

Universidad Autónoma de Querétaro  
Facultad de Ingeniería  
Maestría en Ingeniería de Vías Terrestres y Movilidad

**Análisis del mecanismo de fractura por tensión estática en pavimentos flexibles**

Opción de titulación  
**Tesis**

Que como parte de los requisitos para obtener el Grado de  
Maestría en Ingeniería de Vías Terrestres y Movilidad

**Presenta:**

Ing. Juan Francisco Pérez Landeros

Dirigido por:

Dra. María de la Luz Pérez Rea

Dra. María de la Luz Pérez Rea  
Presidente

  
Firma

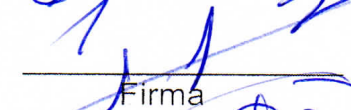
Dr. Pedro Limón Covarrubias  
Secretario

  
Firma

Dr. Omar Chávez Alegria  
Vocal

  
Firma

Dr. Saúl Antonio Obregón Biosca  
Suplente

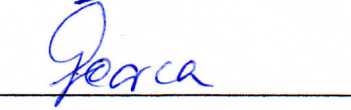
  
Firma

M. I. Alejandro Castellanos Cordero  
Suplente

  
Firma



Dr. Manuel Toledano Ayala  
Director de la Facultad

  
Firma

Dr. Ma. Guadalupe Flavia Loarca Piña  
Directora de Investigación y Posgrado

Centro Universitario  
Querétaro, Qro.  
Septiembre 2018

## RESUMEN

Existen diversos tipos de ensayos enfocados al estudio del agrietamiento de una mezcla asfáltica, los cuales miden la energía de fractura, muchos de éstos muy complejos, otros con poca repetitividad y otros tantos que no generan un estado de tensión apropiado. La dificultad para realizar ensayos de tensión directa en este tipo de materiales ha representado el principal obstáculo para analizar correctamente el problema.

En este trabajo, se presenta un modelo de elemento finito para simular el comportamiento mecánico de una probeta de concreto asfáltico sometida a tensión directa en un ensayo realizado en una máquina universal, llamado "8TD". El propósito de la modelación fue determinar las condiciones adecuadas de ensayo para lograr la mejor interpretación de los resultados. Para la calibración del modelo se prepararon probetas de concreto asfáltico elaboradas con asfalto convencional que fueron sometidas a estados de tensión directa, bajo diferentes condiciones de prueba variando la velocidad de deformación, la temperatura del espécimen y el tamaño de la ranura para inducir la falla.

Se considera además que el modelo de comportamiento mecánico del concreto asfáltico en la probeta puede cambiar de elástico a viscoelástico de acuerdo a la temperatura en el momento del ensayo. El análisis de resultados de los ensayos realizados permitió determinar el valor del máximo esfuerzo cortante que lleva a la falla a las probetas el cual es comparado con el máximo esfuerzo cortante determinado en los modelos. Mediante la interpretación de los resultados de la modelación y la calibración, se determinaron las condiciones más adecuadas para que el ensayo sea representativo y los valores obtenidos de resistencia al esfuerzo cortante en el momento de la falla sean más confiables.

**PALABRAS CLAVE: Pavimento, Asfalto, Tensión, Fractura, Agrietamiento.**

## **SUMMARY.**

There are several types of tests focused on the study of the cracking of an asphalt mixture, which are in the fracture energy, many of the very complex complexes, others with repetitiveness and others that do not generate an appropriate tension state. The difficulty to carry out the tests of direct tension in this type of materials has been the main obstacle to analyze correctly the problem.

In this paper, a finite element model is presented to simulate the mechanical behavior of an asphalt concrete test tube subjected to direct stress in a test performed on a universal machine, called "8TD". The purpose of the modeling was to determine the appropriate testing conditions to achieve the best interpretation of the results. For the calibration of the model, asphalt concrete specimens prepared with conventional asphalt were prepared that were subjected to direct voltage states, under different test conditions varying the deformation speed, the temperature of the specimen and the size of the groove to induce the failure.

It is also considered that the model of mechanical behavior of asphalt concrete in the specimen can change from elastic to viscoelastic according to the temperature at the time of testing. The analysis of the results of the tests carried out allowed to determine the value of the maximum shear stress that leads to the failure of the test pieces, which is compared with the maximum shear stress determined in the models. By interpreting the results of the modeling and calibration, the most appropriate conditions were determined so that the assay is representative and the values obtained of resistance to shear at the time of failure are more reliable.

**KEYWORDS: Pavement, Asphalt, Tension, Fracture, Cracking.**

Para mis padres, Juan Francisco Pérez Sotelo y Julia Landeros Rodriguez; por siempre ser mis mejores consejeros y estar ahí para motivarme a ser una mejor persona.

## **AGRADECIMIENTOS**

A través de estas líneas quiero expresar mi sincero agradecimiento al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) y a la universidad Autónoma de Querétaro por su apoyo para el desarrollo y fortalecimiento de los conocimientos adquiridos para llevar a cabo esta investigación.

A su vez, a la Dra. María de la Luz Pérez Rea y al Dr. Pedro Limón Covarrubias por la confianza, tiempo y conocimientos brindados para cumplir con todos los objetivos establecidos en este trabajo; así como al Dr. Saúl Antonio Obregón Biosca por sus consejos y acertadas observaciones a lo largo de el trayecto de esta maestría; al Dr. Omar Chávez Alegría por siempre estar atento a los detalles que hicieron de esta investigación tener la mejor calidad, al M. en Ing. Alejandro Castellanos Cordero por sus observaciones prácticas y puntuales, que le dieron otro enfoque a esta investigación.

A mis compañeros de la generación de la Maestría en Vías Terrestres y Movilidad; porque de alguna forma todos aportaron su conocimiento en algún momento; además de que conocí a un grupo de personas extraordinarias.

# TABLA DE CONTENIDOS

	Pág.
<b>1 Introducción</b> .....	1
1.1 Descripción del problema .....	2
1.2 Justificación.....	3
1.3 Hipótesis .....	4
1.4 Objetivo .....	4
<b>2 Estado del arte</b> .....	5
2.1 Materiales asfálticos .....	5
2.1.1 Cemento Asfáltico .....	5
2.1.2 Emulsión Asfáltica.....	5
2.2 Materiales Pétreos.....	6
2.3 Propiedades que propician la fractura en un pavimento flexible .....	6
2.3.1 Granulometría .....	6
2.3.2 Contenido de vacíos .....	7
2.3.3 Temperatura.....	8
2.3.4 Consideraciones de tránsito .....	9
2.3.5 Módulo de rigidez.....	10
2.4 Modos de propagación de la fractura.....	11
2.5 Estudios realizados para evaluar la fractura en pavimentos flexibles .....	14
2.5.1 Flexión Simple.....	14
2.5.2 Flexión Apoyada .....	15
2.5.3 Axial Directo .....	16
2.5.4 Ensayo diametral .....	16
2.5.5 Semi-Circular Bending Test (SCB) .....	17
2.5.6 Ensayo de Tracción directa (BTD) .....	18
2.6 Ley de Hooke.....	19
2.7 Viscoelasticidad.....	21
2.7.1 Modelo viscoelástico de Maxwell.....	22
2.8 Concepto de Esfuerzo-Deformación .....	24
2.9 Modelo de elemento finito .....	27
2.10 Consideraciones del modelo de elemento finito .....	29

<b>3</b>	<b>Metodología</b> .....	31
3.1	Desarrollo del sistema de sujeción y elaboración de probetas.....	33
3.2	Sistema de modelación .....	38
<b>4</b>	<b>Resultados</b> .....	42
4.1	Caracterización de los agregados.....	42
4.2	Diseño de la mezcla .....	45
4.3	Ensayo de tensión directa .....	46
4.4	Modelación .....	51
<b>5</b>	<b>Conclusiones</b> .....	61
<b>6</b>	<b>Referencias</b> .....	64
<b>7</b>	<b>Anexos.</b> .....	73
7.1	Gráficas de Esfuerzo-Deformación de la prueba de tensión directa. ....	73
7.2	Curva de viscosidad.....	79
7.3	Evaluación del asfalto .....	80

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura	Pág.
2.1 Efecto del contenido de vacíos en la energía de fractura en mezclas asfálticas .....	8
2.2 Efecto del módulo de rigidez y el envejecimiento en la superficie de una mezcla asfáltica. ....	10
2.3. Modos de propagación de la fractura. ....	11
2.4. Categorías generales de la mecánica de fractura en cuerpos agrietados. ....	13
2.5. Comportamiento de un material elástico sometido a esfuerzos de tensión. ....	20
2.6 Representación esquemática del modelo de Maxwell.....	23
2.7 Comportamiento de la parte elástica (a) y viscosa (b) del modelo de Maxwell.....	24
2.8. Definición de esfuerzo modificado.....	25
2.9. Descomposición de una fuerza en componentes normal y paralela al plano de aplicación. ....	26
3.1. Diagrama de flujo del proceso de investigación.....	31
3.2. Geometría de la probeta antes, durante y después del corte (Vista plana).....	33
3.3. Vista en 3D de las probetas de concreto asfáltico .....	34
3.4. Placas de acero (Corte transversal, longitudinal y vista plana) y vista en 3D.....	35
3.5. Bases para anclar placas metálicas (Vista plana y transversal) y vista en 3D.....	36
3.6. a) Ilustración de la forma de sujeción de la probeta a las placas metálicas, b) Ilustración de la perspectiva lateral del dispositivo de sujeción para la probeta .....	37
3.7. Prensa “GCTS” con cámara ambiental. ....	38
3.8. Geometría del modelo SOLID-185.....	39
3.9. Representación de los grados de libertad y aplicación de la dirección de la carga.....	40
3.10. Representación del esfuerzo principal primero en la simulación de la prueba de tensión directa. ....	41
4.1. Curva granulométrica del agregado pétreo. ....	44
4.2. Granulometría para el diseño de la mezcla asfáltica.....	45
4.3. Elaboración, corte y ranuración de las probetas de concreto asfáltico. ....	46
4.4. Montaje de las probetas en el sistema de evaluación a tensión directa. ....	46
4.5. Prueba de tensión directa. ....	47
4.6 a) Comportamiento de la prueba de tensión con ranura de 2 cm, temperatura de 10°C y distintas velocidades de aplicación, b) Comportamiento de la prueba de tensión con ranura de 2 cm, temperatura de 20°C y distintas velocidades de aplicación y c) Comportamiento de la prueba de tensión con ranura de 2 cm, temperatura de 30°C y distintas velocidades de aplicación.....	48
4.7 a) Comportamiento de la prueba de tensión con ranura de 3 cm, temperatura de 10°C y distintas velocidades de aplicación, b) Comportamiento de la prueba de tensión con ranura de 3 cm, temperatura de 20°C y distintas velocidades de aplicación y c) Comportamiento de la prueba de tensión con ranura de 3 cm, temperatura de 30°C y distintas velocidades de aplicación.....	49
4.8. Proceso de dibujo tridimensional. a) Elaboración de nodos. b) Mallado del elemento para lograr que la figura se convierta en un sólido. ....	51
4.9. Ilustración de la distribución de grados de libertad y el sentido en el que se aplicará la fuerza para simular la acción de la prensa. ....	52
4.10. a) Comportamiento de la probeta bajo condiciones de esfuerzo normal, b) Comportamiento de la probeta bajo condiciones de esfuerzo cortante; c) Figura representativa del esfuerzo cortante, resultado del proceso de simulación. ....	53



4.11 Comparativa entre los resultados de la prueba de laboratorio y la simulación.....	54
4.12. Comportamiento de la pruebas bajo condiciones ideales del ensayo (Temperatura 20°C, Ranura 2cm, Velocidad de 1 mm/min).....	55
4.13 Comparativa de los planos de falla, a) Probeta física, b) Probeta simulada.....	58
4.14. Comparativa entre la prueba de laboratorio y la simulación para el espécimen No.78. ....	59
4.15. Comparativa entre la prueba de laboratorio y la simulación para el espécimen No.87. ....	59
4.16. Comparativa entre la prueba de laboratorio y la simulación para el espécimen No.81. ....	60
7.1.Condiciones de 10°C, Ranura de 2cm y Velocidad de 0.5mm/min. ....	73
7.2. Condiciones de 10°C, Ranura de 2cm y Velocidad de 1 mm/min. ....	73
7.3. Condiciones de 10°C, Ranura de 2cm y Velocidad de 2 mm/min. ....	73
7.4. Condiciones de 20°C, Ranura de 2cm y Velocidad de 0.5 mm/min. ....	74
7.5. Condiciones de 20°C, Ranura de 2cm y Velocidad de 1 mm/min. ....	74
7.6. Condiciones de 20°C, Ranura de 2cm y Velocidad de 2 mm/min. ....	74
7.7. Condiciones de 30°C, Ranura de 2cm y Velocidad de 0.5 mm/min. ....	75
7.8. Condiciones de 30°C, Ranura de 2cm y Velocidad de 1 mm/min. ....	75
7.9. Condiciones de 30°C, Ranura de 2cm y Velocidad de 2 mm/min. ....	75
7.10. Condiciones de 10°C, Ranura de 3cm y Velocidad de 0.5 mm/min. ....	76
7.11. Condiciones de 10°C, Ranura de 3cm y Velocidad de 1 mm/min. ....	76
7.12. Condiciones de 10°C, Ranura de 3cm y Velocidad de 2 mm/min. ....	76
7.13. Condiciones de 20°C, Ranura de 3cm y Velocidad de 0.5 mm/min. ....	77
7.14. Condiciones de 20°C, Ranura de 3cm y Velocidad de 1 mm/min. ....	77
7.15. Condiciones de 20°C, Ranura de 3cm y Velocidad de 2 mm/min. ....	77
7.16. Condiciones de 30°C, Ranura de 3cm y Velocidad de 0.5 mm/min. ....	78
7.17. Condiciones de 30°C, Ranura de 3cm y Velocidad de 1 mm/min. ....	78
7.18. Condiciones de 30°C, Ranura de 3cm y Velocidad de 2 mm/min. ....	78
7.19. Curva de viscosidad Brookfield .....	79

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla	Pág.
3.1. Ensayes a realizar para lograr la caracterización del material.....	32
3.2. Variables consideradas en el ensaye “8TD” .....	33
4.1. Resultados de la caracterización de agregado grueso .....	42
4.2. Resultados de la caracterización de agregado fino .....	43
4.3. Granulometría del agregado pétreo .....	43
4.4. Resultado del diseño de la mezcla asfáltica. ....	45
4.5. Propiedades mecánicas de los especímenes con ranura de 2 cm, a distintas velocidades de aplicación y temperatura. ....	56
4.6. Propiedades mecánicas de los especímenes con ranura de 3 cm, a distintas velocidades de aplicación y temperatura. ....	57
4.7. Propiedades mecánicas de los especímenes con condiciones ideales.....	57
7.1. Análisis del asfalto original (Viscosidad Brookfield) .....	79
7.2. Análisis al asfalto original .....	80
7.3. Análisis del residuo de la prueba de envejecimiento a presión .....	80
7.4. Determinación de índice de tráfico (RTFO) .....	80
7.5. Análisis del residuo de la prueba de la película delgada (RTFO) .....	80

## ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación	Pág.
Ec. 1 Ley de Hooke.....	19
Ec. 2 Relación esfuerzo-deformación .....	20
Ec. 3 Modelo general de la viscoelasticidad .....	22
Ec. 4 Elemento elástico del modelo de Maxwell .....	23
Ec. 5 Elemento viscoso del modelo de Maxwell.....	23
Ec. 6 Modelo viscoelástico de Maxwell .....	23
Ec. 7 Concepto de esfuerzo .....	25
Ec. 8 Esfuerzo normal .....	26
Ec. 9 Esfuerzo cizalla .....	26
Ec. 10 Módulo dinámico .....	29
Ec. 11 Relación de Poisson .....	29
Ec. 12 Velocidad de deformación .....	30
Ec. 13 Viscosidad .....	30

# 1 Introducción

Uno de los principales usos que se le dan a los asfaltos, es entre otros, como material aglutinante en la elaboración de carpetas asfálticas para la construcción de pavimentos flexibles. Los materiales empleados para la construcción de carpetas asfálticas son dos; productos asfálticos y materiales pétreos. Dichos materiales deben ser seleccionados de manera adecuada, considerando que serán sometidos a distintas condiciones de tránsito así como condiciones climatológicas que pudieran llegar a afectar sus propiedades mecánicas de manera considerable.

A su vez, el pavimento es un elemento susceptible a los cambios climatológicos; sumado a esto la interacción con las condiciones vehiculares, aceleran su proceso de envejecimiento, lo cual propicia fallas importantes dentro de su estructura; concluyendo mayormente en fracturas. Actualmente existen un gran número de estudios y ensayos realizados para poder analizar dichas condiciones del pavimento; pero en su mayoría no se reflejan correctamente los estados tensión pura.

La insuficiencia de éstos estudios propicia que el correcto diseño y mantenimiento de las vías terrestres se vea comprometido; ya que implica que la calidad del nivel de servicio reduzca o no sea el óptimo, lo cual de una forma indirecta afecta a los usuarios de las redes de transporte al igual que impacta de forma sustancial en los presupuestos destinados a éstos rubros.

## 1.1 Descripción del problema

Actualmente, los tipos de deterioros más usuales en los pavimentos asfálticos mexicanos son el desgranamiento, la deformación y el agrietamiento. Siendo este último el deterioro más agresivo; puesto que está relacionado con la parte estructural de la carpeta asfáltica. Además, de que este tipo de falla se pueden desprender otras como lo son los hundimientos, erosiones, entre otros.

Por tal motivo, se ha puesto énfasis especial en la investigación del agrietamiento de mezclas asfálticas. Uno de los ensayos más utilizado es el análisis de la fatiga, en este ensayo se evalúa el agrietamiento, pero solo desde una perspectiva de falla por repeticiones de carga. Al ser este ensayo demasiado largo, se han utilizado otros que evalúen el comportamiento ante el agrietamiento, pero desde el punto de vista estático y no dinámico; es ahí donde aparece la mecánica de fractura. La energía de fractura se ha utilizado para diferentes tipos de materiales y entre ellos está el concreto y las mezclas asfálticas. Lo que se evalúa en este tipo de método es la energía necesaria para que un material tenga un rompimiento catastrófico, esta energía se obtiene mediante la curva carga-desplazamiento se llama energía de trabajo.

Hoy en día existen varios ensayos que miden la energía de fractura de una mezcla asfáltica, muchos de ellos muy complejos, otros con poca repetitividad y otros que no generan un estado de tensión apropiado por la mecánica de fractura; los cuales no son contabilizados.

Por todo lo anterior es necesario desarrollar una metodología que cumpla con el objetivo de analizar la fractura en el pavimento desde el punto estático y no dinámico. Se propone un ensayo de tensión directa que justificado con un análisis de falla por medio de elemento finito cumpla con la finalidad de la representación de los estados de ruptura.

## 1.2 Justificación

La fractura constituye una causa importante en el deterioro prematuro del pavimento superficial, las condiciones de carga que producen estas fracturas son una combinación de efectos ambientales (el completar un ciclo termal y del envejecimiento material) y efectos mecánicos (carga de la rueda) como nos lo mencionó Wang y Lian (2011).

En los últimos años se ha presentado un avance significativo en el análisis del comportamiento de la fractura en pavimentos, gracias a los progresos en el campo de la mecánica de fractura de los materiales como lo realizan Yin *et al.* (2015), Pirmohammad y Ayatollahi (2015), ha sido posible establecer ciertos patrones de comportamiento ante estas condiciones.

Sin embargo los ensayos estandarizados de fractura para pavimentos todavía no se han desarrollado lo suficiente como para que este aspecto quede totalmente resuelto, aún hay que mejorar las técnicas de los ensayos, lo anterior lo sostiene Hu *et al.* (2016) y además profundiza en la necesidad de ampliar los mecanismos de análisis para las fracturas en mezclas asfálticas; con la finalidad de entenderlos y establecer entonces diseños que se apeguen al comportamiento real de las estructuras de pavimento.

Lo anterior para obtener un sistema que sea sencillo y con parámetros mecánicos que involucren los factores más relevantes en el proceso de la falla de los pavimentos para lograr su correcta interpretación.

### **1.3 Hipótesis**

La fractura en un espécimen de prueba en un ensaye de tensión directa estará vinculada al valor máximo del esfuerzo normal de tensión en el plano de falla bajo condiciones estandarizadas.

### **1.4 Objetivo**

Definir por medio de elemento finito la concentración de esfuerzos normales y definir el plano en el cual están actuando. De esta manera, mediante el modelo de comportamiento mecánico se validará el procedimiento de la prueba de tensión estática directa para evaluar el esfuerzo máximo de agrietamiento en un pavimento flexible.

## **2 Estado del arte**

Los componentes de las mezclas asfálticas pueden ser muy variados, para su construcción los más empleados son el material asfáltico, el cemento asfáltico, la emulsión asfáltica y los agregados pétreos; conocer sus distintas propiedades y entender sus posibles condiciones de aplicación, permite una mejor clasificación de los tipos de mezclas que una carpeta asfáltica puede llegar a contener.

### **2.1 Materiales asfálticos**

El asfalto es un material bituminoso de color negro, constituido principalmente por asfaltenos, resinas y aceites, elementos que proporcionan características de consistencia, aglutinación y ductilidad como se describe en la norma N-CMT-4-05-001/05 de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes. Los materiales asfálticos se clasifican en cemento asfáltico y emulsiones asfálticas.

#### **2.1.1 Cemento Asfáltico**

Los cementos asfálticos son obtenidos del proceso de destilación del petróleo para eliminar solventes volátiles y parte de sus aceites. Gómez y Solano (2016) mencionan que la viscosidad varía con la temperatura y entre sus componentes, las resinas le producen adherencia con los materiales pétreos, siendo excelentes ligantes, pues al ser calentados se licúan, lo cual permite cubrir totalmente las partículas del material pétreo.

#### **2.1.2 Emulsión Asfáltica**

La emulsión asfáltica puede ser clasificada según su tipo de acuerdo con el RTCA. Esta forma de caracterizar la emulsión depende de su velocidad de rompimiento y de su carga electrostática (según el tipo de emulsificante utilizado),



y posteriormente de acuerdo con las propiedades del asfalto residual según Salazar (2013).

## **2.2 Materiales Pétreos**

También conocidos como roca, material granular o agregado mineral, es cualquier material duro e inerte usado en forma de partículas graduadas o fragmentos, como parte de un pavimento. Dichos agregados incluyen arena, grava, piedra triturada y polvo de roca. El agregado constituye entre el 90 o 50% en peso y un volumen del régimen de 75 al 85%, el comportamiento de un pavimento se ve altamente influenciado por la selección apropiada del agregado, debido a que éste es el que proporciona la mayoría de sus características portantes.

## **2.3 Propiedades que propician la fractura en un pavimento flexible**

Si bien las propiedades mecánicas que contienen los materiales que conforman las mezclas asfálticas, pueden llegar a influir en la mejora o disminución de su comportamiento ante los distintos actores que propician la falla de éstas, se debe de considerar que al momento de conformarse una mezcla, todas las propiedades de los materiales se conjuntan en un solo elemento, además de algunas de éstas; entran procesos como la fabricación y colocación de una mezcla asfáltica, al igual que ciertos factores que interactúan en ésta; pueden llegar a ser definitivos en el buen o mal comportamiento ante la falla por fractura.

### **2.3.1 Granulometría**

Elliot *et al.* (1991) revisan el efecto de la variación de la granulometría sobre en los pavimentos asfálticos que son sometidos a tensión, considerando la variación de contenidos de vacíos en un rango de cuatro al siete por ciento; los resultados sugieren que aquellos que se encontraban dentro de un rango normal

de contenido de vacíos tendían a fallar más debido a los procesos de compactación que a la granulometría. En Miró *et al.* (2005) se realizaron estudios para determinar la concentración volumétrica óptima en una mezcla asfáltica mediante la medición de la energía específica de fractura. Para ello Monismith *et al.* (1994) emplean dos tipos de agregados para dicho análisis, exhibiendo la sensibilidad al tipo de agregado que se emplee, puesto que las mezclas que contenían un agregado con alto potencial de adherencia tenían una alta resistencia a la fractura. Mientras que Freeme *et al.* (1973) recomiendan mezclas con agregados denso-graduados para asfaltos de capa espesa y agregados con menor graduación (menos finos) para pavimentos con capas de asfalto más delgadas; alternativamente, las mezclas que contienen una graduación abierta parecen producir una mejor respuesta que las mezclas continuamente graduadas usadas normalmente. A su vez Braham *et al.* (2007) señalan que los áridos graníticos presentan la necesidad de emplear una mayor cantidad de energía de fractura en las mezclas que se emplearon, mejorando sus propiedades.

Por otra parte en Cárdenas y Fonseca (2009) se presentan estudios comparativos entre dos mezclas; la primera con granulometría controlada, la cual presentaba un aspecto homogéneo monofásico, lo que daba como resultado un aumento significativo en los valores de viscosidad, mientras que una granulometría no controlada presenta aspectos heterogéneos multifásicos y valores bajos de viscosidad con respecto a los controlados; lo cual se traduce en procesos de mezclado óptimos, que traerá como resultados procesos de compactación más controlados.

### **2.3.2 Contenido de vacíos**

Ésta propiedad está en función de la granulometría y su grado de compactación de una mezcla asfáltica, puesto que esto influye de forma directa en su velocidad de oxidación, la cual Koh *et al.* (2009) describen como un supuesto de que a mayor contenido de huecos, el agua y el aire oxidan el ligante de la mezcla acelerando su tasa de envejecimiento, incrementando su fragilidad, y por

ende, teniendo una menor resistencia a la fractura; como lo afirma Jajliardo (2003).

De otra forma Velázquez *et al.* (2008) señalan que mientras el número del contenido de vacío que haya en una mezcla asfáltica resultará en una resistencia para el fallo por fractura producido por incrementos térmicos. En Li *et al.* (2008) y Velásquez *et al.* (2008) los resultados de la investigación arrojan una tendencia que las mezclas con menor contenido de vacíos obtienen en promedio mayores energías de fractura en el proceso de fisuración a bajas temperaturas, tal cual se muestra en la figura siguiente.

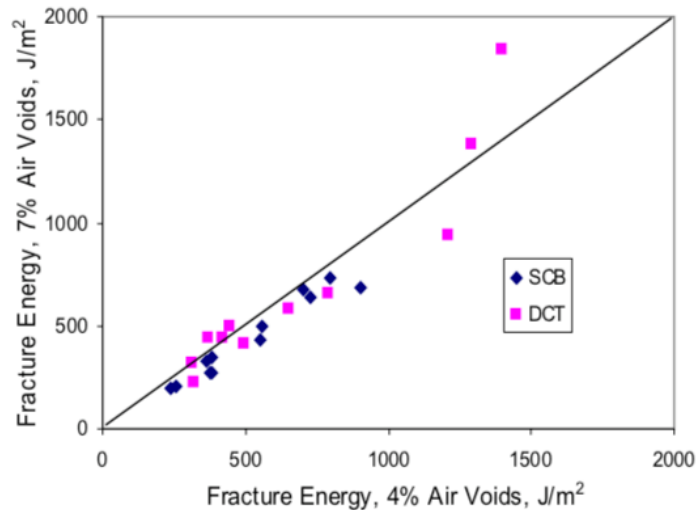


Figura 2.1 Efecto del contenido de vacíos en la energía de fractura en mezclas asfálticas  
Fuente: Li *et al.*, 2008

### 2.3.3 Temperatura

Considerado uno de los agentes ambientales más demandantes en el comportamiento de los pavimentos, puesto que llega a modificar su rigidez, debido a las características termoplásticas del material; como se hace mención en Roberts *et al.* (1996) a medida que aumenta la temperatura, la superficie del pavimento asfáltico se vuelve menos rígida, disminuyendo así sus propiedades de flexión. Sin embargo Pérez *et al.* (2011) describen las estructuras dependiendo su ubicación; puesto que los estados tensionales en las capas base de la mezcla

asfáltica son prácticamente despreciables, modificando considerablemente la rigidez de ésta. Reyes *et al.* (2009) dicen que a bajas temperaturas (0-10 °C) las mezclas asfálticas, presentan cohesiones bajas y a temperaturas altas (40°C) se incrementan sustancialmente, puesto que para dicha investigación el factor que resultó ser determinante fue la presencia de agua, debido a que éste influyó en la resistencia de la unión entre los agregados.

El impacto de las temperaturas en las mezclas asfálticas ha sido estudiado por Zhou *et al.* (2012), Dawson *et al.* (2012), Pan *et al.* (2014) y Chen *et al.* (2015); y han concluido que dicha propiedad puede cambiar el comportamiento de éstas, al añadir un pequeño porcentaje de agregados aislantes según lo comprueban Hall *et al.* (2012) y Feng *et al.* (2013).

Es bien sabido que los perfiles de temperatura tienen un gran impacto en las propiedades de las mezclas, cambiando el comportamiento visco-elástico que usualmente suele presentarse, en estados de tensión y compresión, lo cual trae consigo la propagación o inicio de una fractura, según Wang y Al-Wadi (2013).

#### **2.3.4 Consideraciones de tránsito**

El factor de primera importancia cuando se diseña un pavimento es el tránsito solicitante, debido a que las caracterizaciones del tráfico sobre los pavimentos es bastante compleja, Brown *et al.* (2001) explican que no solo a su variabilidad del tránsito, sino a las interacciones vehículo-pavimento así como sus velocidades de circulación, producen fenómenos adicionales a las propias cargas elásticas que los vehículos producen.

La FHWA (2003) atribuye que las fracturas que se presentan en un pavimento flexible, por lo general son producidas en áreas sujetas a impactos y numerosas cargas repetidas de tráfico, lo cual produce fatiga o pérdida paulatina de las propiedades estructurales, lo cual genera estados de tensiones y deformaciones, que como ya se mencionó, suelen concluir con la fractura.

Otras investigaciones realizadas por García *et al.* (2009), arrojan que las estructuras que están sometidas a tráfico liviano, se comportan mejor cuando se emplean capas intermedias en la estructura del pavimento.

### 2.3.5 Módulo de rigidez

Definido por Padilla (2012) como una propiedad que tiene una relación muy estrecha entre el esfuerzo y la deformación, si bien está en función de la temperatura, tiempo y tipo de carga, debido principalmente a las características viscoelastoplásticas y susceptibilidad térmica del propio material; la rigidez de una mezcla se ve afectada por factores que ya se mencionaron anteriormente, se añaden factores tales como la oxidación del material ligante, lo cual conlleva a un envejecimiento prematuro, lo que trae como resultado el aumento de la rigidez en un material; volviéndolo más frágil y menos resistente a la fractura. Nesnas y Nunn (2004) nos hacen ver los efectos del envejecimiento en una mezcla asfáltica y su relación con su módulo de rigidez, señalando que éste valor podría llegar a ser incluso casi cuatro veces su valor inicial. También menciona las tensiones que pudieran generarse debido al origen térmico y haciéndolas más susceptibles a tener fallos por fractura descendente, como se muestra en la Figura 2.2.

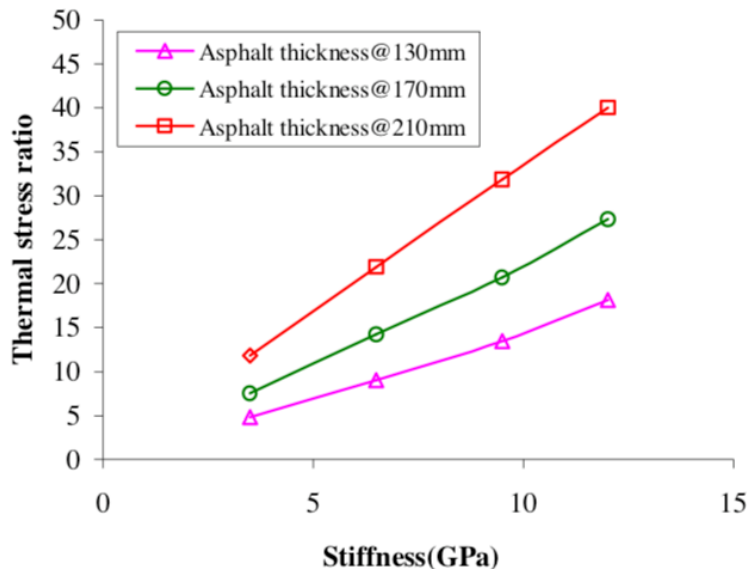


Figura 2.2 Efecto del módulo de rigidez y el envejecimiento en la superficie de una mezcla asfáltica.  
Fuente: Nesnas y Nunn, 2004

## 2.4 Modos de propagación de la fractura

Arana y González (2002) definen a la fractura como la culminación del proceso de deformación plástica, que usualmente se manifiesta con la separación o fragmentación de un cuerpo sólido en dos o más partes bajo el estado de acción de las cargas. Es por ello que lo clasifica en tres modos de fractura (Figura 2.3):

Modo I: La apertura, el cuerpo fisurado se carga con tensiones normales.

Modo II: Deslizamiento o corte plano; el desplazamiento de la superficie de la fisura se encuentra en el plano de ésta y es perpendicular al borde principal.

Modo III: Rasgado, causado por corte fuera del plano; el desplazamiento de las superficies de la fisura se encuentran en el plano y son paralelos al borde principal de ésta.

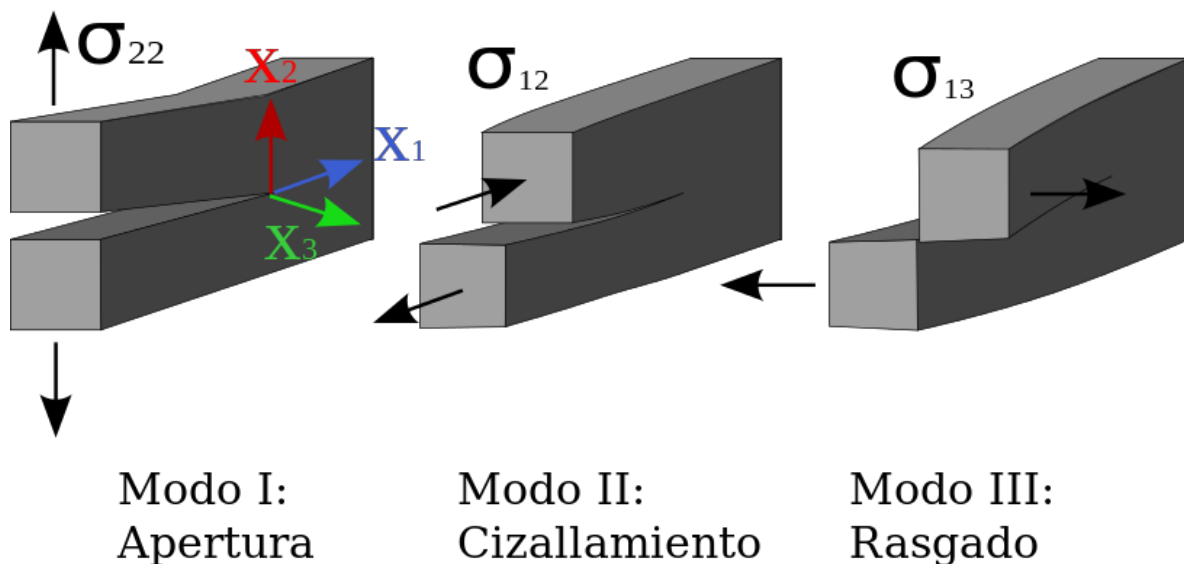


Figura 2.3. Modos de propagación de la fractura.  
Fuente: Arana y González, 2002

A su vez Ying *et al.* (2017) afirman que las fracturas ocurren y se desarrollan bajo condiciones de repeticiones de carga, lo cual ocasiona que las propiedades de los materiales se vean comprometidos, y esto puede resultar en la

iniciación o propagación de las micro fracturas. En Aliha y Sarbijan (2016) se hace referencia a dos tipos de fracturas que se presentan en los pavimentos flexibles, la primera de ellas nombrada “*top-down*” y la segunda “*bottom-up*”, las cuales están relacionadas a los efectos térmicos y de fatiga; pero la propagación de éstas se encuentra vinculada a los aspectos mecánicos del material, el cual cambia cuando se le aplican repeticiones de carga como se comprueba en Dauzats y Rampal (1987), puesto que los niveles de tensión del pavimentos es uno de los parámetros más importantes para la evaluación de la fractura mecánica.

Se han desarrollado distintos parámetros que caracterizan las condiciones de la fractura, para cada una de ellas la mecánica de la fractura las divide en tres principales (Figura 2.4):

1. Mecánica de fractura elástica lineal (LEFM).
2. Mecánica de fractura elasto-plástica (EPFM).
3. Mecánica de fractura dependiente del tiempo (HTTDFM).

La primera de éstas se basa en un análisis de tensiones elásticas en materiales relativamente frágiles, conteniendo fracturas infinitamente agudas, éste tipo de comportamiento se asocia a la fractura frágil, donde la respuesta de carga-deflexión de un cuerpo fisurado muestra esencialmente un comportamiento elástico-lineal hasta el punto donde ocurre la fractura inestable. A su vez existe una zona plástica (fluencia) altamente localizada en el extremo de la fisura, que precede a la fractura frágil, pero su zona de fluencia es pequeña y no afecta el comportamiento total carga-deflexión.

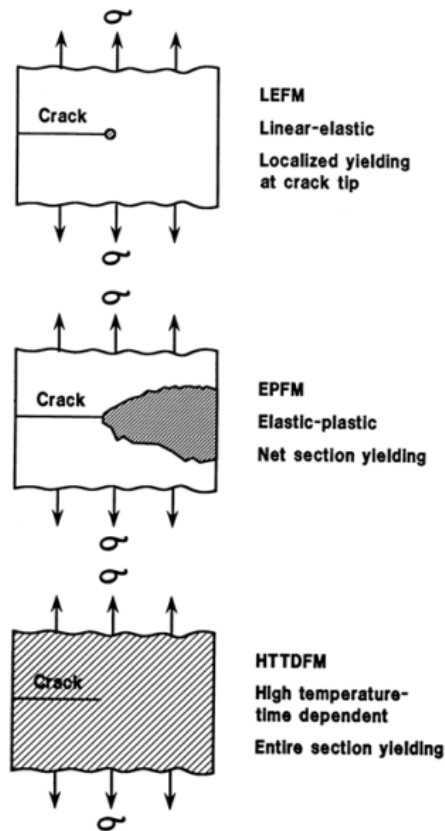


Figura 2.4. Categorías generales de la mecánica de fractura en cuerpos agrietados.  
Fuente: Leon, 2009

La segunda de éstas (EPFM) emplea un parámetro distinto para caracterizar la intensidad de la tensión-deformación en el extremo de la fisura. Dicho parámetro está establecido para definir la intensidad de la tensión y deformación plástica en la región que rodea el extremo de esta zona en el elemento; además es una función de la tensión, deformación, tamaño de la fisura y geometría del cuerpo. Este método se emplea cuando la cantidad de plasticidad o fluencia precede a la fractura, o se encuentra relacionada al evento de la fractura, en otras palabras no se puede despreciar los efectos de la plasticidad en este parámetro. Otra característica es que busca encontrar una relación entre la tensión que se le aplica al elemento, el tamaño de la grieta y la tenacidad del material, que en algunos casos la fractura ocurre después de una deformación plástica significativa.



Para el último parámetro (HTTDFM) esta categoría se aplica a situaciones de comportamiento bajo, donde la sección transversal completa del elemento, previo a y durante los eventos de crecimiento de la fractura, se halla bajo condiciones totalmente plásticas, así mismo se observa que las fisuras crecen de una manera estable debido a la deformación, la cual depende del tiempo que transcurra; bajo ciertas condiciones, la velocidad de crecimiento de la fisura se espera que sea controlada por éste parámetro, el cual es el encargado de regular las tensiones cercanas al extremo de la fisura.

## **2.5 Estudios realizados para evaluar la fractura en pavimentos flexibles**

El pavimento es una estructura cuyo diseño ha sido realizado para un periodo de tiempo determinado, existen diversos factores que pueden acelerar el ciclo de vida del mismo, en este sentido; se han desarrollado una gran cantidad de pruebas que ayudan a determinar la tendencia de comportamiento de un pavimento. Si bien algunos de ellos nos permiten analizar detalladamente los mecanismos y procesos de fracturación, propagación de grietas, deformaciones y posibles discontinuidades, es necesario conocer las utilidades que algunos de éstos nos pueden arrojar.

### **2.5.1 Flexión Simple**

Las pruebas realizadas por Bonnot (1986) arrojan que las magnitudes de deformación y esfuerzo en un pavimento están asociadas directamente con el número de aplicaciones que se le realicen. Para ello se llevaron a cabo pruebas con probetas en forma trapezoidal, las cuales fueron fijados y el extremo más pequeño es sometido a la aplicación de una deformación sinusoidal. Para éstos resultados Kunst (1989) concluye que los especímenes fallarán aproximadamente a media altura donde se aplica la mayor tensión de flexión. Mientras que en

estudios similares Van Dijk (1975) tenían secciones de base de 55 por 20 milímetros y una altura de 250 milímetros, lo cual logró obtener un desplazamiento de esfuerzos más controlado.

En estudios posteriores realizados por Marsac (1992); quien ajustó los mecanismos de análisis; principalmente mejorando las dimensiones de la sección de la probeta, lo cual le permitió lograr dos avances significativos, el primero de ellos fue lograr una medida del módulo más compleja y otro de fatiga. Mientras que Pell y Cooper (1975) llegaron a considerar que una temperatura de 10° C y una velocidad de 1000 RPM, serían las condiciones ideales para poder obtener una deformación controlada y así lograr un módulo de rigidez dinámico mejorado.

Si bien los resultados encontrados por Bonnot (1986) muestran que es una técnica fundamental que puede evaluar de forma clara y básica el diseño de una mezcla, la validación de sus resultados de laboratorio en comparación con los de funcionamiento “in-situ” resultan difíciles de analizar debido a los factores de conversión que se manejan, además de no simular de forma más apegada a la realidad la estructura de un pavimento, puesto que su estado de desfuerzo es esencialmente uni-axial, como lo demostró Marsac (1992). Los resultados de las consideraciones de Kunst (1989) arrojaron que en el ensayo con carga de tres puntos, los especímenes fallarían en donde se inicia una región de esfuerzos relativamente uniformes, puesto que dicha característica ayudaría a emplear el diseño de asfaltos con capas más finas, mientras que Pell *et al.* (1975) revelaron que los costos y tiempos de resultados podrían no ser lo más especializado.

### **2.5.2 Flexión Apoyada**

Las investigaciones realizadas por Majidzadeh *et al.* (1971) para acercarse a las condiciones “in-situ” de esfuerzo y modos de carga; concluyeron en el uso de una esfera de goma, la cual simularía las cargas repetidas en forma circular, para asemejarse a las condiciones a las cuales está sometida la estructura de un pavimento. Dichas condiciones de esfuerzo fueron empleadas por Barksdale y

Miller (1977) para poder evaluar las características de la fractura en un concreto asfáltico, en las cuales empleó equipos de prueba en los cuales las vigas no fueran sometidas a anulaciones de esfuerzos durante las pruebas, puesto que éstas contenían cargas cercanas a los 0.06 segundos, lo cual traería consigo que dicha prueba tuviese un mayor número de repeticiones hasta lograr la fractura.

### **2.5.3 Axial Directo**

Según Raithby (1972) es sus ensayos de laboratorio en el Reino Unido, realizó pruebas uni-axiales sin anulaciones de esfuerzo, lo cual lo llevó a concluir que a partir de periodos de descanso muy cortos (0 a 1 segundo) la fractura aumenta rápidamente puesto que los esfuerzos de deformación son más fáciles de determinar cuándo es medida directamente. Más recientemente Kunst (1989) utilizó cargas con ondas y deformaciones controladas, desafortunadamente, los resultados tan detallados de estas pruebas hoy en día resultan ser extremadamente inaccesibles.

Las principales conclusiones arrojadas del trabajo de Raithby (1972) nos dejan que es posible simular los pulsos de carga que se observan en el campo (compresión-tensión-compresión), los cuales pueden ser empleados para evaluar precisamente a una mezcla, así como sus factores de correlación laboratorio-campo; lo cual conlleva a una mejor recopilación de datos para poder controlar de una forma más adecuada la fractura en los pavimentos flexibles.

### **2.5.4 Ensayo diametral**

La prueba diametral es un ensayo de tracción indirecta conducida por un repetidor de carga sobre un espécimen cilíndrico con una carga compresiva paralela y a lo largo del plano diametral vertical. Kennedy y Anagnos (1983) desarrollaron una configuración de esfuerzos de tensión uniforme y perpendicular a lo largo del espécimen, el cual consideró como un método más eficaz para caracterizar los materiales en términos fundamentales. Mientras que Khosla y

Omer (1985) emplearon cargas de frecuencias variadas (0.05 segundos a 20 repeticiones por minuto), hicieron que las condiciones del ensayo no fuesen las adecuadas, modificando así sus especímenes de prueba por las nuevas medidas cuatro pulgadas de diámetro y dos punto cinco pulgadas, logrando una transmisión de carga a los lados del cilindro mediante tiras más anchas de carga. Para la elaboración de los especímenes se utilizaron criterios internacionales de mezclas asfálticas, como por ejemplo la norma AASHTO TP9 D-94, norma ASTM C496, norma ASTM D4123 y norma ASTM D3497; todo lo anterior para tratar de estandarizar este ensayo.

Una de las principales funciones de este ensayo es poder determinar los desplazamientos verticales y las deformaciones horizontes del diámetro de la probeta, dicha ventaja es que no sólo podía ser aplicado a probetas echas en laboratorio, sino que también a las que fueran extraídas del campo. Dadas las distribuciones teóricas de tensiones, las probetas que contenían características circulares y fuesen sometidas a cargas diametrales, tendían a presentar una mayor cantidad de esfuerzos de tensión en la parte lateral o extremos de la probeta, puesto que se carecía de tensiones tangenciales.

Aun y con los avances que logró Kennedy y Anagnos (1983) este ensayo subestima perceptiblemente si la tensión principal actúa en los planos horizontales o verticales, puesto que aunque es un estado biaxial en el centro del espécimen es imposible variar el cociente de los planos y así extender un punto crítico en donde se encuentre el estado de tensión. Por otra parte, los avances de Khosla y Omer (1985) lograron concluir que las fallas se originan en las regiones de esfuerzo uniformes, pero que dicha región es variable cuando la sección es más pequeña.

### **2.5.5 Semi-Circular Bending Test (SCB)**

Wagoner *et al.* (2005) describen este ensayo para poder medir las propiedades de fractura en mezclas asfálticas, constando de ser flexión apoyada a una viga semicircular, teniendo como mayor ventaja el poder llevarla a cabo y

reduciendo el número de probetas a fabricar, puesto que de cada espécimen se puede preparar uno más. Los resultados obtenidos por este ensayo se calculan mediante el trabajo disipado en el proceso de fractura obteniendo la curva de carga, la cual registra los datos de carga y deflexión.

Saha y Biligiri (2015) hacen resaltar la importancia de las propiedades del asfalto cuando se realiza este tipo de ensaye, puesto que un análisis más profundo acerca de las características de los materiales podrían arrojar que dichos especímenes podrían tener comportamientos elásticos lineales y su distribución de esfuerzo debería de estar lo más cercano posible al límite de la fractura, por lo que realiza la importancia de conocer la tensión máxima antes de la fractura, para así poder determinar las condiciones en las cuales el radio del espécimen sería el óptimo, para que éste no fallara por su forma, sino por sus propiedades mecánicas. Mientras que Saha y Biligiri (2014) relacionan que la fractura se presenta en una zona plástica, la cual es más precisa cuando las propiedades geométricas del espécimen rigen su fractura, puesto que dicha condición podría llegar a propiciar que la energía que se le aplica al espécimen no sea continua y esto presente una desventaja para el procedimiento.

Wang *et al.* (2013) aseveran que las condiciones de temperatura a la cual se expone el espécimen pudiese ser un valor que se debería de calentar, pues que compara las etapas de la propagación de la fractura, concluyendo que la carga contra el desplazamiento vertical coinciden de forma esperada, puesto que se representan de forma efectiva las variables del ensaye.

#### **2.5.6 Ensayo de Tracción directa (BTD)**

Si bien este ensayo está enfocado al análisis de la fatiga en los pavimentos flexibles, el desarrollo de la aplicación del BTD (Barcelona Tracción Directa), se caracteriza por aplicar una combinación de fuerzas, de tal forma que somete a una probeta a un campo de esfuerzos de flexo-tracción, lo cual puede simular los esfuerzos de carga a los que está sometido el pavimento, para lo cual Pérez (2001) hace ver que dicho ensayo tiene como ventaja el poder emplear dos modos

de prueba, un modo estático (simple y corto) y por otro lado una situación dinámica.

Para poder entender el comportamiento del pavimento flexible es necesario comprender su comportamiento mecánico a lo largo de las transiciones que sufre por temperatura y velocidades de aplicación de cargas. Esto significa que dichas variables tienen una relación directa en la respuesta del pavimento, puesto que a temperaturas bajas (inferiores a 10°C), el comportamiento puede ser considerado elástico, por el contrario, a temperaturas altas podemos ver la presencia de una componente viscosa; por lo que se concluye que tiene una rigidez variable. Ahora bien dicho material tiene una característica más; que es cuando las temperaturas y las velocidades de aplicación de carga se encuentran dentro de un rango intermedio, la mezcla asfáltica responde al fenómeno de visco-elasticidad; para ello a continuación se presentan varias teorías las cuales nos ayudarán a entender estos comportamientos.

## 2.6 Ley de Hooke

Dicha ley obedece a un comportamiento elástico el cual es representado por un resorte y se puede definir como la cantidad de estiramiento en un material, el cual es directamente proporcional a la fuerza que se le es aplicada (Ec. 1). La elasticidad es una propiedad que considera este principio, basándose en la cualidad de cambiar de forma cuando actúa una fuerza de deformación sobre un objeto y éste regresa a su forma original cuando cesa la deformación, que por otra parte a los materiales no deformables se les llama inelásticos (Figura 2.5). Si se estira más allá de cierta cantidad, éste ya no regresa a su estado original.

$$\epsilon = \frac{\delta}{L} \quad (\text{Ec. 1})$$

Donde:

$\epsilon$  = Deformación

$L$  = Longitud

$\delta$  = Desplazamiento

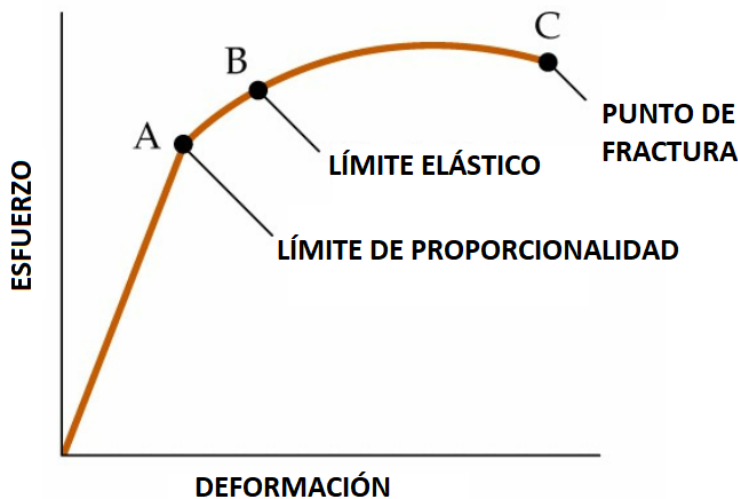


Figura 2.5. Comportamiento de un material elástico sometido a esfuerzos de tensión.  
Fuente: Elaboración propia

De acuerdo con la teoría clásica de la elasticidad se consideran las propiedades mecánicas de los sólidos elásticos en la ley de Hooke, es decir, la deformación conseguida es proporcional al esfuerzo aplicado; por lo que el análisis del modelo considerará dicho principio. Si bien dicho principio se basa en el uso de propiedades como el Módulo Elástico ( $E$ ) y la relación de Poisson ( $\nu$ ) para encontrar la relación esfuerzo-deformación (Ec. 2).

$$\begin{aligned} \varepsilon_x &= \frac{\sigma_x}{E} - \nu \frac{\sigma_y}{E} - \frac{\sigma_z}{E} \\ \varepsilon_y &= \frac{\sigma_y}{E} - \nu \frac{\sigma_z}{E} - \frac{\sigma_x}{E} \\ \varepsilon_z &= \frac{\sigma_z}{E} - \nu \frac{\sigma_x}{E} - \frac{\sigma_y}{E} \\ \gamma_{xy} &= \frac{\tau_{xy}}{G} ; \quad \gamma_{yz} = \frac{\tau_{yz}}{G} ; \quad \gamma_{zx} = \frac{\tau_{zx}}{G} \end{aligned} \quad (\text{Ec. 2})$$

Si bien la Figura 2.5 logra representar todas las etapas de comportamiento mecánico de las mezclas asfálticas, podemos observar que ésta cuenta con tres fases; la primera de ella representa un comportamiento perfectamente elástico, en el que la relación esfuerzo – deformación es lineal. De ahí hasta el límite elástico el material sigue un comportamiento elástico; puesto que existe una relación entre

esfuerzo y deformación, aunque no es lineal y si se retira el esfuerzo se podría recuperar la longitud inicial.

Si se continúa aumentando la carga, por encima del punto elástico, el material presentará rápidas deformaciones, por lo cual no existirá un punto de recuperación; a esto se le conoce como un comportamiento plástico. De igual forma si la aplicación de carga continúa aún por encima del punto del límite elástico, el material llega a un estado de ruptura, en el cual, claramente no habrá una recuperación, incluso se tomaría como una falla estructural, presentándose tres tipos de fallas principales en los materiales:

- a) Falla frágil: Siendo aquellas que se presentan al superar el límite elástico.
- b) Falla Dúctil: Son aquellas que se siguen deformando al superar el límite elástico.
- c) Falla elástica: es considerada como la alteración de las características elásticas tras muchas deformaciones.

## **2.7 Viscoelasticidad**

En cuanto a los materiales viscoelásticos, el comportamiento es un tanto parecido al elástico en el cual la energía aplicada es transformada durante la deformación en energía potencial, de forma que cuando ésta cesa, la deformación puede volver a su estado original, y un componente viscoso, que absorbe la energía aplicada transformándola en calor y haciendo que ésta fluya, es así que para deformaciones muy bajas, casi cercanas al equilibrio existe una relación lineal entre esfuerzo y deformación, encontrándose en una zona denominada como "Viscoelasticidad lineal". Para deformaciones mayores, dicha relación deja de ser lineal y se alcanza un comportamiento de "viscosidad no lineal".

El desarrollo de la viscoelasticidad lineal se basa en el principio de que la respuesta (deformación) a cualquier tiempo es directamente proporcional a su fuerza impulsora (esfuerzo). De tal forma, si la deformación y la velocidad de



deformación son infinitesimales y la relación esfuerzo-deformación, dependiente del tiempo, puede ser descrita como lineal. Dicha relación puede ser descrita por el principio de Maxwell, que se caracteriza por incorporar las tensiones aplicadas a un material y la capacidad que éste tiene para deformarse en cierto tiempo, y además de considerar en elemento de relajación (Ec. 3).

$$\dot{\epsilon}(t) = \frac{\dot{\sigma}(t)}{E} + \frac{\sigma(t)}{\eta} \quad (\text{Ec. 3})$$

En la teoría MLET (*Multi-Layered Elastic Theory*) desarrollada por Ahmed y Erlingsson (2016) consideran la parte visco-elástica de la mezcla asfáltica como uno de los factores principales para el análisis de su comportamiento ya que está relacionado directamente con la respuesta mecánica, pudiendo inclusive modificar el desempeño bajo estados de carga, lo cual afirma Ahmed y Erlingsson (2013).

Por otra parte Li *et al.* (2017) en su desarrollo matemático FWD (*Falling Weight Deflectometer*) parten de un estado dinámico de análisis del pavimento, en el que mencionan dicha propiedad al igual que la temperatura tienen un papel importante en la correcta propagación de cargas en la parte superior de la estructura, refiriéndose a la variación de los esfuerzos normales en relación a los cambios internos de la mezcla asfáltica, que comparado con el resultado de un análisis estático llega a ser no representativo, según Al-Qadi *et al.* (2010) y Xu y Prozzi (2013).

### 2.7.1 Modelo viscoelástico de Maxwell

El modelo de comportamiento viscoelástico de *Maxwell* considera dos partes importantes de un material, la primera es la parte elástica ( $\xi$ ) y la segunda es la parte viscosa ( $\eta$ ); dichos elementos usualmente son representados esquemáticamente por un amortiguador; donde la primera es representada por un resorte, mientras que la segunda por un fluido (Figura 2.6).

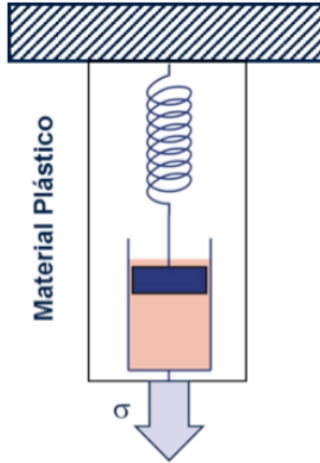


Figura 2.6 Representación esquemática del modelo de Maxwell.  
Fuente: Fombuena *et al.*, 2017

A su vez el modelo de *Maxwell* toma como base el principio de la ley de Hooke, que establece la proporcionalidad entre las tensiones aplicadas y las deformaciones obtenidas (Ec. 4) para la parte elástica del elemento, igualmente forma la parte viscosa esta definido según la ley de *Newton* entre las tensiones aplicadas y la velocidad de variación de la deformación (Ec. 5). Lo anterior de una forma generalizada del modelo de comportamiento de Maxwell está representado por la incorporación de ambas variables, como se expresa en la Ec. 6.

$$\sigma_1 = \xi * \epsilon_1 \quad (\text{Ec. 4})$$

$$\sigma_2 = \eta * \frac{d\epsilon}{dt} \quad (\text{Ec. 5})$$

$$\frac{d\epsilon}{dt} = \frac{1}{\xi} * \frac{d\sigma}{dt} + \frac{1}{\eta} * \sigma \quad (\text{Ec. 6})$$

Bajo un mismo principio el modelo de Maxwell se asegura que la deformación total es la suma de las deformaciones del elemento elástico y el viscoso. Una vez

definido el comportamiento matemático del modelo, puede ser representado gráficamente de la siguiente forma en la Figura 2.7.

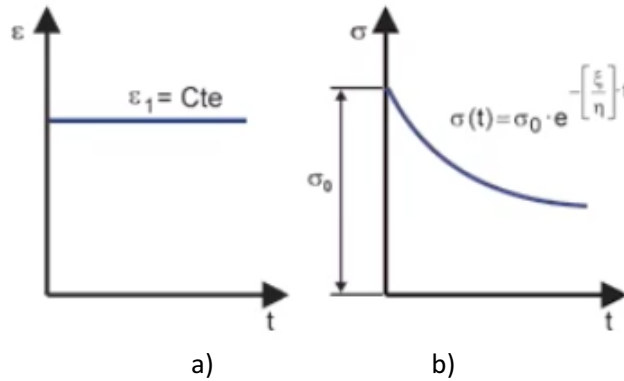


Figura 2.7 Comportamiento de la parte elástica (a) y viscosa (b) del modelo de Maxwell.  
Fuente: Fombuena *et al.*, 2017

## 2.8 Concepto de Esfuerzo-Deformación

El concepto de esfuerzo desde el enfoque de la teoría de la mecánica continua; del cual toma como base su definición, refiriéndose a un material hipotético, puntual, simplificado conceptualmente para el análisis de los esfuerzos y deformaciones en los sólidos, líquidos y gases evadiendo la presencia de brechas y espacios vacíos en una estructura molecular de la materia, según lo respalda Lawrence (1977).

Existen dos tipos de fuerzas que actúan sobre un cuerpo, la primera son fuerzas internas en el cuerpo y la segunda sobre su superficie, siendo posible representar dichas fuerzas como cantidades vectoriales, es decir tensores de primer orden, como se menciona en Dye (2015). Las fuerzas de cuerpo actúan al interior del material sobre cada elemento unitario de volumen o masa, mientras que las fuerzas de superficie actúan sobre unidades de área en los límites exteriores del cuerpo. Estas fuerzas de superficie se expresan como fuerza por unidad de área, como por ejemplo la fuerza por unidad de área infringida a un cuerpo de roca para comprimirlo mencionado en Griffith (1921).

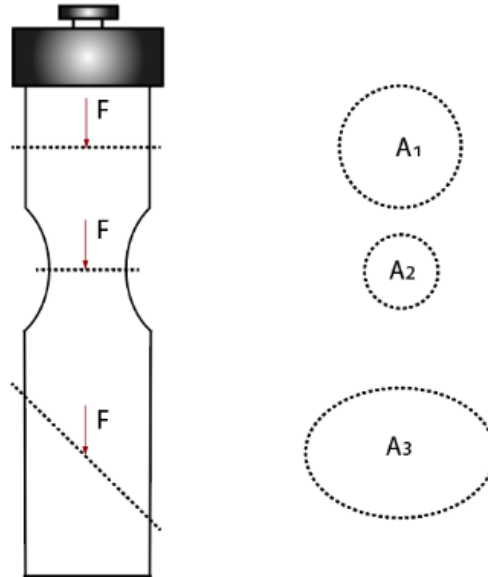


Figura 2.8. Definición de esfuerzo modificado.  
Fuente: Fjaer et al., 2008

En la Figura 2.8 se representa un cuerpo sometido a una fuerza externa ( $F$ ) que se distribuye al interior del cuerpo en planos imaginarios cuyas áreas son distintas una de la otra ( $A_1, A_2, A_3$ ). Definiendo el esfuerzo ( $\sigma$ ) aplicado sobre cada área (Ec. 7).

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (\text{Ec. 7})$$

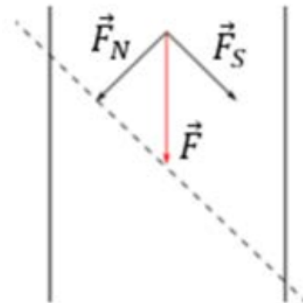
El esfuerzo queda definido como la relación de la fuerza y el área transversal de la cual actúa cierta fuerza. La magnitud del esfuerzo dependerá directamente del área de aplicación de la fuerza y el tipo de esfuerzo de la exposición relativa del momento de área con respecto a la fuerza aplicada.

Considerando dicha expresión (Ec. 4) puede inferirse que el esfuerzo aplicado sobre la sección  $A_2$  de la Figura 2.8 es mayor que el esfuerzo aplicado sobre la sección del  $A_1$ , a pesar de que la fuerza ejercida sobre la columna es la misma en todos sus puntos, claramente despreciando el peso del objeto sobre el cual se esté realizando la aplicación de fuerza. Cuando la dirección de la fuerza

aplicada no es perpendicular al elemento de área (sección  $A_3$ ), es necesario descomponer la fuerza ( $F$ ) en dos componentes mutuamente perpendiculares, una componente normal al plano denominada  $F_N$  que representa los esfuerzos normales (Ec. 8) y una componente paralela al plano denominada  $F_S$  que representa los esfuerzos de cizalla (Ec. 9). Puede inferirse de la Figura 2.9, que dichos esfuerzos de cizalla pueden presentarse en cada uno de los infinitos planos cuya orientación no es perpendicular a la dirección de aplicación de la fuerza.

$$\sigma_N = \frac{F_N}{A} \quad (\text{Ec. 8})$$

$$\sigma_S = \frac{F_S}{A} \quad (\text{Ec. 9})$$



**Figura 2.9. Descomposición de una fuerza en componentes normal y paralela al plano de aplicación.**  
Fuente: Lubliner, 2006

Para poder dar una descripción completa del estado de esfuerzos en un punto  $P$  al interior de un cuerpo, es necesario identificar los esfuerzos aplicados en las superficies, que pudieran ser a tres direcciones ortogonales; según se menciona en Fjaer *et al.* (2008).

## 2.9 Modelo de elemento finito

En Wei y Chau (2013) podemos observar la importancia de los estados de tensión, por encima de los de compresión, puesto que éstos son los que mecánicamente llevan a la falla de una mezcla asfáltica; y que por otra parte en ensayo de tensión indirecta no llega a representar un comportamiento uniforme a lo largo del diámetro de compresión de la probeta, por lo que dicho ensaye podría ser enfocado más para obtener las relación de Poisson más que un estado interno de esfuerzo.

Ahora bien, si hablamos de la búsqueda de una metodología para la evaluación de la tensión pura en mezclas asfálticas, existen herramientas que nos permiten realizarlo, sin siquiera elaborar una gran cantidad de muestras; Neumann *et al.* (2017) hacen mención de las ventajas del uso de la modelación para reproducir distintas pruebas mecánicas, puesto que éstas no requieren grandes recursos computacionales como se ha venido mostrando con el paso del tiempo, y que actualmente las investigaciones de Chen *et al.* (2015), Coleri *et al.* (2012) y Ozer *et al.* (2016) prueban que las mejorías de la representación de las propiedades de un material sometido a tensión han evolucionado lo suficiente como para tener un mayor realismo incluso a niveles de micro-estructuras de las mezclas asfálticas, puesto que es lo que ellos definen como una “reproducción sintética”. Liu *et al.* (2017) sugieren el uso del Método de Elemento Finito (MEF) para representar el comportamiento de las mezclas asfálticas, puesto que se pueden pre-definir comportamientos mecánicos de éstas y así su resultado podrá ser concebido en un ambiente en 3D, todo esto considerando que no se debe de perder de vista la necesidad de elaborar algunas pruebas de laboratorio, con la finalidad de lograr calibrar los modelos de reproducción; para así poder lograr la interpretación y desarrollo del comportamiento de los agregados o incluso de los vacíos de aire en una mezcla asfáltica, lo cual se ve reflejado como una ventaja en tiempo y recursos.

La herramienta de simulación consiste en un sistema de programas para diseño, análisis y simulación de partes por elementos finitos, el cual incluye las fases de preparación, mallado, ejecución y post-proceso, dicho ambiente ejecuta análisis de elementos sometidos a fenómenos físicos, esfuerzos, vibraciones y aplicaciones específicas. Además de simular condiciones reales y de laboratorio, así como los efectos internos y externos que pueden estar relacionado con dicho proceso.

El Método de Elemento Finito (MEF) es considerado como una gran herramienta que ayuda a la resolución de problemas de ingeniería, además de ser considerada una técnica numérica en la que se representan ecuaciones rectoras representadas de forma matricial y como tales son adecuadas para la solución por computadora. Los métodos numéricos forman un sistema de ecuaciones algebraicas simples. El MEF se basa en los principios de la mecánica del continuo, los valores mecánicos, que son usados en la mecánica del continuo son funciones continuas de las coordenadas de los puntos, de manera que son diferenciables de acuerdo a que están basadas en dichas coordenadas.

La función principal del análisis por MEF es lograr recrear matemáticamente el comportamiento real, es decir, dicho análisis debe ser un modelo matemático preciso de un prototipo físico. En ese sentido, las consideraciones del modelo comprenden nodos, elementos, propiedades del material, constantes reales, condiciones de frontera y otras características que son usadas para representar el sistema físico. Es de gran importancia resaltar la ayuda que brinda el programa de elementos finitos para intentar reproducir el comportamiento de los materiales que conforman un pavimento.

Para los fines de ésta investigación se pretende lograr con el modelo propuesto simular las condiciones de comportamiento de una mezcla asfáltica bajo una carga de tensión directa.

## 2.10 Consideraciones del modelo de elemento finito

Módulo Dinámico. Definido por Sandoval *et al.* (2011), como el valor absoluto de la relación entre el valor del esfuerzo máximo y la deformación unitaria máxima, siendo obtenido mediante un ensayo de compresión, a flexión y tracción directa, utilizando cargas en forma cóncava (Ec. 10).

$$E = \frac{\bar{O}}{\epsilon} \quad (\text{Ec. 10})$$

Donde:

$E$  = Módulo dinámico

$\bar{O}$  = Esfuerzo máximo

$\epsilon$  = Deformación unitaria máxima

Relación de Poisson. Considerada en Vásquez Monteros (2016) como una constante elástica que proporciona una medida del estrechamiento de una determinada sección de prisma de material elástico lineal e isotrópico cuando se estira longitudinalmente y se adelgaza en las direcciones perpendiculares a la del estiramiento (Ec. 11)

$$\nu = \frac{E_x}{E_y} \quad (\text{Ec. 11})$$

Donde:

$\nu$  = Relación de Poisson

$E_x$  = Deformación unitaria lateral

$E_y$  = Deformación unitaria vertical

Velocidad de deformación. Definido como el cambio de velocidad ( $v$ ), a través de la distancia ( $H$ ), entre dos placas, refiriéndonos en este caso a capas de pavimento. Considerando la capa inferior como estática, mientras que la superior



se mueve a cierta velocidad, todo esto como el resultado de la aplicación de una fuerza ( $F$ ) (Ec. 12).

$$\dot{\gamma} = \frac{dv}{dH} \quad (\text{Ec. 12})$$

Viscosidad. Es de suma importancia el tener presente que esta propiedad como lo describe Vidal y Ossa (2011) puesto que debido a la susceptibilidad del asfalto hacia los cambios de temperatura, los agregados deben de ser cubiertos en su totalidad por la emulsión asfáltica para que en temperaturas altas, se permitan desplazamientos unas con respecto a otras, y en temperaturas ambiente, pueda lograr mantener unidas a las partículas del agregado. Dicho valor está expresado matemáticamente de la siguiente forma en la Ec. 13:

$$\eta = \frac{T}{\dot{\gamma}} \quad (\text{Ec. 13})$$

Donde:

$\eta$  = Viscosidad.

$T$  = Módulo cortante

$\dot{\gamma}$  = Velocidad de deformación.

### 3 Metodología

Para la realización de ésta investigación se cumplirá secuencialmente el diagrama de flujo propuesto en la Figura 3.1, que describe los pasos que van desde obtener información de los ensayos de tensión, analizar los resultados, realizar comprobación de resultados. Para fines prácticos la investigación se divide en dos partes, la primera de ellas es obtener las condiciones ideales para analizar el ensayo, cuyas características sean las más representativas del comportamiento del material.

Una vez obtenidas las condiciones ideales para realizar el ensayo, se procederá a comprobar dicha situación, todo esto repitiendo ensayos y realizando modelaciones matemáticas, como se hizo en su primera etapa.

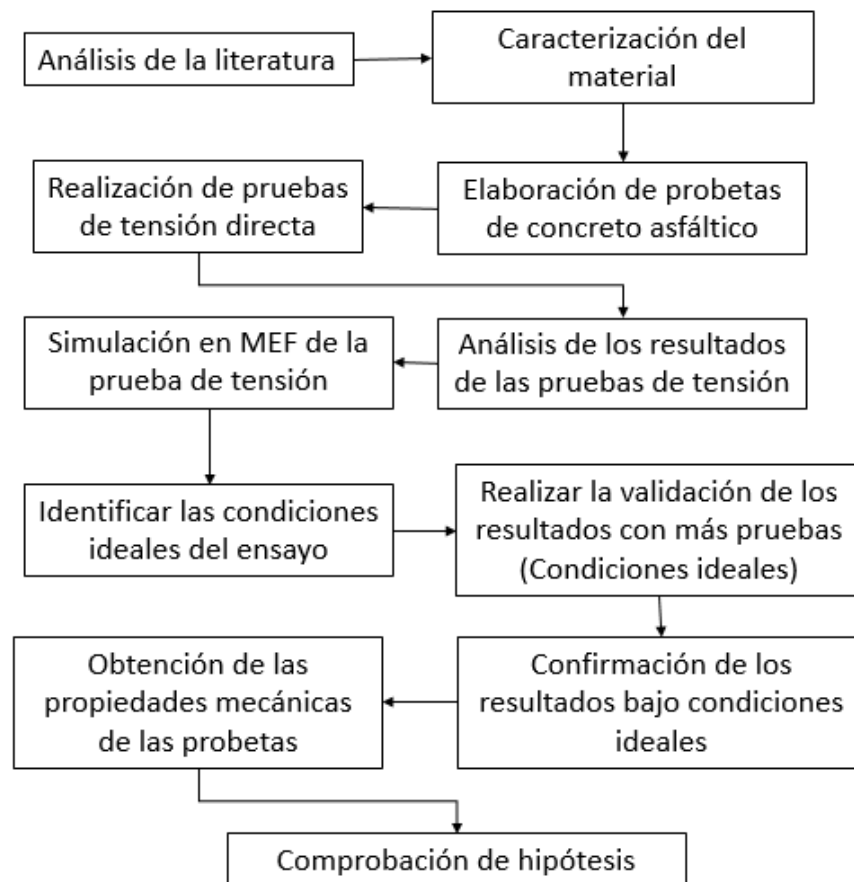


Figura 3.1. Diagrama de flujo del proceso de investigación.  
Fuente: Elaboración propia

Con la finalidad de cumplir con la normativa para la elaboración de especímenes de concreto asfáltico se buscará cumplir con las siguientes especificaciones:

**Tabla 3.1. Ensayos a realizar para lograr la caracterización del material.**

Nombre del ensayo	Especificación
Muestreo de agregados	ASTM C 702
Análisis granulométrico	ASTM C 136
Método para determinar densidad y absorción del agregado	ASTM C 127-07
Abrasión (Desgaste de los ángeles)	ASTM C 131
Intemperismo acelerado	ASTM C 88
Equivalente de arena	ASTM D 2419
Partículas planas y alargadas	ASTM D 4791
Caras fracturadas	ASTM D 5821

Fuente: Elaboración propia

Una vez que éste proceso esté concluido, esta investigación se concentrará básicamente en dos etapas principales; en una primera etapa, se procedió al desarrollo de un ensayo experimental que fuera capaz de evaluar la resistencia al fallo por fractura en mezclas asfálticas. Este procedimiento debería de cumplir con las condiciones de no presentar desventajas de los actuales procedimientos actualizados.

En este contexto, se evaluará un nuevo procedimiento, el ensayo “8TD”, frente a múltiples variables experimentales, con el objetivo de establecer la pertinencia, repetitividad y sensibilidad del procedimiento propuesto, para evaluar las propiedades mecánicas de las mezclas asfálticas relacionadas con la falla por fractura. Las variables en esta primera etapa se mencionan en la Tabla 3.2.

**Tabla 3.2. Variables consideradas en el ensayo “8TD”.**

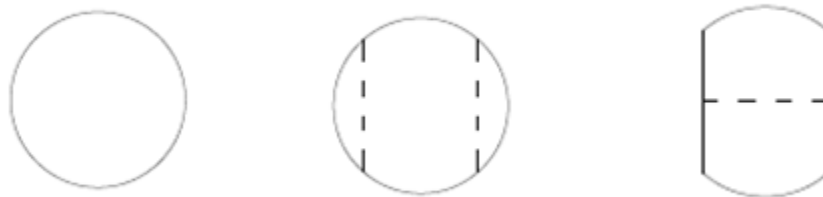
Variable	Unidades	Valor
Velocidad del ensayo	mm/min	0.5
		1
		2
Temperatura	°C	10°
		20°
		30°
Tamaño de la ranura	cm	1
		2
		3

**Fuente: Elaboración propia**

En una segunda etapa, se determinará el comportamiento de una serie de mezclas, las cuales fueron ensayadas de igual forma mediante el nuevo procedimiento del ensayo 8TD la finalidad de esta etapa fue determinar el grado de correlación entre las propiedades mecánicas obtenidas por el nuevo procedimiento desarrollado y sus características ante la fractura.

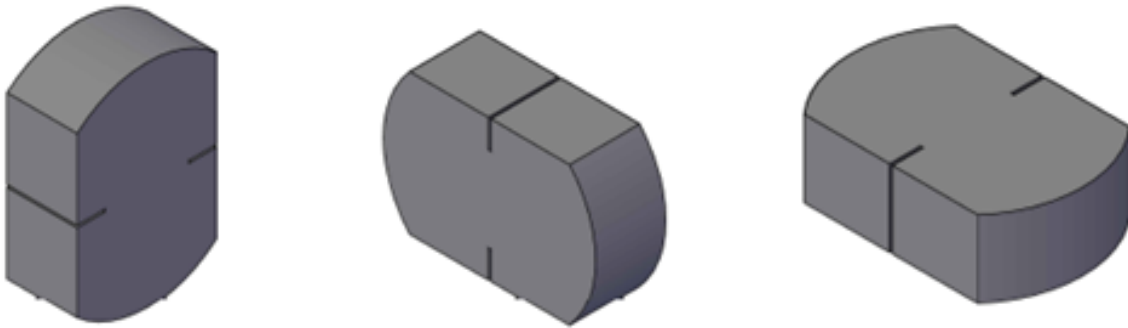
### **3.1 Desarrollo del sistema de sujeción y elaboración de probetas**

La metodología del ensayo 8TD consiste en someter una probeta semi-circular, cortada y ranurada por los lados, a un esfuerzo de tensión directa para provocar su fractura, simulando la propagación de una fisura en una capa de mezcla asfáltica (Figura 3.2).



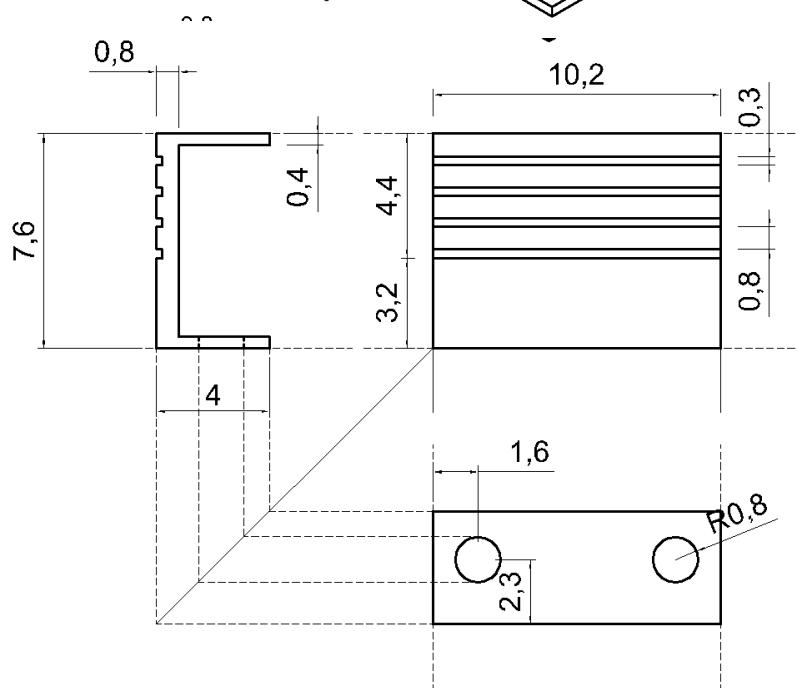
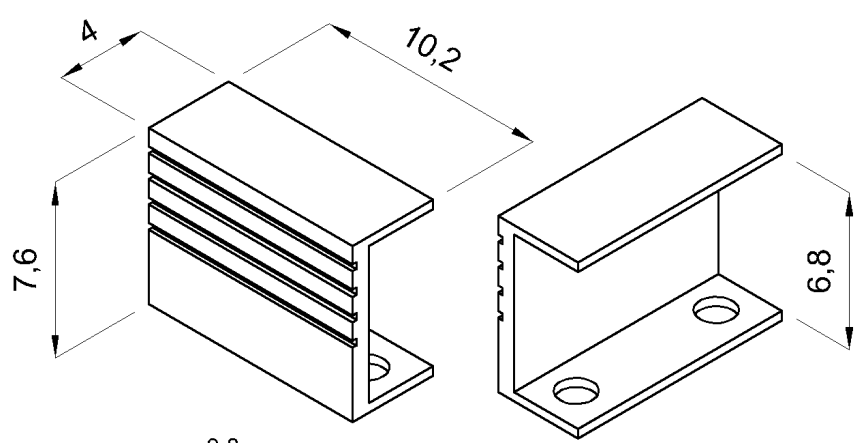
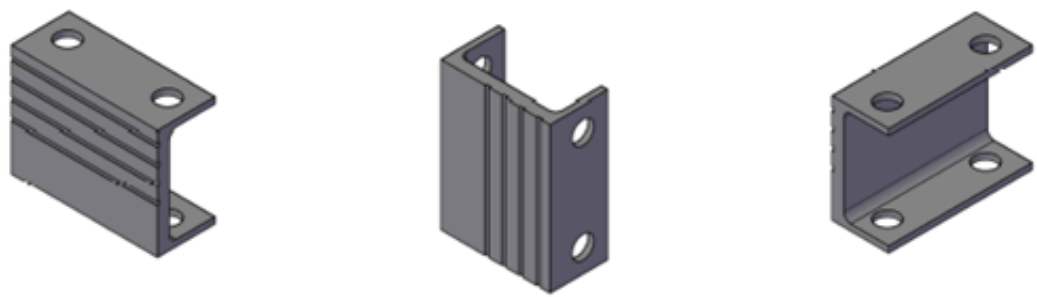
**Figura 3.2. Geometría de la probeta antes, durante y después del corte (Vista plana)**  
**Fuente: Elaboración propia**

En el caso de las probetas cilíndricas, en un comienzo, el procedimiento de fabricación y compactación sigue la metodología establecida por el método Superpave. Posteriormente, la probeta se corta en sus extremos, y se le induce una fisura mediante una entalladura en la parte central (Figura 3.3).



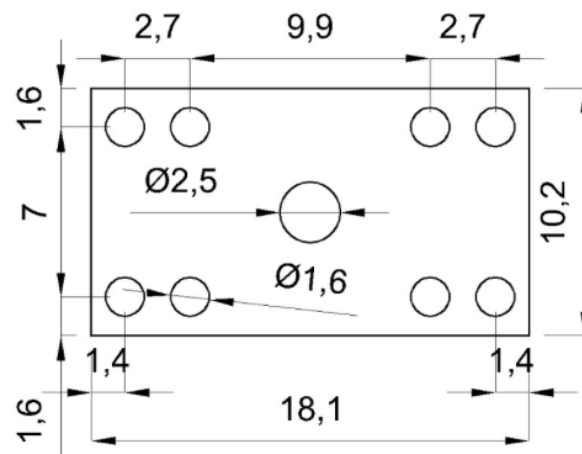
**Figura 3.3. Vista en 3D de las probetas de concreto asfáltico**  
Fuente: Elaboración propia

El desarrollo de un nuevo ensaye trae consigo el adaptar el equipo; en este caso se empleó una prensa GCTS, lo cual trajo consigo que para los fines de ésta investigación se requiriera la construcción de un equipo especial de sujeción para las pastillas de concreto asfáltico, la cual se compone de una serie de placas de acero, con ranuras diseñadas para una mejor adherencia entre la probeta y la placa; tal cual se muestra en la Figura 3.4 y Figura 3.5, para posteriormente ser colocadas dentro de la cámara ambientada con temperatura controlada y poder ser ensayadas.



Cotas en centímetros

Figura 3.4. Placas de acero (vista transversal, longitudinal, plana y 3D).  
Fuente: Elaboración propia



Cotas en centímetros

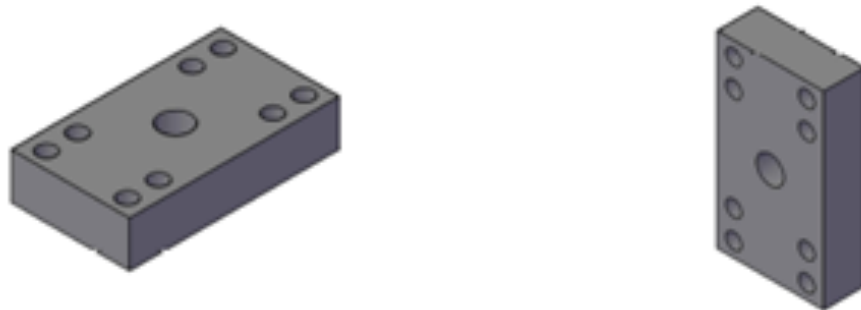
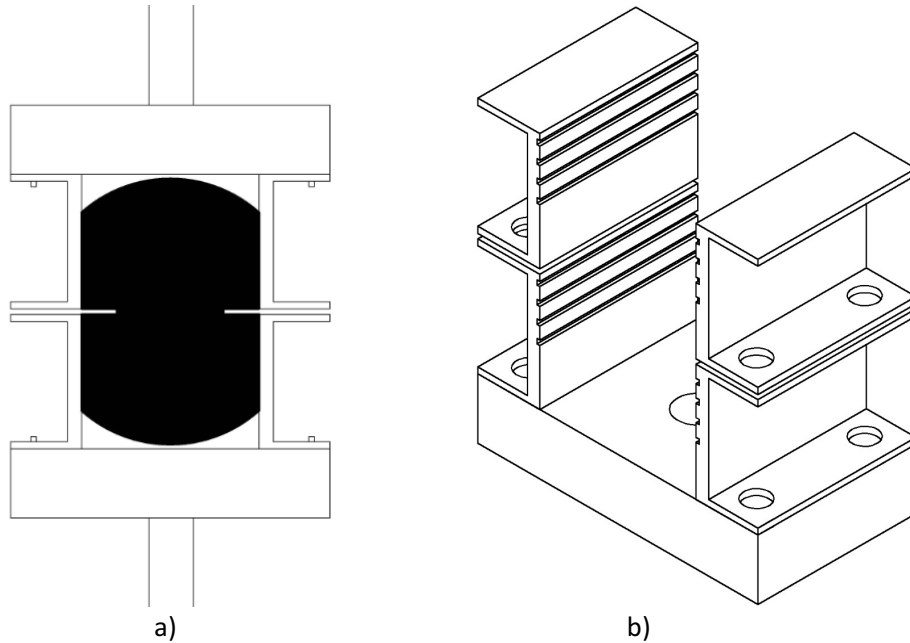


Figura 3.5. Bases para anclar placas metálicas (Vista plana y 3D).  
Fuente: Elaboración propia

Posteriormente, mediante el uso de una resina epoxi, se fijan las dos secciones de la cara plana separadas por la entalladura a unas placas de hacer, como se ilustra en la Figura 3.6. Éstas a su vez, son fijadas a soportes de una prensa, que permiten un movimiento perpendicular a la ranura, para llevar a cabo esta acción se emplea una máquina como se muestra en la Figura 3.7.

El ensayo 8TD se realiza a temperatura controlada y consiste en someter probetas semicirculares a un esfuerzo simple de tensión directa. Para ello los testigos deben estar previamente estabilizados a la temperatura del ensayo. Para la realización de éste se emplea una prensa GCTS, la cual previamente fue

adaptada como ya se mencionó anteriormente y que dispone de una cámara ambiental capaz de controlar la temperatura con una precisión de  $\pm 1^\circ\text{C}$ .

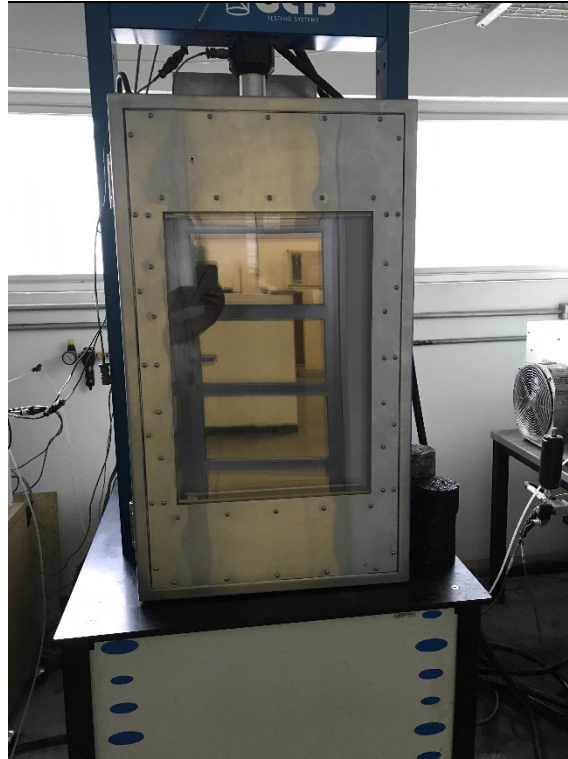


**Figura 3.6. a) Ilustración de la forma de sujeción de la probeta a las placas metálicas, b) Ilustración de la perspectiva lateral del dispositivo de sujeción para la probeta.**  
Fuente: Elaboración propia

El *software* de adquisición de datos de la prensa GCTS, registra la evolución de la fuerza de tensión aplicada, así como el desplazamiento del pistón hasta que éste alcance un desplazamiento tal, que la carga haya llegado a un estado de relajación. Una vez registrados dichos datos, se procede a graficar las cargas registradas en función de sus desplazamientos, y a partir de esto, se obtendrán los parámetros de resistencia a la fractura.

Una de las principales ventajas del ensayo 8TD, es que presenta la particularidad de desarrollar principalmente tensiones en la parte de la fisura, focalizando el trabajo realizado en propagar la fisura a través del plano de fallo previamente inducido.





**Figura 3.7. Prensa “GCTS” con cámara ambiental.**  
**Fuente: Elaboración propia**

### **3.2 Sistema de modelación**

El sistema de modelación contiene un contenido extenso en cuanto a elementos finitos, de los cuales se puede seleccionar los que a cada problema convengan para fines de su análisis. Para este estudio se considera un modelo tridimensional, el cual se define en un plano X-Y-Z. Además trabaja en cuatro distintos tipos de elementos, el primero de ellos es el punto (definido por un nodo), el segundo es una línea (representada por una línea recta o curva que se puede conectar a dos o tres nodos), el tercero es el área (puede tener forma cuadrilátera o triangular); y por último el volumen (cuyas formas suelen ser tetraedros o exaedros). Los modelos de análisis sólidos en 3D son empleados para generar estructuras gruesas en el espacio, usualmente relacionados con esfuerzos considerables.

Es de vital importancia seleccionar cuidadosamente el elemento finito cuyos grados de libertad sean los suficientes para caracterizar la respuesta de dicho modelo. Para los fines de ésta investigación se empleará el elemento finito que se acopla más a las necesidades del problema en estudio, para poder reproducir el comportamiento de la mezcla asfáltica

Este elemento finito se utiliza para modelación en 3D de estructuras sólidas. Se define por ocho nodos, además de contar con propiedades como plasticidad, hiperplasticidad, rigidez de tensión, fluencia, deflexión grande y capacidades de deformación. Cuenta con formulación mixta con capacidad para simular deformaciones de los componentes elasto-plásticos de materiales casi incompresibles y materiales hiperelásticos completamente incompresibles.

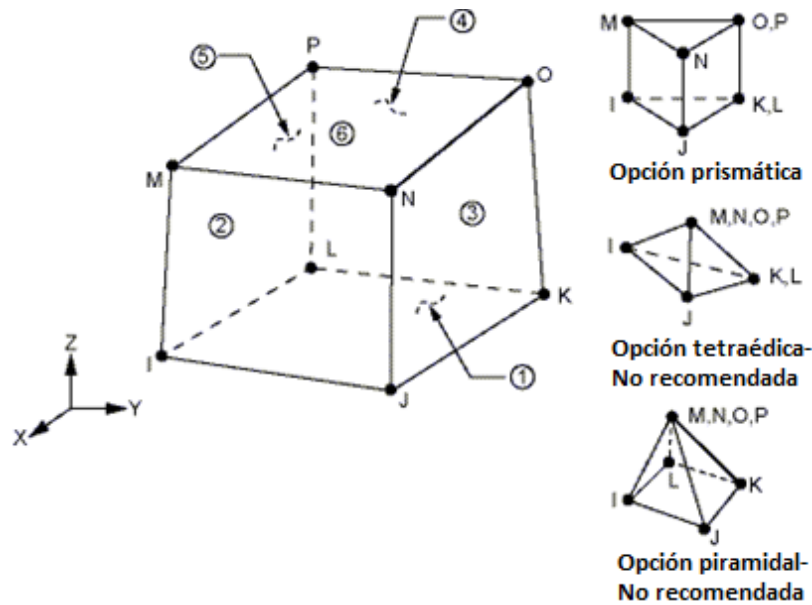


Figura 3.8. Geometría del elemento finito.  
Fuente: Mechanical APDL

Los datos de entrada del elemento incluyen ocho nodos, espesor y características de los materiales. Permite degeneraciones de prisma, tetraedro y pirámide cuando se usa en regiones irregulares. Se soportan diversas tecnologías de elementos tales como barra B, integración uniformemente reducida y tensiones mejoradas.

El proceso de modelación busca la reproducción de las condiciones físicas y mecánicas de las probetas de concreto asfáltico que se están evaluando. Para ello el procedimiento a seguir es dibujar éstas en el sistema coordenado que el sistema de modelación tiene, a su vez, el *software* nos permite realizar distintas técnicas de diseño, el que se empleó para esta investigación fue un dibujo sólido en 3D, posterior a realizar un solo volumen para el sistema se añadieron los grados de libertad para cada nodo.

Como se describió en la metodología del ensayo, la aplicación de cargas se realizará directamente en las caras laterales de la probeta en el sentido vertical, las cuales serán simuladas dentro del *software* como se muestra en la Figura 3.9.

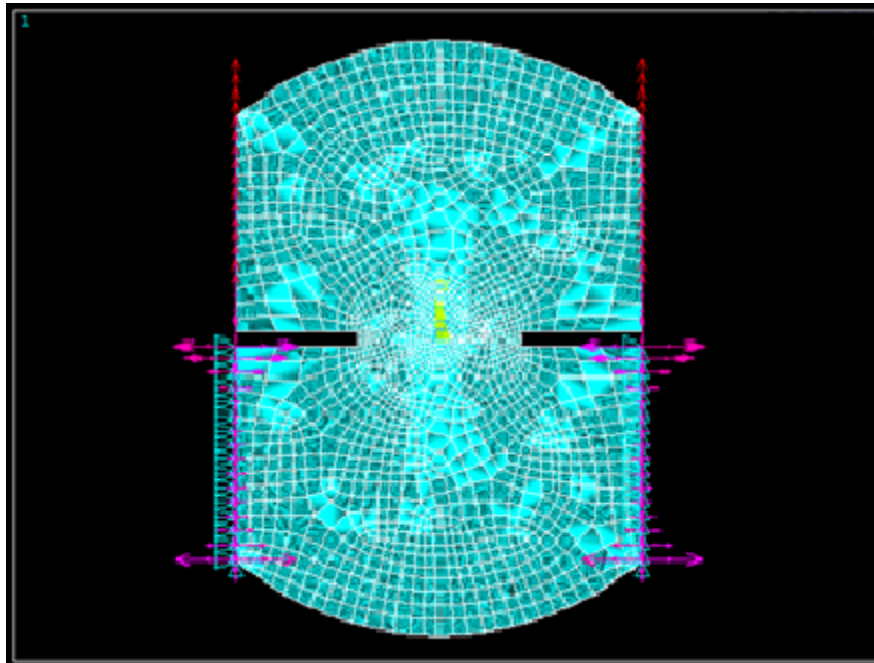


Figura 3.9. Representación de los grados de libertad y aplicación de la dirección de la carga.  
Fuente: Elaboración propia

Una vez que se han dibujado y establecido todas las condiciones a las cuales será simulada la probeta de concreto asfáltico, mediante el modelo que seleccionamos previamente, el *software* realizará la reproducción del proceso de carga en dicho espécimen y se podrán apreciar los esfuerzos que se generan en la probeta de concreto asfáltica; ilustrado en la Figura 3.10.

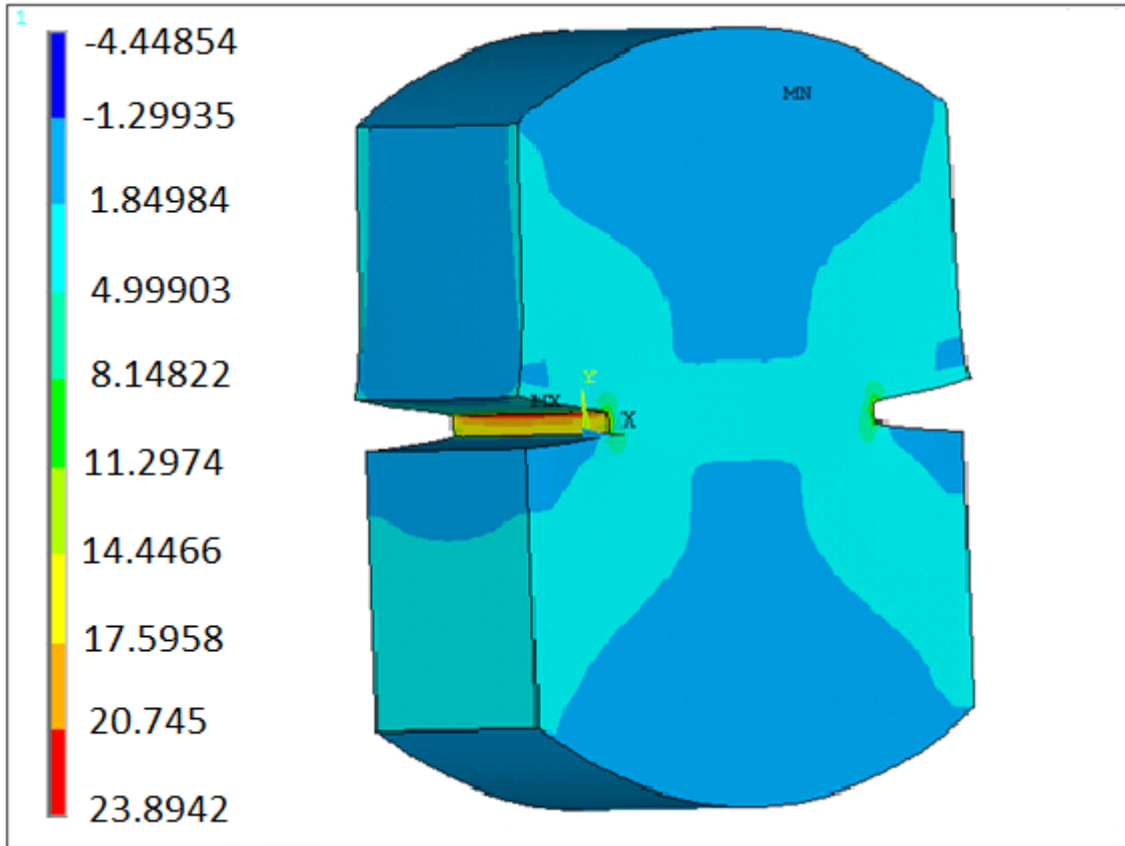


Figura 3.10. Representación del esfuerzo principal primero en la simulación de la prueba de tensión directa.  
Fuente: Elaboración propia

Cabe mencionar que el sistema arroja una serie de resultados que el usuario debe de interpretar, puesto que bajo las condiciones iniciales, puede ser posible calcular los esfuerzos de Von Mises, desplazamientos nodales, esfuerzos en los planos  $XY, XZ, YZ$ ; así como las zonas en donde éstos se están generando. Una vez que hayamos realizado dicho análisis, procederemos al procesamiento de la información que nos arroja el programa.

## 4 Resultados

En este capítulo se muestran los resultados de las pruebas realizadas al material pétreo, al material asfáltico y los resultados arrojados por los ensayos de tensión directa así como los que se obtuvieron por la simulación empleando el modelo de elemento finito.

### 4.1 Caracterización de los agregados

En las Tablas 4.1 y 4.2 se muestran resultados de las pruebas realizadas al material pétreo para su caracterización tanto en la parte gruesa como para la parte fina; de igual forma se hace mención de la normativa y su respectivo límite en el que se debe de encontrar el material para ser considerado útil en la elaboración de la mezcla asfáltica.

Tabla 4.1. Resultados de la caracterización de agregado grueso

Característica	Unidad	Norma	Valor	Especificación
Desgaste de los ángeles	%	ASTM- C131	10%	30% Máx.
Desgaste Micro-Deval	%	AASHTO TP 58-99	7%	18% Máx.
Intemperismo acelerado	%	AASHTO T 104	1.12%	15% Máx.
Caras fracturadas (2 caras o más)	%	ASTM D 5821	98%	90% Min.
Partículas alargadas	%	ASTM D 4791	1.6%	5 a 1, 10% Máx.
Partículas lajeadas	%	ASTM D 4791	0.34%	5 a 1, 10% Máx.
Adherencia con el asfalto	%	Recomendación AMAAC RA-08/2010	96%	90% Mín.

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 4.2. Resultados de la caracterización de agregado fino.**

Característica	Unidad	Norma	Valor	Especificación
Equivalente de arena	%	ASTM D 2419	70%	50% Mín.
Angularidad	%	AASHTO T 304	41%	40% Mín.
Azul de metileno	mg/g	Recomendación AMAAC RA-05/2011	11 ml/g	15 ml/g, Máx.

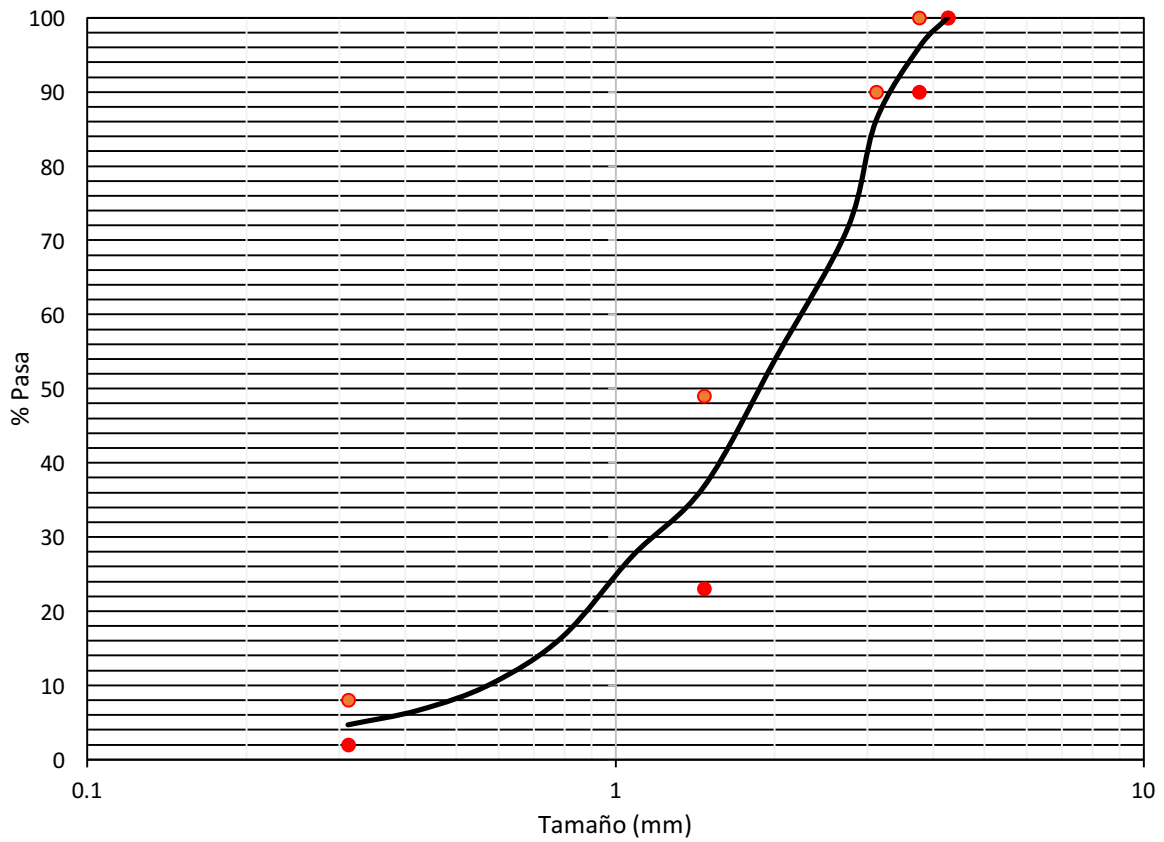
Fuente: Elaboración propia

Derivado del análisis granulométrico se aprecia que se tiene un material de tamaño máximo de 1" (25 mm) y un tamaño nominal máximo de ¾" (19mm), así como se muestra en la Tabla 4.3.

**Tabla 4.3. Granulometría del agregado pétreo.**

Designación	Apertura (mm)	Retenido (%)	Pasa (%)
<b>Granulometría de la grava</b>			
1"	25.00	0%	100%
¾"	19.00	2%	98%
½"	12.50	19%	79%
⅜"	9.50	34%	45%
No. 4	4.75	41%	4%
No. 8	2.36	3%	1%
<b>Granulometría de la arena</b>			
No. 4	4.75	0%	100%
No. 8	2.36	11%	89%
No. 16	1.18	32%	57%
No. 30	0.60	21%	36%
No. 50	0.30	9%	27%
No. 100	0.15	7%	19%
No. 200	0.075	6%	14%

Fuente: Elaboración propia



**Figura 4.1. Curva granulométrica del agregado pétreo.  
Fuente: Elaboración propia**

En la Figura 4.1 se puede apreciar que la granulometría que se usa para la elaboración de la mezcla asfáltica se encuentra dentro de los puntos de control que marca la normativa, por lo que se considera adecuada.

## 4.2 Diseño de la mezcla

Para el diseño de la mezcla se realizó un ajuste granulométrico y así cumplir con las especificaciones establecidas por los puntos de control, dando como resultado los siguientes datos que se muestran en la Tabla 4.4.

Tabla 4.4. Resultado del diseño de la mezcla asfáltica.

Designación	Malla		Puntos de control	
	Apertura (mm)	Pasa (%)	Mínimo	Máximo
1"	25.00	100.00%	100	100
3/4"	19.00	98.408%	90	100
1/2"	12.50	71.540%	-	90
3/8"	9.50	50.955%	-	-
No. 4	4.75	37.226%	-	-
No. 8	2.36	28.890%	23	49
No. 16	1.18	16.819%	-	-
No. 30	0.60	11.966%	-	-
No. 50	0.30	9.688%	-	-
No. 100	0.15	7.611%	-	-
No. 200	0.075	6.127%	2	8

Fuente: Elaboración propia

Para tener definidos los límites establecidos por los puntos de control y para la granulometría de la mezcla asfáltica densa de tamaño nominal de 3/4"; se realizó la curva de diseño en conjunto con las restricciones y la línea de máxima densidad representado en la Figura 4.2.

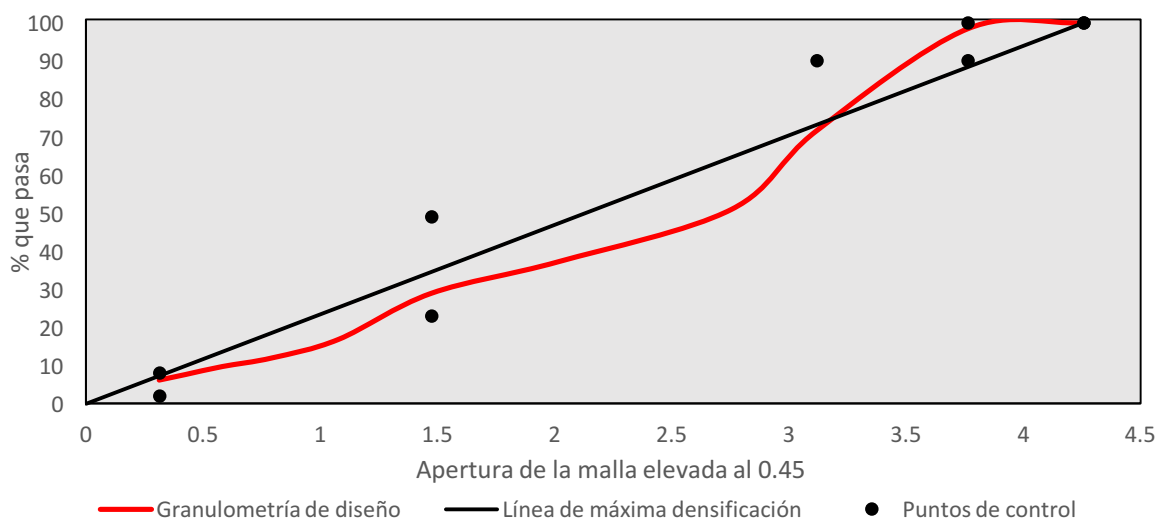


Figura 4.2. Granulometría para el diseño de la mezcla asfáltica.

Fuente: Elaboración propia



### 4.3 Ensayo de tensión directa

Como se planteó en el capítulo de metodología, se desarrolló un sistema para poder adaptar una máquina universal GCTS y así evaluar las mezclas asfálticas a estados de tensión directa, para ello se procedió con la elaboración, corte y ranuración de las probetas mostradas en la Figura 4.3; así como su posterior montaje en dicho sistema (Figura 4.4).

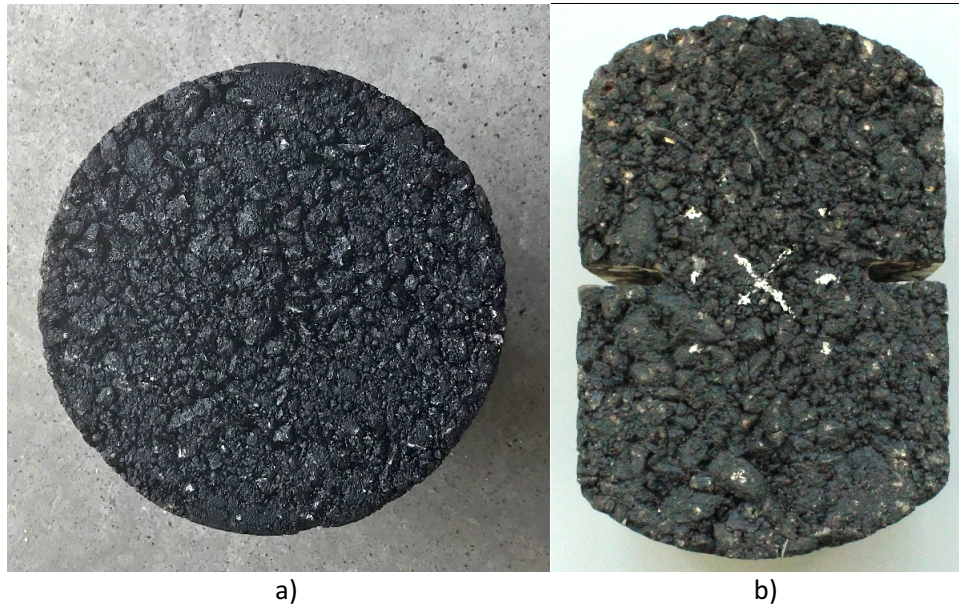
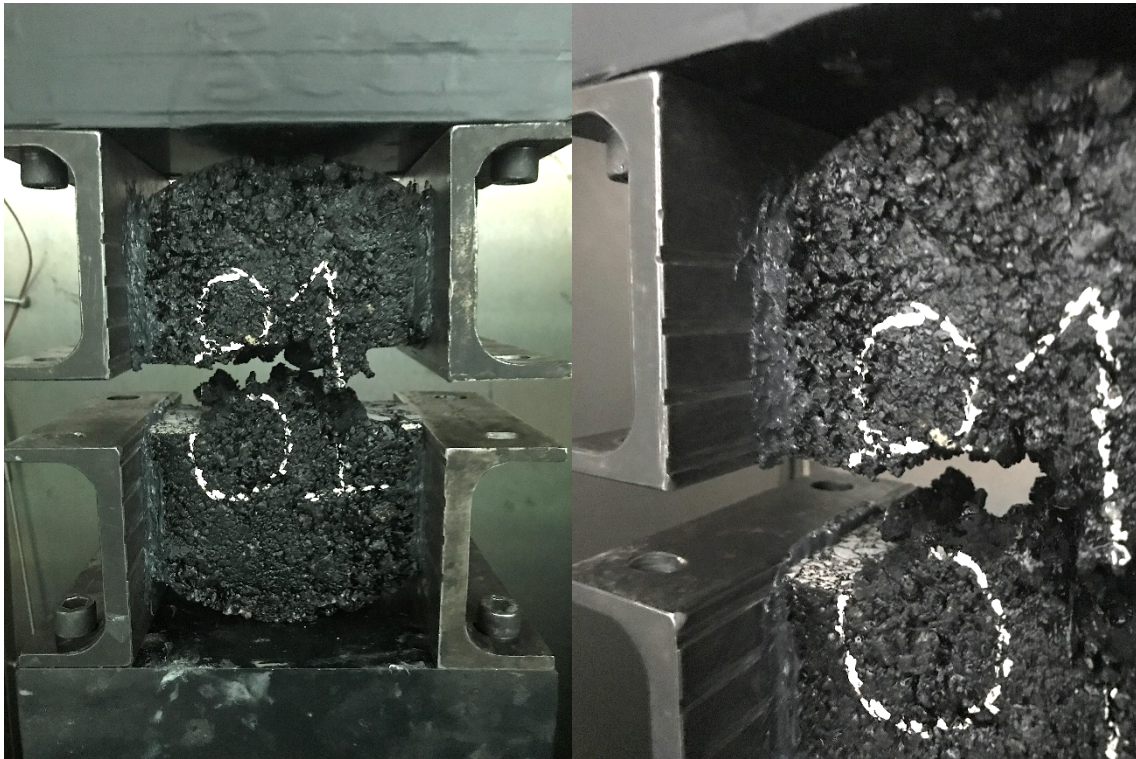


Figura 4.3. a) Elaboración y b) ranuración de las probetas de concreto asfáltico.  
Fuente: Elaboración propia



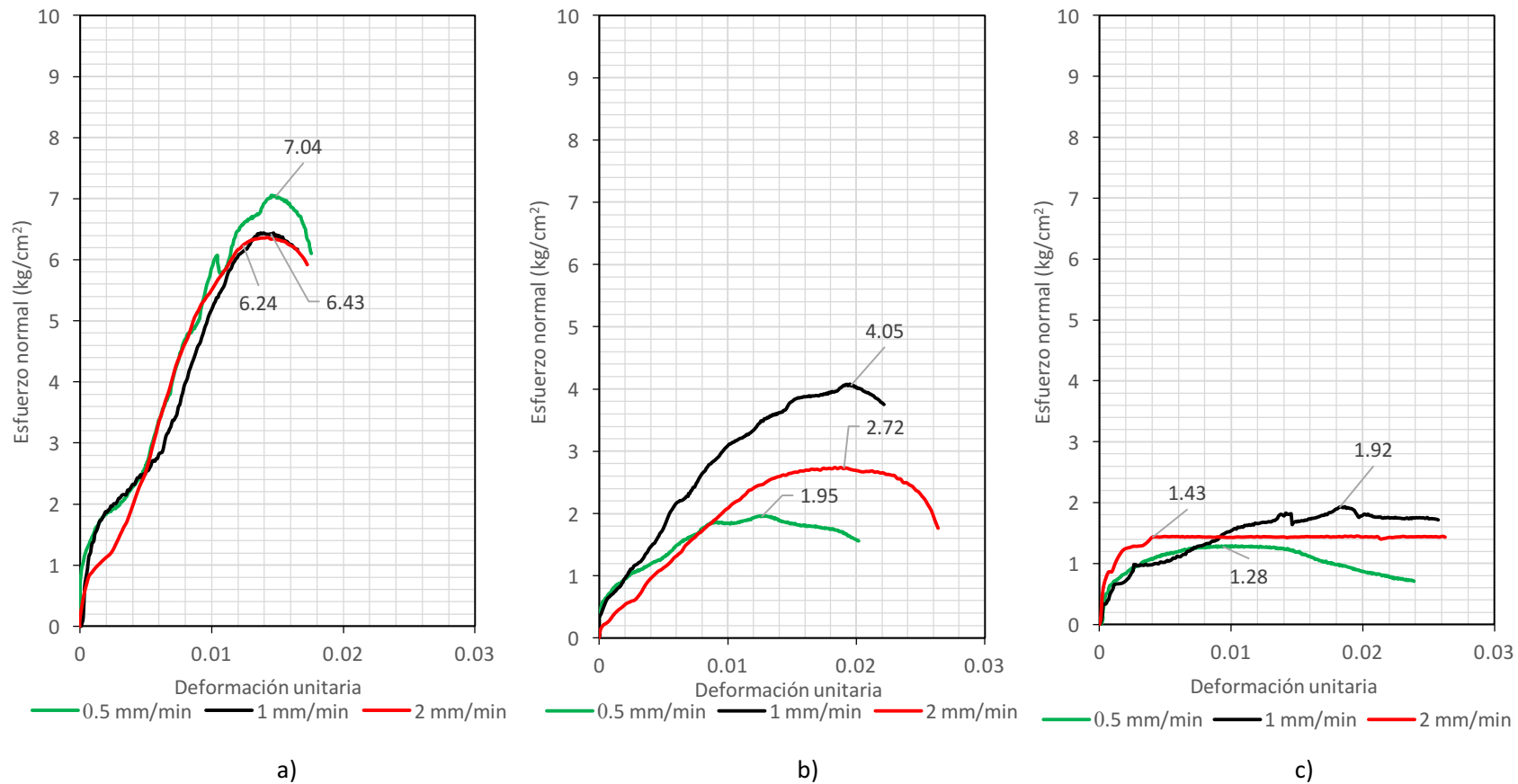
Figura 4.4. Montaje de las probetas en el sistema de evaluación a tensión directa.  
Fuente: Elaboración propia

Una vez montadas las probetas en la máquina universal se procedió a realizar la prueba de tensión directa; todo esto con la finalidad de llevar a la falla a dichos especímenes, para así poder obtener los valores de esfuerzo normal máximo que éstos podían soportar (Figura 4.5).



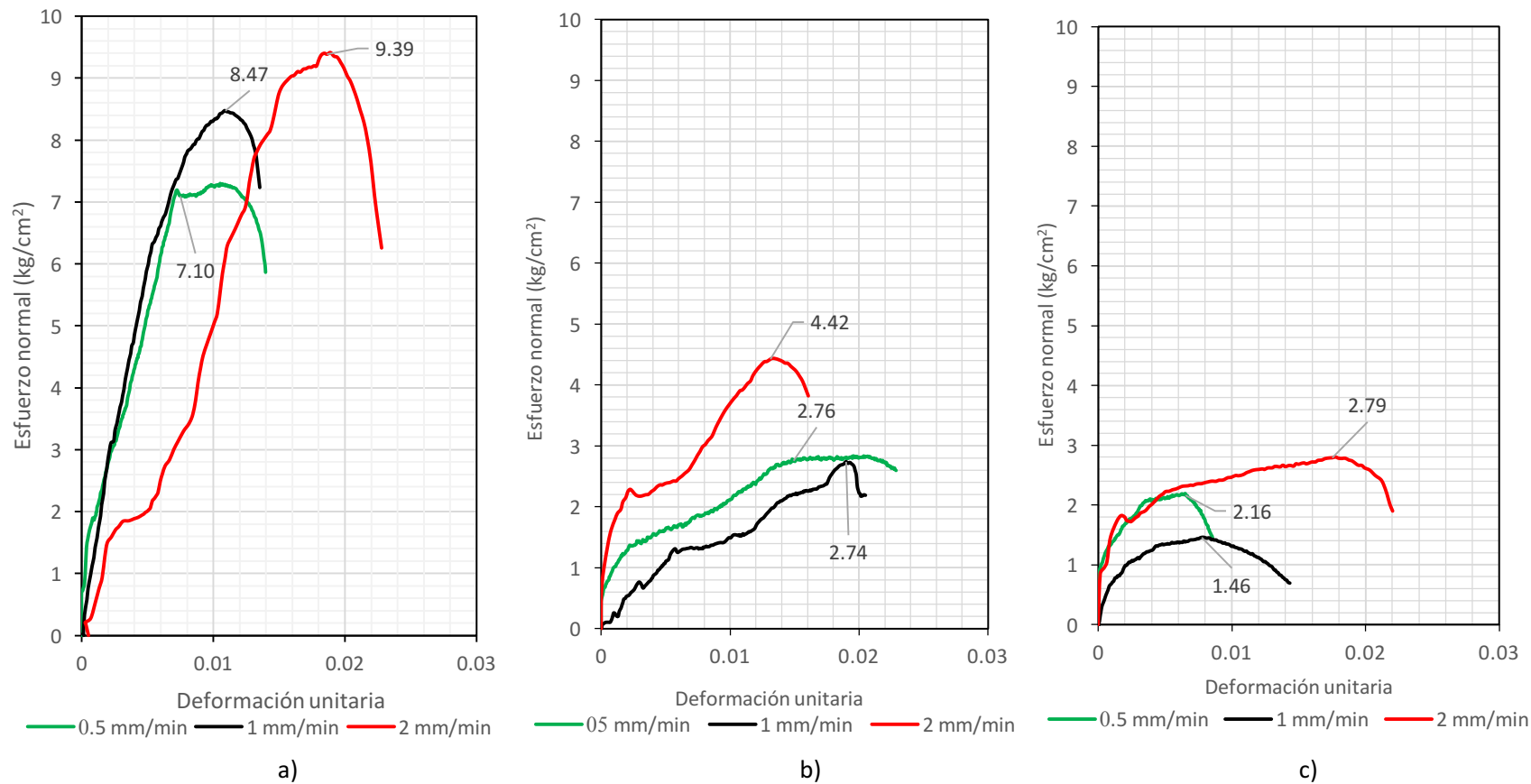
**Figura 4.5. Prueba de tensión directa.**  
Fuente: Elaboración propia

Para la realización de las pruebas de tensión directa, se produjeron 3 especímenes por cada una de las distintas variables con las que se contaba, todo esto con la finalidad de obtener un total de 71 probetas de concreto asfáltico, este número fue elegido para poder contar con un grado de confiabilidad bueno, puesto que si se elaboraban más probetas; los resultados de la investigación podría llegar a tener demasiada dispersión, lo que haría que el procesamiento de los datos requiriera más tiempo y se adoptara otra metodología de selección de características.



**Figura 4.6 a) Comportamiento de la prueba de tensión con ranura de 2 cm, temperatura de 10°C y distintas velocidades de aplicación, b) Comportamiento de la prueba de tensión con ranura de 2 cm, temperatura de 20°C y distintas velocidades de aplicación y c) Comportamiento de la prueba de tensión con ranura de 2 cm, temperatura de 30°C y distintas velocidades de aplicación.**

Fuente: Elaboración propia



**Figura 4.7 a) Comportamiento de la prueba de tensión con ranura de 3 cm, temperatura de 10°C y distintas velocidades de aplicación, b) Comportamiento de la prueba de tensión con ranura de 3 cm, temperatura de 20°C y distintas velocidades de aplicación y c) Comportamiento de la prueba de tensión con ranura de 3 cm, temperatura de 30°C y distintas velocidades de aplicación.**  
**Fuente: Elaboración propia**

En la Figura 4.6 y 4.7 se muestran los estados de esfuerzo y deformación unitaria para las probetas con ranura de 2 cm, ensayadas a temperatura y velocidad variable, se aprecia que para el rango de temperatura de los 10°C predomina un comportamiento elástico del material asfáltico (mayor rigidez en las muestras); si bien se obtiene un estado mayor de esfuerzo, la falla se produce de forma frágil, sin oportunidad de permitir deformaciones recuperables; por otra parte en aquellas que fueron realizadas bajo temperaturas de 30°C se muestra que la componente viscosa del material está presente de forma importante, ya que la resistencia al esfuerzo normal se vio disminuida debido a esta condición, además de que se presentaron deformaciones permanentes; por lo que tal condición fue descartada para ser considerada como una buena opción de representación. Ahora bien; el patrón de comportamiento de las condiciones de 20°C en sus distintas velocidades tomaron las dos componentes del material asfáltico (elástica y plástica), lo cual cumple con el objetivo de representar las condiciones reales a las cuales se encuentra sometido un pavimento flexible.

Si bien la elección de la temperatura resultó en la de 20°C, la decisión con respecto al tamaño de la ranura fue decisiva por el comportamiento de las pruebas; en el caso de la Figura 4.7 en el inciso b, se puede apreciar que durante el desarrollo del ensayo (en sus distintas velocidades de aplicación), el material sufrió reajustes en su estructura, ya que las partículas gruesas quedan en contacto unas con otras, lo que provee una suficiente fricción interna; debido a la naturaleza mecánica de la mezcla asfáltica, por lo que se puede inferir que no es un desarrollo uniforme, y bajo este parámetro de selección, resulta tener una mejor representación los ensayos mostrados en la Figura 4.6 inciso b; los cuales no tienen un grado de variabilidad alto, siendo finalmente la temperatura de 20°C, ranura de 2 cm y velocidad de 1 mm/min, la que fue seleccionada como aquella que representa mejor el estado de tensión de la prueba; además de que logra considerar las componentes elástica y viscosa del material.

## 4.4 Modelación

Derivado de los resultados de las pruebas de laboratorio para el ensaye de tensión directa en todos y cada uno de los especímenes así como para las distintas condiciones que fueron planteadas en la metodología de esta investigación, se realizó la modelación de dicho procedimiento; se realizó en el *software*, buscando tratar de reproducir las mismas propiedades mecánicas de la mezcla asfáltica; la cual fue ensayada previamente.

Uno de los primeros pasos fue realizar el proceso de dibujo de la probeta, para esto se plasmaron los nodos en el sistema coordenado del programa, una vez formada la probeta en las 3D, se procedió con el mallado del volumen y del tal forma el programa pudiera contemplarlo como un elemento sólido (Figura 4.8). Posterior a ello fueron asignados los grados de libertad y cada una de las distintas cargas y la dirección en que serían aplicadas a la probeta; que buscarían tratar de simular aquellas que fueron realizadas en la máquina universal en el laboratorio (Figura 4.9).

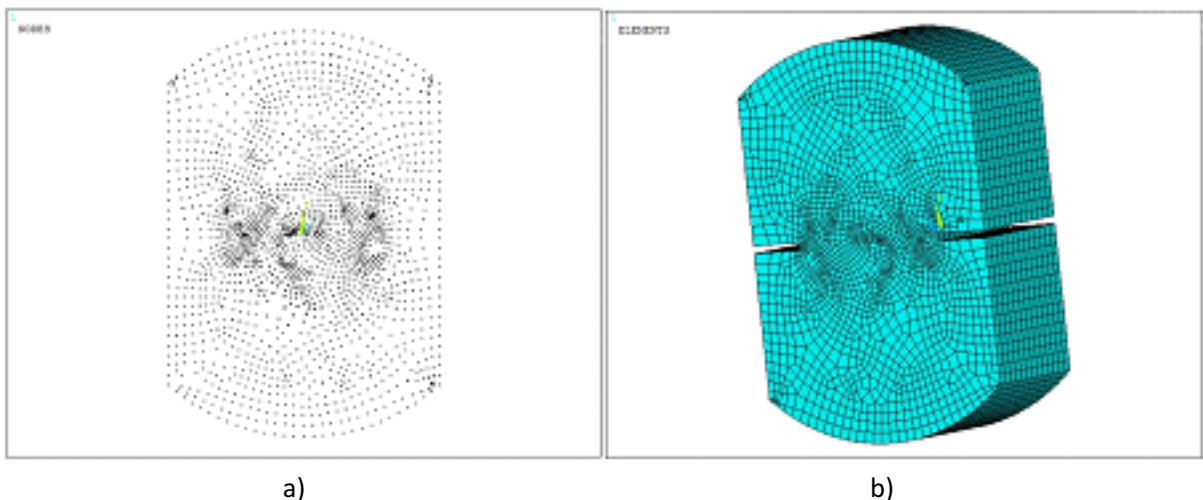
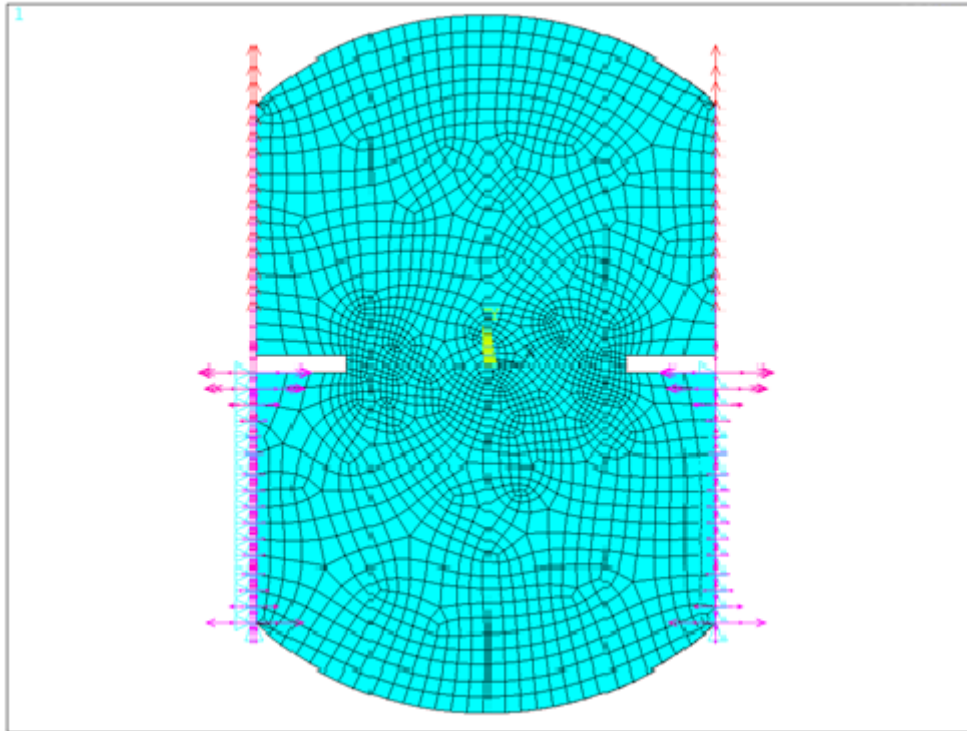


Figura 4.8. Proceso de dibujo tridimensional. a) Elaboración de nodos. b) Mallado del elemento para lograr que la figura se convierta en un sólido.

Fuente: Elaboración propia

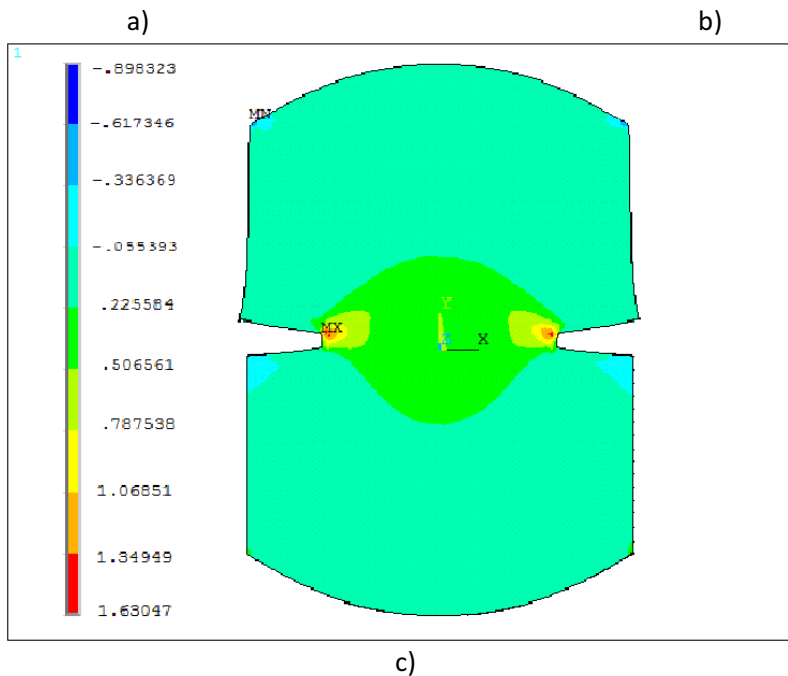
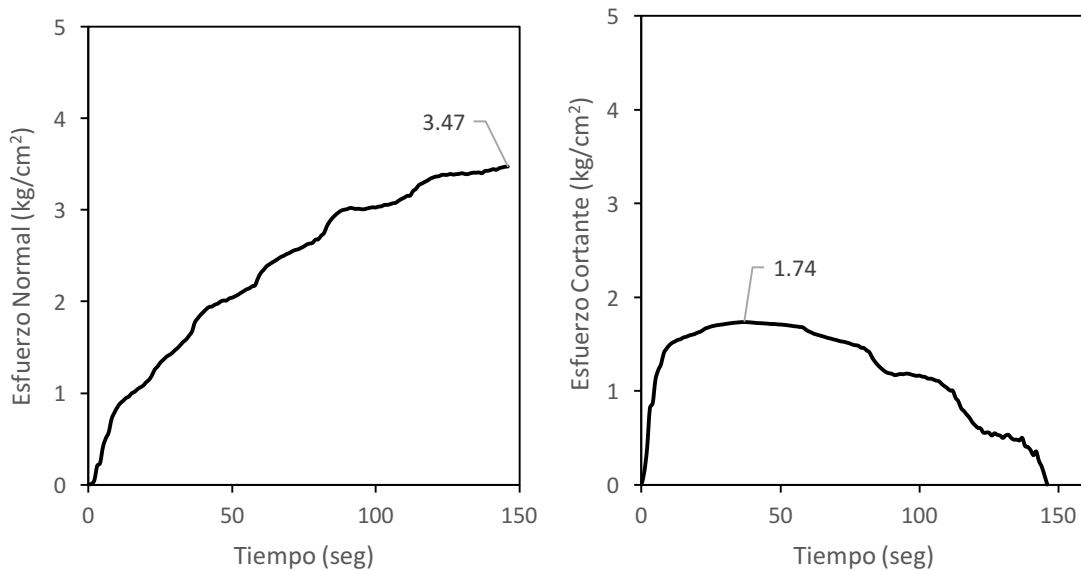


**Figura 4.9. Ilustración de la distribución de grados de libertad y el sentido en el que se aplicará la fuerza para simular la acción de la prensa.**  
**Fuente: Elaboración propia**

Posterior a la realización de las simulaciones para cada una de las distintas condiciones de carga, velocidad, tamaño de ranura, y condiciones de temperatura, se extrajeron los resultados para ser comparados con los realizados experimentalmente, teniendo una tendencia similar con los encontrados ensayados en el laboratorio; por lo que se llegó a la conclusión de que los resultados de las pruebas simuladas tenían en efecto, las condiciones ideales para realizar el ensaye, eran las de ranura de 2 cm, velocidad de 1 mm/min, y temperatura de 20° C.

La resistencia al esfuerzo cortante, en las probetas ensayadas en las condiciones ideales fue de 1.63, 6.48 y 1.57 Kg/cm<sup>2</sup> para los planos XZ, XY e YZ respectivamente. De acuerdo al sistema coordenado empleado en el modelo y en relación a los datos experimentales, el esfuerzo cortante actuante máximo en el momento de la falla en el plano XZ es el único que se puede conocer del ensaye de tensión directa si el análisis se realiza en un estado de esfuerzo plano, el cual resulta ser de 1.74 Kg/cm<sup>2</sup> de acuerdo a la interpretación de Mohr, considerando

que el esfuerzo cortante máximo en el plano en una ensaye uni-axial de tensión es igual a la mitad del valor del esfuerzo normal en el límite de fluencia (Figura 4.10). Sin embargo, la fractura debida al máximo esfuerzo cortante se asume, de acuerdo al modelo, que puede aparecer mucho antes en otro plano diferente al del análisis.

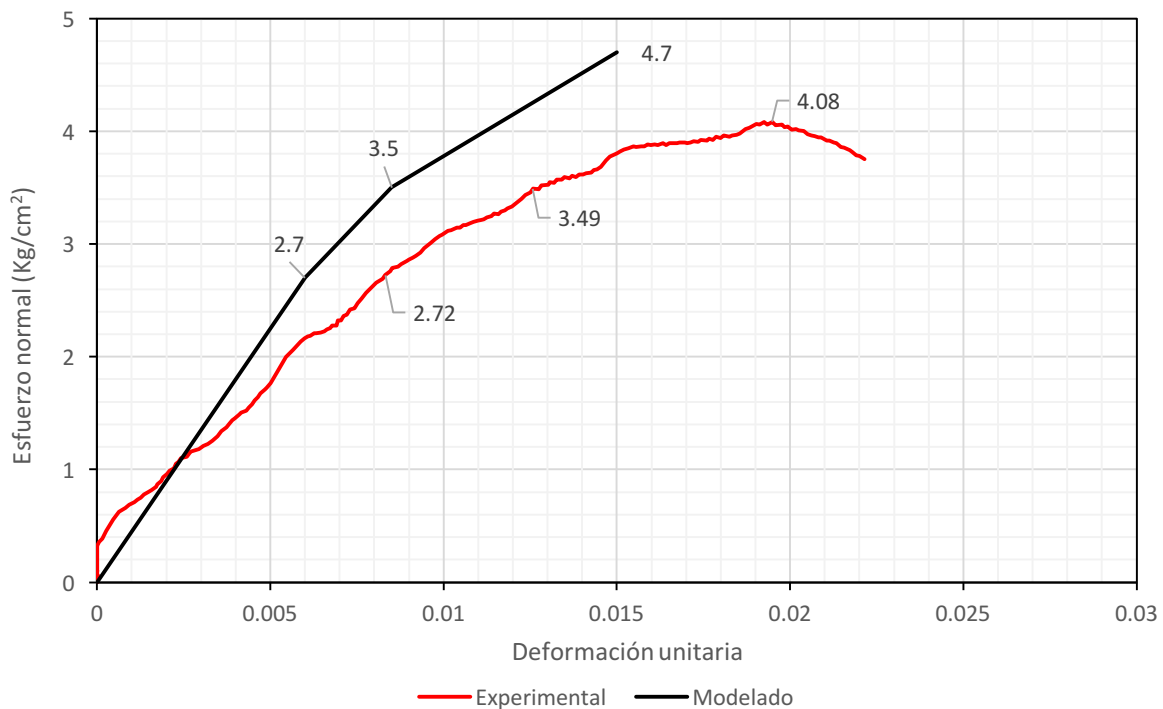


**Figura 4.10. a) Comportamiento de la probeta bajo condiciones de esfuerzo normal, b) Comportamiento de la probeta bajo condiciones de esfuerzo cortante; c) Figura representativa del esfuerzo cortante, resultado del proceso de simulación.**

Fuente: Elaboración propia



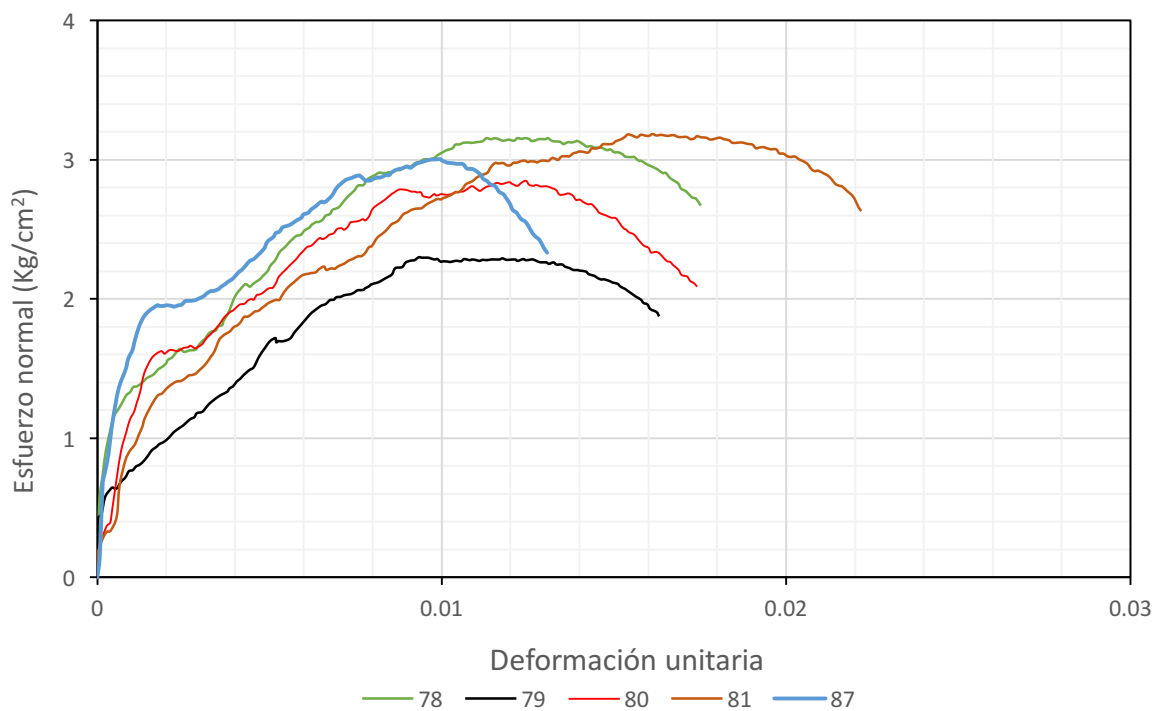
Como se mencionó en el proceso metodológico de ésta investigación, como resultado de la primera etapa, se procedió a la calibración de las pruebas bajo las condiciones que se consideraron como ideales, arrojando el comportamiento mostrado en la Figura 4.11 el cual está dirigido al análisis del esfuerzo normal presentado y la deformación unitaria de los especímenes, es preciso mencionar que la decisión acerca de la selección de las condiciones ideales tuvo una mayor relevancia debido a la tendencia en el comportamiento de las dos pruebas (pruebas físicas y pruebas simuladas).



**Figura 4.11 Comparativa entre los resultados de la prueba de laboratorio y la simulación.**  
**Fuente: Elaboración propia**

Dentro de la segunda etapa de los resultados, en donde una vez obtenidas las condiciones ideales para lograr representar las condiciones de esfuerzo en la prueba de tensión directa, se procedió a la realización de más pruebas físicas (Figura 4.12) para obtener una serie de datos que el *software* requeriría, además de así poder verificar que el comportamiento de las probetas de concreto asfáltico estuviera dentro de los parámetros que en un inicio habían sido considerados para esas condiciones de velocidad, carga y temperatura.

Para lograr la calibración del modelo de elemento finito, se procedió a la activación del modelo viscoelástico de Maxwell, el cual de acuerdo al ambiente del *software*, fue ingresado por medio de una matriz, que en sus celdas C46-C50, en las 5 columnas que el programa presenta, serán colocados los módulos de cortante ( $G$ ) en  $\text{kg/cm}^2$  y módulo de compresibilidad ( $K$ ) en  $\text{kg/cm}^2$ , éstos parámetros fueron obtenidos de las pruebas que se realizaron en el laboratorio (Tabla 4.5, 4.6 y 4.7).



**Figura 4.12. Comportamiento de la pruebas bajo condiciones ideales del ensayo (Temperatura 20°C, Ranura 2cm, Velocidad de 1 mm/min). Fuente: Elaboración propia**

**Tabla 4.5. Propiedades mecánicas de los especímenes con ranura de 2 cm, a distintas velocidades de aplicación y temperatura.**

Temperatura (°C)	Velocidad (mm/min)	Esfuerzo normal ( $\sigma$ ) (Kg/cm <sup>2</sup> )	Módulo de elasticidad ( $E$ ) (Kg/cm <sup>2</sup> )	Módulo de Cortante ( $G$ ) (Kg/cm <sup>2</sup> )	Módulo de compresibilidad ( $K$ ) (Kg/cm <sup>2</sup> )	Módulo de viscosidad ( $\eta$ ) (Kg/cm <sup>2</sup> *s)
10	0.5 (1)	3.49	273.34	91.72	4,555.67	901.41
	0.5 (2)	4.96	463.29	155.47	7,721.50	1712.10
	0.5 (3)	7.06	538.77	180.80	8,979.50	2413.17
	1 (1)	3.31	94.97	31.87	1,582.83	295.66
	1 (2)	3.23	121.09	40.63	2,018.17	1131.22
	1 (3)	2.58	204.40	68.59	3,406.67	693.56
	2 (1)	2.03	105.05	35.25	1,750.83	505.49
	2 (2)	6.92	564.15	189.31	9,402.50	846.35
	2 (3)	6.36	516.16	173.21	8,602.67	1627.89
20	0.5 (1)	3.03	284.22	95.38	4,737.00	2094.00
	0.5 (2)	1.96	197.55	66.29	3,292.50	1086.02
	0.5 (3)	1.67	128.80	43.22	2,146.67	563.50
	1 (1)	2.39	202.19	67.85	3,369.83	744.15
	1 (2)	3.47	277.88	93.25	4,631.33	749.18
	1 (3)	4.08	256.50	86.07	4,275.00	445.04
	2 (1)	2.74	182.12	61.11	3,035.33	509.93
	2 (2)	4.63	315.98	106.03	5,266.33	675.33
	2 (3)	4.96	324.64	108.94	5,410.67	788.90
30	0.5 (1)	0.94	309.15	103.74	5,152.50	75.10
	0.5 (2)	0.96	169.33	56.82	2,822.17	69.65
	0.5 (3)	1.29	177.10	59.43	2,951.67	58.57
	1 (1)	1.96	183.56	61.60	3,059.33	513.72
	1 (2)	1.83	152.69	51.24	2,544.83	435.61
	1 (3)	0.95	261.30	87.68	4,355.00	397.54
	2 (1)	1.44	404.10	135.60	6,735.00	375.97
	2 (2)	1.09	318.80	106.98	5,313.33	262.38
	2 (3)	1.88	99.47	33.38	1,657.83	447.95

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 4.6. Propiedades mecánicas de los especímenes con ranura de 3 cm, a distintas velocidades de aplicación y temperatura.**

Temperatura (°C)	Velocidad (mm/min)	Esfuerzo normal ( $\sigma$ ) (Kg/cm <sup>2</sup> )	Módulo de elasticidad (E) (Kg/cm <sup>2</sup> )	Módulo de Cortante (G) (Kg/cm <sup>2</sup> )	Módulo de compresibilidad (K) (Kg/cm <sup>2</sup> )	Módulo de viscosidad ( $\eta$ ) (Kg/cm <sup>2</sup> *s)
10	0.5 (1)	5.76	1,408.80	472.75	23,480.00	1286.03
	0.5 (2)	8.14	953.51	319.97	15,891.83	2420.37
	0.5 (3)	7.29	878.15	294.68	14,635.83	2560.64
	1 (1)	7.03	439.61	147.52	7,326.83	1894.54
	1 (2)	5.30	283.03	94.98	4,717.17	1443.19
	1 (3)	8.48	958.25	321.56	15,970.83	1504.52
	2 (1)	7.83	532.38	178.65	8,873.00	1273.10
	2 (2)	9.42	499.09	167.48	8,318.17	733.86
	2 (3)	7.71	435.23	146.05	7,253.83	946.50
20	0.5 (1)	2.89	118.44	39.74	1,974.00	998.03
	0.5 (2)	2.84	180.91	60.71	3,015.17	963.98
	0.5 (3)	2.63	131.98	44.29	2,199.67	791.97
	1 (1)	2.39	122.94	41.26	2,049.00	545.85
	1 (2)	2.74	148.16	49.72	2,469.33	362.91
	1 (3)	8.51	649.65	218.00	10,827.50	2657.29
	2 (1)	6.28	415.85	139.55	6,930.83	1417.47
	2 (2)	6.63	494.64	165.99	8,244.00	905.37
	2 (3)	4.44	379.58	127.38	6,326.33	796.57
30	0.5 (1)	-	-	-	-	-
	0.5 (2)	2.17	266.61	89.47	4,443.50	652.36
	0.5 (3)	2.20	469.43	157.53	7,823.83	821.15
	1 (1)	1.46	47.57	15.96	792.83	385.64
	1 (2)	2.79	335.41	112.55	5,590.17	1012.03
	1 (3)	3.27	195.77	65.69	3,262.83	806.63
	2 (1)	3.42	484.88	162.71	8,081.33	503.32
	2 (2)	2.80	212.08	71.17	3,534.67	648.97
	2 (3)	3.35	335.32	112.52	5,588.67	483.38

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 4.7. Propiedades mecánicas de los especímenes con condiciones ideales.**

Temperatura (°C)	Velocidad (mm/min)	Esfuerzo normal ( $\sigma$ ) (Kg/cm <sup>2</sup> )	Módulo de elasticidad (E) (Kg/cm <sup>2</sup> )	Módulo de Cortante (G) (Kg/cm <sup>2</sup> )	Módulo de compresibilidad (K) (Kg/cm <sup>2</sup> )	Módulo de viscosidad ( $\eta$ ) (Kg/cm <sup>2</sup> *s)
20	1 (78)	3.15	351.60	117.99	5,860.00	1490.60
	1 (79)	2.30	291.63	97.86	4,860.50	844.83
	1 (80)	2.85	303.70	101.91	5,061.67	1140.35
	1 (81)	3.18	250.80	84.16	4,180.00	1222.88
	1 (87)	3.01	396.68	133.11	6,611.33	1130.94

Fuente: Elaboración propia

El proceso de validación de la prueba se generó mediante la evaluación y aplicación de las propiedades mecánicas obtenidas de las distintas pruebas de laboratorio, a los especímenes, y que posteriormente fueron incorporadas en la simulación; se extrajeron los resultados y fueron procesados, derivándose en la correcta relación entre las pruebas físicas y las analizadas en *software*, puesto que los planos de falla y de comportamiento son claramente similares tal cual se puede apreciar en la Figura 4.13.

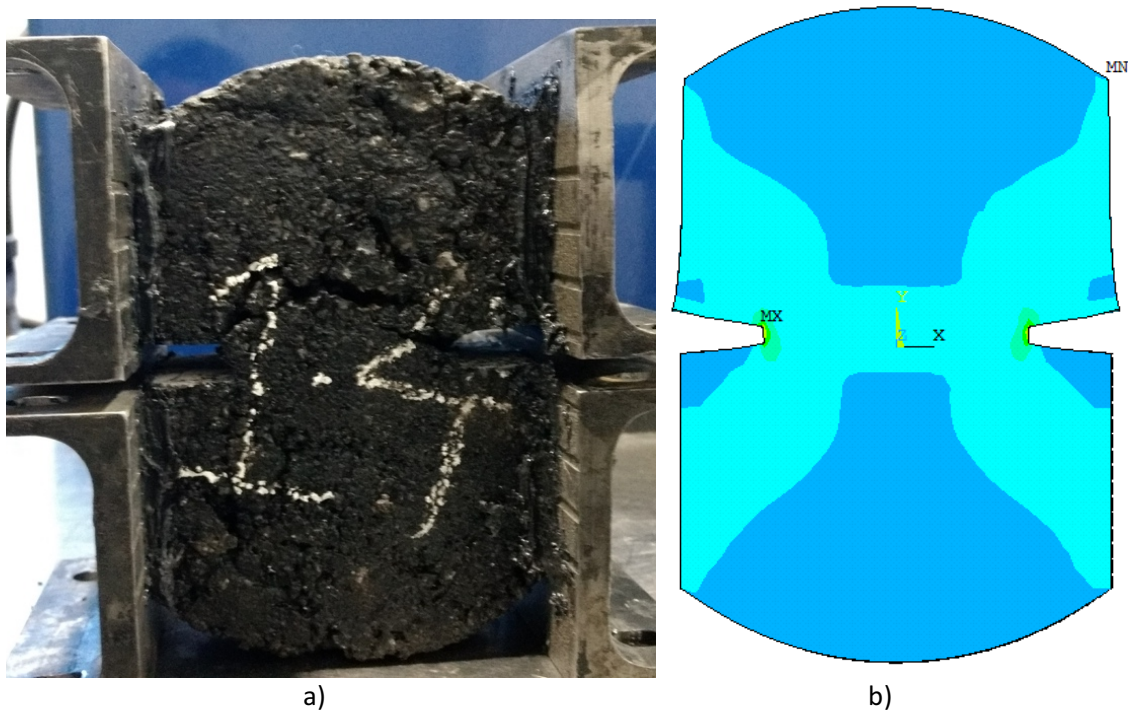
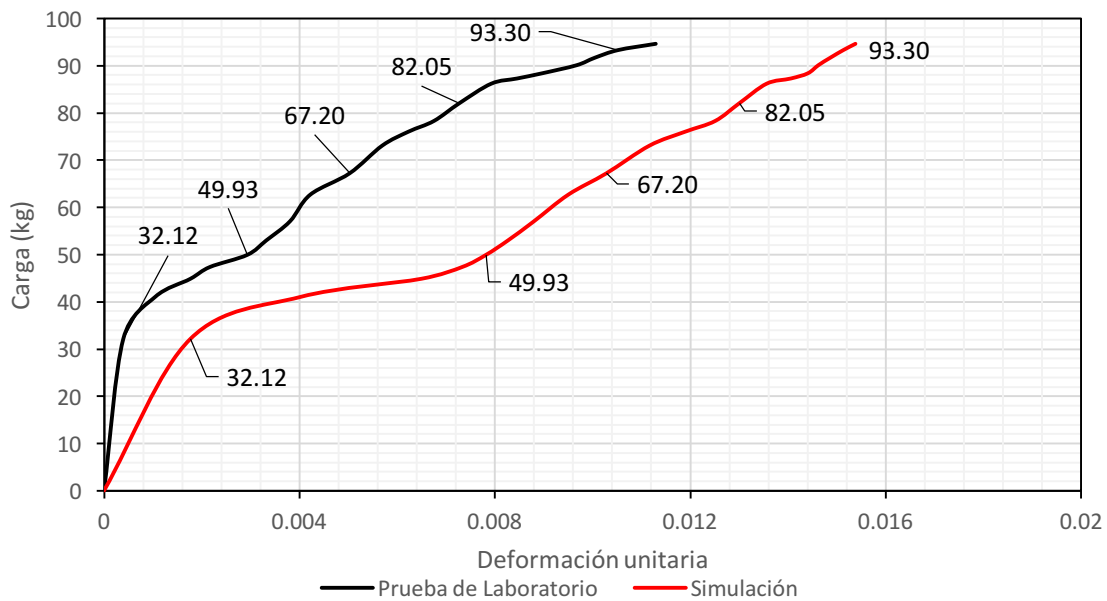


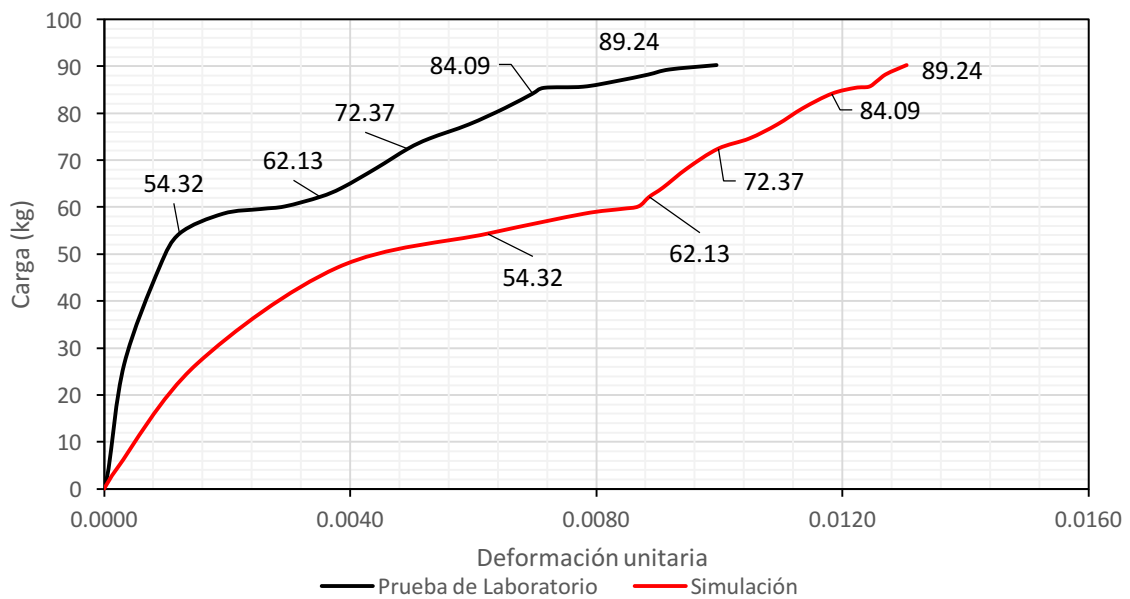
Figura 4.13 Comparativa de los planos de falla, a) Probeta física, b) Probeta simulada  
Fuente: Elaboración propia

Concluyendo en que, éstos datos fueron correctos, puesto que la variación entre los resultados del comportamiento de las probetas de asfalto en la prueba de tensión directa y la simulación realizada en el *software*, tenían por variación un rango entre el 30% y el 35%, éste resultado fue obtenido mediante el método de del cálculo del error de resultado indirecto, el cual considera el análisis de dos bases de datos a partir de distintas magnitudes que están relacionadas una con la otra, por lo cual, para el análisis de los resultados de las pruebas de tensión directa y las simulaciones, se ajusta bastante bien (Figura 4.14, 4.15 y 4.16); éste

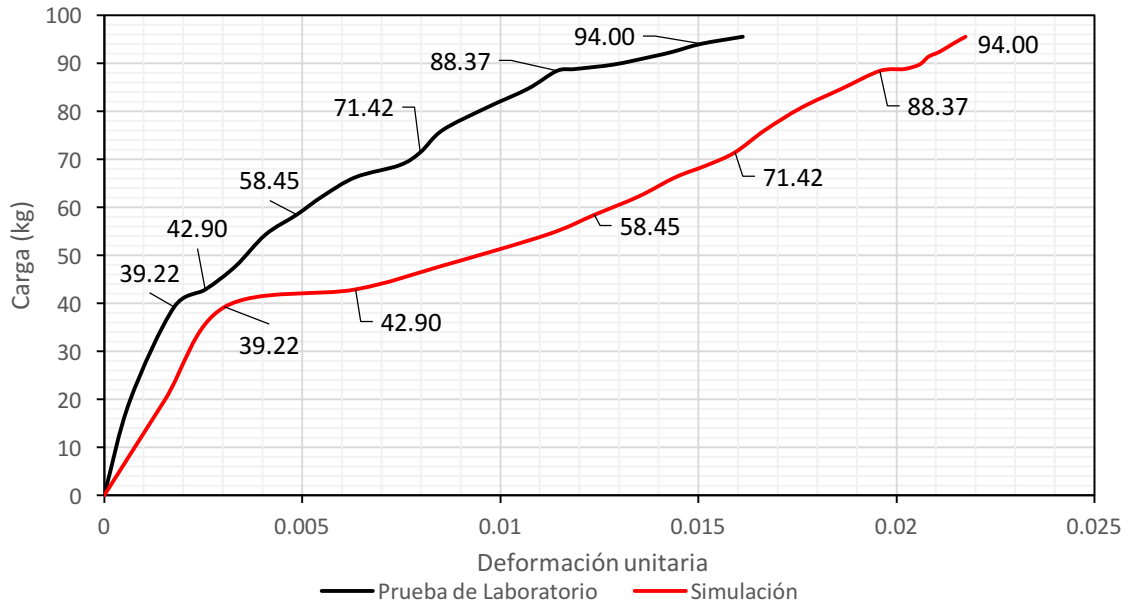
resultado fue considerado como congruente, puesto que el ambiente de la simulación consideraba los elementos como medios continuos.



**Figura 4.14. Comparativa entre la prueba de laboratorio y la simulación para el espécimen No.78.**  
Fuente: Elaboración propia



**Figura 4.15. Comparativa entre la prueba de laboratorio y la simulación para el espécimen No.87.**  
Fuente: Elaboración propia



**Figura 4.16. Comparativa entre la prueba de laboratorio y la simulación para el espécimen No.81.**  
**Fuente: Elaboración propia**

## 5 Conclusiones

Con los resultados de la modelación así como las pruebas de laboratorio, podemos deducir que bajo la hipótesis de la elasticidad lineal, las mejores condiciones para representar los estados de tensión de los especímenes se reducen a una temperatura de 20°C, velocidad de deformación de 1 mm/min y una ranura de 2 cm. Lo que se puede observar en el desarrollo del ensayo son los siguientes puntos:

- Se hace presente el efecto viscoelástico en el material, sin llegar a impactar directamente en los límites de proporcionalidad.
- La probeta se mantiene más rígida, permitiendo una mayor representación de los esfuerzos sin comprometer demasiado los resultados.
- Las condiciones que fueron seleccionadas como las ideales consideran la componente elástica y viscosa del material, lo que se asemeja a las condiciones reales de servicio.

El ensaye propuesto resulta ser adecuado desde esta perspectiva, concluyendo en que la prueba de tensión directa resulta ser importante en comparación con algunas otras pruebas de su misma categoría, ya que se genera un estado de tensión pura y no una tensión por compresión, como se pudiera llegar a realizar en pruebas como la tensión indirecta o el *Semi-circular Bending Test*; además no sólo desde el punto de vista equiparable, sino en su proceso de realización; ya que la prueba desarrollada en esta investigación resultó ser sencilla en cuanto a su procedimiento; desde la elaboración de los especímenes, su corte y ranurado; así como el montaje en el sistema de sujeción propuesto, todo lo anterior debido al buen uso de materiales y equipo simple de maniobrar.



Debe entenderse que las limitaciones del modelo no permiten llegar a resultados exactos como se pudieran arrojar un ensaye físico; puesto que en el desarrollo de las simulaciones se considera al espécimen como un medio continuo, mientras que en la realización de los ensayes de laboratorio se pueden apreciar visualmente las discontinuidades naturales en la mezcla asfáltica (agregado pétreo y asfáltico), esto puede apreciarse en la superficie de falla que sigue el perfil del material pétreo; a lo largo de la capa de ligante asfáltico que lo recubre, así como el reacomodo del medio granular durante el proceso de ensaye contribuyen fuertemente a la variabilidad de los resultados, sin embargo, el análisis de comportamiento de los esfuerzos de carga tanto en la prueba física como en la simulada, tienen una tendencia similar, llegando algunas de ellas a tener el mismo valor de fractura. Aun así, los valores de resistencia medidos directamente en una prueba de tensión siempre serán valores evidentes y no teóricos, que deberán ser considerados bajo la reserva de cada caso.

Bajo las consideraciones anteriores es necesario mencionar que el plano de falla que se presentó en todas las probetas, fue el en sentido XZ; debido al esfuerzo cortante máximo, lo que resulta de la energía de deformación por cortante en el punto de fluencia debido a la tensión simple, esto sugiere que el esfuerzo cortante máximo desempeña un rol importante y supone que la fluencia del material depende únicamente del máximo esfuerzo cortante que se alcanza dentro de la probeta.

Si bien el comportamiento mecánico de la mezcla asfáltica fue el esperado, se pueden apreciar que en el rango de temperatura de 30°C la componente viscosa está presente en gran parte, lo cual denota que se podrían presentar deformaciones permanentes; que para los fines de diseño de pavimento es un valor que debe ser considerado y así evitar posibles daños a una estructura carretera.

En el proceso de elaboración de ésta investigación; es necesario mencionar que uno de los objetivos se cumplió de forma concreta, puesto que en un inicio la finalidad de la aplicación del modelo de elemento finito fue para poder lograr la

validación de la prueba, ya que si bien los resultados evidentes en las pruebas de laboratorio podían ser representativas, era necesario analizar el comportamiento de las pruebas mediante la observación de los planos de falla así como los esfuerzos internos que se generarían dentro de la probeta de concreto asfáltico, ya que como era de esperarse, resulta complicado la medición de este parámetro de manera física, puesto que una mezcla asfáltica es un elemento discontinuo, por lo que precisar una falla resulta un tanto complicado.

Durante el desarrollo de las pruebas de laboratorio se encontraron varios puntos que deben ser sumamente cuidados durante el proceso de elaboración de la prueba de tensión estática, ya que al usar un pegamento epóxico; se debe tener la atención requerida para mezclarla y colocarla en el tiempo justo, puesto que de pasar un periodo considerable; puede llegar a bajar las propiedades de adherencia con la probeta de asfalto. De igual forma, la unión entre la probeta y el mecanismo de sujeción debe estar realizado con la presión necesaria para que los dos elementos queden sujetos uno del otro de forma correcta; asegurando de ésta manera que al momento de realizar la prueba, sea la probeta de concreto asfáltico la que esté oponiendo resistencia al desplazamiento y no tenga deficiencia. Resulta oportuno hacer énfasis en la forma en la cual el ensaye de tensión directa mide los desplazamientos verticales de los especímenes por medio de un transductor, el cual debe de encontrarse en contacto directo con las pastilla; puesto que de lo contrario a medida que el ensayo se desarrolle, éste podrá o no registrar adecuadamente los desplazamientos, ya que posterior a la realización de la prueba, ésta información será necesaria para poder calcular de forma correcta los esfuerzos normales que se están generando, así como podrá significar en la correcta interpretación de los resultados comparativos con los que se simulan.

## 6 Referencias

AASHTO (2014). Standard method of test for uncompact void content of fine aggregate. Normativa: AASHTO T 304

AASHTO (2015). Standard method of test for determining dynamic modulus of hot mix asphalt concrete mixtures. Normativa: AASHTO T 342-11

AASHTO (1998). Standard test method for determining the creep compliance and strength of hot mix asphalt (HMA) using the indirect tensile test device. Normativa: AASHTO TP 9

AASHTO (2014). Standard test method for resistance of coarse aggregate to degradation by abrasion in the micro-deval apparatus. Normativa: AASHTO TP 58.

Ahmed A. and Erlingsson S. (2016), Viscoelastic response modelling of a pavement under moving load. *Transportation Research Procedia*. (14):748-757.

Aliha M.R. and Sarbijan M.J. (2016), Effects of loading, geometry and material properties on fracture parameters of a pavement containing top-down and bottom-up cracks. *Engineering Fracture Mechanics*. (166):182-197.

Al-Qadi I.L., Wang H. and Tutumluer E. (2010), Dynamic analysis of thin asphalt pavements by using cross-anisotropic stress-dependent properties for granular layer. *Transportation Research Board*. (2154):156-163.

AMAAC (2011). Determinación del valor de azul metileno para filler y finos. Normativa: AMAAC RA 05/2011.

AMAAC (2010). Desprendimiento por fricción en la fracción gruesa de materiales pétreos para mezclas asfálticas. Normativa: AMAAC RA 08/2010.

Arana J.L. and González J.J. (2002), Mecánica de fractura, *Mecanismos de fractura*, Ed. Universidad del país vasco, Euskal Herriko Unibertsitateko, 25-81.

ASTM (2013). Standard test method for soundness of aggregates by use of sodium sulfate or magnesium sulfate. Normativa: ASTM C 88

ASTM (2004). Standard test method for relative density (specific gravity) and absorption of coarse aggregate. Normativa: ASTM C 127

ASTM (2014). Standard test method for resistance to degradation of small-size coarse aggregate by abrasion and impact in the Los Angeles machine. Normativa: ASTM C 131

ASTM (2014). Standard test method for sieve analysis of fine and coarse aggregates. Normativa: ASTM C 136.

ASTM (2017). Standard test method for splitting tensile strength of cylindrical concrete specimens. Normativa: ASTM C 496.

ASTM (2003). Standard practice for reducing samples of aggregate to testing size. Normativa: ASTM C 702.

ASTM (2014). Standard test method for sand equivalent value of soils and fine aggregate. Normativa: ASTM D 2419.

ASTM (2009). Standard test method for dynamic modulus of asphalt mixtures. Normativa: ASTM D 3497-79

ASTM (2003). Standard test method for indirect tension test for resilient modulus of bituminous mixtures. Normativa: ASTM D 4123-82.

ASTM (2010). Standard test method for flat particles, elongated particles, or flat and elongated particles in coarse aggregate. Normativa: ASTM D 4791.

ASTM (2017). Standard test method for determining the percentage of fractured particles in coarse aggregate. Normativa: ASTM D 5821.

Barksdale R.D. and Miller J.H. (1977), Development of equipment and Techniques for evaluating Fatigue and rutting characteristics of asphalt concrete mixes, *Institute of Technology*, Report SCEGIT-77-147.

Bonnot, J. (1986), Asphalt Aggregate Mixtures, *Transportation Research Board*, (1096):42-50.

Braham A., W. Buttlar and M. Marateanu. (2007), Effect of Binder type, Aggregate and Mixture Composition in the fracture energy of hot mix asphalt in cold climates. *Transportation Research Record: Journal of the transportation research Board*. (2001):102-109.

Brown R., Kandhal P. and J. Zhang (2001), Performance Testing for Hot Mix Asphalt, *National Center for Asphalt Technology*, (1):01-05.

Cárdenas Jaleydi and Fonseca Elsa (2009), Modelación del comportamiento reológico del asfalto convencional y modificado con polímero reciclado, estudiado desde la relación viscosidad-temperatura. *Revista EIA*. (12):125-137.

Chen M.Z., Zheng J., Li F.Z., Wu S.P., Lin J.T. and Wan L. (2015), Thermal performances of asphalt mixtures using recycled tire rubber as mineral filler. *Road materials and pavement design*. (16):379-391.

Chen J., H. Wang and L. Li. (2015), Virtual testing of asphalt mixture with two-dimensional and three-dimensional random aggregate structures. *International Journal of Pavement Engineering*, (18):1-13.

Coleri E., J.T. Harvey, K. Yang and J.M. Boone. (2012), Development of a micromechanical finite element model from computed tomography images for shear modulus simulation of asphalt mixtures. *Construction and Building Materials*. (30):783-793.

Dauzats M. and Rampal A. (1987), Mechanism of Surface cracking in wearing courses, *International conference on the structural design*, TRID, Ann Arbor, USA, (16):232-247.

Dawson A.R., Dehedzi P.K., Hall M.R., Wang J. and Isola R. (2012), Enhancing thermal properties of asphalt materials for heat storage and transfer applications. *Road Materials Pavement Design*. (13):784-803.

Dye D. (2015), Mechanical Behavior: Continuum Mechanics. MSE203 *Mechanical Applications*.

Elliot R.P., Ford M.C. and Ghanim M. (1991), Effect of aggregate gradation variation on asphalt concrete mix properties, *Transportation Research Board*, (1317):52-60.

Erlingsson S. and Ahmed A.W. (2013), Evaluation of pavement deformation models for unbound granular materials using accelerated pavements tests. *Road Materials and Pavement Design*. (14):178-195.

Fombuena V., Boronat T., Sánchez-Nácher L., García-Sanoguera d. and R. Balart (2017), Usefulness of viscoelastic models in learning polymer materials engineering, *Modelling in Science Education and Learning*, (10):1-12.

Federal Highway Administration (2003), *Distress Identification Manual for Long-Term Pavement Performance Program*, Publication No. FHWA-RD-03-031.

Feng D., Yi J. and Wang D. (2013), Performance and thermal evaluation of incorporating waste ceramic aggregates in wearing layer of asphalt pavement. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*. (25):857-863.

Fjaer E., Holt R.M., Horsrud P., Raaen A.M. and Risnes R. (2008), *Petroleum related rock Mechanics 2nd Edition*. Developments in Petroleum Science. 2nded. (53).

Freeme C.R. and Marais C.P. (1973), Thin bituminous surfaces: Their fatigue behavior and prediction, *Highway research board*, (140):158-179.

García J., García C., Buisson J. Cortés C. and J. Potti (2009), *Pavimentos de larga duración*, VIII Congreso Nacional de Firmes, Valladolid.

Gómez Hernández, J. M. and Solano Gómez, D. H. (2016), Determinación del agregado fino (agregado de río o agregado de peña) con mayor adhesividad al ligante asfáltico. Trabajo de Grado. Universidad Católica de Colombia. Facultad de Ingeniería. Programa de Ingeniería Civil. Bogotá, Colombia.

Griffith A.A. (1921), The phenomena of rupture and flow in solids. *Philosophical transactions of the royal society a: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*. (221):582-593.

Hainian Wang, Chen Zhang, Lian Yang and Zhanping You (2013), Study on the rubber modified asphalt mixtures cracking propagation using the extended finite element method, *Construction and building Materials*, (47):223-230.

Hall M.R., Dehdezi P.K., Dawson A.R., Grenfell J. and Isola J. (2012), Influence of the thermos-physical properties of pavement material son the evolution of temperature depth profiles in different climatic regions. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*. (24):32-47.

Jajliardo A. (2003), Development of specification criteria to mitigate top-down cracking, *Master Thesis of engineering*, University of Florida, USA.

Kennedy T.W. and Anagnos J.N. (1983), Procedures for the static and repeated load Indirect Tensile Tests. *Center of transportation research*, (183):1-14.

Khosla N.P. and Omer M.S. (1985), Characterization of asphaltic Mixtures for prediction of pavement performance, *Transportation Research Board*, (1034):47-55.

Kunst P. A. J. C. (1989), Surface Cracking on Asphalt Layers, *Working Committee*, (12):1-198.

Koh C., Lopp G. and Roque R. (2009), Development of a dog-bone direct tension test (DBDT) for asphalt concrete, *Advanced Testing and Characterization of bituminous materials*, (1): 585-596.

Lawrence M. (1977), Introduction to the mechanics of a continuous medium. Prentice-Hall Series in Engineering of the Physical sciences. Upper Saddle River, United States: Pearson Education.

Leon William (2009), Basic of fracture mechanics as applied to structural integrity, *The abdu salam (International Center for Theoretical Physics)*, (24):1-59.

Li M., Wang H., Xu G. and Xie Pengyu (2017), Finite element modeling and parametric analysis of viscoelastic and nonlinear pavement responses under dynamic FWD loading. *Construction and Building Materials*. (141):23-25.

Li X., Braham A., Marasteanu M., Buttlar W. and Williams R (2008), Effect of factors affecting fracture energy of asphalt concrete at low temperature, *Road materials and pavement design*, (9):397-416.

Liu P., J. Hu, D. Wang, M. Oeser, S. Alber, W. Ressel and G.C. Fall. (2017), Modelling and evaluation of aggregate morphology on asphalt compression behavior. *Construction and Building Materials*. (133):196-208.

Lubliner J. (2006), Plasticity Theory. *Journal of Applied Mechanics* (59):1-540.

Majidzadeh K, Kauffmann E.M. and Ramsamooj D.V. (1971), Application of Fracture Mechanics in the Analysis of Pavement Fatigue, *Association of Asphalt Paving Technologists*, (61): 227-246.

Marsac P. (1992), L'essai de module complexe au LCPC, *Rapport Interne Section Matériaux de Chaussées*, (20):13-35.

Miró R., Martínez A., Pérez F., and Bianchetto H. (2005), Effect of Filler on the Aging Potential of asphalt mixtures. *Transportation Research Board: Journal of the transportation research Board*. (1901):10-17.

Monismith C.L., Chatti K. and Lysmer J. (1994) Dynamic finite element analysis of joined concrete pavements. *Transportation Research Board*. (1449):79-90.

N-CMT-4-04-001 (2015), Características de los materiales. Materiales para pavimentos. Secretaría de Comunicaciones y Transportes.

Nernas K. and Nunn M. (2004), A model for top-down reflection cracking in composite pavements, *Fifth international RILEM (Conference on reflective cracking pavements)*, (12):409-419.



Neumann J., J.W. Simon, K. Mollenhauer, and S. Reese. (2017), A framework for 3D synthetic mesoscale models of hot mix asphalt for the finite element method. *Construction and Building Materials*. (148):857-873.

Ozer H., Z.G. Ghauch, H. Dhasmana and I.L. Al-Qadi. (2016), Computational micromechanical analysis of the representative volume element of bituminous composite materials. *Mechanics of Time-Dependent Materials*. (20):441-453.

Padilla R. (2012), Demostración simple del valor del Módulo de Rigidez al Cortante, desde un enfoque continuo en el análisis tridimensional. *Sociedad Mexicana de Ingeniería*.

Pan P., Wu S., Xiao Y., Wang P. and Liu X. (2014), Influence of graphite on the thermal characteristics and anti-ageing properties of asphalt binder. *Construction and Building Materials*. (64):220-226.

Pell P.S. and Cooper K.E. (1975), Effect of Testing and Mix Variables on the Fatigue Performance of Bituminous Materials, *The Association of Asphalt Paving Technologists*, (44).

Pérez Jiménez F.E. (2001), Aplicación del ensayo BTB para determinar la Energía de Fractura y el comportamiento de las Mezclas Bituminosas, Laboratorio de Caminos Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, España.

Pérez Jiménez F., Valdez G. and Martínez A. (2011), Influencia de la temperatura y tipo de mezcla asfáltica en el comportamiento a fatiga de los pavimentos flexibles, *Revista de la Construcción*, (11):87-100.

Raithby K.D. (1972), Some effects of Loading History on the Fatigue Performances of Rolled Asphalt, *TRRL Report*, (496):1-91

Reyes Ortiz O. J. and Millán M. S. (2009), Influencia de la temperatura, la granulometría y el agua en la cohesión de mezclas asfálticas, *Ingeniería y Universidad*, (13):309-324.

Roberts F.L., Kandhal P.S., Brown R.E., Lee D.Y. and Kennedy T.W. (1996), Hot mix asphalt materials, Mixture design and construction, *National Asphalt Association*, (2):1-603

Saha G. and Biligiri K.P. (2014), Fracture damage evaluation of asphalt mixtures using Semi-circular Bending test based on fracture energy approach, *Engineering Fractures Mechanics*, (142):154-169.

Saha G. and Biligiri K.P. (2015), Fracture properties of asphalt mixtures using semi-circular bending test: A state of the art review a future research, *Construction and Building Materials*, (105):103-112.

Salazar Delgado Jorge (2013), Guía para la realización de ensayos y clasificación de asfaltos, emulsiones asfálticas y asfaltos rebajados, *Reglamento Técnico Centroamericano*, (1):1-25.

Sandoval H., Barrera Naranjo M. and Acuña C. J. (2011), *Asphalt Mixtures' Dynamic Modules Determination by Correlations*, (1):1-14.

UNE-EN 12697-25 (2006), Métodos de ensayo para mezclas bituminosa en caliente. Parte 25: Ensayo de compresión.

Van Dijk, W. (1975), Practical Fatigue Characterization of Bituminous Mixes, *The Association of Asphalt Paving Technologists*, (38):69-88.

Vásquez Monteros C.J. (2016), Factores de equivalencia de daño en pavimentos flexibles: Análisis para condiciones típicas de Argentina. Tesis Maestría, Universidad Nacional de La Plata, Buenos Aires, Argentina.

Velázquez R., Turos M., Marastenu M., Gison N. and Clyne T (2008), Investigation of low temperature cracking in asphalt mixtures using TSRST, *Pavement cracking: Mechanisms, modeling, detection, testing and case histories*, p.p. 405-414.

Vidal J. and Ossa A. (2011), Modeling and analysis of susceptibility to permanent deformation in asphalt mixtures, *Ingeniería de Construcción*. (26):129-149.

Wagoner M., Buttlar W. and Paulino G. (2005), Disk-Shaped Compact Tension Test for asphalt concrete fracture, *Experimental Mechanics*, (3):270-277.

Wang H. and Al-Qadi I.L. (2013), The importance of nonlinear anisotropic modeling of granular base for predicting maximum viscoelastic pavement responses under moving vehicular loading. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*. (139):29-38.

Wei X.X. and K.T. Chau (2013), Three dimensional analytical solution for finite circular cylinders subjected to indirect tensile test. *International Journal of Solids and Structures*. (15):1-43.

Xu Q. and Prozzi J.A. (2013), Static versus viscoelastic wave propagation approach for simulating loading effects on flexible pavement structure. *Construction and Building Materials*. (53): 584-595.

Ying G., Geng D., Huang X., Li G. (2017), Degradation evaluation index of asphalt pavement based on mechanical performance of asphalt mixture. *Construction and Building materials*. (140):75-81.

Zhou X., Wang S. and Zhou C. (2012), Thermal conduction and insulation modification in asphalt-based composite. *Sci-Technol*. (3):285-288.

# 7 Anexos.

## 7.1 Gráficas de Esfuerzo-Deformación de la prueba de tensión directa.

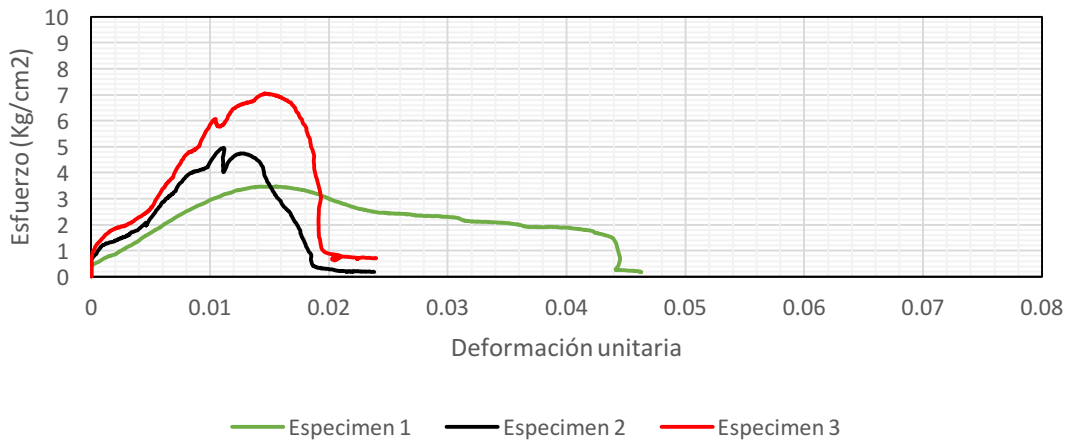


Figura 7.1. Condiciones de 10°C, Ranura de 2cm y Velocidad de 0.5mm/min.

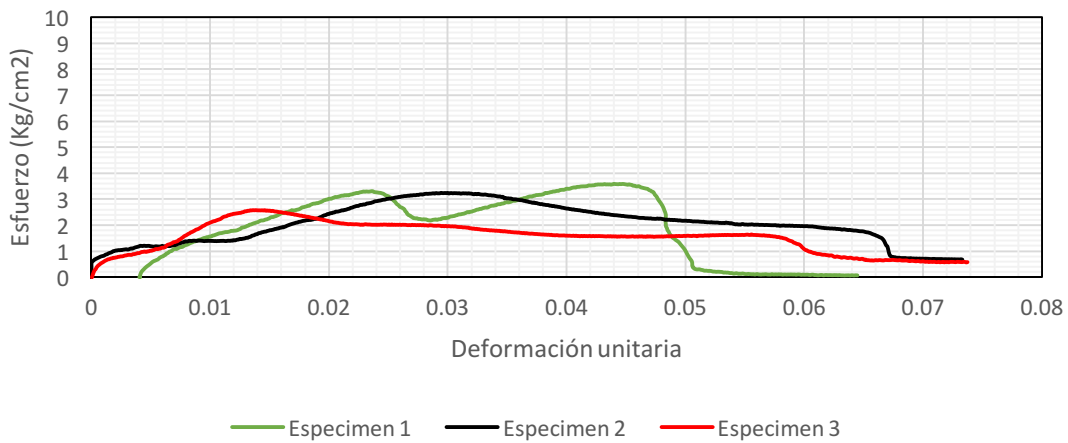


Figura 7.2. Condiciones de 10°C, Ranura de 2cm y Velocidad de 1 mm/min.

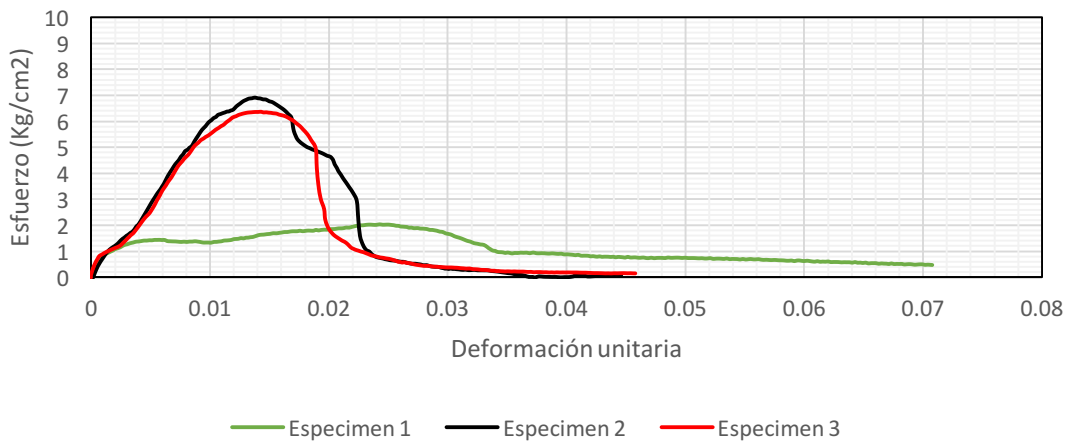
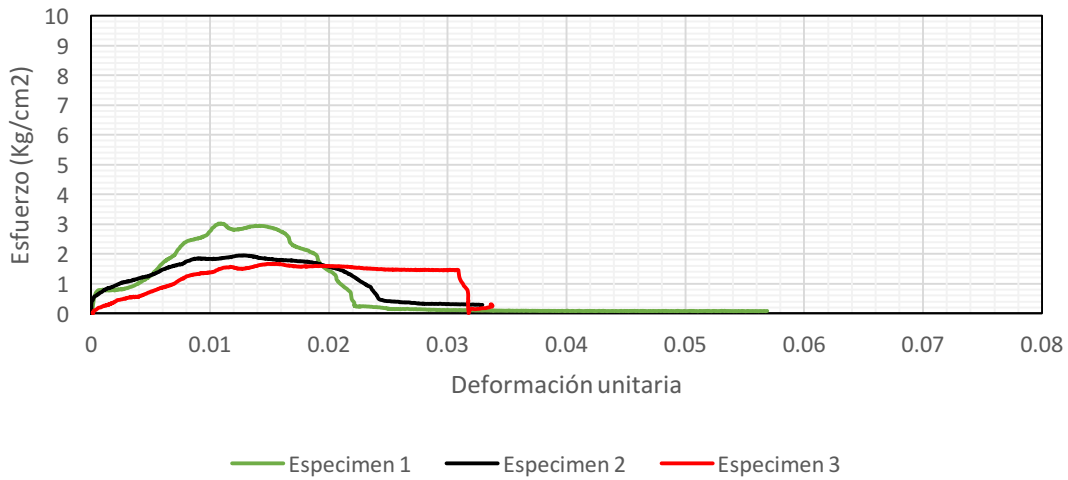
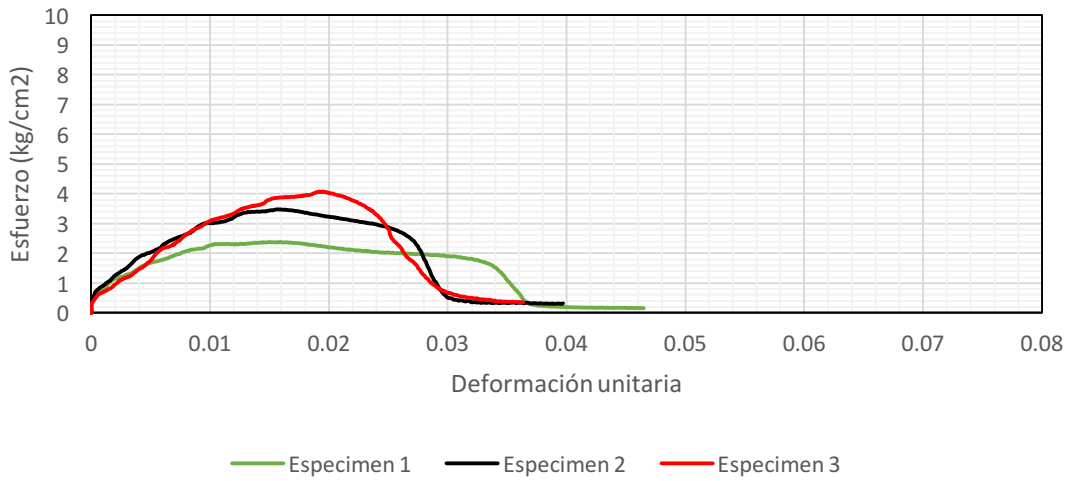


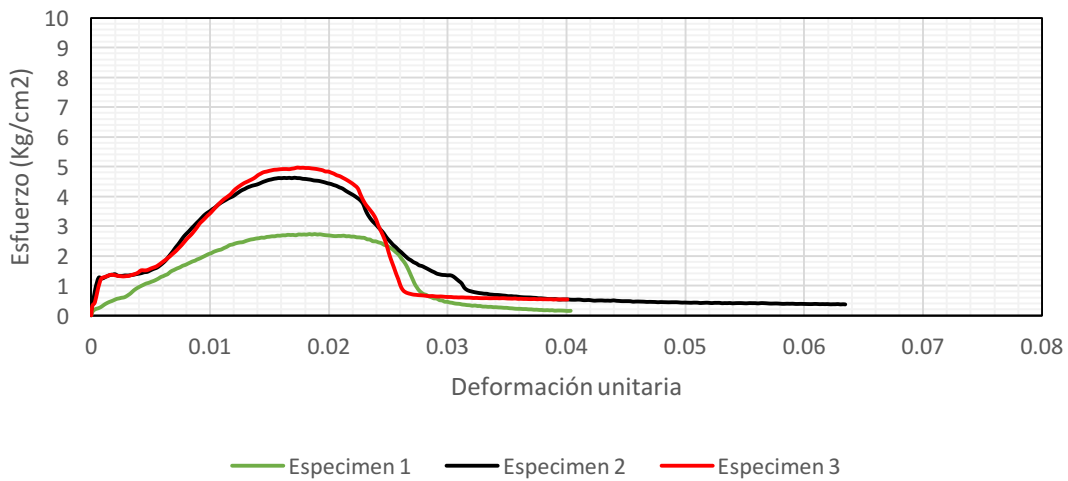
Figura 7.3. Condiciones de 10°C, Ranura de 2cm y Velocidad de 2 mm/min.



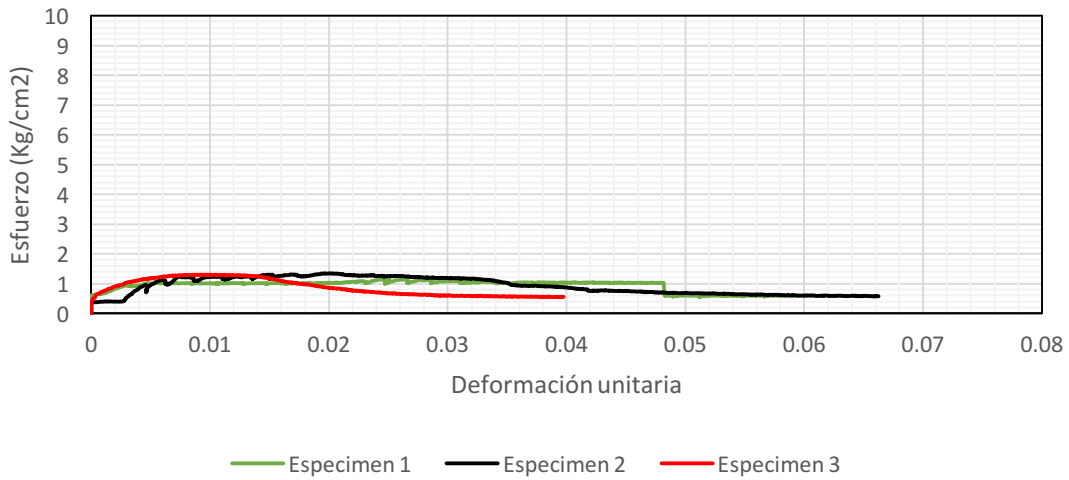
**Figura 7.4. Condiciones de 20°C, Ranura de 2cm y Velocidad de 0.5 mm/min.**



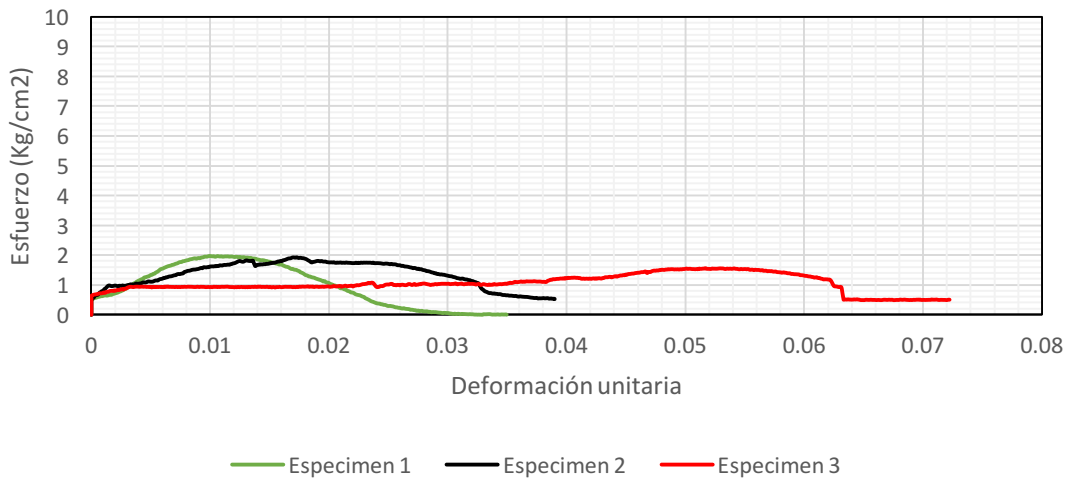
**Figura 7.5. Condiciones de 20°C, Ranura de 2cm y Velocidad de 1 mm/min.**



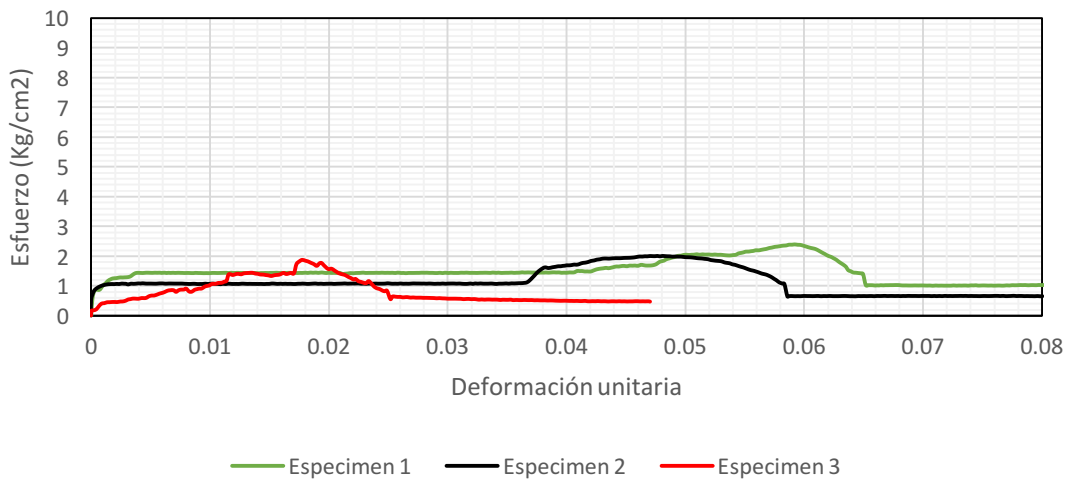
**Figura 7.6. Condiciones de 20°C, Ranura de 2cm y Velocidad de 2 mm/min.**



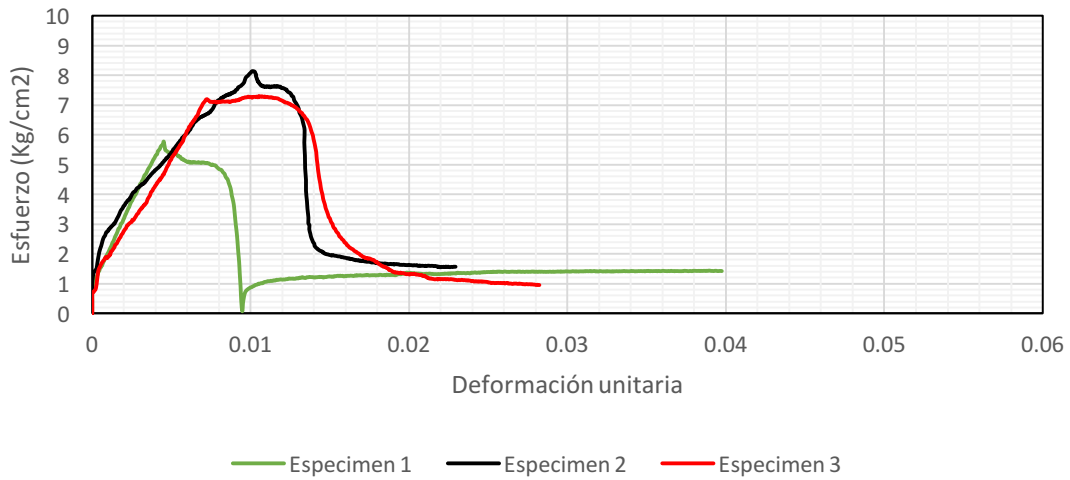
**Figura 7.7. Condiciones de 30°C, Ranura de 2cm y Velocidad de 0.5 mm/min.**



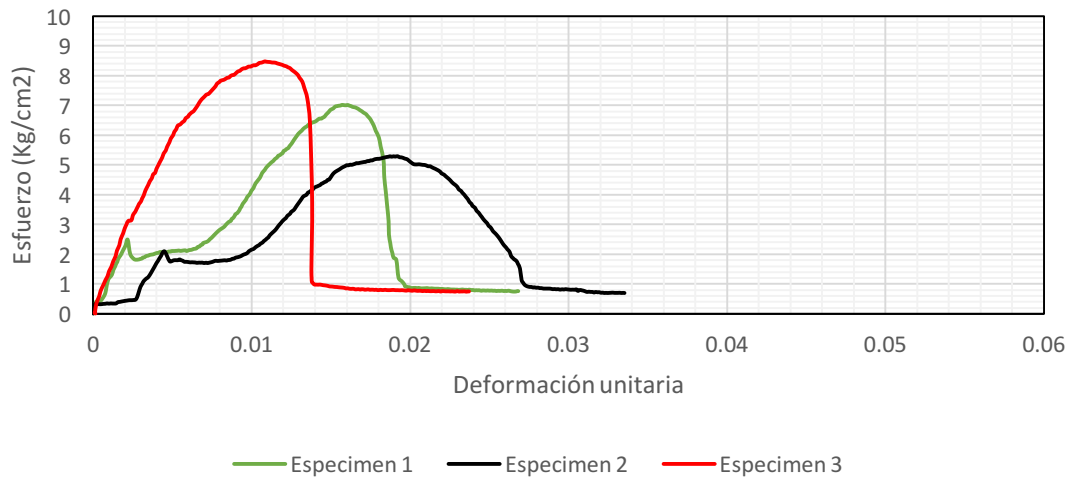
**Figura 7.8. Condiciones de 30°C, Ranura de 2cm y Velocidad de 1 mm/min.**



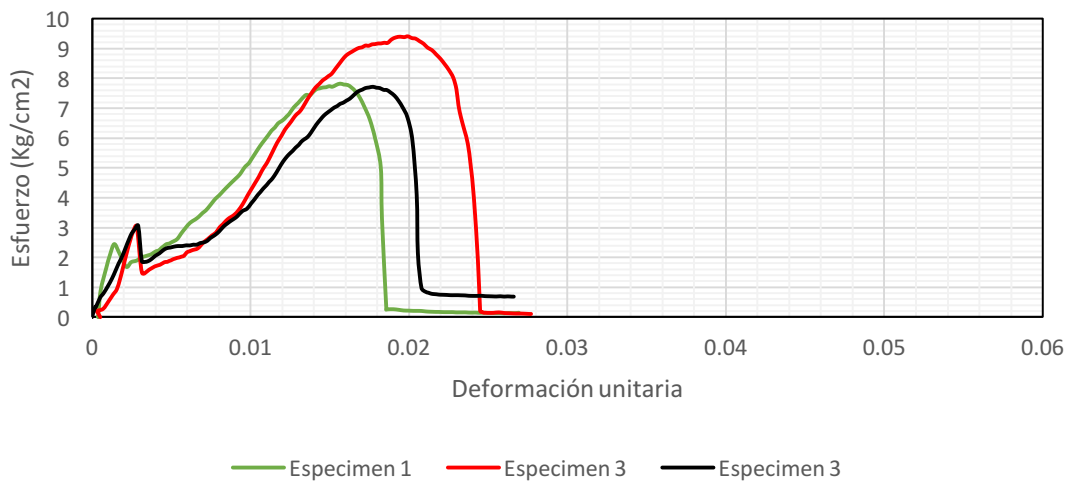
**Figura 7.9. Condiciones de 30°C, Ranura de 2cm y Velocidad de 2 mm/min.**



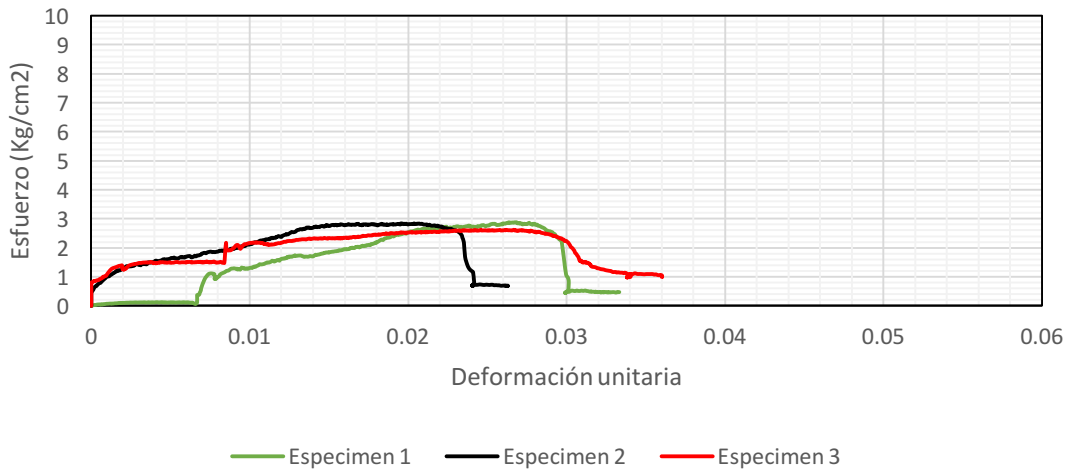
**Figura 7.10. Condiciones de 10°C, Ranura de 3cm y Velocidad de 0.5 mm/min.**



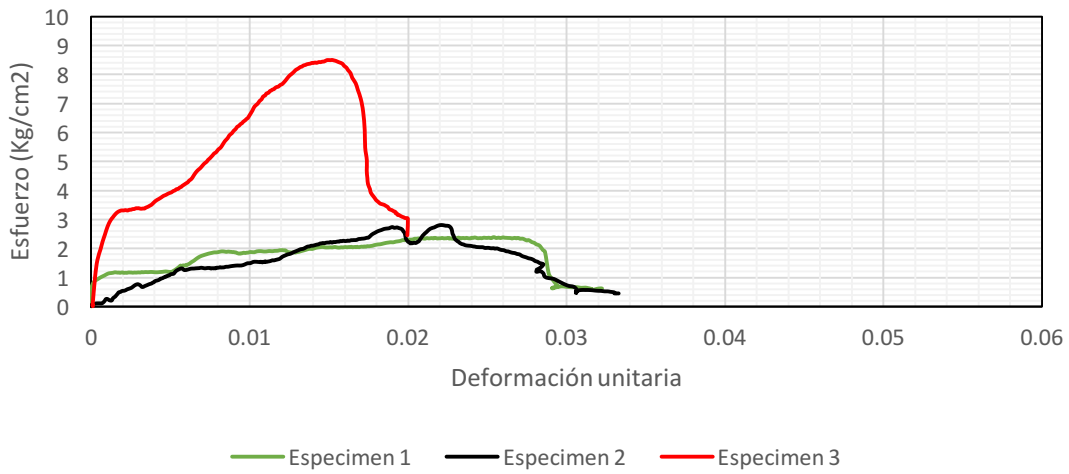
**Figura 7.11. Condiciones de 10°C, Ranura de 3cm y Velocidad de 1 mm/min.**



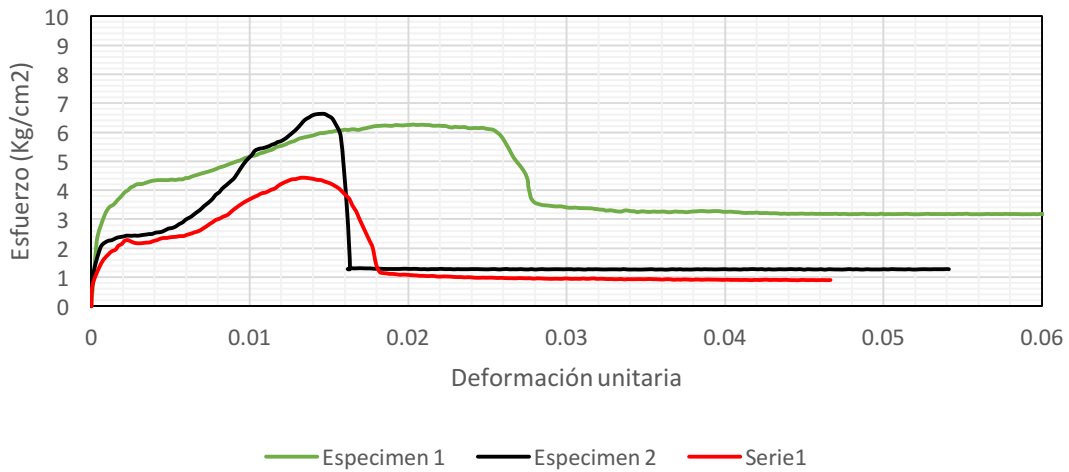
**Figura 7.12. Condiciones de 10°C, Ranura de 3cm y Velocidad de 2 mm/min.**



**Figura 7.13. Condiciones de 20°C, Ranura de 3cm y Velocidad de 0.5 mm/min.**

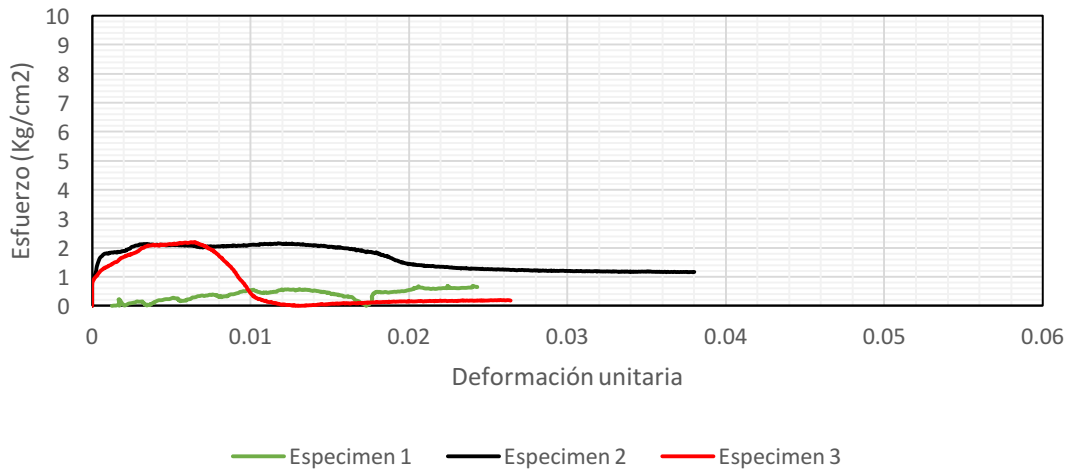


**Figura 7.14. Condiciones de 20°C, Ranura de 3cm y Velocidad de 1 mm/min.**

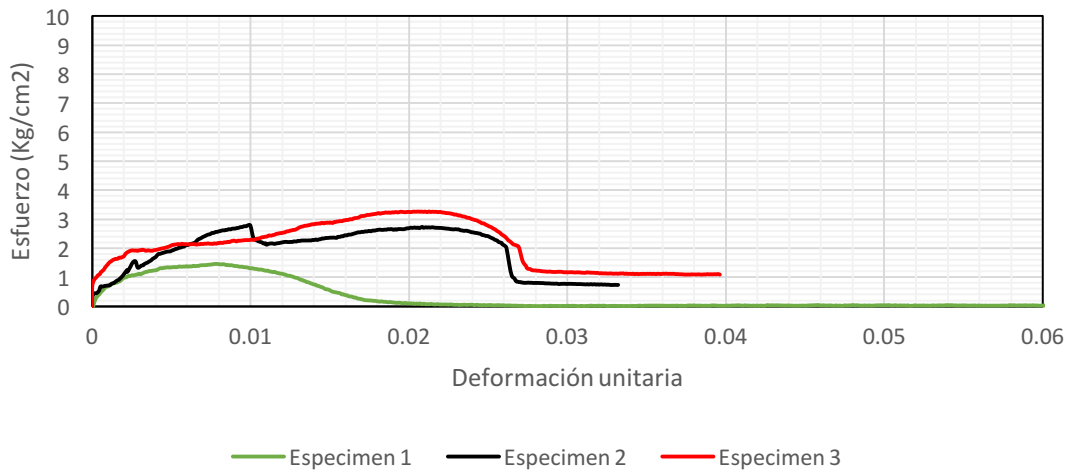


**Figura 7.15. Condiciones de 20°C, Ranura de 3cm y Velocidad de 2 mm/min.**

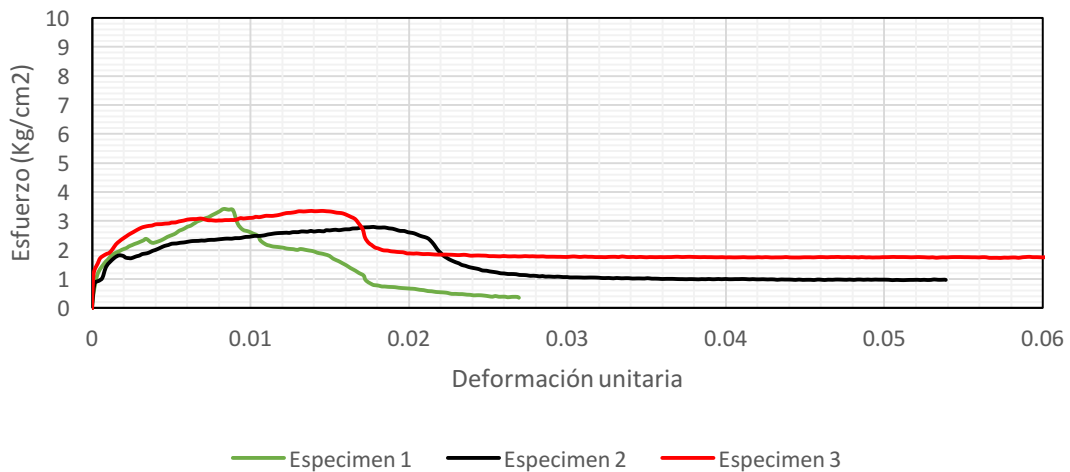




**Figura 7.16. Condiciones de 30°C, Ranura de 3cm y Velocidad de 0.5 mm/min.**



**Figura 7.17. Condiciones de 30°C, Ranura de 3cm y Velocidad de 1 mm/min.**



**Figura 7.18. Condiciones de 30°C, Ranura de 3cm y Velocidad de 2 mm/min.**

## 7.2 Curva de viscosidad

Tabla 7.1. Análisis del asfalto original (Viscosidad Brookfield)

Tipo de prueba	Resultado	Normativa
Viscosidad Brookfield 110° C SC4-27 6 rpm (cP)	2203	M-MMP-4-05-005/02 SCT
Viscosidad Brookfield 125° C SC4-27 12 rpm (cP)	858	M-MMP-4-05-005/02 SCT
Viscosidad Brookfield 140° C SC4-27 12 rpm (cP)	374	M-MMP-4-05-005/02 SCT
Viscosidad Brookfield 155° C SC4-27 24 rpm (cP)	188	M-MMP-4-05-005/02 SCT
Viscosidad Brookfield 170° C SC4-27 24 rpm (cP)	108	M-MMP-4-05-005/02 SCT

Fuente: Elaboración propia

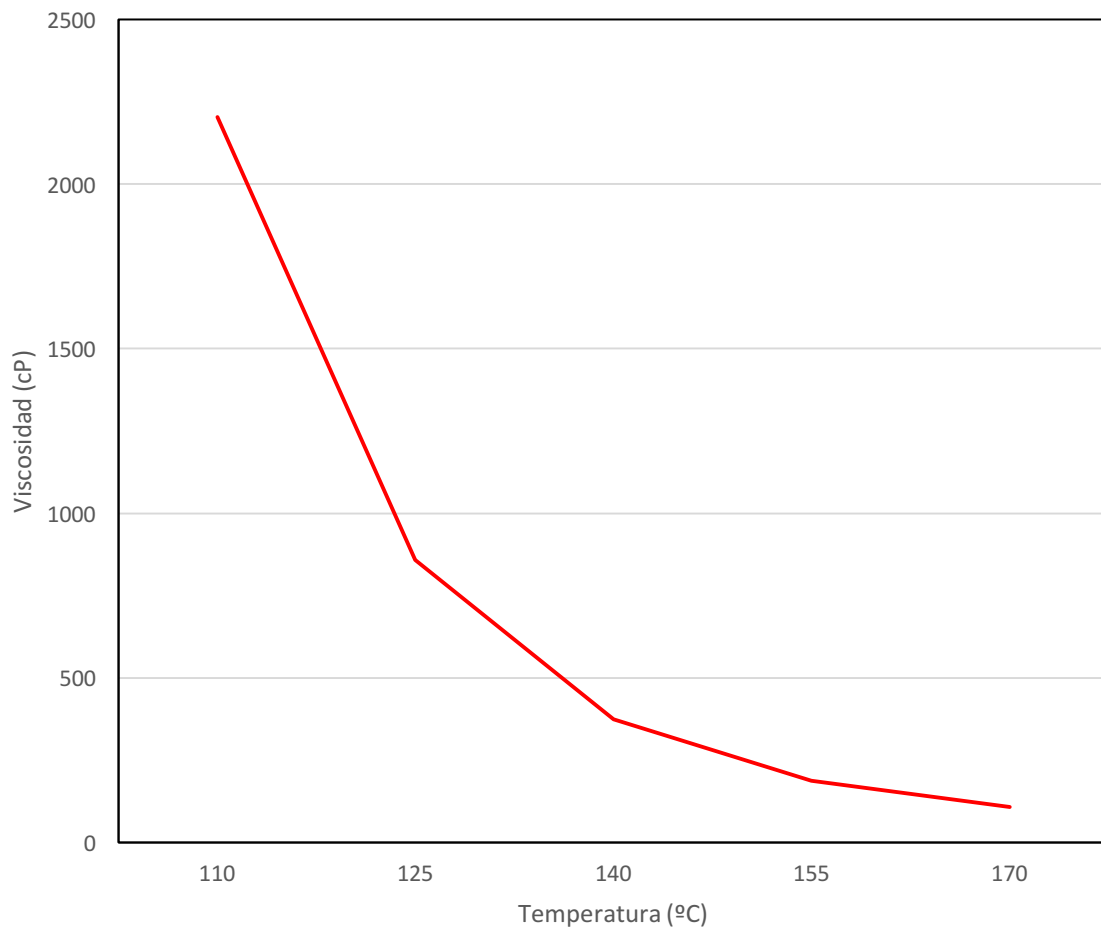


Figura 7.19. Curva de viscosidad Brookfield

### 7.3 Evaluación del asfalto

**Tabla 7.2. Análisis al asfalto original**

Tipo de prueba	Resultado	N-CMT-4-05-004/08	Método de Prueba
Punto de inflamación Cleveland (°C)	>300	230 mín.	ASTM D 92
Viscosidad Brookfield 135°C SC4-27 12 rpm (cP)	414	3000 máx.	ASTM D 4402
Módulo reológico de corte dinámico a 64°C (Kpa)	1441	1 mín.	ASTM D 7175
Ángulo de fase a 64°C	83.51	--	ASTM D 7175

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 7.3. Análisis del residuo de la prueba de envejecimiento a presión**

Tipo de prueba	Resultado	N-CMT-4-05-004/08	Método de Prueba
Módulo reológico de corte dinámico a 25°C (Kpa)	2711	5000 máx.	ASTM D 7175
Rigidez en creep a -12°C (Mpa)	115.93	300 máx.	ASTM D 6648
Valor m(t) a-12°C	0.314	0.3 mín.	ASTM D 6648

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 7.4. Determinación de índice de tráfico (RTFO)**

Prueba	Valor	Normativa
Respuesta elástica 100 Pa a 64°C (%)	18.15	AASHTO T-350
Respuesta elástica 3200 Pa a 64°C (%)	5.29	AASHTO T-350
Diferencia en respuesta elástica a 64°C (%)	70.87	AASHTO T-350
Creep compliance Jnr100 a 64°C	1.447	AASHTO T-350
Creep compliance Jnr3200 a 64°C	1.852	AASHTO T-350
Diferencia creep compliance Jnr a 64°C (%)	27.99	AASHTO T-350

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 7.5. Análisis del residuo de la prueba de la película delgada (RTFO)**

Tipo de prueba	Resultado	N-CMT-4-05-004/08	Método de prueba
Pérdida de masa por calentamiento a 163°C	0.32	1 máx.	ASTM D 2872
Módulo reológico de corte dinámico a 64 °C (KPa)	4.714	2.2 mín.	ASTM D 7175
Ángulo de fase a 64 °C (°)	75.46	--	ASTM D 7175

Fuente: Elaboración propia