



MODELO DE ELEMENTO FINITO PARA LA INTERPRETACIÓN DE LA FALLA POR FRACTURA EN ENSAYES DE TENSIÓN DIRECTA REALIZADOS EN MEZCLAS DE CONCRETO ASFÁLTICO.

J. F. Pérez-Landeros¹, M. L. Pérez-Rea², P. Limón-Covarrubias³

Resumen

Este trabajo, busca el desarrollo de un modelo de elemento finito para la simulación del comportamiento mecánico de una probeta de concreto asfáltico sometida a tensión directa en un ensaye realizado en una máquina universal, llamado "8TD". El propósito de la modelación es determinar las condiciones adecuadas de ensaye para lograr la mejor interpretación de los resultados. Para la calibración del modelo se prepararon probetas de concreto asfáltico elaboradas con asfalto convencional las cuales fueron sometidas a estados de tensión directa bajo diferentes condiciones de prueba, variando la velocidad de deformación, temperatura del espécimen y tamaño de ranura para inducir la falla. Se considera 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 ensaye. El análisis de resultados de los ensayos realizados permitió determinar el valor de máximo esfuerzo cortante que lleva a la falla 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 ensaye 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.

¹ Estudiante de la Maestría en Vías Terrestres y Movilidad. Universidad Autónoma de Querétaro. Becario CONACyT. Correo electrónico franciscop1909@hotmail.com

² Profesora-Investigadora de la División de Investigación y Posgrado de la Facultad de Ingeniería. Universidad Autónoma de Querétaro. Correo electrónico: perea@uaq.mx

³ Investigador. Grupo Surfax. LASFALTO. Correo electrónico: pedro@surfax.com.mx

1. Introducción

En la actualidad el deterioro de los pavimentos asfálticos representa uno de los problemas de mayor impacto en cuestión de vías terrestres, siendo los casos más usuales el desgranamiento, la deformación y el agrietamiento; en donde el último de éstos es el más agresivo relacionándose directamente con la parte estructural de la carpeta asfáltica. A causa de este problema pueden derivarse otros como lo son los hundimientos y las erosiones. El agrietamiento se presenta cuando al interior de la masa de concreto asfáltico, los esfuerzos cortantes actuantes debido a fuerzas de tensión superan la resistencia al esfuerzo cortante del material.

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

El fenómeno de la fractura es una de las situaciones más difíciles del comportamiento de un pavimento flexible; las propiedades del material, la amplia gama de temperaturas, así como la reología del material y las condiciones de carga a las cuales está sometido un asfalto, plantean un panorama en el cual los análisis y técnicas simples no son suficientes. Por lo tanto el enfoque básico para abordar de manera comprensiva los problemas relacionados con la fractura en el ámbito de los pavimentos flexibles es a través de la mecánica de fractura.

2. Análisis de la mecánica de fractura.

Durante mucho tiempo se han caracterizado distintas pruebas experimentales; como fue el ensayo Semi-Circular Bending Test (SCB) llevado a cabo por Wagoner *et al.* (2005) que describe y resalta las propiedades de la mezcla asfáltica; al igual que la necesidad de obtener la tensión máxima antes de la fractura. Por otra parte, AASHTO diseñó una prueba diametral desarrollado por Kennedy *et al.* (1983), en la cual el objetivo primordial era determinar los desplazamientos verticales y las deformaciones horizontales de los especímenes que se encontraban bajo dicho



análisis, los cuales presentaron ser de utilidad para muestras que suelen ser extraídas en campo. A su vez Marsac (1992) realizó estudios más enfocados a la flexión simple los cuales arrojaron conjeturas en las que los factores que llegaban a influenciar directamente en la fractura; eran la temperatura y las condiciones de carga; siendo congruentes con los resultados obtenidos por Pérez *et al.* (2011) y García *et al.* (2009), si bien los resultados comprueban las técnicas fundamentales para evaluar las mezclas, las validaciones de sus resultados se veían comprometidos con los de campo.

Por otra parte, los estudios relacionados con la flexión simple han sido enfocados al análisis de los desplazamientos longitudinales producidos por la aplicación de cargas repetitivas, logrando únicamente obtener avances en el rubro de los módulos de fatiga, debido a la dificultad para lograr la compatibilidad de los resultados esperados contra los obtenidos. Paralelamente, el estudio desarrollado por ASTM (referencia, año), llamado Disk-Shaped Compact Tension Test (DC-T) es un modelo que caracteriza la resistencia de la mezcla asfáltica bajo ambientes naturales; que establece términos cuantitativos más significantes para su desempeño, dejando de lado las variables de composición del material, tratamiento por temperatura o fabricación de la mezcla; además de estar enfocado directamente al análisis del efecto de la tensión pura en los especímenes.

Una vez planteados los análisis teóricos realizados para la fractura de mezclas asfálticas, puede decirse que algunos de ellos resultan poco viables, como le resultó a Majidzadeh *et al.* (1971) con la flexión apoyada debido a sus consideraciones operacionales, mientras que como bien sabemos, la propagación de las fracturas analiza el comportamiento real de las mezclas asfálticas.

3. Metodología

La simulación es una técnica de experimentación que busca imitar ciertos aspectos de la realidad; lo cual permite evaluar condiciones similares a las reales, pero empleando variables controladas. En este caso se empleó un software comercial llamado ANSYS para analizar el comportamiento mecánico del espécimen de pavimento flexible y su interacción con las cargas que se le puedan aplicar.

Para realizar la simulación, se deben recrear las condiciones físicas del modelo; por lo que ANSYS® emplea el Método de Elementos Finitos (MEF), el cual permite la representación de la geometría de las probetas, en particular la modelación tridimensional, lo cual constituye una de las partes más fundamentales de la solución.

La modelación tridimensional en este sistema usualmente emplea elementos de punto, elementos de línea, elementos de área o elementos sólidos; aunque éstos se pueden llegar a entremezclar.

La modelación del ensayo en el software considera los siguientes aspectos:

- Comenzar con un planteamiento cercano al problema; es decir, determinar la forma básica que tomará el modelo, secciones del elemento, así como establecer las propiedades mecánicas del material.
- Construir el modelo con las dimensiones del elemento.
- Establecer un plano de trabajo.
- Determinar el método de análisis.
- Analizar los resultados.

ANSYS® permite ciertos comandos para la generación de geometrías, aplicación de cargas y restricciones, estableciendo diferentes tipos de análisis y post-procesamiento.

Una vez que hayan sido simuladas las condiciones tanto de carga, grados de libertad, propiedades físicas y mecánicas de los elementos que serán sometidos a tensión directa, se procederá a obtener los parámetros que permitan relacionar directamente las condiciones teóricas con las reacciones reales que puedan presentarse en dicho ensayo.

Las probetas fueron realizadas de mezcla de concreto asfáltico convencional en especímenes cilíndricos y posteriormente se cortaron según las medidas mostradas en la figura 1, en la cantidad necesaria para realizar tres repeticiones del diseño factorial contenido en la tabla 1. Los ensayos fueron realizados una máquina

universal marca “CGTS” de 10,200 kg de capacidad, la cual se instrumentó para realizar los ensayos a velocidades de deformación controlada (ver figura 2)

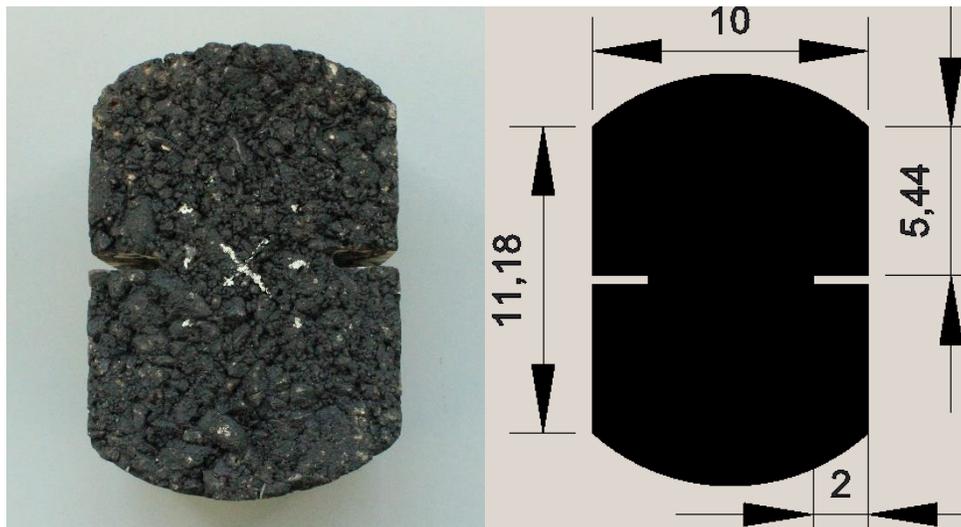


Figura 1. Fabricación y corte de las probetas de asfalto.

Variable	Unidades	Valor
Temperatura	°C	10
		20
		30
Velocidad	mm/min	0.5
		1.0
		2.0
Ranura	cm	1.0
		2.0
		3.0

Tabla 1. Variables del ensayo “8TD”.



Figura 2. Máquina Universal, adaptada para el ensayo “8TD”

Con los ensayos realizados se obtuvo suficiente información para analizar el comportamiento mecánico de todas las combinaciones y optar por la definición de las condiciones más adecuadas de ensaye de acuerdo a las primeras aproximaciones del modelo. Bajo estas condiciones se obtuvieron valores medios experimentales de las propiedades mecánicas que posteriormente deberían usarse en los modelos de elemento finito.

Una vez determinadas las condiciones adecuadas de ensaye y programado el modelo se procedió a realizar los ensayos definitivos y las corridas para realizar una comparativa entre los datos obtenidos en las pruebas y los datos obtenidos del modelo.

4. Modelación

El proceso de la modelación, como ya se describió en la metodología consistió en representar de forma gráfica tanto las condiciones de carga como la geometría de la probeta, una vez que fueron establecidos sus parámetros de propiedades físicas y mecánicas.

Para este análisis el elemento finito seleccionado fue el SOLID185, el cual es un elemento tridimensional sólido, con tres grados de libertad en cada nodo, traducciones en las direcciones x, y, z nodales. Este elemento soporta plasticidad, hiperplasticidad, rigidez de tensión, fluencia, deflexión grande y capacidades de deformación, así como se muestra en la figura 3.

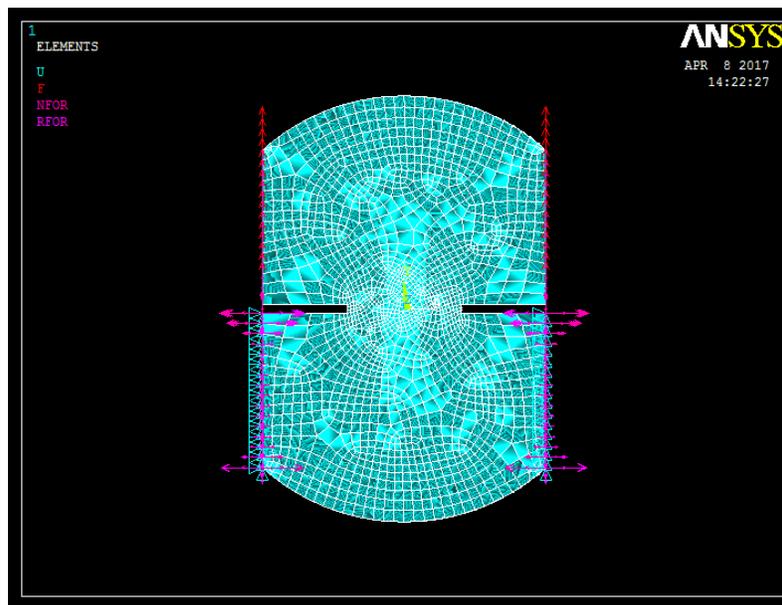


Figura 3. Simulación de la geometría y condiciones de carga para el ensayo “8TD”.

Similarmente, con la finalidad de comparar los resultados numéricos obtenidos en ANSYS® con los obtenidos en el laboratorio, se realizó un análisis nodal para el modelo en 3D de la probeta, tratando de simular los esfuerzos que están actuando dentro del espécimen en el momento en que se le está aplicando la carga máxima y antes de que se presente la fractura, como en la figura 4.

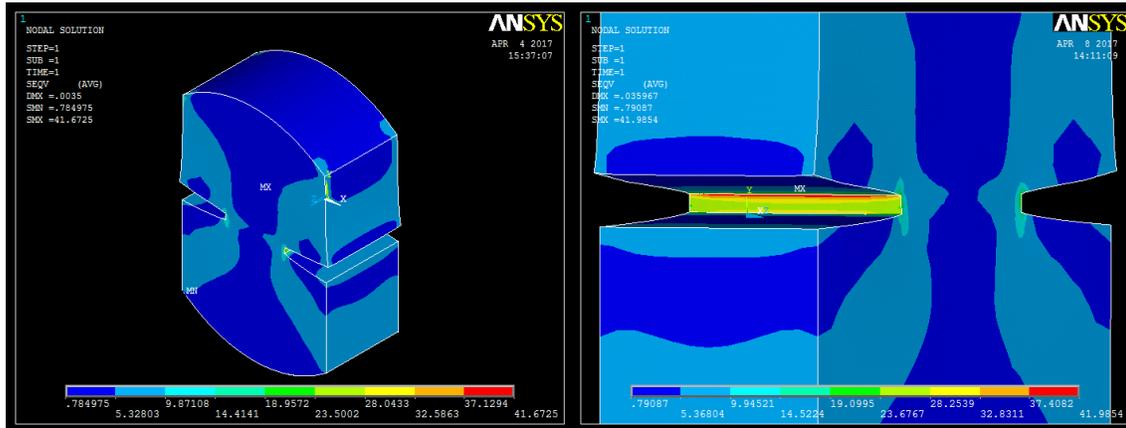


Figura 4. Modelación en 3D de los esfuerzos generados en la probeta.

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 directamente proporcional al esfuerzo aplicado; por lo que el análisis del modelo considerará dicho principio. Del estudio preliminar se determinaron las condiciones ideales de la prueba

De este análisis se observó el comportamiento viscoso se encuentra presente a partir de los 20°C y en un principio se decidió analizar únicamente el comportamiento elástico hasta el momento de la falla. Se deja para un análisis posterior el estudio de la componente viscosa de la deformación y el efecto en los resultados de los ensayos.

5. Resultados

En los estudios preliminares se determinó que las condiciones ideales de comportamiento se obtienen en las probetas con ranuras de 2 cm de longitud. En las probetas con ranuras de 3 cm de longitud se observó que la resistencia alcanzada tenía mucha variabilidad con el resto de las variables fijas. Las probetas con ranuras de 2 cm fueron las que mostraron menor variabilidad en los resultados. De igual forma se determinó la velocidad de desplazamiento de 1mm/min. Para la temperatura, aunque la menor dispersión en el comportamiento mecánico se obtiene

para 10C por ser más rígido, se optó por 20C por representar un valor estándar en los ensayos.

En la figura 6 se muestran los estados de esfuerzo y deformación que fueron obtenidos de las pruebas de laboratorio realizadas a las probetas con ranura de 2 cm, cuya tendencia fue la más acercada a los resultados de la modelación matemática, puesto que se lograron establecer patrones de comportamiento que asemejaban una de la otra. A su vez podemos observar que la velocidad de 1 mm/min es la que presenta una mayor cantidad de esfuerzo, los cual para fines de análisis resultan ser los ideales.

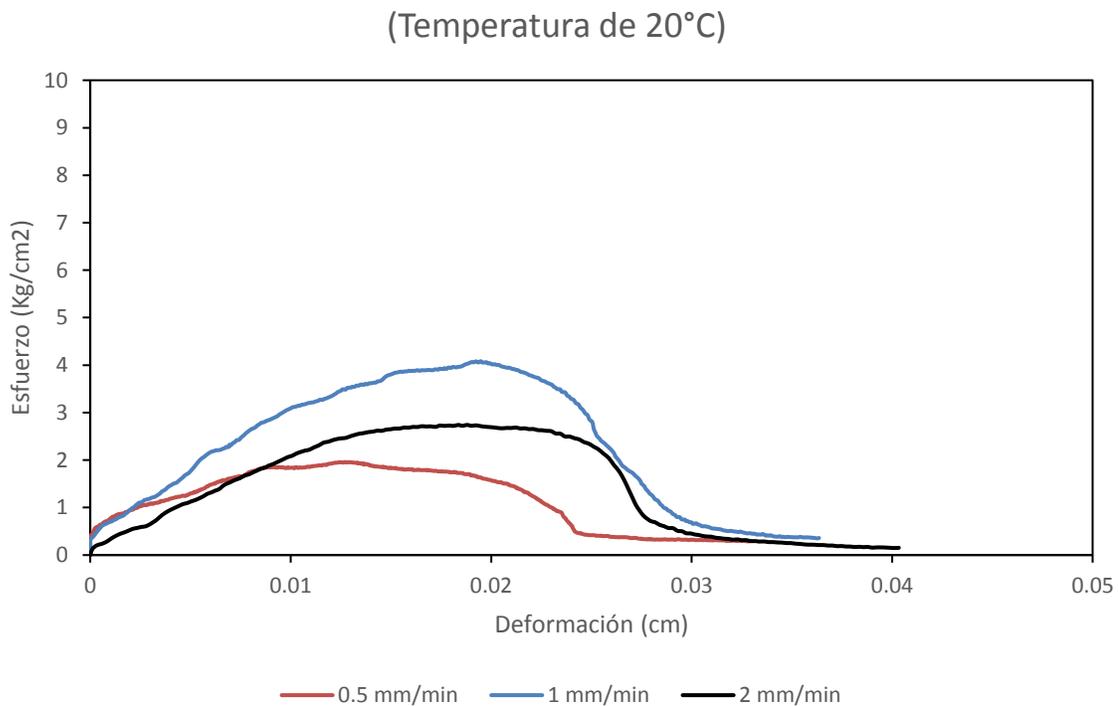


Figura 6. Resultados de la prueba de tensión para probetas con ranura de 2 cm, en distintas velocidades de aplicación.

El modelo de elemento finito se aplicó a las probetas idealizadas con los estándares definidos en los ensayos previos. Las propiedades mecánicas aplicadas al modelo se determinaron en dichos ensayos. Posteriormente se realizaron ensayos

en las mismas condiciones para comparar con el modelo. En la figura 7 se muestran los resultados obtenidos en base al modelo de elemento finito, el cual se aproxima a los resultados experimentales.

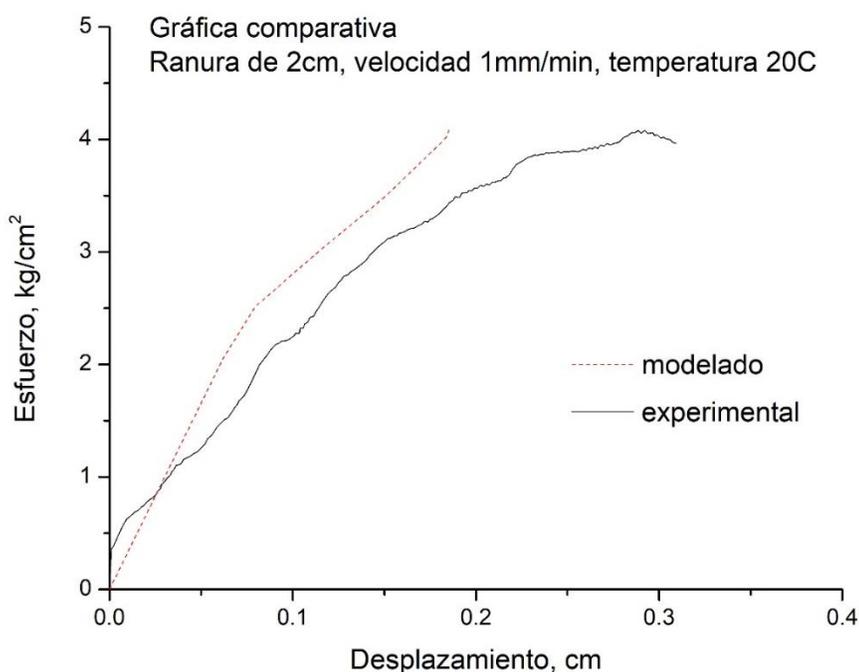


Figura 7. Gráfica comparativa de los resultados de la modelación matemática y la experimentación.

En la gráfica de la figura 7 se puede observar que el modelo predice una mayor rigidez a la real; sin embargo la aproximación del modelo arroja un error de 25 % lo cual puede ser aceptable considerando que no se conoce a ciencia cierta el error que arroja la prueba de tensión indirecta que se usa actualmente para evaluar cualitativamente este efecto. Posteriormente y en un trabajo a futuro, este valor de aproximación puede ser mejorado si se considera la componente viscosa y el efecto de temperatura.

La resistencia al esfuerzo cortante, en las probetas ensayadas en las condiciones ideales fue de 1.66, 6.48 y 1.57 kg/cm² 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 1.75 kg/cm^2 de acuerdo a la interpretación de Mohr, considerando que el esfuerzo cortante máximo en el plano en una ensaye uniaxial de tensión es igual a la mitad del valor del esfuerzo normal en el límite de fluencia (ver figura 8). 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.

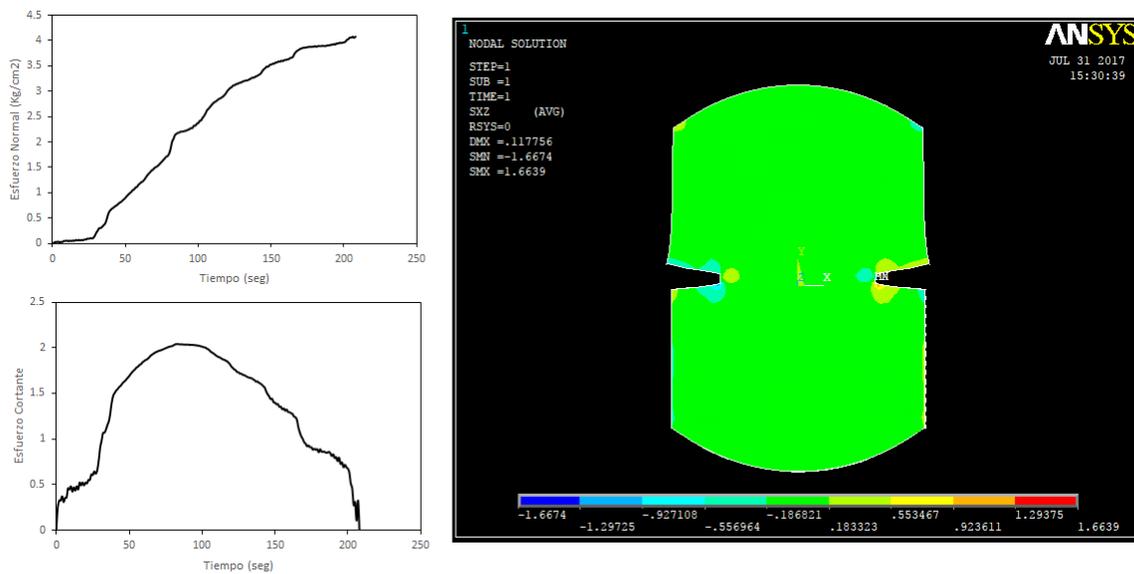


Figura 8. Condiciones de esfuerzo normal y esfuerzo cortante para las condiciones ideales del ensayo. (a) Experimental, (b) modelado

6. Conclusiones

Como resultados de la modelación así como las pruebas de laboratorio, podemos concluir 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, se puede resumir en 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
- Hace falta introducir en el modelo la componente viscosa desde temperaturas un poco menores de 20°C para evaluar el efecto en el ensaye y las consecuencias de no considerarlo en el análisis de la fractura.

El ensaye propuesto resulta ser adecuado desde esta perspectiva, sin embargo, es necesario continuar con el análisis y perfeccionar el modelo. Debe entenderse que las limitaciones del modelo no permiten llegar a resultados exactos que arroja un ensaye físico, ya que se considera al espécimen como un medio continuo y las discontinuidades en la mezcla en las fases pétreos y asfalto, así como el reacomodo del medio granular durante el proceso de ensaye contribuyen fuertemente a la variabilidad de los resultados. 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. Aun así, los valores de resistencia medidos directamente en una prueba de tensión siempre serán valores tangibles y no teóricos, que deberán ser considerados bajo la reserva de cada caso.

7. Referencias

- [1] Wagoner M., Buttlar W., y Paulino G., (2005) Disk-Shaped Compact Tension Test for asphalt concrete fracture, *Experimental Mechanics*, 45(3), 270-277.
- [2] Kennedy T.W. y Anagnos J. .N. (1983) Procedures for the static and repeated load indirect tensile tests. *Center of transportation research*, vol. 183, 14 páginas.
- [3] Marsac P. (1992) L'essai de module complexe au LCPC, *Rapport Interne Section Matériaux de Chaussées*, vol. 20, p.p. 13-35.
- [4] Pérez Jiménez F., Valdez G. y 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*, Vol. 11, p.p. 87-100, ISSN: 0717-7925.
- [5] García J., García C., Buisson J., Cortés C. y Potti J. (2009) *Pavimentos de larga duración*, VIII Congreso Nacional de Firms, Valladolid.
- [6] ASTM D7313 – Standard test method for determining fracture energy of asphalt-aggregate mixtures using the disk-shaped compact tension geometry.
- [7] Majidzadeh K., Kauffmann E. M. y Ramsamooj D. V. (1971) Application of fracture mechanics in the analysis of pavement fatigue, *Association of asphalt paving technologists*, vol. 61, p.p. 227-246.