuentra en el laboratorio puede configurarse fácilmente para cumplir con las necesidades del ensayo, puesto que tiene una capacidad máxima de 20kN.

Para establecer el pre dimensionamiento del dispositivo es importante identificar las partes del equipo MTS-810 y conocer su funcionamiento, en la Figura 2-3 y la Figura 2-4 se observa la descripción de la maquina y se definen las funciones de algunas de sus partes.

**Figura 2-3: Material Test System MTS-810 (Partes del Equipo- frente)**



Fuente: *Catalogo Electrónico del Equipo* (MTS Systems Corporation)

**Figura 2-4: Material Test System MTS-810 (Partes del Equipo- atrás)**



Control de seguros hidráulicos. Permite bloquear o desbloquear los tornillos

Actuador Hidráulico. Mejora la capacidad de carga para obtener resultados más exactos.

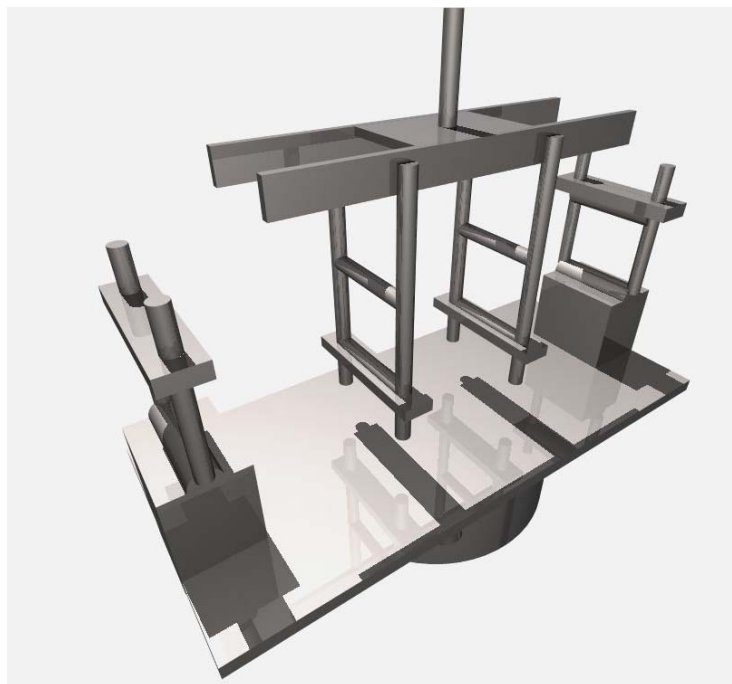
Actuador de control de flujo. Reduce las fluctuaciones en la presión hidráulica para mejorar pruebas de control y exactitud en los resultados.

*Fuente: Catalogo Electrónico del Equipo (MTS Systems Corporation)*

Teniendo una descripción de la maquina y del ensayo, se propone un diseño del elemento adaptable a los actuadores de carga del sistema. Como herramientas de apoyo, se utilizaron los programas de dibujo Autocad y Archicad para realizar los modelos y los planos para la fabricación del elemento.

Las dimensiones del dispositivo estructural deben cumplir con las condiciones de la prueba, además de ajustarse a las especificaciones geométricas del actuador dinámico (MTS – 810) y de las probetas. En la Figura 2-5 se observa el prototipo del elemento diseñado para implementación del ensayo.

**Figura 2-5: Dispositivo estructural**



*Fuente: Elaboración Propia*

Según la NE FP 12697 -26, la geometría de la viga se define de tal manera que el alto o ancho debe ser tres veces el tamaño máximo del agregado de la mezcla, mientras que la longitud debe ser ocho veces el largo o el ancho. Para la mezcla seleccionada MDC-2 según las especificaciones de diseño INVIAS Artículo 450-07 las dimensiones de la viga son:

$$\text{Ancho: } 3 * T_{max} = 50 \text{ mm} \rightarrow T_{max} = \text{aprox. } 16.7 \text{ mm}$$

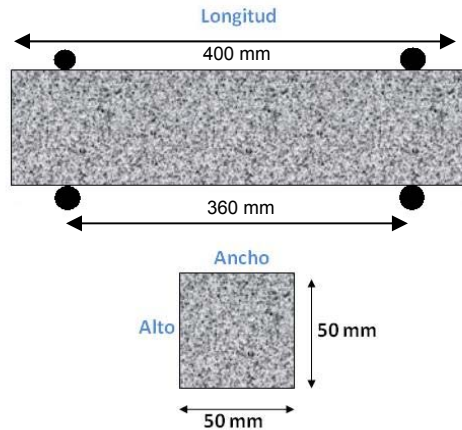
Alto igual al ancho: 50 mm

$$\text{Longitud: } 8 * \text{Ancho(o el alto)} = 400 \text{ mm}$$

En la Figura 2-6 se observa que la luz libre del la viga es de 360mm, con 20 mm de tolerancia en cada uno de sus extremos. Además, la separación entre los

puntos de carga es de 120mm y la sección de los apoyos debe ser ajustable a la altura de la viga.

**Figura 2-6: Dimensiones de la Viga o Probeta**



*Fuente: Elaboración Propia*

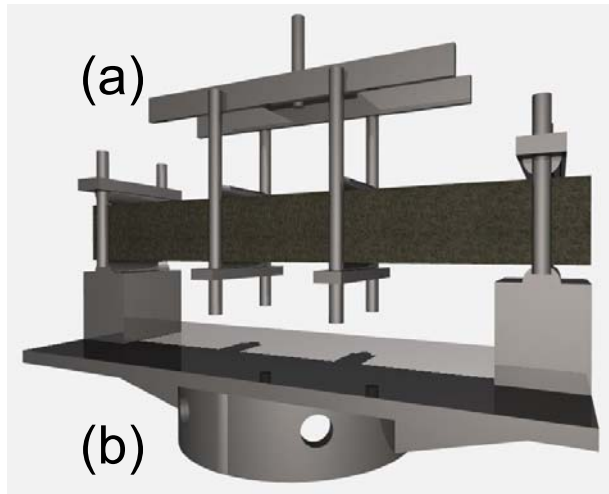
El dispositivo estructural debe ser fabricado en un material resistente a las sollicitaciones de los ensayos, sin sufrir deformaciones considerables que afecten los resultados de las pruebas. Así se garantiza que las cargas aplicadas se transmiten en su totalidad a la viga.

Además, el elemento debe soportar las diferentes temperaturas de las pruebas sin cambiar sus condiciones iniciales. Por esta razón, se recomienda un acero de alta resistencia con altos puntos de fluencia, fusión y tenacidad; a la tracción y a la compresión.

El dispositivo estructural diseñado para el ensayo consta de dos partes. La parte superior (a) encargada de transmitir la carga a la viga, y la Inferior (b) que tiene como función apoyar la viga en los extremos. Los apoyos son ajustables, para garantizar el contacto con la muestra; y redondeados, de tal forma que las cargas

son aplicadas longitudinalmente en un solo punto. La Figura 2-7 presenta el montaje de una viga en el elemento diseñado.

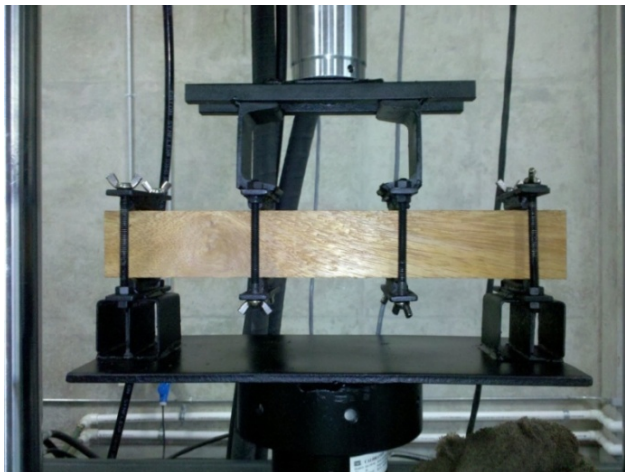
**Figura 2-7: Diseño Elemento Estructural**



*Fuente: Elaboración Propia*

Una vez terminado el diseño del dispositivo, este se adapta a la máquina de carga dinámica (MTS-810); asegurándolo de tal manera que se garantice la rigidez del sistema. La Figura 2-8 muestra el montaje con una viga de madera dispuesta para realizar los ensayos preliminares.

**Figura 2-8: Montaje en la MTS-810**



*Fuente: Registro Fotográfico Propio*

## 2.2. FABRICACIÓN DE PROBETAS

Las vigas utilizadas para el ensayo de flexión en cuatro puntos pueden ser extraídas directamente de campo o fabricadas en el laboratorio. A continuación se presentan las diferentes maneras para obtener las muestras.

- Extracción de núcleos en campo:

La extracción de núcleos en campo se realiza mediante el uso de una cortadora de concreto asfáltico de piso. Generalmente, la caracterización de las muestras extraídas de pavimentos existentes se realiza con el fin de determinar el deterioro en las propiedades de la capa de rodadura. En la Figura 2-9 se puede apreciar el proceso de corte del pavimento.

*Figura 2-9: Corte del Pavimento (Extracción de Especímenes en Campo)*



*Fuente: Empresa Prestadora de Servicios de Ingeniería (BULMAQ - Maquinaria y Servicios)*

- Fabricación en molde:

La fabricación de las vigas en el laboratorio puede realizarse mediante el uso de moldes pre-dimensionados, (ver Figura 2-10). Este tipo de especímenes pueden adecuarse para cumplir con la compactación requerida, pero en la mayoría de los casos presentan problemas en las condiciones de borde.

**Figura 2-10: Molde para la Realización de Vigas**



*Fuente: Análisis Comparativo del Esfuerzo a Tracción en Vigas (Rueda, 2010)*

- Extracción en placas de laboratorio:

Otro método de obtención de probetas consiste en extraer las muestras a partir de placas fabricadas en el laboratorio. De esta manera, se eliminan los problemas en la condición de borde y se garantiza la uniformidad de la muestra. La Figura 2-11 muestra una placa compactada en el laboratorio, lista para el proceso de corte.

**Figura 2-11: Placas Compactadas**



*Fuente: Registro Fotográfico Propio (Laboratorios CORASFALTOS)*

Las dimensiones de la placa son: alto 70 mm, ancho 450 mm y largo 300 mm. De cada placa se extraen 5 vigas de 50x50x400 mm. El proceso de realización de las

placas empieza desde la preparación de la mezcla, la cual se deposita en un molde con las dimensiones mencionadas y se pone en la compactadora, pasando una y otra vez el vibro-rodillo hasta completar cierto número de pasadas. Luego, a la placa se le realiza un ensayo de densidad para determinar el porcentaje de vacíos, si no son los deseados se procede de nuevo con la compactadora aplicándole más ciclos o pasadas del rodillo hasta llegar a la densidad requerida. En la Figura 2-12 se aprecia la máquina utilizada para compactar las placas de concreto asfáltico en el laboratorio de CORASFALTOS.

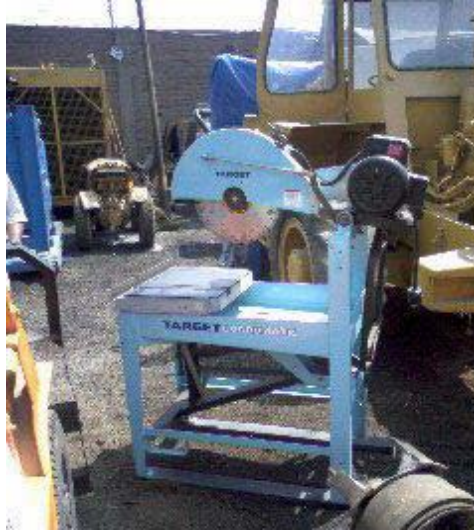
**Figura 2-12: Máquina Compactadora de placa**



*Fuente: Registro Fotográfico Propio (Máquina CORASFALTOS)*

Finalmente, el proceso de corte se realiza en una mesa de disco con punta acerada, con el fin de minimizar el efecto sobre las condiciones iniciales de las muestras; y así obtener probetas idóneas para el ensayo. La Figura 2-13 muestra el equipo necesario para cortar las placas.

**Figura 2-13: Cortadora de Placas**



*Fuente: Registro Fotográfico Propio*

Para efectuar el ensayo de flexión en cuatro puntos correctamente, se requieren muestras que presenten un comportamiento uniforme; por esta razón, se recomienda la extracción de vigas a partir de placas fabricadas en el laboratorio.

### **3. ENSAYO DE MÓDULO COMPLEJO EN VIGAS DE CONCRETO ASFÁLTICO**

Para evaluar el módulo complejo en vigas se implementó un ensayo no destructivo de flexión en cuatro puntos, teniendo en cuenta distintos materiales como madera, aluminio y concreto asfáltico; a diferentes temperaturas y frecuencias. En este capítulo se presenta la descripción de las pruebas realizadas en el laboratorio de la Universidad Industrial de Santander.

#### **3.1. PRUEBAS DE ADAPTACIÓN**

Antes de realizar los ensayos en las vigas de concreto asfáltico, se efectuaron algunas pruebas en especímenes de aluminio, con el fin de verificar el correcto funcionamiento del sistema. Estos procedimientos forman parte de la calibración y adecuación del montaje, además permitieron definir la programación de la máquina. La Figura 3-1 ilustra el desarrollo de los ensayos preliminares.

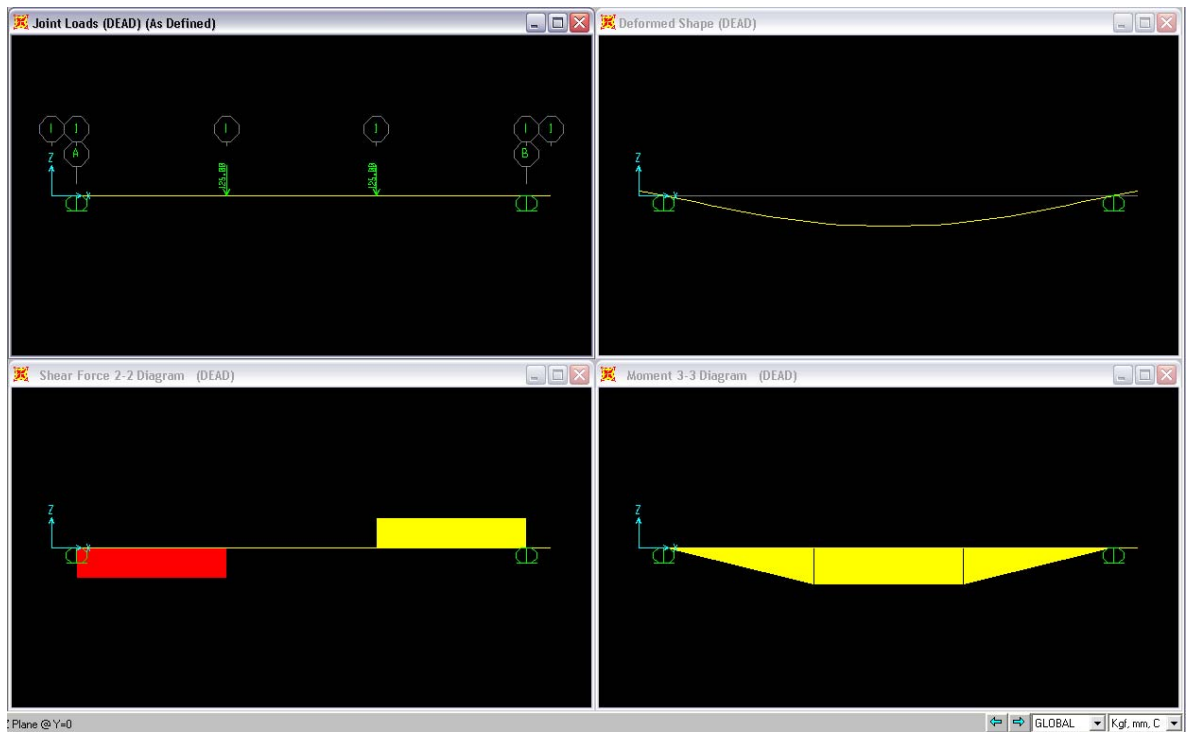
*Figura 3-1: Ensayos preliminares*



*Fuente: Registro Fotográfico Propio*

Inicialmente, se realizaron pruebas de carga estática sobre la viga de aluminio, con deformímetros en los extremos del espécimen que permitieron verificar la condición simple de los apoyos. Adicionalmente, se tomaron lecturas de la fuerza y la deformación, que fueron comparadas con el programa SAP, identificando diferencias del orden del 3%; garantizando así las condiciones del ensayo de flexión en cuatro puntos. En la Figura 3-2 se aprecia el modelo del ensayo en SAP.

**Figura 3-2: Modelo en SAP 2000**



*Fuente: Elaboración propia*

Finalmente, se desarrollaron ensayos de carga cíclica en la viga de aluminio, en los que se encontró que el valor del ángulo de desfase entre las señales de fuerza y deformación es  $0^\circ$ . De esta forma se validó la implementación de la prueba.

Después de algunas pruebas sobre vigas de concreto asfáltico, se encontró mayor uniformidad en los datos de los ensayos bajo deformación controlada. También se estableció que el valor de la deformación inducida admisible para mantener el material dentro del rango lineal se encontraba entre 0.001mm y 0.01mm.

Finalmente, se definió el valor de 0.006mm como la deformación inducida para los ensayos, aunque se debió verificar tras cada prueba, que el comportamiento de las señales de fuerza y deflexión concordara con la hipótesis de linealidad.

### 3.1.1. Preparación de vigas y realización del ensayo

Para la realización de este proyecto se probaron dos especímenes, extraídos de placa, fabricados en el laboratorio por CORASFALTOS. Cada una de las muestras presentaba diferentes diseños de mezcla, con el fin de garantizar la eficiencia del ensayo para distintos tipos de concreto asfáltico. En la Figura 3-3 se observan las probetas utilizadas, con su respectiva identificación.

**Figura 3-3: Identificación de las muestras**



*Fuente: Registro fotográfico propio*

La muestra UNO fue fabricada con una mezcla de alto módulo, con asfalto de penetración 30/40 (Modificado para obtener una penetración final de 24) y

granulometría francesa EME-2. La muestra DOS se fabricó según las especificaciones para las mezclas densas en caliente MDC-2, con asfalto 60/70 convencional. La Tabla 3-1 contiene las especificaciones de cada una de las mezclas.

**Tabla 3-1: Especificaciones de las Muestras**

Muestra	Agregado		Asfalto		%
	Granulometría	Fuente	Penetración	Porcentaje	
UNO	EME-2 (Francia)	Cohelo, Cundinamarca	30/40 Mod. Pfinal 24	5.8	3
DOS	MDC-2 (INVIAS)	Chicamocha, Santander	60/70	5	5

*Fuente: Elaboración Propia*

Las pruebas iniciaron con el acondicionamiento térmico de las vigas, el cual consistió en enfriarlas o calentarlas para realizar la prueba bajo diferentes estados de temperatura de la muestra, para este estudio se usaron dos temperaturas:  $T1 = 10^{\circ}\text{C}$  y  $T2 = 30^{\circ}\text{C}$ . Diferentes estudios y normas recomiendan manejar la temperatura con una cámara de variación; sin embargo este ensayo se realizó sin la misma, debido a que la universidad solo cuenta con un horno y una nevera para realizar estos acondicionamientos térmicos.

Después de acondicionar térmicamente las vigas, se deben colocar en la máquina para ajustar los apoyos y puntos de carga. Este proceso se realiza en 5 minutos aproximadamente. Con las muestras en posición y la programación lista, se puede dar inicio al ensayo. Durante la ejecución de las pruebas se deben tomar lecturas de las señales de fuerza y deformación que permitan determinar el ángulo de desfase entre estas. En la

Tabla 3-2 se especifican las características del material, la duración del ensayo, además de los parámetros de temperatura y frecuencia utilizados.

**Tabla 3-2: Protocolo de Ensayo**

DOS								
Características de la Mezcla Asfáltica								
Tipo de Asfalto	60/70				Gradación	MDC-2		
Contenido de Asfalto (%)	5,5				Fuente de Material	Chicamocha		
Temperatura (°C)	10				30			
Frecuencia (Hz)	1	3	5	10	1	3	5	10
Número de Ciclos	20	30	50	150	20	30	50	150

Fuente: Elaboración propia.

Con el fin de tener mayor precisión en la obtención de los datos, se utilizó un extensómetro de tal forma que pudiera medir la deflexión de la viga en el centro, (ver Figura 3-4). Las imprecisiones en los datos obtenidos por el LVDT tienen que ver con las deformaciones que puede presentar el sistema (El elemento estructural, los acoples con la máquina y la celda de carga). Los datos obtenidos por el LVDT y por el extensómetro deben ser similares, sin embargo la lectura más confiable en todos los casos es la del extensómetro. La Figura 3-4 muestra la disposición final del sistema (con la inclusión del extensómetro), durante uno de los ensayos realizados a una de las probetas de concreto asfáltico utilizadas.

**Figura 3-4: Ensayo de Flexión en 4 Puntos (Módulo Complejo)**



Fuente: Registro Fotográfico Propio

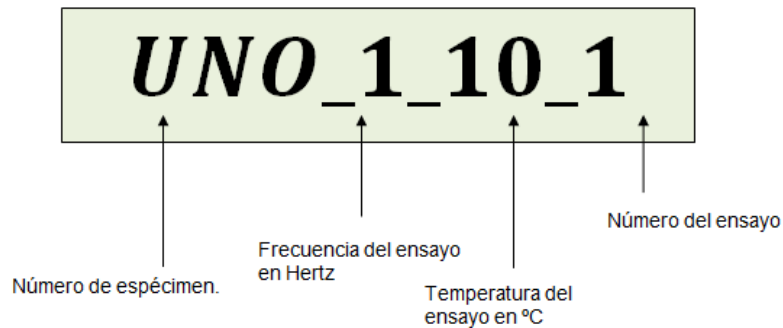
## 4. ANALISIS DE RESULTADOS

Una vez realizadas las pruebas de flexión a las vigas en concreto asfáltico, se realizó el tratamiento correspondiente para los datos obtenidos en el laboratorio a cada uno de los especímenes después de realizar el ensayo de módulo complejo, y un análisis de los resultados observados que se presentan en este capítulo.

### 4.1. IDENTIFICACIÓN DE LOS DATOS

Inicialmente, los datos obtenidos fueron identificados con el fin de referenciar cada archivo según el ensayo realizado. Los parámetros tenidos en cuenta para la identificación de las pruebas fueron: el nombre de la muestra, la frecuencia de carga, la temperatura y el número del ensayo. En la Figura 4-1 se aprecia un ejemplo de la notación utilizada. Una vez identificados los datos, se procedió a determinar el módulo de rigidez complejo para cada una de las lecturas.

*Figura 4-1: Ejemplo de Identificación de las pruebas*



*Fuente: Elaboración Propia*

## 4.2. TRATAMIENTO DE LOS DATOS OBTENIDOS

Inicialmente, las señales obtenidas por el software de adquisición de datos son almacenadas en una tabla compatible con una hoja de cálculo electrónica, esta contiene la información de las diferentes lecturas tomadas en el ensayo. Para el cálculo del módulo de rigidez complejo se requieren los valores del tiempo en el que fue tomado cada uno de los datos, las magnitudes de la fuerza aplicada y los desplazamientos, medidos por el LVDT del actuador de la maquina y por el extensómetro en el centro de la viga. La siguiente Figura 4-2 muestra un ejemplo de la toma de los datos.

**Figura 4-2: Datos de salida tras un ensayo**

Time Sec	Axial Force kN	Axial	
		Displacement mm	Axial Length mm
24.319336	-0.18502727	-0.056965604	0.061149698
24.320313	-0.19700089	-0.059392177	0.06399291
24.321289	-0.19754699	-0.062142584	0.066119589
24.322266	-0.20453002	-0.062722884	0.067723997

*Fuente: Registro Propio.*

El primer paso para determinar el módulo de rigidez complejo consiste en ajustar los datos de carga y desplazamiento (Medido por el extensómetro) a curvas del tipo sinusoidal, para calcular el modulo dinámico y el ángulo de fase. En cada ciclo se obtiene un valor de modulo y de ángulo, entonces el promedio será la medida de la rigidez para una probeta. La ecuación de ajuste de los datos para encontrar el ángulo de desfase es la siguiente:

$$F(t) = A + B * \cos(\omega * t - \varphi) \rightarrow \text{FUERZA}$$

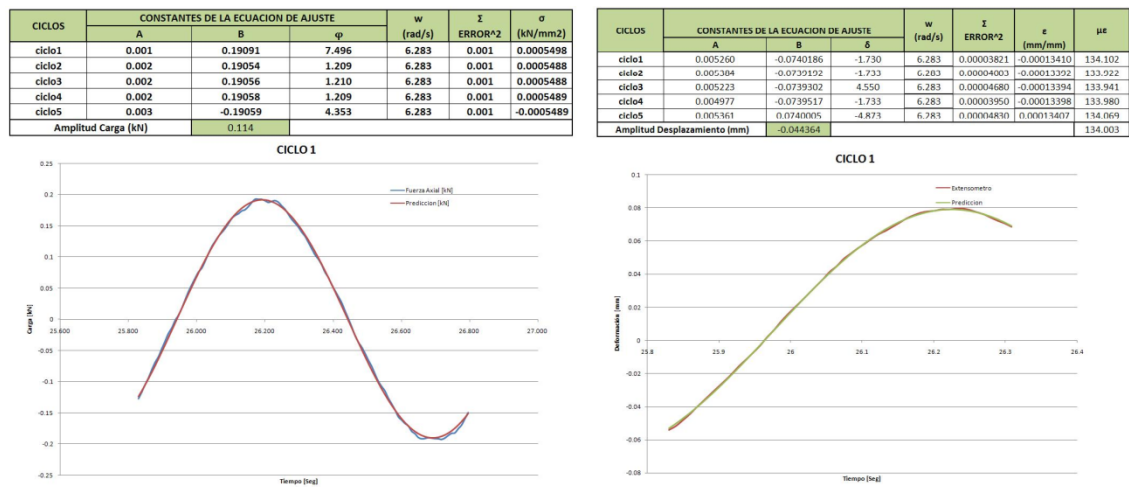
**Ecuación 4-1: Ecuación de ajuste de la carga**

$$D(t) = A + B * \cos(\omega * t - \varphi) \rightarrow \text{DESPLAZAMIENTO}$$

**Ecuación 4-2: Ecuación de ajuste del desplazamiento**

Donde B representa la amplitud de la señal y  $\varphi$  es un ángulo de desfase. La hoja de cálculo de EXCEL, por medio de la función SOLVER, reduce el error cuadrático iterando los valores de las constantes para darle la mejor forma a la función. La figura 3-3 ilustra el ajuste de curvas mediante el uso de EXCEL. El ángulo de desfase se calcula con la diferencia entre los valores de los ángulos de las funciones de carga y deformación.

**Figura 4-3: Ajuste de curvas en EXCEL**



Fuente: Registro Propio

Luego de determinar el desfase, se procede a calcular el módulo dinámico, definido en la Ecuación 1-5. Para obtenerlo, es necesario conocer los valores del esfuerzo  $\sigma_0$  y de deformación unitaria  $\epsilon_0$ , que son definidos en función de la carga y la deformación de la viga.

En el caso de la señal de carga  $P(t) = A + P_0 * \cos(w * t - \delta_1)$ , el esfuerzo  $\sigma_0$  se define como:

$$\sigma_0 = \frac{P_0 * l}{b * h^2}$$

**Ecuación 4-3: Ecuación del esfuerzo**

Donde  $P_0$  es la amplitud de la onda de carga,  $l$  es la longitud entre apoyos,  $b$  es la base y  $h$  es finalmente la altura de la viga.

De la misma forma para la señal de deformación  $D(t) = A + D_0 * \cos(w * t - \delta_2)$ , la deformación unitaria  $\varepsilon_0$  se define como:

$$\varepsilon_0 = 4.696 * \frac{D_0 * h}{l^2}$$

***Ecuación 4-4: Ecuación de la deformación unitaria***

Donde  $D_0$  es la amplitud de la onda de deformación,  $l$  es la longitud entre apoyos y  $h$  la altura de la viga.

Una vez determinado el desfase y el módulo dinámico, se procede a establecer el valor del modulo de la forma compleja; el cual, según la Tabla 1-2, esta modificado por un factor de forma para las vigas de sección rectangular, (ver Ecuación 4-5).

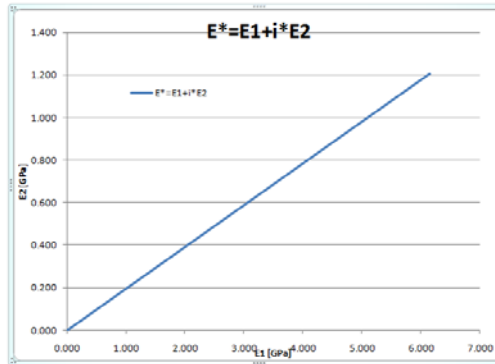
$$\gamma(m^{-1}) = \frac{2L^3 - 3LI^2 + I^3}{8bh^3}$$

***Ecuación 4-5: Factor de forma para vigas***

Aplicando la Ecuación 1-6 se obtienen los valores del modulo elástico (E1) y el módulo viscoso (E2). Con estos datos se puede construir el vector del módulo de rigidez en el plano complejo, ver Figura 4-4.

**Figura 4-4: Cálculo del módulo complejo**

Modulo Complejo E*			
	Factor ( $\gamma$ )	Módulo Elástico [E1]	Módulo Viscoso [E2]
Ciclo1	1.590	6.153	1.209
Ciclo2	1.590	6.150	1.202
Ciclo3	1.590	6.137	1.199
Ciclo4	1.590	6.142	1.208
Ciclo5	1.590	6.138	1.210
E*=E1+i.E2		6.144	1.206



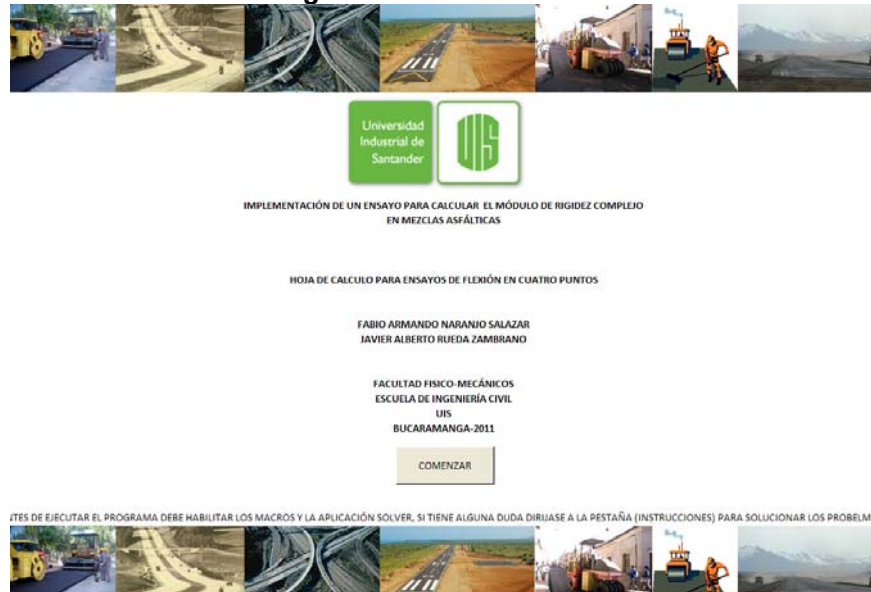
Fuente: Registro Propio

### 4.3. DISEÑO DEL SOFTWARE PARA EL ANÁLISIS DE RESULTADOS

Para facilitar el proceso de cálculo del módulo complejo, se diseñó un programa mediante el uso de macros en EXCEL, llamado PCMRC-VIGAS (Anexo digital C). Esta herramienta permite al usuario calcular en corto tiempo el ángulo de desfase, el módulo dinámico y los componentes del módulo complejo (módulo elástico y módulo viscoso); a partir de los datos obtenidos de la MTS-810. A continuación se presenta una breve inducción al programa.

La interfaz inicial (Figura 4-5) presenta la información del proyecto, de los autores y es el comienzo para ejecutar la aplicación. Al abrir el programa debe habilitar los macros y la función Solver de Excel. En caso de no conocer el proceso de activación, se debe seguir las instrucciones (Pestaña instrucciones) para habilitarlos y luego dar en el botón “COMENZAR” para iniciar.

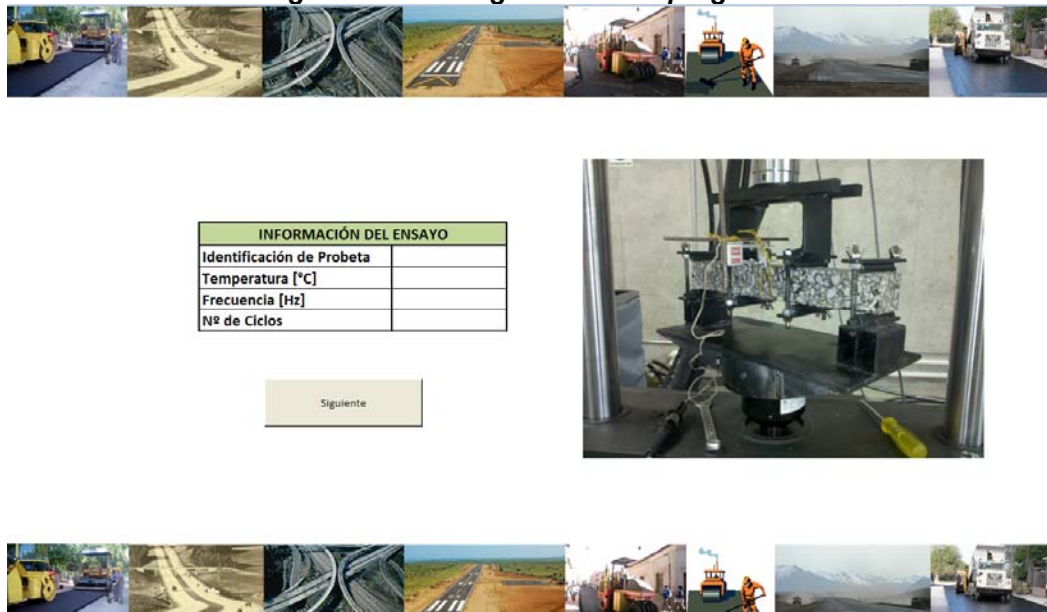
**Figura 4-5: Interfaz inicial**



Fuente: Registro fotográfico propio

La segunda hoja presenta la información general del ensayo, en ella, se debe ingresar la identificación de la probeta y los datos como la frecuencia del ensayo en (Hz), la temperatura (°C) y el numero de ciclos de la prueba. Luego debe dar clic en el botón “SIGUIENTE” para continuar el programa, (ver Figura 1-1).

**Figura 4-6: Datos generales del programa**



Fuente: Registro fotográfico propio

Luego se presenta la hoja “datos”, en la que se debe ingresar la información suministrada por la maquina. El programa fue diseñado para trabajar con 500 datos, correspondientes a los últimos cinco ciclos del ensayo. Al ingresar las lecturas se debe verificar que la medida del extensómetro este en fase con la señal del desplazamiento medido por el LVDT. Es importante que cada ciclo tenga el mismo número de datos (100) puesto que para cada uno se determinara un módulo dinámico.

Si se quiere utilizar el programa, antes de realizar los ensayos se deberá establecer el tiempo de captura de información de tal forma que se recolecten 100 datos por cada periodo de carga. Es decir, para la frecuencia de 1Hz, el tiempo entre cada toma de datos es de 0.01seg; para 5Hz, 0.002seg; y para 10Hz, 0.001seg.

**Figura 4-7: Datos de la prueba**

**Módulo de Rigidez Complejo en Vigas de Concreto Asfáltico**

Universidad Industrial de Santander

Proyecto de Grado:  
Implementación de un Ensayo para Medir el Módulo de Rigidez Complejo en Muestras Asfálticas

**Información general**

**INFORMACIÓN DEL ENSAYO**

Identificación de Prueba	UNIC_11_2012
Temperatura (°C)	25
Frecuencia del Ensayo	10.000
Amplitud de Carga	150.000

**DIMENSIONES DE LA VIGA**

Longitud entre Caras [mm]	400
Base [B] [mm]	50.000
Alteza [H] [mm]	50.000
Di. Aplicación de la C. [D] [mm]	125

**Botón inicio**

INICIO

**Datos a Ingresar**

Tiempo	Fuente Señal	Deformación LVDT	Desplazamiento	Entrada
1	LVDT	(mm)	(mm)	RDV(V)
2				RDV(V)
3				RDV(V)
4				RDV(V)
5				RDV(V)
6				RDV(V)
7				RDV(V)
8				RDV(V)
9				RDV(V)
10				RDV(V)
11				RDV(V)
12				RDV(V)
13				RDV(V)
14				RDV(V)
15				RDV(V)
16				RDV(V)
17				RDV(V)
18				RDV(V)
19				RDV(V)
20				RDV(V)

**Resultados**

**Módulo Dinámico y Amplitud de Ensayo**

	E (dynes)	σ (MPa)	σ (MPa)	σ (MPa)
0.001	3.073	-0.268	-0.511 (0.01)	0.997
0.002	3.069	-0.269	-0.511 (0.01)	0.998
0.003	3.079	-0.269	-0.511 (0.01)	0.992
0.004	3.072	-0.268	-0.511 (0.01)	0.998
0.005	3.072	-0.268	-0.511 (0.01)	0.998
promedio	3.073	-0.268	-0.511 (0.01)	0.995
Módulo Dinámico (σ <sup>2</sup> )	9.461			

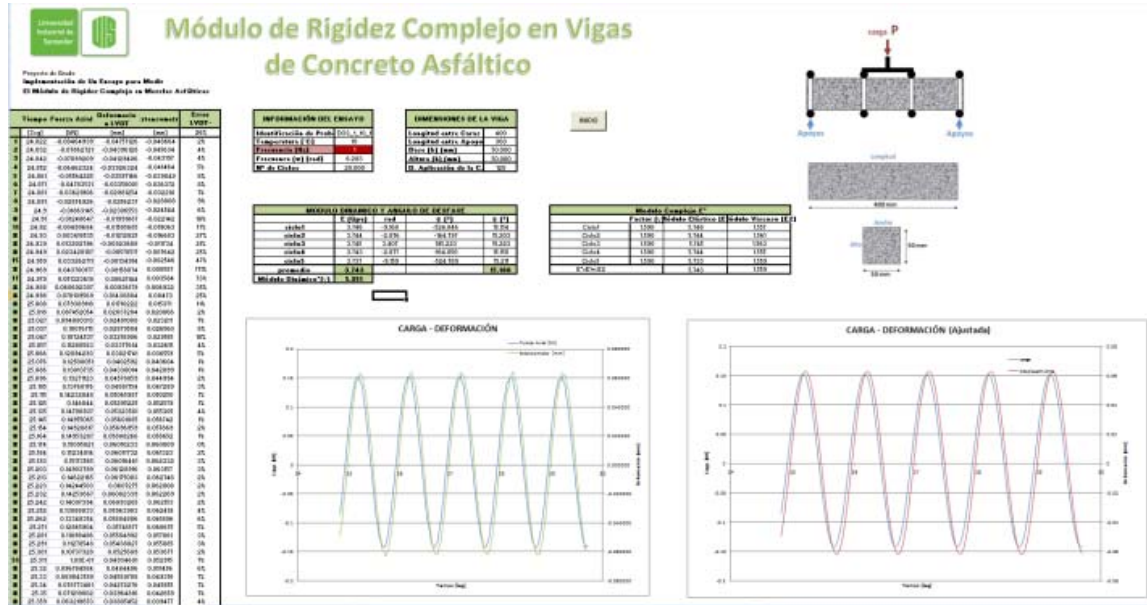
**Módulo Complejo E\***

	Factor (β)	Módulo Elástico (E') [MPa]	Módulo Viscoso (E'')
0.001	1.990	7.969	1.261
0.002	1.990	7.969	1.261
0.003	1.990	7.969	1.261
0.004	1.990	7.969	1.261
0.005	1.990	7.969	1.261
promedio	1.990	7.969	1.261
E* (E' + iE'')	1.982	7.962	1.262

Fuente: Registro fotográfico propio

Después de ingresar los datos, se debe dar clic en el botón “INICIO”, de esta manera el programa se valdrá de las pestañas CARGA y DESPLAZAMIENTO para realizar los ajustes de curvas y hallar los esfuerzos y deformaciones necesarios para calcular el módulo de rigidez complejo. Los resultados son presentados en la pestaña DATOS, junto con las graficas correspondientes, (ver Figura 4-8).

Figura 4-8: Resultados en el programa



Fuente: Registro fotográfico propio

En el ANEXO DIGITAL D se presentan las hojas de cálculo de todos los ensayos realizados.

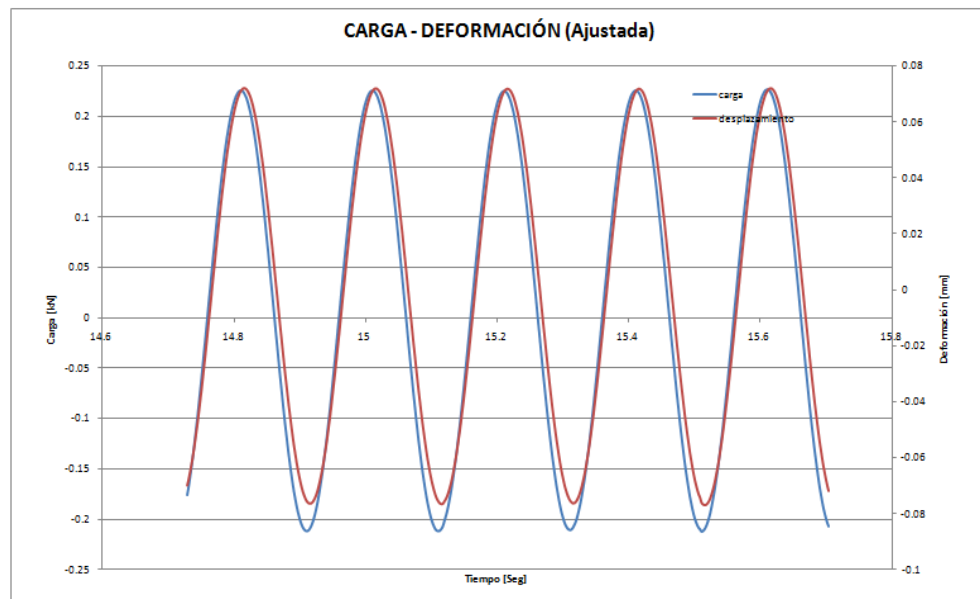
#### 4.4. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

Una vez realizado el análisis para todos los ensayos, se obtuvieron los valores del módulo complejo esperados, que permiten demostrar la variación en el comportamiento de las mezclas asfálticas ante las diferentes sollicitaciones de carga y temperatura. Los valores calculados para el módulo complejo son presentados en el ANEXO B a este documento. A continuación se presenta la interpretación de los resultados obtenidos.

#### 4.4.1. Comportamiento visco-elástico de las mezclas

Los datos de las señales de carga y desplazamiento presentaron ángulos de desfase; afirmando que el ensayo concuerda con lo esperado por la teoría de visco-elasticidad. Para cuantificar este ángulo y dar un valor del módulo, se procesaron los datos almacenados en cada ensayo. Realizando las graficas se observa desfase entre las señales, (ver Figura 4-9).

**Figura 4-9: Curva CARGA y DESPLAZAMIENTO vs TIEMPO**



*Fuente: Registro Propio*

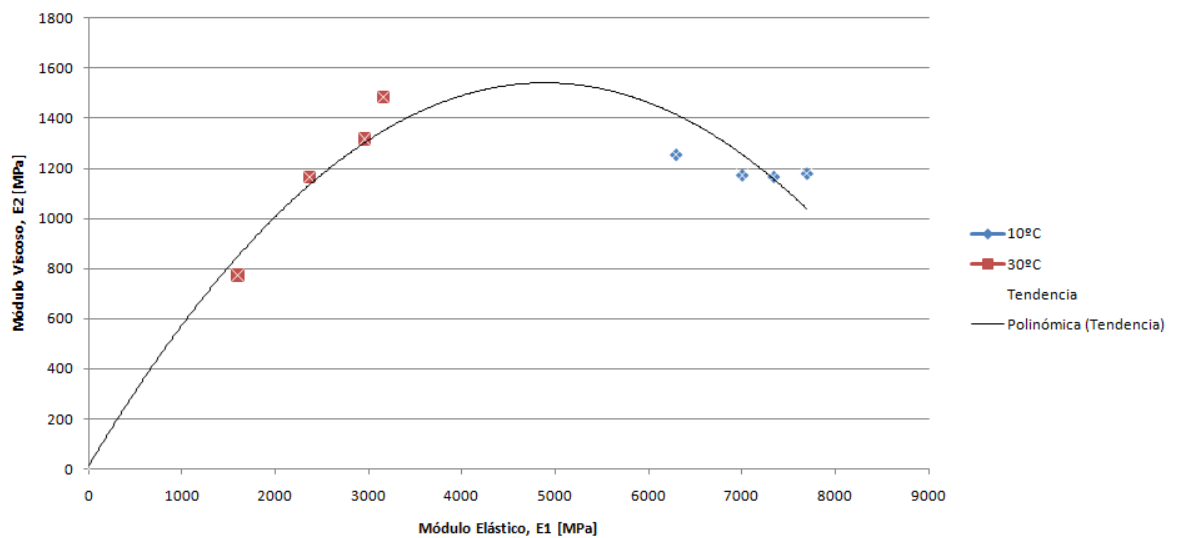
La figura muestra el comportamiento en el tiempo de las señales de carga y deformación. Como era de esperarse, la señal de deformación se retrasa, debido al comportamiento visco elástico de la mezcla.

#### 4.4.2. Evolución esperada del módulo

Al procesar los datos, se encuentra que la evolución del módulo complejo para las muestras ensayadas se presentaba acorde a lo esperado. La línea polinómica de tendencia de los datos muestra el comportamiento común de las mezclas

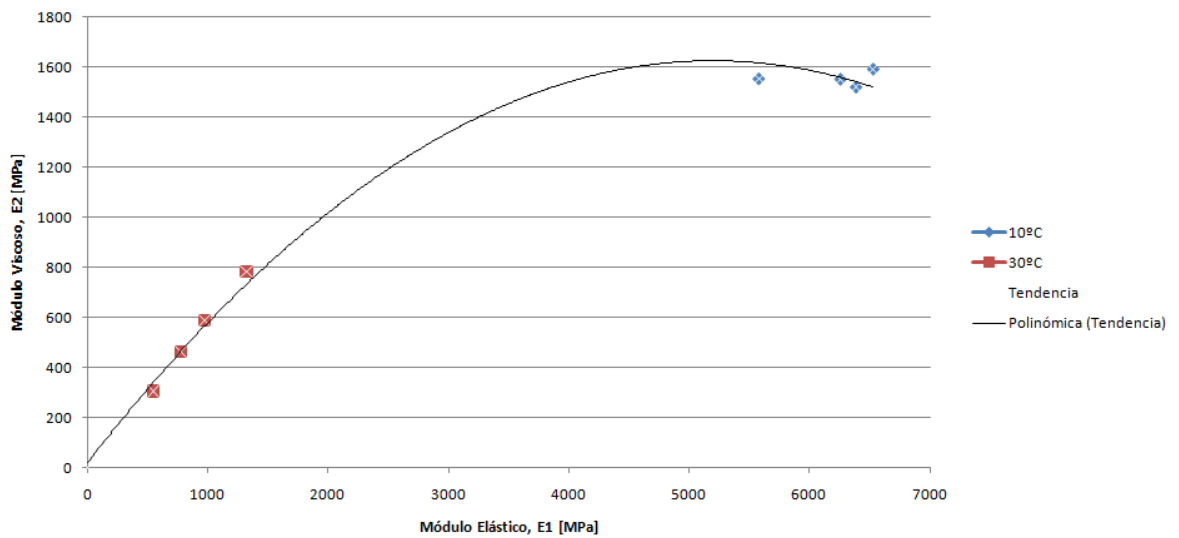
asfálticas. La Figura 4-10 y la Figura 4-11 muestran la evolución del módulo complejo en el plano Cole-Cole para las muestras UNO y DOS respectivamente.

**Figura 4-10: Plano Cole-Cole para el material UNO**



Fuente: Elaboración Propia

**Figura 4-11: Plano Cole-Cole para el material DOS**



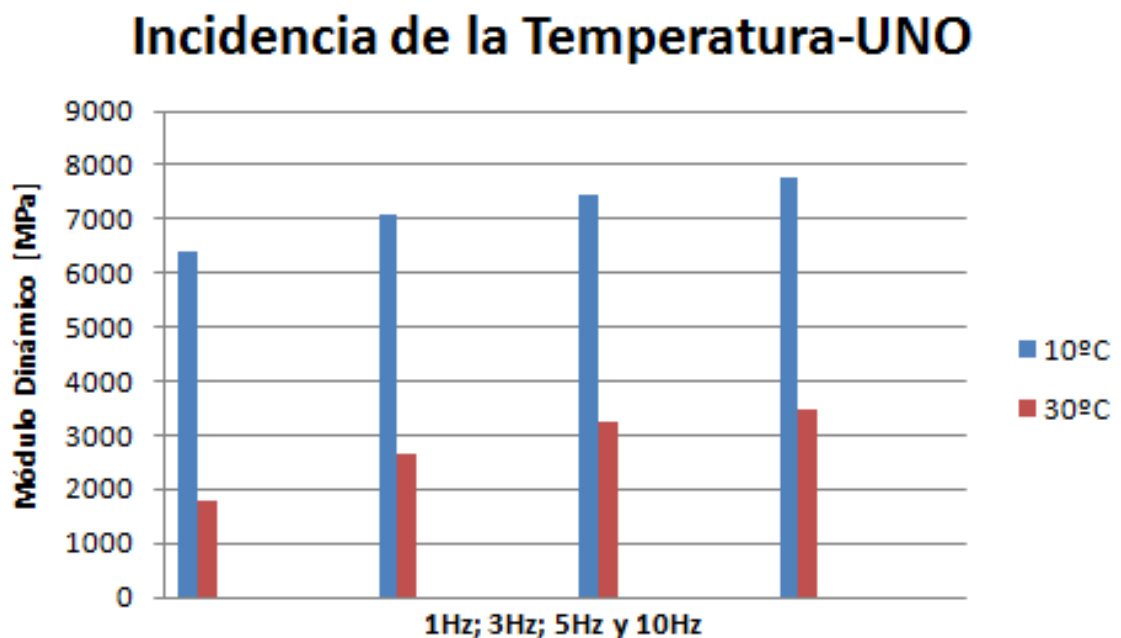
Fuente: Registro Propio

Para la mezcla de alto módulo (UNO), los valores de rigidez son mayores y la curvatura es más pronunciada; mientras que para la mezcla corriente (DOS), la curva se presenta mucho más suave, con valores más pequeños.

#### 4.4.2.1. Incidencia de la Temperatura en la Rigidez Compleja

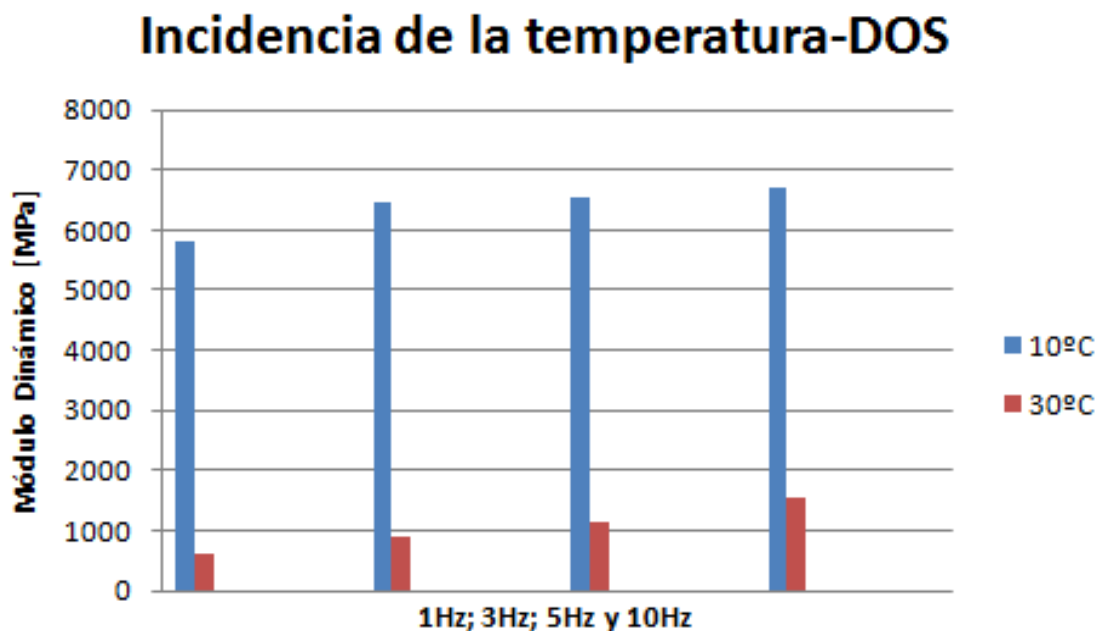
El valor del módulo complejo depende considerablemente de los cambios en la condición térmica de las muestras. Para temperaturas bajas predomina el comportamiento elástico y el modulo dinámico presenta mayores valores; mientras que para altas temperaturas, la rigidez disminuye. La Figura 4-12 y Figura 4-13 muestran la variación que presenta el modulo dinámico ante los cambios de temperatura para las muestras uno y dos respectivamente.

Figura 4-12: Comparación del módulo dinámico con la temperatura (Probeta UNO)



Fuente: Elaboración propia

Figura 4-13: Comparación del módulo dinámico con la temperatura (Probeta DOS)



Fuente: Elaboración propia

Los ensayos realizados muestran que la temperatura incide significativamente en la rigidez de las mezclas, ante una variación de 10°C se observan diferencias de entre 200 y 600 por ciento.

#### 4.4.2.2. Incidencia de la Frecuencia en la Rigidez Compleja

Al igual que la temperatura, la frecuencia de aplicación de carga tiene una incidencia en el valor de la rigidez de las mezclas asfálticas. Según los resultados obtenidos, el módulo dinámico tiende a variar linealmente con respecto de la frecuencia para altas temperaturas; mientras que para bajas temperaturas, al variar la frecuencia, se presenta una menor variación en el módulo viscoso, ajustándose a una curva es más suave.

Figura 4-14: Comparación del módulo dinámico con la frecuencia (Probeta UNO)

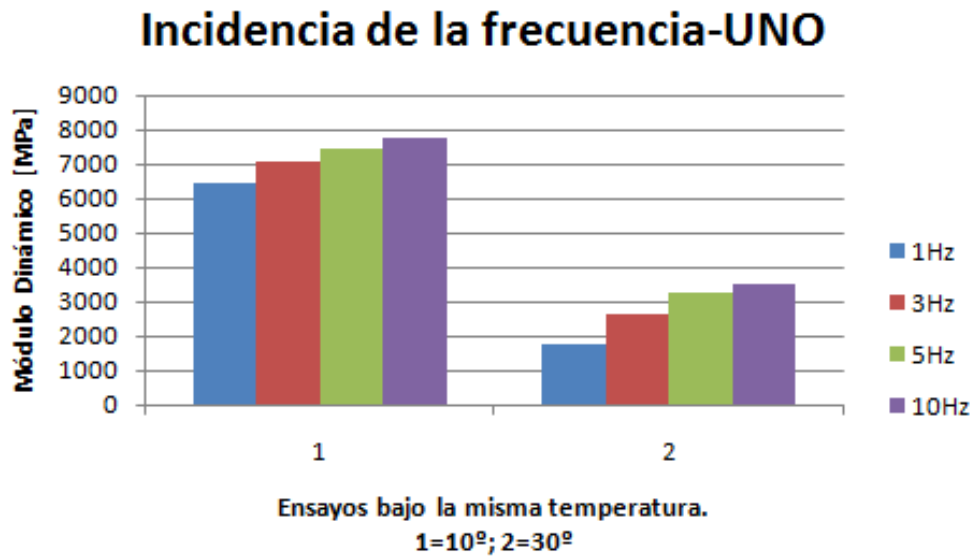
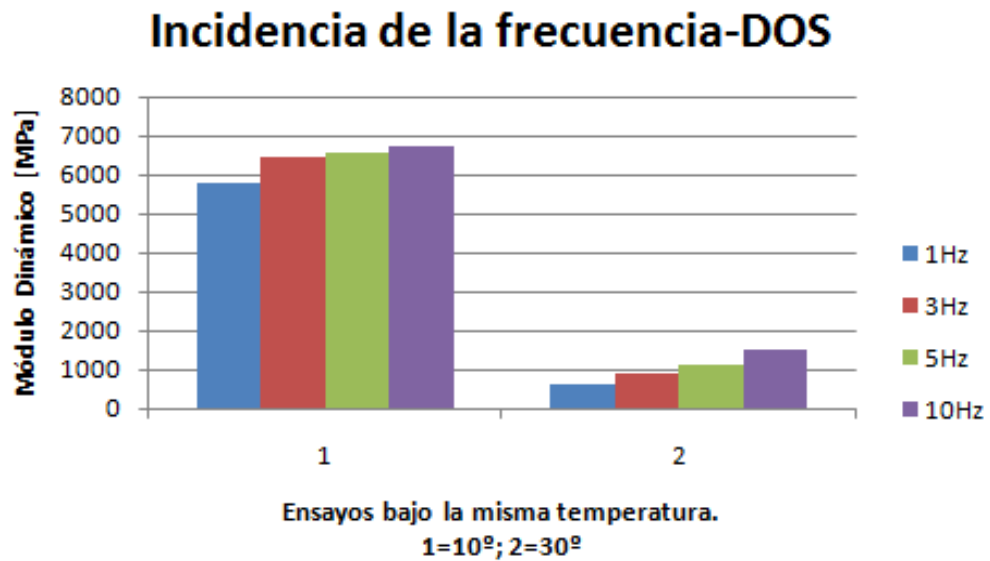


Figura 4-15: Comparación del módulo dinámico con la frecuencia (Probeta DOS)



Fuente: Elaboración propia

Las Figura 4-14 y Figura 4-15 muestran la variación que presenta el módulo dinámico respecto al cambio de frecuencias para las muestras UNO y DOS respectivamente. A medida de que la frecuencia aumenta, se obtienen valores de rigidez más altos.

A partir de los resultados, se comprobó que el ensayo implementado permite definir el módulo de rigidez complejo en las mezclas asfálticas de acuerdo con su comportamiento visco-elástico lineal. Razón por la cual, este estudio constituye una nueva herramienta en la caracterización de los materiales bituminosos utilizados en los pavimentos flexibles.

## 5. CONCLUSIONES

- Se ha logrado estudiar las propiedades Visco-Elásticas de las mezclas asfálticas, mediante la implementación del ensayo de flexión en cuatro puntos que permite determinar el módulo complejo de las muestras. Los resultados de las pruebas realizadas confirman la relación existente entre las condiciones térmicas y de carga, con la respuesta mecánica del material.
- La variación de la condición térmica es determinante en el comportamiento del concreto asfáltico. Para temperaturas bajas, el módulo dinámico presenta mayores valores, con predominio de las propiedades elásticas; mientras que para altas temperaturas el módulo viscoso es el factor que mejor describe el comportamiento en de las mezclas.
- La velocidad del tráfico vehicular es un factor determinante en el deterioro de los pavimentos flexibles. Lo anterior se debe a que el valor del módulo de rigidez complejo varía directamente con la frecuencia de las solicitaciones; es decir al disminuir el periodo de aplicación de carga, el módulo dinámico aumenta.
- El elemento diseñado para la implementación del ensayo presentó un comportamiento aceptable, cumpliendo con los estándares internacionales que aplican para este tipo de metodologías. El cumplimiento de estas normativas garantiza la confiabilidad de los resultados obtenidos.

- La metodología implementada resultó sencilla, efectiva y de alta repetitividad, razón por la cual permite caracterizar el comportamiento visco elástico de las mezclas asfálticas sin la necesidad de realizar un gran número de ensayos.
- La hoja de cálculo programada para el análisis de los datos constituye una herramienta complementaria que facilita y agiliza el proceso de obtención del módulo complejo, a partir de una interfaz intuitiva y agradable al usuario.

## 6. RECOMENDACIONES

Para futuros estudios se recomienda la utilización de equipos de última tecnología que minimicen las fuentes de error. En el caso de la UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER, se recomienda la adquisición de una cámara de temperatura que permita mantener las condiciones térmicas a lo largo del ensayo.

El montaje del elemento debe ser realizado cuidadosamente. Para esto se debe verificar el ajuste de cada una de las piezas, antes y durante los ensayos. Además, todos los equipos implicados en la realización de las pruebas deben estar previamente calibrados.

Si se quisiera estudiar el fenómeno de la fatiga utilizando el mismo montaje, se deberá reforzar el elemento, con el fin de aumentar su rigidez y disminuir así las deformaciones en una prueba de larga duración.

Para estudios futuros, se propone analizar la incidencia de la composición de las mezclas en el comportamiento visco-elástico del concreto asfáltico.

Además, se propone la implementación del ensayo en la evaluación del efecto del agua en la rigidez de las mezclas asfálticas.

## 7. BIBLIOGRAFÍA

AASHTO. (2002). Standard Specification for transportation materials and methods of sampling and testing. *American Association of State Highway and Transportation Officials* . EEUU.

Asphalt Institute. (2006). Laboratory mixing and compaction temperatures. Kentucky , USA: Asphalt Institute Technical Bulletin.

BARRA SALGADO, B. (2009). AVALIACAO DA ACAO DA ÁGUA NO MÓDULO COMPLEXO E NA FADIGA DE MISTURAS ASFÁLTICAS DENSAS. *Tese da Universidade Federal de Santa Catarina* . Florianópolis.

BULMAQ - Maquinaria y Servicios. (s.f.). *BULMAQ*. Recuperado el Enero de 2011, de <http://bulmaq.blogspot.com/2009/02/nuestra-empresa.html>

Carter, A., & Perraton, D. (Junio de 2002). LA MESURE DU MODULE COMPLEXE DES ENROBÉS BITUMINEUX. *Segunda Conferencia Especializada en Ingeniería de los Materiales de la Sociedad Canadiense de Ingeniería Civil* . Montréal, Quebec, Canada.

CASTAÑEDA, E. (2004). Contribution de méthodes non destructives à l'évaluation de l'effet de l'eau sur les enrobés bitumeux. Francia.

CEN. (2005). Módulo Complexe NF-EN 12697-21. *COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION* . Bruxelas, Belgica.

DE LA ROCHE, C. (Diciembre de 1996). Module de rigidité et comportement en fatigue des enrobés bitumineux/Expérimentations et nouvelles perspectives d'analyse. *Thèse de Doctorat* . Francia: Ecole Centrale Paris.

Di Benedetto, H. (1990). Nouvelle approche du comportement des enrobés bitumineux. *Proceedings of the Fourth International RILEM* . Budapest.

Dussan, E., & Falutero, F. (2005). AUTOMATIZACIÓN DE ENSAYOS DINÁMICOS DEL LABORATORIO. *Tesis Javeriana* . Bogota, Colombia.

Garriga, A. M. (Diciembre de 2002). REOLOGÍA DE ESPESANTES CELULÓSICOS PARA PINTURAS AL AGUA: MODELIZACIÓN Y MECANISMO Y

DE ESPESAMIENTO ASOCIATIVO. *TESIS DOCTORAL - UNIVERSIDAD DE BARCELONA* . BARCELONA, ESPAÑA.

H. Di Benedetto, M. N. (Marzo de 2001). Stiffness testing for bituminous mixtures. *RILEM TC 182-PEB* .

INVIAS. (2007). 450-07 Mezclas Asfálticas en Caliente. *Especificaciones de Diseño* . Colombia.

INVIAS. (2007). I.N.V. E-754 Módulo Dinámico en Mezclas Asfálticas. *INVIAS* . Colombia.

OLARD, F. (Octubre de 2003). COMPORTEMENT THERMOMÉCANIQUE DES ENROBÉS BITUMINEUX. *ECOLE DOCTORALE DES SCIENCES POUR L'INGENIEUR DE LYON* . Lyon, Francia: L'INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES APPLIQUÉES DE LYON.

Reyes, O. J., Camacho, J. F., & Nieto, A. (Agosto de 2006). CHANGES IN THE DYNAMIC PROPERTIES OF AN ASPHALT MIXTURE BY ENERGY OF COMPACTION AND VARIATION IN THE GRANULOMETRY. *Ciencia E Ingeniería Neogranadina* . Colombia.

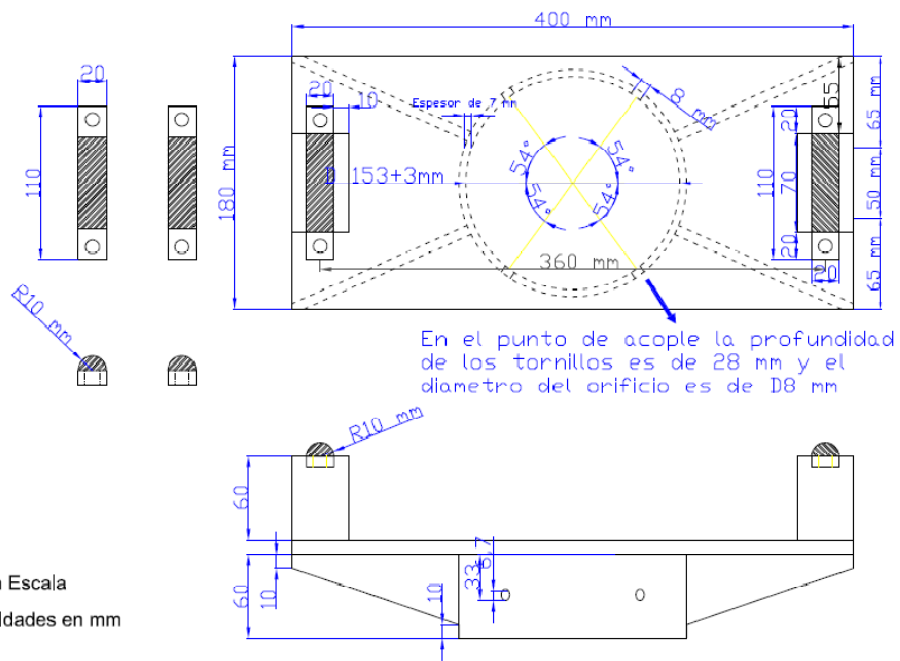
Rueda, E. (2010). ANÁLISIS COMPARATIVO DEL ESFUERZO DE TRACCIÓN EN VIGAS DE CONCRETO ASFALTICO SOMETIDAS A FLEXIÓN. *Tesis UIS* . Bucaramanga, Colombia.

Witczak, M., Kaloush, K., & Pellinen, T. (2002). Simple performance test for superpave mix design transportation research board. WASHINGTON, D.C.: NCHRP Report 465.

# ANEXOS

## Anexo A – PLANOS PARA LA REALIZACIÓN DEL DSIPOSITIVO ESTRUCTURAL

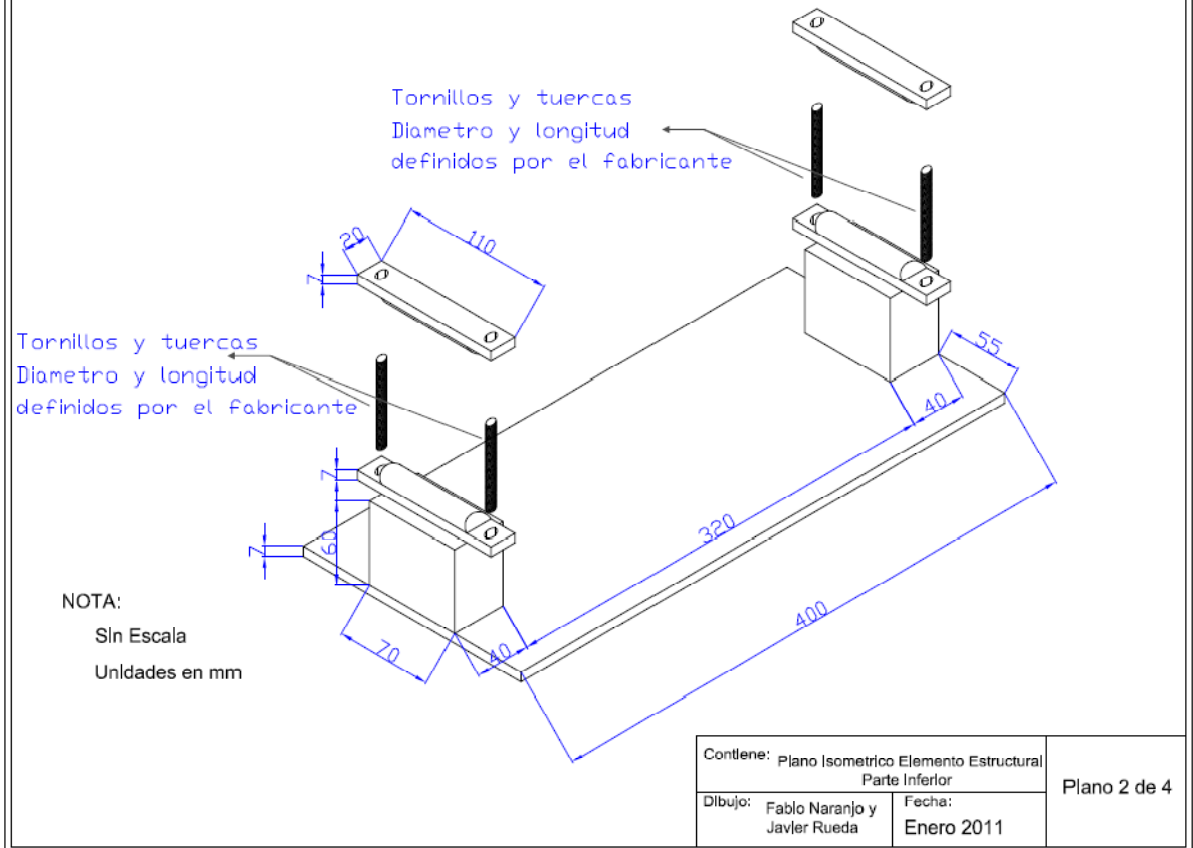
### Diseño Elemento Estructural Parte Inferior



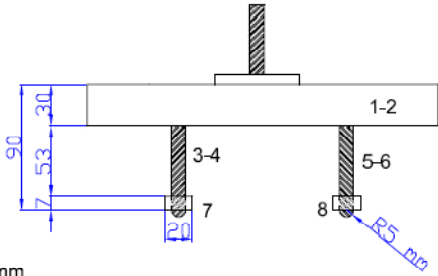
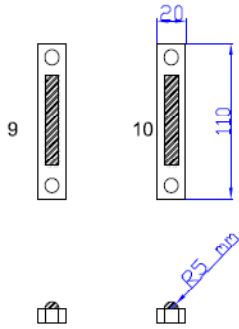
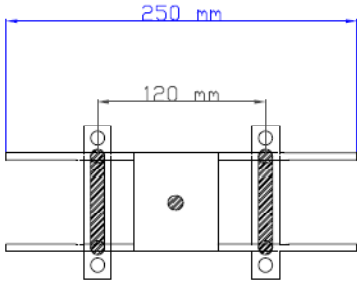
NOTA:  
Sin Escala  
Unidades en mm

Contiene: Planja y Perfil Elemento Estructural Parte Inferior		Plano 1 de 4
Dibujo: Fabio Naranjo y Javier Rueda	Fecha: Enero 2011	

# Diseño Elemento Estructural Parte Inferior - 3D



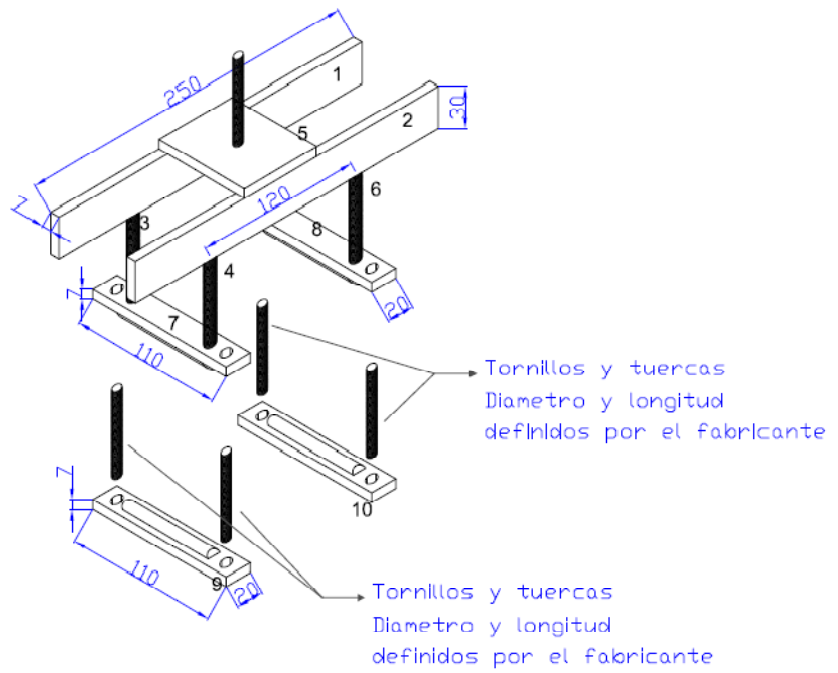
# Diseño Elemento Estructural Parte Superior



NOTA:  
Sin Escala  
Unidades en mm

Contiene: Planta y Perfil Elemento Estructural Parte Superior		Plano 3 de 4
Dibujo: Fablo Naranjo y Javier Rueda	Fecha: Enero 2011	

# Diseño Elemento Estructural Parte Superior - 3D



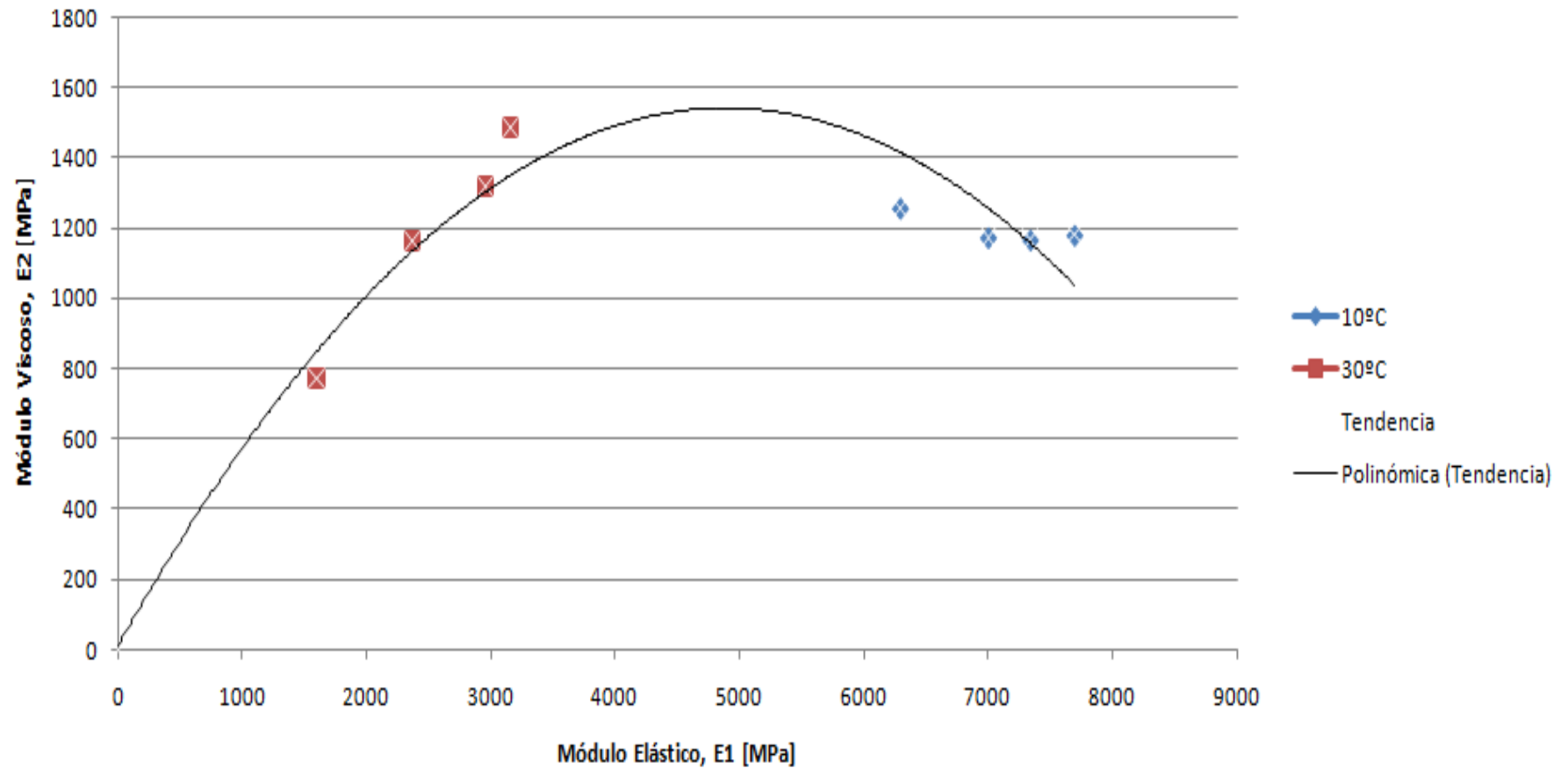
NOTA:  
Sin Escala  
Unidades en mm

Contiene: Plano Isometrico Elemento Estructural Parte Superior		Plano 4 de 4
Dibujo: Fabio Naranjo y Javier Rueda	Fecha: Enero 2011	

**Anexo B – VALORES DEL MÓDULO COMPLEJO PARA LOS ENSAYOS DE LA MUESTRA UNO**

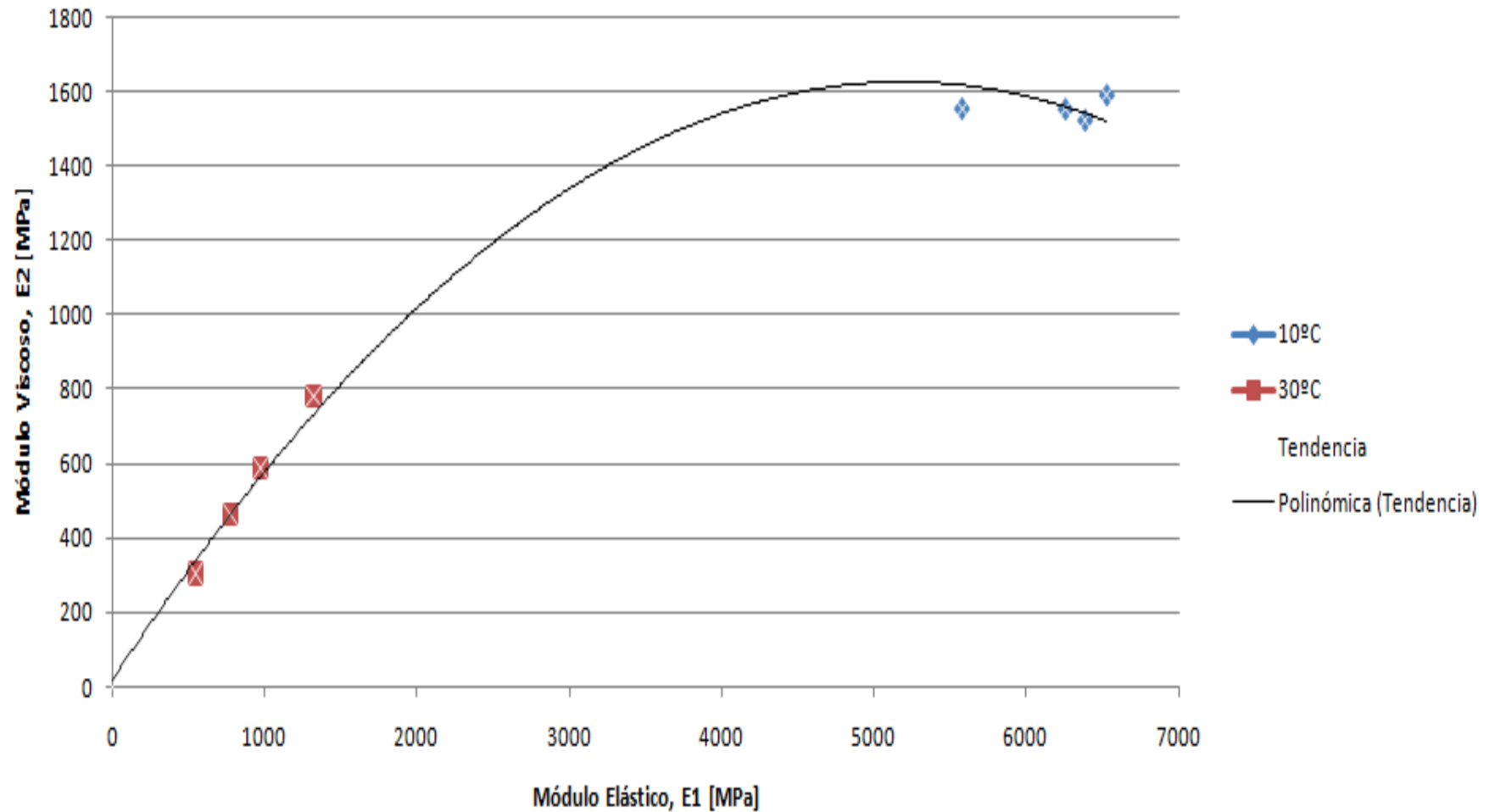
Muestra	UNO								
Temperatura [°C]	Frecuencia [Hz]	Número de ensayo	Desfase [φ]	E1 [GPa]	E2 [Gpa]	E*  [Gpa]	E1 Promedio [MPa]	E2 Promedio [MPa]	E*  Promedio [MPa]
10	1	1	11.103	6.144	1.206	6.261	6296	1256	6420
		2	11.332	6.358	1.274	6.485			
		3	11.399	6.385	1.287	6.514			
	3	1	9.563	7.065	1.190	7.165	7002	1173	7100
		2	9.483	6.940	1.159	7.036			
		3	9.490	7.002	1.170	7.099			
	5	1	8.910	7.294	1.144	7.383	7340	1167	7432
		2	9.068	7.352	1.173	7.445			
		3	9.118	7.374	1.184	7.469			
	10	1	8.652	7.673	1.168	7.761	7695	1180	7785
		2	8.754	7.680	1.183	7.770			
		3	8.750	7.732	1.190	7.823			
30	1	1	25.525	1.508	0.720	1.671	1598	773	1775
		2	25.961	1.607	0.782	1.787			
		3	25.945	1.678	0.817	1.866			
	3	1	26.303	2.311	1.143	2.578	2370	1164	2641
		2	26.244	2.375	1.171	2.647			
		3	25.935	2.425	1.179	2.696			
	5	1	24.664	2.887	1.326	3.177	2958	1318	3239
		2	23.977	2.969	1.320	3.249			
		3	23.400	3.019	1.306	3.289			
	10	1	25.647	3.045	1.462	3.378	3162	1486	3493
		2	25.070	3.186	1.490	3.517			
		3	24.817	3.254	1.505	3.585			

## Evolución Estimada del Módulo Complejo en el Plano Cole-Cole para la Muestra UNO



Muestra	DOS								
Temperatura [°C]	Frecuencia [Hz]	Número de ensayo	Desfase [φ]	E1 [GPa]	E2 [Gpa]	E*  [Gpa]	E1 Promedio [MPa]	E2 Promedio [MPa]	E*  Promedio [MPa]
10	1	1	15.19	5.74	1.56	5.95	5580	1553	5792
		2	15.52	5.58	1.55	5.79			
		3	15.99	5.42	1.55	5.64			
	3	1	13.79	6.34	1.56	6.53	6255	1552	6445
		2	13.90	6.27	1.55	6.46			
		3	14.12	6.16	1.55	6.35			
	5	1	13.27	6.51	1.53	6.68	6383	1521	6562
		2	13.42	6.36	1.52	6.54			
		3	13.52	6.29	1.51	6.46			
	10	1	13.52	6.47	1.56	6.65	6525	1591	6717
		2	13.71	6.56	1.60	6.75			
		3	13.87	6.55	1.62	6.75			
30	1	1	28.89	0.54	0.30	0.62	546	305	625
		2	29.24	0.54	0.30	0.62			
		3	29.43	0.55	0.31	0.63			
	3	1	30.93	0.75	0.45	0.88	776	462	904
		2	30.83	0.78	0.47	0.91			
		3	30.58	0.80	0.47	0.93			
	5	1	31.41	0.94	0.58	1.10	970	589	1135
		2	31.38	0.97	0.59	1.13			
		3	30.97	1.00	0.60	1.17			
	10	1	30.94	1.28	0.77	1.50	1321	782	1535
		2	30.71	1.32	0.79	1.54			
		3	30.26	1.36	0.79	1.57			

## Evolución Estimada del Módulo Complejo en el Plano Cole-Cole para la Muestra DOS



***Anexo C y Anexo D (Formato Digital)***

Adjunto a este documentó se entrega un disco compacto en el que se encuentran los Anexos digitales C y D.

La carpeta del anexo C contiene la Hoja de Excel programada con macros, llamada PCMRC-VIGAS.xlsm, también se encuentra una base de datos con las lecturas correspondientes al ensayo UNO\_1\_10\_1, estos datos pueden ser utilizados para probar el programa.

La carpeta del anexo D contiene el análisis de los datos de cada uno de los ensayos mediante el programa PCMRC-VIGA.xlsm.