



ESTUDIO DEL EFECTO COMBINADO DE AGUA Y  
ENVEJECIMIENTO DEL ASFALTO EN LA RIGIDEZ DE  
CONCRETOS BITUMINOSOS

MÓNICA LUQUE ARDILA  
EMILY DAYANA SÁNCHEZ QUINTANILLA

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

2014



ESTUDIO DEL EFECTO COMBINADO DE AGUA Y  
ENVEJECIMIENTO DEL ASFALTO EN LA RIGIDEZ DE  
CONCRETOS BITUMINOSOS

MÓNICA LUQUE ARDILA  
EMILY DAYANA SÁNCHEZ QUINTANILLA

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

2014



## **AGRADECIMIENTOS**

*A Dios por ser nuestra guía, por iluminarnos y por colocar en nuestro camino esta carrera.*

*A nuestra familia por apoyarnos incondicionalmente y ser el motor que nos impulsa a ser mejores día a día.*

*A todas esas personas incondicionales que nos acompañaron paso a paso en nuestra vida universitaria.*

*Al ingeniero Eduardo Castañeda por su tiempo, sus conocimientos, su experiencia y dedicación para el buen desarrollo de este proyecto.*

*A los profesores, los cuales con sus aportes nos enriquecieron y formaron integralmente.*

*A los laboratoristas por su colaboración y apoyo constante.*

*A las ingenieras Viviana Pérez y Lina Polanco por la ayuda brindada y en general por la orientación durante el desarrollo del proyecto.*

*A dos personitas especiales que desde el cielo siguen acompañándonos.*

## CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN.....	17
1. ESTADO DEL ARTE.....	18
2. METODOLOGÍA.....	22
2.1 FABRICACIÓN DE PROBETAS.....	22
2.2 ACONDICIONAMIENTO DE LAS VIGAS.....	25
2.3 DETERMINACIÓN DEL MÓDULO DINÁMICO.....	26
2.4 DETERMINACIÓN DEL MÓDULO COMPLEJO.....	27
2.5 DETERMINACIÓN ÁNGULO DESFASE.....	27
3. RESULTADOS Y ANÁLISIS.....	28
3.1 EVOLUCIÓN DEL MÓDULO DINÁMICO.....	29
3.1.1 Efecto del agua.....	30
3.1.2 Efecto de la temperatura.....	30
3.1.3 Efecto de combinación de temperatura y agua.....	31
3.2 EVOLUCIÓN DEL MÓDULO COMPLEJO.....	32
3.2.1 Efecto del agua.....	32
3.2.2 Efecto de la temperatura.....	35



3.2.3 Efecto de combinación de temperatura y agua.....	37
4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	39
5. BIBLIOGRAFIA.....	40
ANEXOS.....	42

## LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Métodos utilizados para evaluar el envejecimiento por temperatura de las mezclas asfálticas.....	19
Tabla 2. Métodos utilizados para evaluar el envejecimiento por oxidación de mezclas asfálticas.....	20

## LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Granulometría.....	23
Figura 2. Dimensiones de las vigas.....	23
Figura 3. Fabricación de probetas.....	24
Figura 4. Ensayo a flexión.....	26
Figura 5. Desfase entre señales de carga y desplazamiento.....	28
Figura 6. Evaluación del Módulo dinámico.....	29
Figura 7. Evaluación del Módulo dinámico ajustado.....	30
Figura 8. Variación de la rigidez por efecto del agua.....	31
Figura 9. Variación de la rigidez por efecto de la temperatura.....	31
Figura 10. Variación de la rigidez por efecto de combinación (Temperatura y agua).....	32
Figura 11. Espacio del Black viga 1 efecto del agua.....	33
Figura 12. Espacio del Black viga 2 efecto del agua.....	33
Figura 13. Espacio del Black viga 3 efecto del agua.....	34
Figura 14. Resultados variación ángulo de desfase efecto del agua.....	34
Figura 15. Espacio de Black viga 1 efecto de la temperatura.....	35
Figura 16. Espacio de Black viga 2 efecto de la temperatura.....	35
Figura 17. Espacio de Black viga 3 efecto de la temperatura.....	36
Figura 18. Resultados variación ángulo de desfase efecto de la	

Temperatura.....	36
Figura 19. Espacio de Black viga 1 efecto de combinación de Temperatura y agua.....	37
Figura 20. Espacio de Black viga 2 efecto de combinación de Temperatura y agua.....	37
Figura 21. Espacio de Black viga 3 efecto de combinación de Temperatura y agua.....	38
Figura 22. Resultados de variación ángulo de desfase efecto de Combinación de temperatura y agua.....	38

## LISTA DE ECUACIONES

	Pág.
Ecuación 1. Módulo dinámico.....	26
Ecuación 2. Inercia.....	27
Ecuación 3. (a) Módulo complejo, (b) Módulo elástico, (c) Módulo viscoso.....	27

## LISTA DE ANEXOS

	Pág.
Anexo A. Granulometría y principales características de la mezcla.....	42
Anexo B. Porcentaje de vacíos en las vigas.....	43
Anexo C. Módulos.....	44



## RESUMEN

**TÍTULO:** ESTUDIO DEL EFECTO COMBINADO DE AGUA Y ENVEJECIMIENTO DEL ASFALTO EN LA RIGIDEZ DE CONCRETOS BITUMINOSOS.\*

**AUTORES:** LUQUE ARDILA Mónica

SANCHEZ QUINTANILLA Emily Dayana\*\*

**PALABRAS CLAVES:** Concreto bituminoso, agua, envejecimiento, rigidez, deterioro.

### CONTENIDO:

La construcción de vías de alta calidad y durabilidad requiere del conocimiento de las características y el comportamiento de los materiales que la conforman. Desde principios del siglo XIX se usa intensivamente el asfalto en carreteras pavimentadas.

Factores como el medio ambiente y las cargas se han identificado como elementos que influyen significativamente en el deterioro de los concretos bituminosos. De igual forma, el agua y el envejecimiento son agentes importantes generadores de cambios en las propiedades de las carpetas asfálticas.

Para evaluar el comportamiento de los materiales en las mezclas asfálticas, se efectúan ensayos con el objetivo de medir su evolución en distintas situaciones; el estudio de la rigidez, es muy útil cuando se está interesado en determinar la durabilidad del asfalto, ya que ésta es un factor que brinda información acerca de las propiedades mecánicas de los materiales.

Esta investigación pretende analizar el efecto combinado de agua y envejecimiento en la rigidez de mezclas asfálticas, mediante ensayos no destructivos de vigas y determinando la evolución de la rigidez del material.

El estudio realizado muestra que la rigidez del material varía cuando las probetas se someten a distintos acondicionamientos, encontrándose que el agua es el agente que mayor deterioro produce.

---

\*Proyecto de grado, Modalidad Investigación

\*\*Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Director de proyecto. Ing. M. Sc., Ph.D. Eduardo Alberto Castañeda Pinzón



## ABSTRACT

**TITLE:** COMBINED EFFECT OF WATER AND AGING STUDY IN ASPHALT CONCRETE STRENGTH OF BITUMINOUS.\*

**AUTHORS:** LUQUE ARDILA Mónica

SANCHEZ QUINTANILLA Emily Dayana\*\*

**KEYWORDS:** Bituminous concrete, water, aging, stiffness, deterioration.

### CONTENT:

The road construction high quality and durability requires knowledge of the characteristics and behavior of the materials that comprise them. Since the early nineteenth century used intensively in the asphalt paved roads.

Factors such as the environment and loads have been identified as factors that significantly influence the deterioration of bituminous concrete. Similarly, the water and aging generating agents are important changes in the properties of the asphalt pavement.

To evaluate the performance of materials in asphalt mixtures, tests are performed in order to measure your progress in different situations; the study of rigidity is very useful when you are interested in determining the durability of asphalt, as this is a factor which provides information about the mechanical properties of materials.

This research aims to analyze the combined effect of water and aging in the stiffness of asphalt mixtures using non-destructive testing of beams and determining the evolution of the stiffness of the material.

The study shows that the stiffness of the material changes when the samples are subjected to different fittings, being that the water is the agent further deterioration occurs.

---

\*Proyecto de grado, Modalidad Investigación

\*\*Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Director de proyecto. Ing. M. Sc., Ph.D. Eduardo Alberto Castañeda Pinzón

## INTRODUCCIÓN

La mezcla asfáltica está compuesta por asfalto y un agregado mineral donde el asfalto actúa como un agente ligante y aglutinador de las partículas minerales, formando una masa cohesiva empleada como superficie de rodadura de pavimentos [1].

La rigidez es una propiedad fundamental de los concretos asfálticos, la cual es afectada por aspectos como el envejecimiento y la exposición al agua, por lo que su estudio puede ayudar en la selección de materiales y en la evaluación de la vida útil.

La presente investigación pretende analizar el comportamiento de la rigidez de concretos bituminosos sometidos al efecto combinado de agua y envejecimiento.

Para la ejecución del proyecto se realizó seguimiento a la rigidez (mediante ensayos a flexión) de 4 grupos de vigas acondicionadas de forma particular ante diversos agentes de deterioro.

## 1. ESTADO DEL ARTE

El comportamiento mecánico de una mezcla asfáltica varía de acuerdo a las condiciones en que se encuentre expuesta; teniendo en cuenta que es un material visco-elástico puede verse afectado por la acción de las cargas del tránsito, las variaciones climáticas y otros agentes del medio ambiente que pueden ocasionar, en muchos casos la falla prematura de la misma. El concreto asfáltico se deteriora principalmente por fenómenos de fisuración o fatiga, ocasionados por efecto de cargas o temperatura, deformaciones excesivas, desgaste de los materiales y pérdida de adhesividad del agregado y el ligante por efecto del agua [2].

El envejecimiento de las mezclas asfálticas es un proceso complejo el cual ocurre durante el mezclado en la planta, la construcción de la carretera y la vida de servicio. Es ampliamente aceptado que el mecanismo de funcionamiento del envejecimiento ocurre en dos etapas: El envejecimiento a corto y a largo plazo. La primera etapa del fenómeno se debe a la pérdida de componentes volátiles mientras la mezcla está caliente y la segunda se produce por las condiciones ambientales y los efectos del clima [3]. De tal forma, en este fenómeno intervienen, de un lado, variables intrínsecas de la mezcla, como lo son sus componentes: el asfalto, los agregados, los vacíos con aire y el espesor de la película de asfalto [3] y, del otro lado, variables extrínsecas que producen el efecto del envejecimiento como la temperatura, la presión atmosférica, el agua lluvia, la humedad relativa del ambiente, la radiación ultra violeta, el viento, las cargas del tránsito y el tiempo de servicio generando procesos de oxidación que producen envejecimiento en los materiales [3].

De acuerdo con las consideraciones anteriores se puede establecer que el envejecimiento en las mezclas asfálticas es un fenómeno producido por la interacción de variables intrínsecas y extrínsecas, las cuales producen un efecto de endurecimiento en la mezcla [3]. De esta manera se puede evidenciar que el fenómeno de envejecimiento y endurecimiento de la mezcla asfáltica se presenta primordialmente por dos factores principales, la pérdida de volátiles y la oxidación.

En general y hasta la fecha las investigaciones realizadas se han enfocado en cuatro categorías de pruebas de envejecimiento, clasificadas así:

a) Procesos de calentamiento (acondicionamiento en hornos): Este tipo de tratamiento consiste en exponer las muestras a periodos de calor extendido en hornos los cuales generalmente se realizan sobre muestras compactas [3].

La tabla 1 resume algunos procedimientos utilizados para envejecer mezclas asfálticas.

**Tabla 1.** Métodos utilizados para evaluar el envejecimiento por temperatura de las mezclas asfálticas

Autor (año)	Prueba o ensayo	Temperatura °C	Duración	Muestra	Otras características
Von Quintas (1988)	Envejecimiento en planta	135	8,16,24,36 h	Material suelto	
SHRP (1991)	Short term aging test	135	4 h	Material suelto	
	STOA				
Scholz (1995)	Bitutest protocol	135	2 h	Material suelto	
Pauls & Welbom (1952)	Mezcla arena Ottawa + asfalto	163	Varios periodos	50 * 50 mm <sup>2</sup>	
Plancher et al (1976)		150	5 h	25 * 40 mm <sup>2</sup> φ	
Kemp & Prodoehl (1981)	Ottawa sand mixtures	60	1200 h		
Hugo y Kennedy (1985)		100	4 o 7 días		80% humedad relativa
Bell et al. (1991)	Short Term Aging STA	135 y 163	0, 6 y 15 h	Material suelto	Compactación amasado 250 y 500 psi
Bell et al. (1991)	Extended mixing EM	135 y 163	0, 10, 120 y 360 min	Material suelto	Homo giratorio y compactación por amasado
Von Quintas (1988)	Long Term ageing	60	2 días	Muestra compacta	Pre acondicionamiento
		107	3 días		
Bell et al. (1991)	Long Term aging LTA	40 y 60	2 días	Muestra compacta	Pre acondicionamiento
		107	0, 2 y 7 días	Muestra compacta	
SHRP (1991)	Long-Term oven ageing	85	5 días	Muestra compacta	
	LTQA			Muestra compacta	
Scholz (1995)	Bitutest protocol	85	5 días	Muestra compacta	

**Fuente:** Fernández et al. [3]

b) Pruebas de oxidación: Se sabe que el envejecimiento por oxidación cambia la estructura molecular de los asfaltos creando moléculas más grandes y polares [3] con lo que se alteran las propiedades reológicas de las mezclas asfálticas; algunos investigadores han realizado pruebas de laboratorio para producir envejecimiento acelerado en las mezclas asfálticas en atmósferas enriquecidas de oxígeno. (Tabla 2).

**Tabla 2.** Métodos para evaluar el envejecimiento por oxidación en mezclas asfálticas

Autor (año)	Prueba o ensayo	Temperatura °C	Duración	Muestra	Otras características
Kumar y Goetz (1977)	Mixture oxidation	60	1,2,4,6,10 días	Muestra compacta	Aire a 0.5 mm de agua
(Von Quintas, 1988)	Long Term ageing	60	5 y 10 días	Muestra compacta	Aire a 0.7 Mpa.
Kim et al. (1986)	Oregon mixtures	60	0,1,2,3,5 días	Muestra compacta	Aire a 0.7 Mpa.
SHRP (1991)	Low pressure oxidation LPO	60 u 85	5 días	Muestra compacta de STOA	Oxígeno a 1.9l/min.
Bell et al. (1991)	Pressure Oxidation Vessel	25 60	2 días 7 días	Muestra compacta	Oxígeno a 100 psi Oxígeno a 300 psi
Khalid & Walsh (2000)		60	Más de 25 días	Muestra compacta	Aire a 3l/min
Korsgaard (1996)	PAV mixtures	100	72 h	Muestra compacta	Aire a 2.07 Mpa.

**Fuente:** Fernández et al. [3]

c) Envejecimiento mediante radiación infrarroja y radiación ultravioleta: Este tipo de ensayo hace parte de los conocidos tratamientos de foto degradación, en estos, se intenta reproducir el efecto que produce la luz del día o la radiación producida por el sol al tiempo que se estudian los cambios en el comportamiento de los asfaltos y de las mezclas asfálticas en relación con la degradación a causa de la luz.

La consecuencia más importante de envejecimiento acelerado por acción de la luz o la radiación ultravioleta, corresponde a un incremento significativo en la viscosidad del material [3].

d) Endurecimiento esterítico (Steric Hardening): El endurecimiento esterítico del asfalto producido por los cambios de temperatura cercana a la temperatura ambiente y corresponde a un reajuste estructural el cual se puede revertir mediante la exposición al calor o al trabajo mecánico [3].

A manera de síntesis se puede afirmar que aún no se encuentra un tratamiento normalizado en laboratorio que prediga los efectos de envejecimiento de mezclas asfálticas en el tiempo. Es evidente que encontrar las duraciones adecuadas de las pruebas depende directamente de las condiciones climáticas del lugar y de las características propias de las mezclas asfálticas [3].

A su vez, el agua es uno de los principales agentes que produce daño sobre la carpeta asfáltica. Se filtra a través de los poros que se encuentran en la capa de rodadura, luego se mueve lentamente hacia el asfalto y finalmente destruye las fuerzas que mantienen unido el ligante asfáltico con los agregados minerales, afectando la vida útil de los pavimentos.

Se ha demostrado que el agua libre al interior de un pavimento puede deteriorar de 20 a 50 veces su capacidad estructural, constituyéndose en un factor climático erosivo peligroso [4].

La presencia de agua libre dentro del pavimento se debe principalmente a dos causas definidas por Cañete:

1. Infiltración de agua a través de grietas en el pavimento, zanjas laterales, cunetas sin pavimentar, etc.
2. Ascensión capilar desde el nivel freático.

Los mayores daños en los pavimentos se producen por la infiltración de agua en las fisuras que se encuentran en la carpeta de rodadura [5], uno de ellos es la poca adhesión entre las partículas minerales y el ligante asfáltico, aspecto muy común en países tropicales.

El agua tiene una tensión superficial menor que la del asfalto, lo que le permite moverse lentamente hacia el asfalto, y destruir las fuerzas que mantienen unida la capa del ligante al agregado. La sensibilidad al agua del asfalto y el agregado se ve influenciada por su naturaleza físico-química [2].

Así mismo [6] sugiere que la adherencia agregado asfalto ocurre por reacción química entre el asfalto y el agregado. De manera similar, [6] menciona que la calidad del agregado y la composición mineralógica es uno, de entre tantos factores, que afectan la magnitud de este fenómeno. Además, la adherencia entre el ligante y el agregado pétreo es fuertemente dependiente de la mineralogía de este último material [6]. Al igual [6] demostró que la edad del pavimento tiene una

alta influencia en el daño por humedad. La humedad es uno de los factores que afecta en mayor grado el desempeño de la mezcla asfáltica debido a que produce una degradación en las propiedades mecánicas del material por la presencia de agua en forma líquida o como vapor [3].

Teniendo en cuenta la información anterior, es necesario indicar que la rigidez es un factor que brinda información sobre las propiedades mecánicas de los materiales.

Para determinar el comportamiento visco-elástico de las mezclas asfálticas en el laboratorio se realizan ensayos homogéneos y no homogéneos, siendo éstos últimos los que arrojan mejores resultados [7]; todos los ensayos permiten determinar el módulo de rigidez a partir del esfuerzo y la deformación.

Los ensayos de módulo complejo se pueden evaluar en diagramas que tienen en cuenta las componentes visco-elásticas del concreto asfáltico. El diagrama de Black que relaciona en un mismo plano los valores de ángulo de desfase y módulo dinámico permite realizar este análisis.

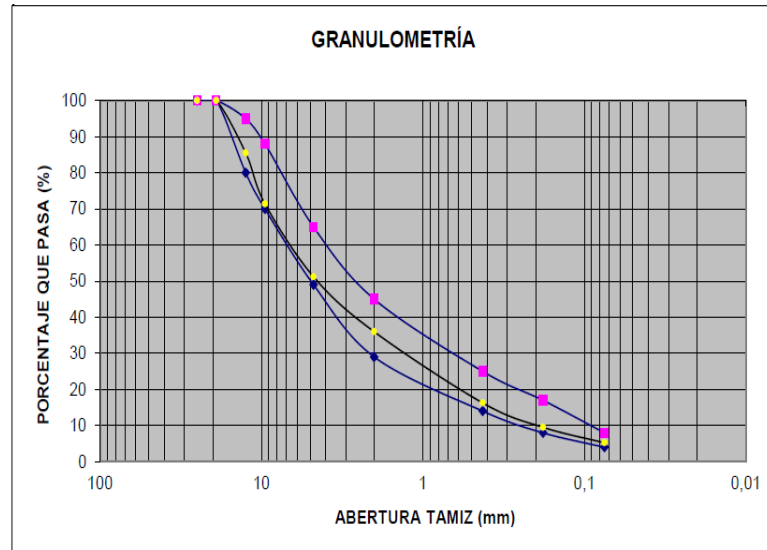
## **2. METODOLOGÍA**

El efecto combinado de agua y envejecimiento del asfalto produce cambios en la rigidez de los concretos bituminosos. El análisis de la evolución de la rigidez de probetas sometidas a diversos acondicionamientos permitirá estudiar el efecto de agentes causantes de cambios en el material.

### **2.1 FABRICACIÓN DE PROBETAS**

Para la realización del proyecto se empleó mezcla asfáltica en caliente MDC-2, pre-mezclada, proveniente de TECNOPAVIMENTOS S.A. (Planta de producción de la zona) y se utilizó cemento asfáltico de penetración 60/70. Ver anexo A. En la Figura 1 se muestra la granulometría del material empleado.

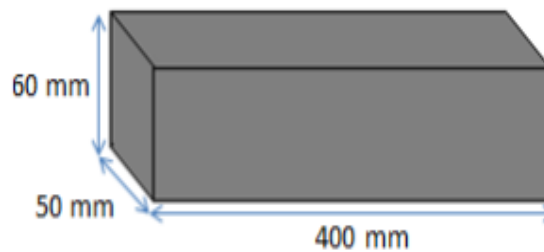
**Figura 1. Granulometría**



**Fuente:** TECNOPAVIMENTOS S.A.

Las probetas de dimensiones 400x60x50mm, utilizadas en los ensayos fueron fabricadas teniendo en cuenta que la altura o ancho debe ser tres veces el tamaño máximo del agregado de la mezcla, mientras que la longitud debe ser ocho veces la altura o el ancho de la viga (NE FP 12697-26). La figura 2 muestra el prototipo de viga empleado.

**Figura 2. Dimensiones de las vigas**



**Fuente:** Elaboración propia

Para su elaboración fue necesario construir placas de concreto asfáltico de dimensiones 0.6 x 0.6 x 0.1 m, compactadas a 120 °C, (siendo esta una temperatura adecuada que permite llevar a cabo el proceso de compactación sin

que se produzcan agrietamientos o desplazamientos indebidos en la mezcla siguiendo los lineamientos de [8]) utilizando un equipo compactador de impactos.

De cada placa se extrajeron ocho vigas cortadas siete días después de la compactación, utilizando una máquina cortadora de disco con punta diamantada, asegurándose que las probetas quedarán con medidas uniformes y exactas. La figura 3 muestra el proceso descrito.

**Figura 3.** Fabricación de probetas



**Fuente:** Registro fotográfico propio

Las probetas obtenidas presentan un contenido de asfalto del 5.19% y el porcentaje de vacíos en las mismas varió entre 5% y 8% cumpliendo con los requerimientos según [9], como se muestra en el anexo B.

## 2.2 ACONDICIONAMIENTO DE LAS VIGAS

Se seleccionó un grupo de 12 probetas con características similares entre sí y posteriormente se dividió en 4 subgrupos cada uno conformado por 3 unidades y sometido de forma particular a los siguientes acondicionamientos:

Subgrupo 1: Las probetas se exponen al ambiente del laboratorio, permaneciendo sobre una superficie totalmente horizontal para evitar la deformación. El propósito de su fabricación fue analizar el comportamiento de la rigidez sin factores que aceleren el proceso de envejecimiento y humedad, para luego comparar resultados con otros subgrupos de vigas.

Subgrupo 2: Para recrear el efecto de agentes como el agua se procedió a sumergir las vigas previamente saturadas (según se describe en [10]). Tradicionalmente el acondicionamiento para estudiar el efecto del agua se hace a temperatura del orden de 60°C. Se seleccionó una temperatura de 25°C para reducir el efecto de ésta en el material y se evaluó el deterioro en mayores periodos de tiempo a los empleados tradicionalmente.

Subgrupo 3: En las vigas de este subgrupo se simuló el fenómeno de envejecimiento a largo plazo (el cual es asociado exclusivamente a la vida de servicio del pavimento) mediante el procedimiento de calor extendido en horno, a una temperatura 40°C con la cual se procuró mantener similitud en el comportamiento mecánico del asfalto presente en el laboratorio y el de las carpetas asfálticas en campo.

Subgrupo 4: Con el fin de simular el efecto combinado de agua y envejecimiento del asfalto estas tres vigas fueron acondicionadas inicialmente como se indica en el subgrupo 3 por 30 días y posteriormente se acondicionaron de la misma manera que las vigas descritas en el subgrupo 2 durante 7 días más.

La toma de datos de la rigidez de las vigas se realizó antes de iniciar los acondicionamientos y posteriormente en periodos de tiempo fijos. El ensayo no destructivo de flexión se practica aplicando carga dinámica a los tercios medios de la luz de la probeta con una frecuencia de 5 Hz, controlando la deformación máxima a 50  $\mu\epsilon$  y buscando mantener la temperatura controlada durante el proceso. Este ensayo se realizó siguiendo los parámetros dados por [11], que define el procedimiento de ensayo de flexión en cuatro puntos, empleando el

dispositivo de carga dispuesto en el laboratorio de la Universidad Industrial de Santander, la MTS-810 (Material Test System), como se indica en la figura 4.

**Figura 4.** Ensayo a flexión.



**Fuente:** Registro fotográfico propio

La evaluación de la rigidez se hace analizando los valores de módulo dinámico obtenidos tras cada acondicionamiento (valor absoluto del módulo complejo que define las propiedades elásticas de un material de viscosidad lineal sometido a una carga sinusoidal [12]) y observando la evolución de la misma pero teniendo en cuenta el comportamiento visco-elásticas a través del análisis del módulo complejo en el diagrama de Black.

### 2.3 DETERMINACIÓN DEL MÓDULO DINÁMICO

El módulo dinámico se determinó utilizando las ayudas de diseño de [13] para deflexión en vigas simplemente apoyadas, de la cual se obtuvo la siguiente ecuación (1):

$$E = 0.03086 * \frac{PL^3}{\Delta I}$$

**Ecuación 1.** Módulo dinámico

Donde:

P: La carga aplicada en kN

L: Longitud entre apoyos en mm, (357 mm)

$\Delta$ : Deflexión en el tercio medio de la luz en mm.

I: Inercia en mm<sup>4</sup>. Se define en la ecuación (2).

$$(I = \frac{1}{12}(b) * (h)^3)$$

**Ecuación 2.** Inercia

b: Base de la viga.

h: Altura de la viga.

## 2.4 DETERMINACIÓN DEL MÓDULO COMPLEJO

Para la determinación del módulo complejo se utilizó la ecuación (3); donde E1 es la componente real, la cual representa el comportamiento elástico (Módulo elástico) y E2 es la componente imaginaria, representando el comportamiento viscoso (Módulo viscoso).

$$(a) = E1 + E2$$

Donde:

$$(b) \frac{\sigma}{\varepsilon} * \text{Cos}(\Phi)$$

$$E: (c) * (\frac{\sigma}{\varepsilon} * \text{Sen}(\Phi))$$

**Ecuación 3.** (a) Módulo complejo, (b) Módulo elástico, (c) Módulo viscoso

$\Phi$ : Ángulo de desfase en radianes (rad).

## 2.5 DETERMINACIÓN ÁNGULO DESFASE

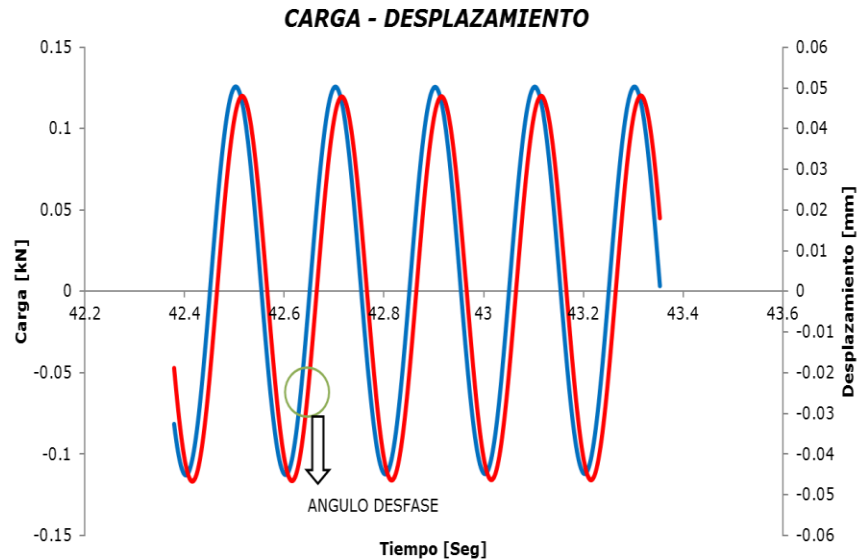
Para calcular el ángulo de desfase (diferencia entre los valores de los ángulos de las funciones de carga y deformación [14]), se empleó una hoja de cálculo<sup>1</sup> que lo determina mediante el ajuste a funciones sinusoidales de los datos de esfuerzo y deformación.

---

<sup>1</sup>Programa pcmrc-vigas [14].

El desfase se puede observar graficando en el tiempo la carga aplicada y el desplazamiento medido (LVDT) como se muestra en la figura 5.

**Figura 5.** Desfase entre señales de carga y desplazamiento



**Fuente:** Registro propio

Adicionalmente, fue necesario realizar una corrección a este valor, con el fin de ajustar el error de lectura que se da entre la señal de los datos registrados en el instante en que ocurre la aplicación de carga y la lectura registrada en el ordenador.

El ajuste se realizó mediante el desarrollo de un ensayo de carga cíclica a una viga de acero, la cual debido a las propiedades elásticas del material debería registrar un ángulo de desfase igual a  $0^\circ$ , sin embargo por el retraso entre la toma de datos de la máquina y la lectura del equipo éste registró un valor de  $2.917^\circ$ , lo que permitió realizar el ajuste a los ángulos obtenidos en los ensayos con las vigas de concreto asfáltico.

### 3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

En el anexo C se presentan los resultados obtenidos de módulo dinámico y complejo para cada viga en los distintos acondicionamientos.

Algunos estudios han propuesto, evaluar el deterioro de la mezcla asfáltica, a través de la evaluación del módulo dinámico, considerando este proporcional a la reducción de la rigidez.

Algunos otros trabajos de Investigación presentan una metodología de estudio a partir del módulo complejo y las propiedades visco-elásticas del material donde el comportamiento del concreto asfáltico muestra valores con tendencias más ajustadas a los cambios que sufre el material al ser afectado por agentes como el agua.

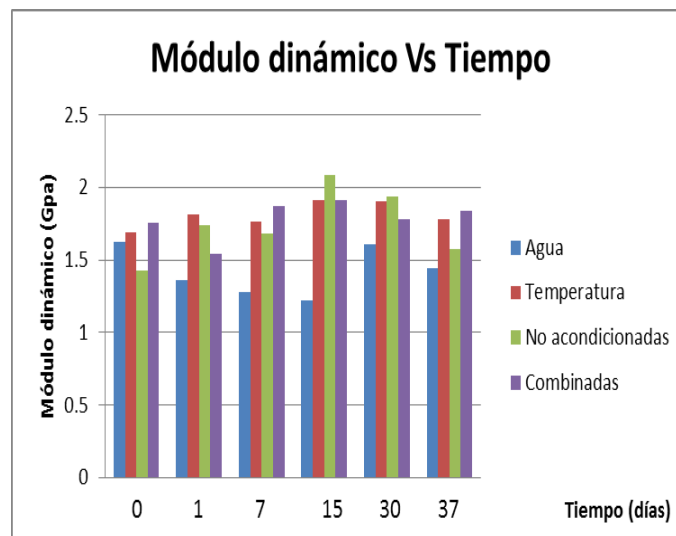
A continuación se presenta el análisis respectivo de los resultados empleando los dos métodos.

### 3.1 EVOLUCIÓN DEL MÓDULO DINÁMICO

El análisis de la rigidez se lleva a cabo evaluando los valores del módulo dinámico para cada efecto a los que fueron sometidas las probetas y comparando la evolución de los mismos a lo largo del tiempo.

En la figura 6 se muestran los valores del módulo dinámico obtenidos en diferentes periodos de tiempo, teniendo en cuenta los distintos acondicionamientos.

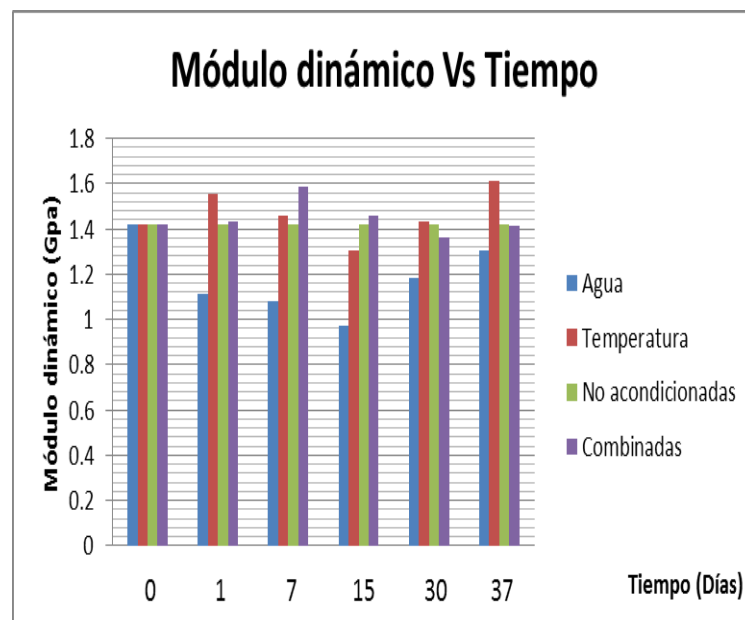
**Figura 6.** Evaluación del módulo dinámico



**Fuente:** Elaboración propia

Para realizar una mejor interpretación de resultados, se lleva a cabo un ajuste en los módulos de todas las probetas, tomando como parámetro los valores de rigidez mostrados por las vigas que no fueron acondicionadas, pues los cambios de la rigidez en este grupo son atribuidos a derivas de la temperatura de ensayo. Bajo las condiciones del laboratorio la rigidez de las vigas no debería verse afectada a lo largo del tiempo, sin embargo, debido a las variaciones de temperatura en los ensayos este comportamiento no se evidenció, por lo que fue necesario realizar el respectivo ajuste. Ver figura 7.

**Figura 7.** Evaluación del módulo dinámico ajustado



**Fuente:** Elaboración propia

Si se hace un análisis con los valores del módulo dinámico ajustados, se observan los siguientes comportamientos:

**3.1.1 Efecto del agua:** De manera general los resultados evidencian que la rigidez del material disminuye a lo largo del tiempo, sin embargo este comportamiento no es constante pues algunos valores presentan incrementos ocasionales, lo que indicaría que no hay deterioro sino aumento en la calidad del material.

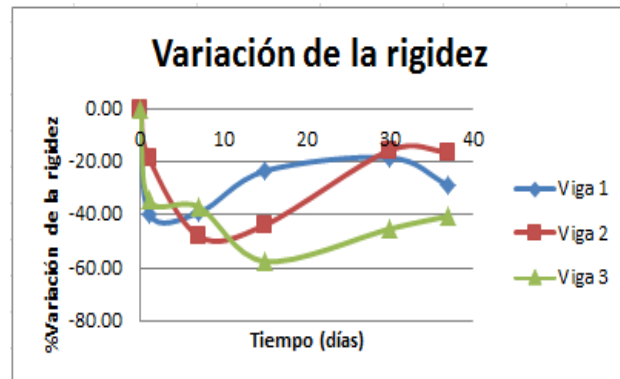
**3.1.2 Efecto de la temperatura:** En estas vigas se observa un aumento general de la rigidez y aunque su comportamiento en todos los casos no presenta

incrementos progresivos, se puede evidenciar que tras este acondicionamiento el material se endureció y la rigidez se ve afectada por este fenómeno.

**3.1.3 Efecto de combinación de temperatura y agua:** En general, las vigas sometidas al efecto combinado muestran variaciones en el comportamiento de la rigidez, ya que para el efecto de la temperatura la rigidez aumenta (aunque no siempre con una tendencia de incremento a lo largo del proceso) y al sumergirlas en el agua ésta disminuye con respecto al valor inicial del módulo.

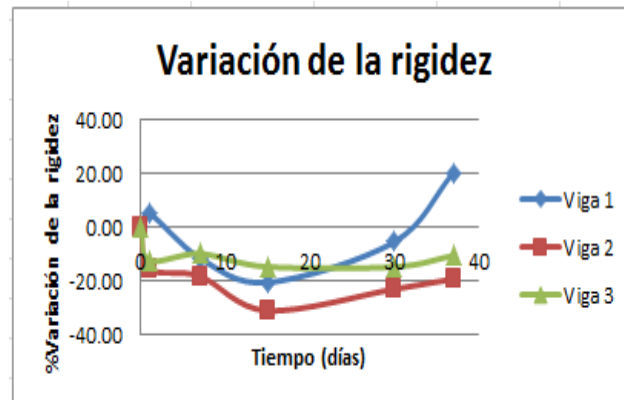
En las figuras 8, 9 y 10 se muestra la variación de la rigidez en las vigas según el efecto del agua, la temperatura y combinado (temperatura y agua) respectivamente.

**Figura 8.** Variación de la rigidez por efecto del agua



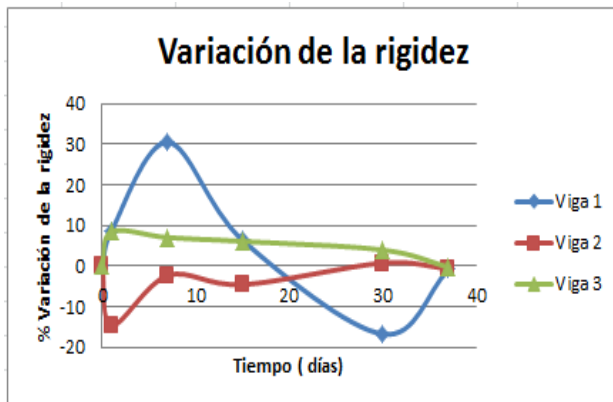
**Fuente:** Elaboración propia

**Figura 9.** Variación de la rigidez por efecto de la temperatura



**Fuente:** Elaboración propia

**Figura 10.** Variación de la rigidez por efecto de combinación (Temperatura y Agua)



**Fuente:** Elaboración propia

Esta variación se calculó tomando el valor de la rigidez inicial como cero y calculando a partir de éste el porcentaje de variación en la rigidez para los siguientes días.

En general, al valorar la evolución de la rigidez no se puede observar claramente los efectos sobre el material, pues los valores obtenidos tras algunos acondicionamientos en ocasiones no muestran una tendencia definida. Lo anterior sugiere que para la caracterización de la sensibilidad al agua de materiales como el concreto asfáltico, no se debe utilizar el módulo de rigidez, si los acondicionamientos incluyen temperaturas elevadas, porque se presentan comportamientos dependientes del efecto del agua y otros que son contrarios por el efecto de la temperatura.

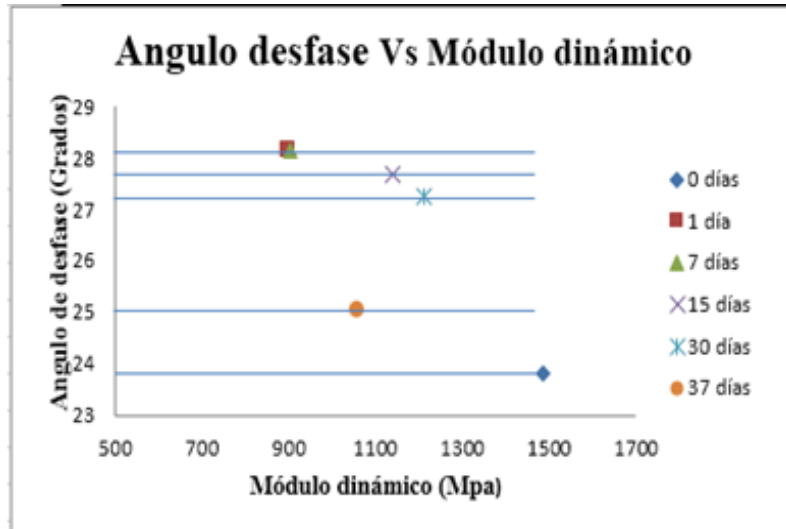
### 3.2 EVOLUCIÓN DEL MÓDULO COMPLEJO

Algunos estudios han propuesto la evaluación del material mediante el análisis de resultados, en el plano complejo. Se empleó el diagrama de Black teniendo en cuenta el efecto de cada uno de los agentes que intervienen en los acondicionamientos de las vigas.

**3.2.1 Efecto del agua:** Cuando se evalúa el deterioro por efecto del agua mediante el modulo complejo se espera que para condiciones de ensayo iguales (carga y temperatura) el módulo de rigidez disminuya [2].

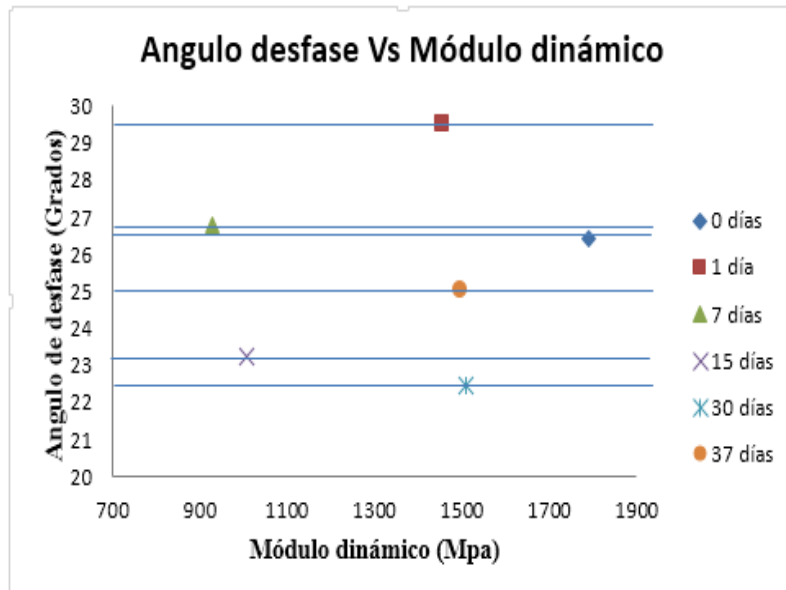
En las figuras 11,12 y 13 se presenta el comportamiento de los datos para las vigas sometidas al efecto del agua.

**Figura 11.** Espacio de Black viga 1 Efecto del agua



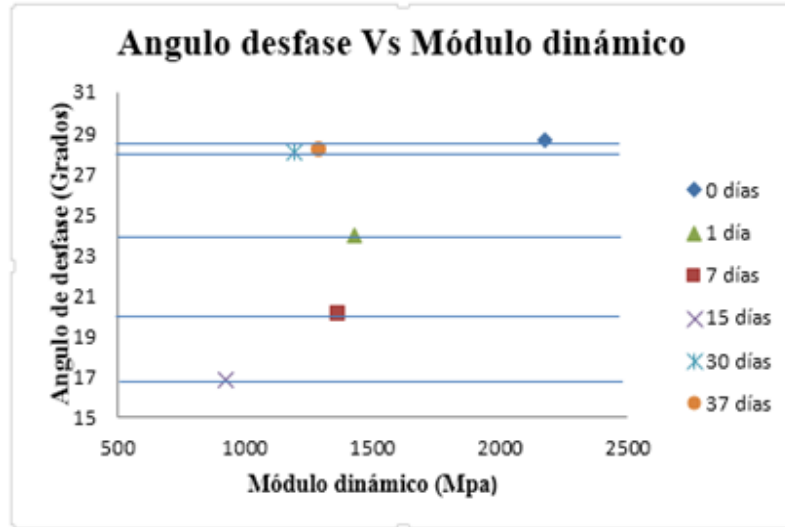
**Fuente:** Elaboración propia

**Figura 12.** Espacio de Black viga 2 Efecto del agua



**Fuente:** Elaboración propia

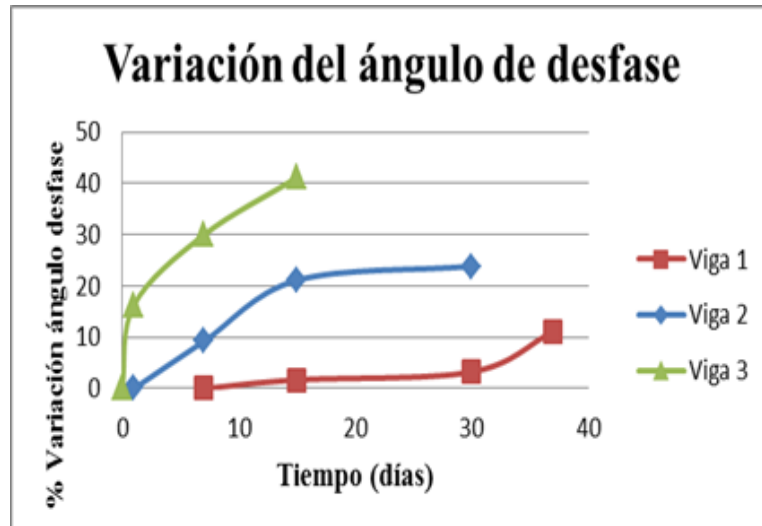
**Figura 13.** Espacio de Black viga 3 Efecto del agua



**Fuente:** Elaboración propia

A continuación en la figura 14 se presenta la variación del ángulo de desfase en función del tiempo, tomando como base el valor del ángulo en el día cero y calculando la variación a partir de éste.

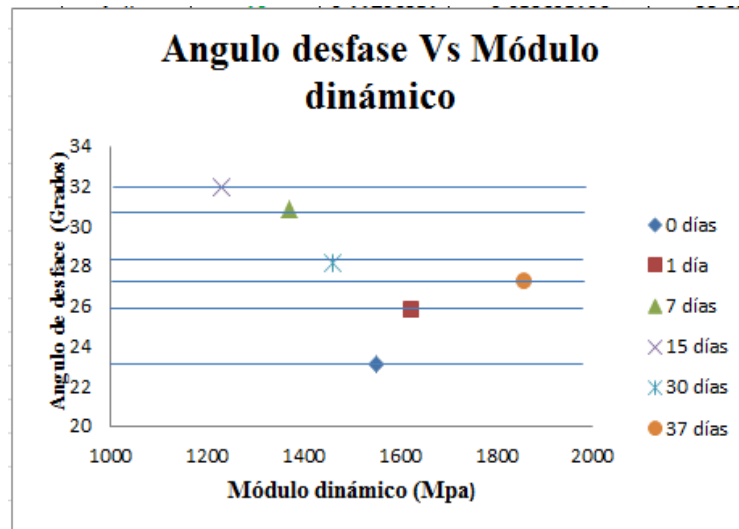
**Figura 14.** Resultados variación ángulo de desfase efecto del agua



**Fuente:** Elaboración propia

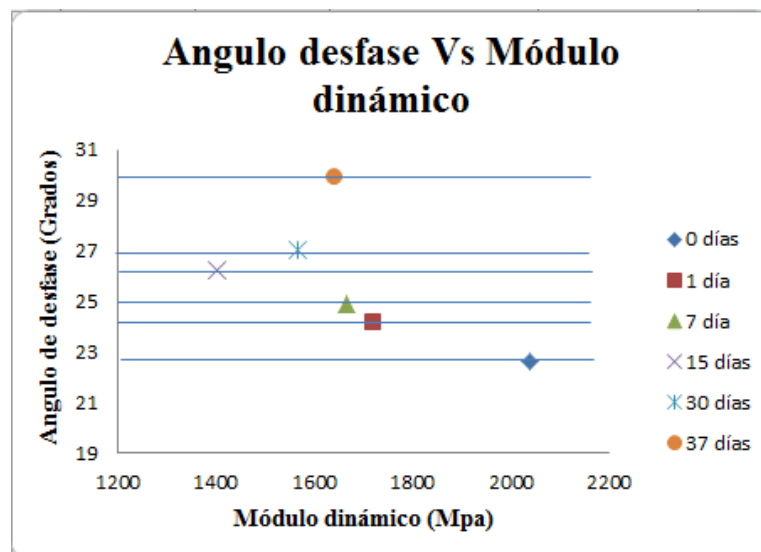
**3.2.2 Efecto de la temperatura:** En el diagrama de Black (figuras 15, 16 y 17), se muestran los resultados obtenidos a lo largo del tiempo.

**Figura 15.** Espacio de Black viga 1 Efecto de la temperatura



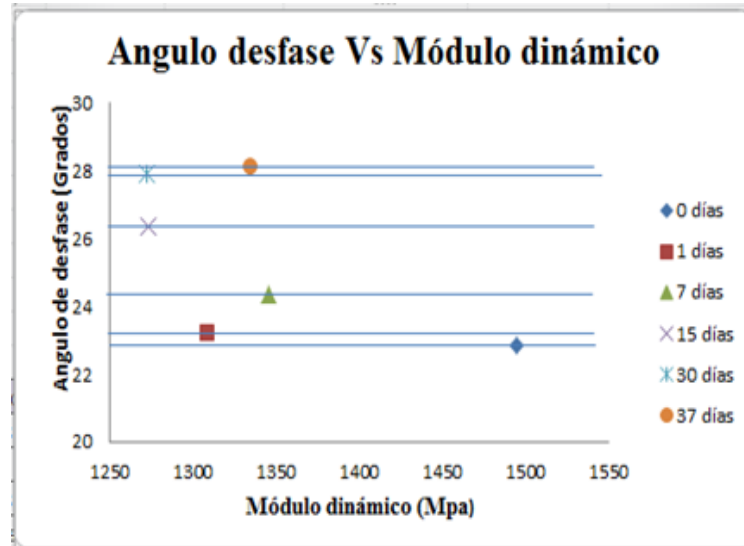
**Fuente:** Elaboración propia

**Figura 16.** Espacio de Black Viga 2 Efecto de la temperatura



**Fuente:** Elaboración propia

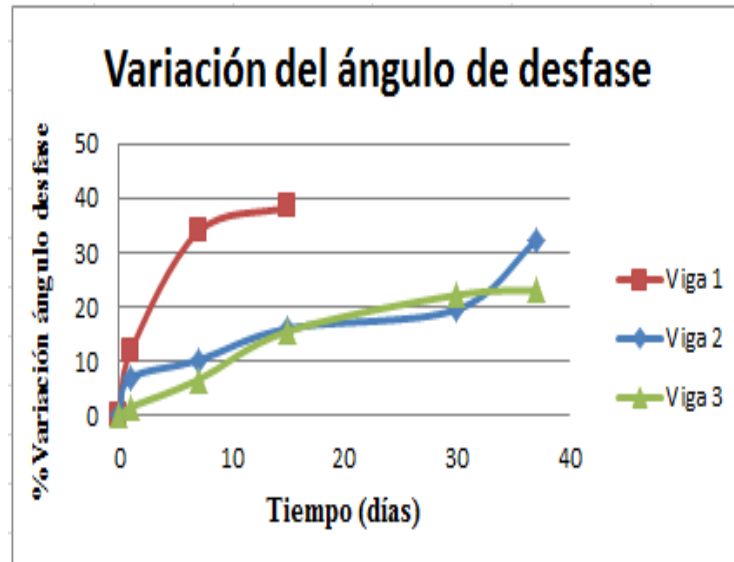
**Figura 17.** Espacio de Black viga 3 Efecto de la temperatura



**Fuente:** Elaboración propia

El porcentaje de variación del ángulo de desfase del material se observa en la figura 18.

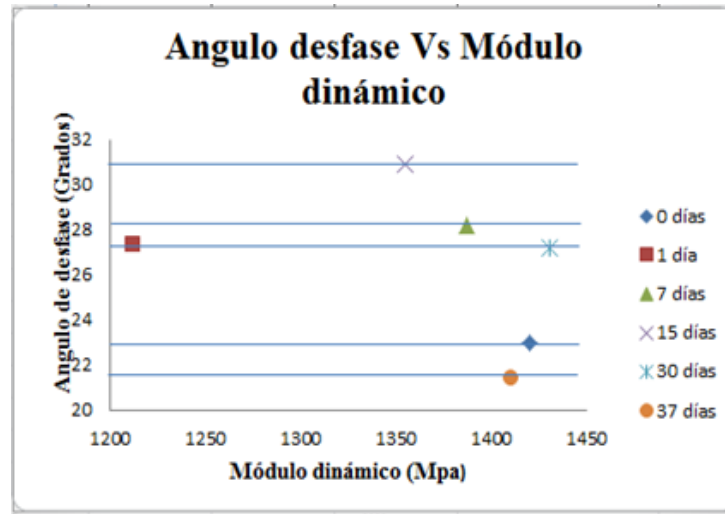
**Figura 18.** Resultados variación ángulo de desfase efecto de la temperatura



**Fuente:** Elaboración propia

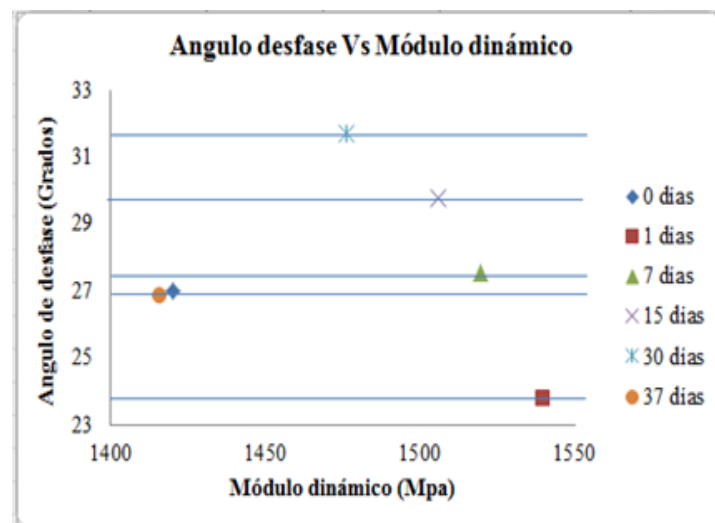
**3.2.3. Efecto de combinación de temperatura y agua:** Los resultados se muestran en el diagrama de Black. (Figuras 19,20 y 21.)

**Figura 19.** Espacio de Black Viga 1 Efecto de combinación de temperatura y agua



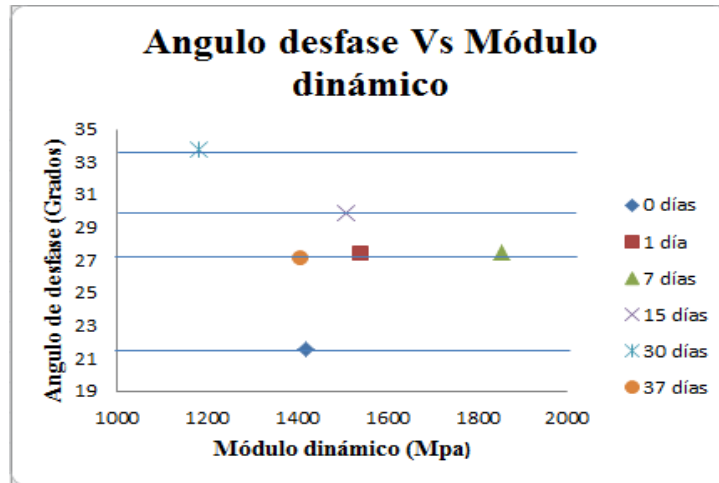
**Fuente:** Elaboración propia

**Figura 20.** Espacio de Black Viga 2 Efecto de combinación de temperatura y agua



**Fuente:** Elaboración propia

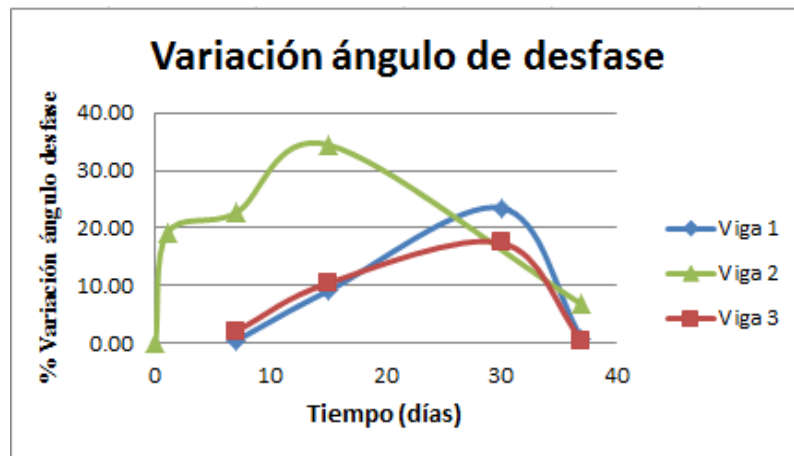
**Figura 21.** Espacio de Black Viga 3 Efecto de combinación de temperatura y agua



**Fuente:** Elaboración propia

En la figura 22 se muestra el porcentaje de variación de ángulo de desfase.

**Figura 22.** Resultados variación ángulo de desfase efecto de combinación de temperatura y agua



**Fuente:** Elaboración propia

La evaluación en el plano complejo, al igual que la evolución de la rigidez, muestra tendencias contrarias cuando se comparan las probetas sumergidas en agua con la tendencia de las probetas acondicionadas en temperatura. Es decir, no parece haber una contribución clara de la evaluación en el plano complejo para determinar el deterioro del material.

#### 4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Debido al efecto del agua los resultados de los ensayos indican reducción en la rigidez de las vigas después de un periodo largo de acondicionamiento, sin embargo, en periodos cortos de inmersión, se evidencian aumentos ocasionales en el valor de la misma, los cuales no pueden atribuirse al incremento de la capacidad mecánica de los materiales sino al envejecimiento del asfalto.

Los estudios realizados sugieren que la evolución de la rigidez no es un parámetro que permita evaluar, eficientemente, el deterioro de los materiales bituminosos.

Se recomienda continuar los estudios, evaluando la posibilidad de emplear la evolución el plano Cole-Cole, con ensayos donde la rigidez y los ángulos de desfase se midan a bajas temperaturas y elevadas frecuencias de ensayo.

## BIBLIOGRAFÍA

- Caro, S. García, C. Caicedo, B. Modelo numérico para analizar el efecto del clima en pavimentos. Revista de Ingeniería – Universidad de los Andes. Vol 15, fasc 1, 2002, pp 4-9. [4]
- Fernández, W. Rondón, Q. Reyes, F. Envejecimiento de asfaltos y mezclas asfálticas: Estado del conocimiento. Ingeniería e Investigación - Universidad Nacional de Colombia. Vol 33, fasc 1, 2013, pp 5-12. [3]
- H. Di Benedetto, M. Stiffness testing for bituminous mixtures. RILEM TC 182-PEB. 2001. [7]
- Lopera, C. Diseño y producción de mezclas asfálticas tibias a partir de la mezcla de asfalto y aceite crudo de palma [Tesis de Maestría]. Medellín: Universidad Nacional de Colombia, 2011. [1]
- Muñoz, H. Manual del acero DIACO para construcciones sismo resistentes. Aceros DIACO – Gerdau [13]
- Naranjo, F. Rueda, A. Implementación de un ensayo para medir el módulo de rigidez complejo en mezclas asfálticas [Tesis de pregrado]. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander, 2011. [14]
- Norma AASHTO T 321-03. Standard method of test for determining the fatigue life of compacted Hot-mix asphalt (HMA) subjected to repeated flexural bending. AASHTO. USA [11]
- Norma I.N.V. 450-07. Especificaciones Generales para mezclas asfálticas en caliente (Concreto asfáltico y mezcla de alto módulo). Instituto Nacional de Vías - INVIAS. Colombia [8]
- Norma I.N.V.E 725-07. Evaluación de la susceptibilidad al agua de las mezclas asfálticas compactadas utilizando la prueba de tracción indirecta. Instituto Nacional de Vías - INVIAS. Colombia [10]

- Norma I.N.V.E 736-07. Porcentaje de vacíos de aire en mezclas asfálticas compactadas densas y abiertas. Instituto Nacional de Vías - INVIAS. Colombia [9]
- Norma I.N.V.E 754-07. Módulo dinámico de mezclas asfálticas. Instituto Nacional de Vías - INVIAS. Colombia [12]
- Pérez, V. Evaluación del efecto del agua en vigas de concreto asfáltico bajo condiciones inducidas de humedad [Tesis de Maestría]. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander, 2012. [2]
- Ridgeway, H. Infiltration of water through the pavement surface. Transportation Research Record. Vol 616, 1976, pp 98-100. [5]
- Rondón, H. Moreno, L. Influencia del agua en el fenómeno de stripping en mezclas asfálticas: estudio sobre el ligante. Ingeniería y Universidad-Pontificia Universidad Javeriana. Vol 14, fasc 2, 2010, pp 297-312. [6]

## Anexo A. Granulometría y principales características de la mezcla.

	CONTROL DIARIO DE CALIDAD MEZCLA ASFALTICA EN CALIENTE	TECNO CP - 01																																																																																	
		REVISION 6																																																																																	
OBRA: PLANTA DE PRODUCCION FUENTE DE MATERIALES: AGREGADOS PETREOS / CEMENTO ASFALTICO : PESCADERO / BARRANCABERMEJA FECHA TOMA DE MUESTRAS: AGOSTO 30 DE 2018		TIPO DE MEZCLA ASFALTICA EN CALIENTE: MDC-2 MUESTRA No: 1 TEMPERATURA TOMA DE MUESTRA: 148 oC TEMPERATURA DE COMPACTACION LABORATORIO: 135 oC FECHA DE ENSAYOS: AGOSTO 2018																																																																																	
<b>ANALISIS GRANULOMETRICO</b> NORMA: I.N.V. E -123 y E -782		<b>EXTRACCION CUANTITATIVA DEL ASFALTO</b> NORMA: I.N.V. E -732																																																																																	
PESO INICIAL 3061,2 gr INDICE DE PLASTICIDAD (IP) = N.P		<table border="1"> <tr><td>Peso inicial de la muestra (gr)</td><td>1517,7</td></tr> <tr><td>Peso final, lavada y seca (gr)</td><td>1438,6</td></tr> <tr><td>Peso del asfalto (gr)</td><td>79,1</td></tr> <tr><td>CONTENIDO DE ASFALTO (%)</td><td>5,21</td></tr> </table>	Peso inicial de la muestra (gr)	1517,7	Peso final, lavada y seca (gr)	1438,6	Peso del asfalto (gr)	79,1	CONTENIDO DE ASFALTO (%)	5,21																																																																									
Peso inicial de la muestra (gr)	1517,7																																																																																		
Peso final, lavada y seca (gr)	1438,6																																																																																		
Peso del asfalto (gr)	79,1																																																																																		
CONTENIDO DE ASFALTO (%)	5,21																																																																																		
<table border="1"> <thead> <tr> <th rowspan="2">No</th> <th rowspan="2">TAMIZ ABERTURA (mm)</th> <th rowspan="2">PESO RETENIDO (gr)</th> <th colspan="2">PORCENTAJE (%)</th> <th colspan="2">ESPECIFICACION INV</th> </tr> <tr> <th>RETENIDO</th> <th>PASA</th> <th></th> <th></th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>1"</td><td>25</td><td></td><td>0,00</td><td>100,00</td><td>100</td><td>100</td></tr> <tr><td>3/4"</td><td>19</td><td></td><td>0,00</td><td>100,00</td><td>100</td><td>100</td></tr> <tr><td>1/2"</td><td>12,5</td><td>441,3</td><td>14,46</td><td>85,54</td><td>80</td><td>95</td></tr> <tr><td>3/8"</td><td>9,5</td><td>459,3</td><td>15,05</td><td>70,48</td><td>70</td><td>88</td></tr> <tr><td>No4</td><td>4,75</td><td>625,3</td><td>20,49</td><td>49,99</td><td>49</td><td>65</td></tr> <tr><td>No10</td><td>2</td><td>446,2</td><td>14,69</td><td>35,30</td><td>29</td><td>45</td></tr> <tr><td>No 40</td><td>0,425</td><td>582,9</td><td>19,10</td><td>16,20</td><td>14</td><td>25</td></tr> <tr><td>No 80</td><td>0,18</td><td>201,3</td><td>6,60</td><td>9,60</td><td>8</td><td>17</td></tr> <tr><td>No 200</td><td>0,075</td><td>138,2</td><td>4,53</td><td>5,07</td><td>4</td><td>8</td></tr> <tr><td>Pasa No 200</td><td></td><td>164,7</td><td>5,07</td><td></td><td></td><td></td></tr> </tbody> </table>		No	TAMIZ ABERTURA (mm)	PESO RETENIDO (gr)	PORCENTAJE (%)		ESPECIFICACION INV		RETENIDO	PASA			1"	25		0,00	100,00	100	100	3/4"	19		0,00	100,00	100	100	1/2"	12,5	441,3	14,46	85,54	80	95	3/8"	9,5	459,3	15,05	70,48	70	88	No4	4,75	625,3	20,49	49,99	49	65	No10	2	446,2	14,69	35,30	29	45	No 40	0,425	582,9	19,10	16,20	14	25	No 80	0,18	201,3	6,60	9,60	8	17	No 200	0,075	138,2	4,53	5,07	4	8	Pasa No 200		164,7	5,07				<b>GRAVEDAD ESPECIFICA MAXIMA TEORICA (Gmm)</b> NORMA: I.N.V. E -735
No	TAMIZ ABERTURA (mm)				PESO RETENIDO (gr)	PORCENTAJE (%)		ESPECIFICACION INV																																																																											
		RETENIDO	PASA																																																																																
1"	25		0,00	100,00	100	100																																																																													
3/4"	19		0,00	100,00	100	100																																																																													
1/2"	12,5	441,3	14,46	85,54	80	95																																																																													
3/8"	9,5	459,3	15,05	70,48	70	88																																																																													
No4	4,75	625,3	20,49	49,99	49	65																																																																													
No10	2	446,2	14,69	35,30	29	45																																																																													
No 40	0,425	582,9	19,10	16,20	14	25																																																																													
No 80	0,18	201,3	6,60	9,60	8	17																																																																													
No 200	0,075	138,2	4,53	5,07	4	8																																																																													
Pasa No 200		164,7	5,07																																																																																
		<table border="1"> <tr><td>Masa de la muestra (gr)</td><td>1200,00</td></tr> <tr><td>Masa del agua desplazada (gr)</td><td>709,00</td></tr> <tr><td>Gmm</td><td>2,4440</td></tr> </table>	Masa de la muestra (gr)	1200,00	Masa del agua desplazada (gr)	709,00	Gmm	2,4440																																																																											
Masa de la muestra (gr)	1200,00																																																																																		
Masa del agua desplazada (gr)	709,00																																																																																		
Gmm	2,4440																																																																																		
		<b>DENSIDAD DE MEZCLAS ASFALTICAS COMPACTADAS</b> NORMA: I.N.V. E -733																																																																																	
		<table border="1"> <thead> <tr><th>Probeta No</th><th>1</th><th>2</th><th>3</th></tr> </thead> <tbody> <tr><td>Espesor (cm)</td><td>6,28</td><td>6,37</td><td></td></tr> <tr><td>Peso en el aire (gr)</td><td>1203,10</td><td>1205,80</td><td></td></tr> <tr><td>Peso en el agua (gr)</td><td>689,50</td><td>691,10</td><td></td></tr> <tr><td>Peso S.S.S. (gr)</td><td>1204,70</td><td>1207,50</td><td></td></tr> <tr><td>Volumen (cm3)</td><td>515,2</td><td>516,4</td><td></td></tr> <tr><td>Densidad Bulk (gr/cm3)</td><td>2,335</td><td>2,335</td><td></td></tr> <tr><td>Densidad promedio</td><td colspan="2">2,335</td><td></td></tr> </tbody> </table>	Probeta No	1	2	3	Espesor (cm)	6,28	6,37		Peso en el aire (gr)	1203,10	1205,80		Peso en el agua (gr)	689,50	691,10		Peso S.S.S. (gr)	1204,70	1207,50		Volumen (cm3)	515,2	516,4		Densidad Bulk (gr/cm3)	2,335	2,335		Densidad promedio	2,335																																																			
Probeta No	1	2	3																																																																																
Espesor (cm)	6,28	6,37																																																																																	
Peso en el aire (gr)	1203,10	1205,80																																																																																	
Peso en el agua (gr)	689,50	691,10																																																																																	
Peso S.S.S. (gr)	1204,70	1207,50																																																																																	
Volumen (cm3)	515,2	516,4																																																																																	
Densidad Bulk (gr/cm3)	2,335	2,335																																																																																	
Densidad promedio	2,335																																																																																		
		<b>RESISTENCIA DE MEZCLAS ASFALTICAS, METODO MARSHALL</b> NORMA: I.N.V. E -748																																																																																	
		<table border="1"> <thead> <tr><th>Probeta No</th><th>1</th><th>2</th><th>3</th></tr> </thead> <tbody> <tr><td>Lectura dial de carga</td><td>350</td><td>320</td><td></td></tr> <tr><td>Estab. Medida (KgF)</td><td>1298</td><td>1168</td><td></td></tr> <tr><td>Factor de correccion</td><td>1</td><td>1</td><td></td></tr> <tr><td>Estab. corregida (KgF)</td><td>1322,9</td><td>1182,2</td><td></td></tr> <tr><td>Estab. Promedio</td><td colspan="2">1263</td><td></td></tr> <tr><td>Flujo (mm)</td><td>3,18</td><td>2,54</td><td></td></tr> <tr><td>Flujo promedio</td><td colspan="2">2,86</td><td></td></tr> </tbody> </table>	Probeta No	1	2	3	Lectura dial de carga	350	320		Estab. Medida (KgF)	1298	1168		Factor de correccion	1	1		Estab. corregida (KgF)	1322,9	1182,2		Estab. Promedio	1263			Flujo (mm)	3,18	2,54		Flujo promedio	2,86																																																			
Probeta No	1	2	3																																																																																
Lectura dial de carga	350	320																																																																																	
Estab. Medida (KgF)	1298	1168																																																																																	
Factor de correccion	1	1																																																																																	
Estab. corregida (KgF)	1322,9	1182,2																																																																																	
Estab. Promedio	1263																																																																																		
Flujo (mm)	3,18	2,54																																																																																	
Flujo promedio	2,86																																																																																		
		<b>VACIOS DE AIRE EN MEZCLAS ASFALTICAS COMPACTADAS</b> NORMA: I.N.V. E -736																																																																																	
		<table border="1"> <thead> <tr><th>Probeta No</th><th>1</th><th>2</th><th>3</th></tr> </thead> <tbody> <tr><td>% de vacios de aire</td><td>4,45</td><td>4,46</td><td></td></tr> <tr><td>% de vacios promedio</td><td colspan="2">4,46</td><td></td></tr> </tbody> </table>	Probeta No	1	2	3	% de vacios de aire	4,45	4,46		% de vacios promedio	4,46																																																																							
Probeta No	1	2	3																																																																																
% de vacios de aire	4,45	4,46																																																																																	
% de vacios promedio	4,46																																																																																		
<b>GRANULOMETRÍA</b> 																																																																																			
REALIZO Y APROBO : LABORATORISTA PLANTA DE PRODUCCION																																																																																			

Fuente: TECNOPAVIMENTOS S.A

## Anexo B. Porcentaje de vacíos en las vigas.

Acondicionamiento	VIGA	PESO SECO EN EL AIRE (A) (g)	MASA EN EL AGUA C (g)	MASA SATURADA Y SUPERFICIE SECA B (g)	Gravedad bulk	% Vacíos
Agua	1	2571	1435	2574	2.257	7.641
Agua	2	2770	1562	2782	2.270	7.099
Agua	3	2576	1435	2579	2.252	7.866
Temperatura	1	2760	1563	2762	2.302	5.813
Temperatura	2	2680	1517	2686	2.293	6.196
Temperatura	3	2602	1457	2614	2.249	7.982
Combinado (temperatura y agua)	1	2650	1492	2658	2.273	7.008
Combinado (temperatura y agua)	2	2648	1500	2656	2.291	6.274
Combinado (temperatura y agua)	3	2620	1480	2626	2.286	6.456
No acondicionadas	1	2666	1503	2672	2.281	6.687
No acondicionadas	2	2690	1527	2694	2.305	5.685
No acondicionadas	3	2552	1445	2558	2.293	6.182

**Fuente:** Elaboración propia

## Anexo C. Módulos

### Vigas no acondicionadas

Tiempo (días)	Viga	Carga (kN)	Deformación (mm)	Ángulo (grad)	Angulo correg	Ángulo (rad)	E (Mpa)	% Ajuste	Modulo ajustado	E1 (Mpa)	E2 (Mpa)
0	1	0.120	0.053	24.0	21.1	0.4	1781.74	0.00	1420	1325.02	510.62
1	1	0.103	0.047	22.6	19.7	0.3	1703.08	18.21	1420	1336.78	478.98
7	1	0.101	0.048	21.8	18.8	0.3	1644.77	15.26	1420	1343.98	458.39
15	1	0.148	0.050	28.6	25.7	0.4	2328.92	31.78	1420	1279.46	615.93
30	1	0.091	0.039	27.5	24.6	0.4	1813.49	26.45	1420	1291.03	591.30
37	1	0.102	0.048	34.1	31.2	0.5	1647.43	9.63	1420	1214.28	736.15

Tiempo (días)	Viga	Carga (kN)	Deformación (mm)	Ángulo (grad)	Angulo correg	Ángulo (rad)	E (Mpa)	% Ajuste	Modulo ajustado	E1 (Mpa)	E2 (Mpa)
0	2	0.074	0.053	19.9	17.0	0.3	1099.30	0.00	1420	1358.25	414.20
1	2	0.120	0.047	23.0	20.1	0.4	1986.47	18.21	1420	1333.30	488.58
7	2	0.112	0.048	25.7	22.8	0.4	1809.10	15.26	1420	1309.16	550.00
15	2	0.134	0.050	33.0	30.1	0.5	2116.94	31.78	1420	1228.95	711.39
30	2	0.138	0.046	26.7	23.8	0.4	2330.32	26.45	1420	1299.51	572.42
37	2	0.090	0.049	29.1	26.2	0.5	1432.88	9.63	1420	1273.84	627.47

Tiempo (días)	Viga	Carga (kN)	Deformación (mm)	Ángulo (grad)	Angulo correg	Ángulo (rad)	E (Mpa)	% Ajuste	Modulo ajustado	E1 (Mpa)	E2 (Mpa)
0	3	0.093	0.052	26.3	23.4	0.4	1393.21	0.00	1420	1353.62	562.99
1	3	0.093	0.047	21.9	19.0	0.3	1536.14	18.21	1420	1342.98	461.30
7	3	0.097	0.048	25.5	22.6	0.4	1589.82	15.26	1420	1311.24	545.01
15	3	0.120	0.051	29.5	26.6	0.5	1819.30	31.78	1420	1270.19	634.84
30	3	0.088	0.041	30.3	27.4	0.5	1667.29	26.45	1420	1260.55	653.77
37	3	0.103	0.049	33.8	30.9	0.5	1649.55	9.63	1420	1219.01	728.29

### Efecto del agua

Tiempo (días)	Viga	Carga (kN)	Deformación (mm)	Ángulo (grad)	Angulo correg	Ángulo (rad)	E (Mpa)	% Ajuste	Módulo corregido	E1 (Mpa)	E2 (Mpa)
0	1	0.10	0.05	26.7	23.8	0.4	1485.90	0.00	1485.90	1359.51	599.70
1	1	0.06	0.05	31.1	28.2	0.5	1097.81	18.21	897.93	791.70	423.67
7	1	0.07	0.05	31.1	28.2	0.5	1066.73	15.26	904.00	797.04	426.53
15	1	0.10	0.05	30.6	27.7	0.5	1667.05	31.78	1137.31	1007.19	528.25
30	1	0.09	0.04	30.2	27.2	0.5	1647.07	26.45	1211.47	1077.13	554.50
37	11	0.07	0.05	27.9	25.0	0.4	1171.53	9.63	1058.68	959.34	447.74

Tiempo (días)	Viga	Carga (kN)	Deformación (mm)	Ángulo (grad)	Angulo correg	Ángulo (rad)	E (Mpa)	% Ajuste	Módulo corregido	E1 (Mpa)	E2 (Mpa)
0	2	0.147	0.053	29.3	26.4	0.5	2174.11	0.00	1789.21	1602.31	796.16
1	2	0.112	0.050	32.4	29.5	0.5	1742.52	18.21	1456.57	1267.97	716.83
7	2	0.101	0.049	29.7	26.8	0.5	1616.36	15.26	930.14	830.45	418.94
15	2	0.085	0.049	26.2	23.3	0.4	1355.00	31.78	1006.25	924.47	397.36
30	2	0.093	0.045	25.4	22.5	0.4	1617.71	26.45	1508.15	1393.78	576.10
37	2	0.090	0.049	28.0	25.0	0.4	1431.16	9.63	1495.96	1355.42	633.02

Tiempo (días)	Viga	Carga (kN)	Deformación (mm)	Ángulo (grad)	Angulo correg	Ángulo (rad)	E (Gpa)	% Ajuste	Módulo corregido	E1 (Gpa)	E2 (Gpa)
0	3	0.076	0.049	31.6	28.7	0.5	1217.30	0.00	2174.11	1907.30	1043.52
1	3	0.075	0.047	26.9	24.0	0.4	1233.11	18.21	1425.26	1301.97	579.87
7	3	0.070	0.048	23.0	20.1	0.4	1144.46	15.26	1369.78	1286.44	470.51
15	3	0.085	0.053	19.8	16.9	0.3	1255.69	31.78	924.42	884.53	268.61
30	3	0.100	0.050	31.0	28.1	0.5	1553.53	26.45	1189.87	1049.91	559.90
37	3	0.095	0.043	31.0	28.1	0.5	1721.65	9.63	1293.30	1140.75	609.36

## Efecto de la temperatura

Tiempo (días)	Viga	Carga (kN)	Deformación (mm)	Ángulo (grad)	Angulo correg	Ángulo (rad)	E (Mpa)	% Ajuste	Módulo corregido	E1 (Mpa)	E2 (Mpa)
0	1	0.096	0.048	26.0	23.1	0.4	1549.08	0.00	1549.08	1425.30	606.79
1	1	0.117	0.053	28.7	25.8	0.4	1735.11	18.21	1625.38	1463.70	706.70
7	1	0.101	0.049	33.8	30.9	0.5	1616.62	15.26	1370.00	1176.10	702.63
15	1	0.115	0.050	34.8	31.9	0.6	1802.18	31.78	1229.49	1043.84	649.66
30	1	0.102	0.040	31.1	28.2	0.5	1987.18	26.45	1461.63	1288.75	689.57
37	1	0.125	0.048	30.1	27.2	0.5	2056.02	9.63	1857.97	1652.17	849.94

Tiempo (días)	Viga	Carga (kN)	Deformación (mm)	Ángulo (grad)	Angulo correg	Ángulo (rad)	E (Mpa)	% Ajuste	Módulo corregido	E1 (Mpa)	E2 (Mpa)
0	2	0.138	0.053	25.5	22.6	0.4	2036.95	0.00	2036.95	1880.27	783.41
1	2	0.125	0.046	27.1	24.2	0.4	2100.00	18.21	1721.13	1915.65	860.40
7	2	0.118	0.047	27.8	24.9	0.4	1960.00	15.26	1663.55	1777.50	825.88
15	2	0.133	0.051	29.2	26.3	0.5	20160.00	31.78	1403.44	18080.80	8916.86
30	2	0.126	0.046	30.0	27.0	0.5	2130.00	26.45	1566.27	1897.25	968.16
37	2	0.114	0.049	32.8	29.9	0.5	1820.00	9.63	1641.72	1578.10	906.64

Tiempo (días)	Viga	Carga (kN)	Deformación (mm)	Ángulo (grad)	Angulo correg	Ángulo (rad)	E (Mpa)	% Ajuste	Módulo corregido	E1 (Mpa)	E2 (Mpa)
0	3	0.101	0.053	25.7	22.8	0.4	1494.65	0.00	1494.65	1377.68	579.66
1	3	0.096	0.047	26.1	23.2	0.4	1600.33	18.21	1308.96	1203.31	515.19
7	3	0.105	0.047	27.2	24.3	0.4	1730.30	15.26	1345.73	1226.31	554.22
15	3	0.118	0.049	29.3	26.4	0.5	1865.75	31.78	1272.86	1140.43	565.32
30	3	0.098	0.048	30.8	27.9	0.5	1587.99	26.45	1272.69	1124.97	595.14
37	3	0.093	0.049	31.0	28.1	0.5	1476.99	9.63	1334.71	1177.59	628.30

## Efecto de combinación (Temperatura y agua)

Tiempo (días)	Viga	Carga (kN)	Deformación (mm)	Ángulo (grad)	Angulo correg	Ángulo (rad)	E (Mpa)	% Ajuste	Módulo ajustado	E1 (Mpa)	E2 (Mpa)
0	1	0.121	0.053	24.4	21.5	0.4	1792.65	0.00	1420.00	1292.73	587.58
1	1	0.081	0.050	30.3	27.4	0.5	1263.63	18.21	1543.65	1370.96	709.45
7	1	0.134	0.048	30.4	27.5	0.5	2186.08	15.26	1852.59	1643.43	855.11
15	1	0.117	0.048	32.8	29.9	0.5	1913.93	31.78	1510.00	1309.63	751.64
30	1	0.098	0.049	36.7	33.8	0.6	1573.18	26.45	1181.46	981.89	657.07
37	1	0.127	0.051	30.1	27.1	0.5	1953.39	9.63	1407.17	1252.26	641.84

Tiempo (días)	Viga	Carga (kN)	Deformación (mm)	Ángulo (grad)	Angulo correg	Ángulo (rad)	E (Mpa)	% Ajuste	Módulo ajustado	E1 (Mpa)	E2 (Mpa)
0	2	0.118	0.051	25.9	23.0	0.4	1820.12	0.00	1420.00	1307.18	554.68
1	2	0.102	0.054	30.3	27.4	0.5	1481.49	18.21	1211.75	1076.14	557.01
7	2	0.101	0.048	31.1	28.2	0.5	1636.19	15.26	1386.58	1221.98	655.27
15	2	0.108	0.047	33.8	30.9	0.5	1775.41	31.78	1354.89	1162.42	696.05
30	2	0.105	0.044	30.1	27.2	0.5	1855.43	26.45	1430.21	1272.17	653.52
37	2	0.102	0.049	24.4	21.4	0.4	1614.55	9.63	1410.30	1312.75	515.41

Tiempo (días)	Viga	Carga (kN)	Deformación (mm)	Ángulo (grad)	Angulo correg	Ángulo (rad)	E (Mpa)	% Ajuste	Módulo ajustado	E1 (Mpa)	E2 (Mpa)
0	3	0.101	0.048	29.9	27.0	0.5	1655.54	0.00	1420.00	1265.58	643.98
1	3	0.105	0.044	26.7	23.8	0.4	1882.85	18.21	1540.04	1409.58	620.35
7	3	0.120	0.052	30.5	27.5	0.5	1792.96	15.26	1519.43	1347.29	702.49
15	3	0.133	0.051	32.7	29.8	0.5	2053.22	31.78	1505.84	1306.95	747.95
30	3	0.117	0.048	34.6	31.7	0.6	1915.57	26.45	1476.14	1256.36	774.95
37	3	0.115	0.046	29.8	26.8	0.5	1961.23	9.63	1416.06	1263.58	639.22

Fuente: Elaboración propia