

**MODIFICACIÓN DEL ENSAYO DE DUCTILIDAD PARA ASFALTOS EN PRO  
DE UN MEJORAMIENTO EN EL ANÁLISIS DE RESULTADOS**

**ANDRES FELIPE MELENDEZ SUAREZ  
JOSE FERNANDO ORTIZ SALINAS**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE CIENCIAS FISICOMECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL  
BUCARAMANGA**

**2006**

**MODIFICACIÓN DEL ENSAYO DE DUCTILIDAD PARA ASFALTOS EN PRO  
DE UN MEJORAMIENTO EN EL ANÁLISIS DE RESULTADOS**

**ANDRES FELIPE MELENDEZ SUAREZ  
JOSE FERNANDO ORTIZ SALINAS**

**Trabajo de grado para optar al título de  
Ingeniero civil**

**Director  
EDUARDO CASTAÑEDA PINZÓN  
Ingeniero Civil PhD**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE CIENCIAS FISICOMECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL  
BUCARAMANGA**

**2006**

*A Dios y a mis padres por brindarme  
su apoyo y comprensión.  
A mis amigos por mantenerse a  
mi lado en todo momento.*

**Andres Felipe**

*A Dios y a mis padres por brindarme su apoyo, comprensión y sabiduría.*

*A mi familia, por estar a mi lado en todo momento.*

*A mis hermanos, por su apoyo incondicional.*

*A todos lo que estuvieron y ya no están, por sus enseñanzas en el diario vivir.*

**Jose Fernando**

## **AGRADECIMIENTOS**

A nuestro director, Ing. PhD Eduardo Castañeta Pinzón, por su orientación, apoyo y respaldo.

A la Escuela de Ingeniería Civil de la Universidad Industrial de Santander por la colaboración que nos prestó para la ejecución de los ensayos de ductilidad para asfaltos.

A nuestras familias por brindarnos toda su comprensión y apoyo sin los cuales no hubiésemos podido culminar éste proyecto.

A nuestros amigos que estuvieron incondicionalmente a nuestro lado ofreciéndonos su colaboración y compañía.

## CONTENIDO

1.	GENERALIDADES.	1
1.1	DUCTILIDAD.	1
1.2	MEDIDA DE LA DUCTILIDAD.	2
2.	CAMPAÑA EXPERIMENTAL.	6
2.1	METODOLOGÍA.	6
2.2	RESULTADOS.	6
	2.2.1 Pruebas modificando el condicionamiento térmico.	7
	2.2.2 Pruebas modificando las probetas.	8
	2.2.3 Verificación de tiempos de acondicionamiento de probetas.	12
	2.2.3.1 Ensayos con modificaciones en los tiempos de acondicionamiento.	15
	2.2.4 Verificación de repetibilidad con materiales diversos.	16
	2.2.4.1 Pruebas realizadas con asfaltos modificados.	16
	2.2.5 Ensayos de recuperación elástica.	18
3.	ANÁLISIS MECÁNICO.	20
3.1	MODELAMIENTO MECÁNICO.	20
4.	CONCLUSIONES.	28
5.	RECOMENDACIONES.	29
	BIBLIOGRAFÍA.	30

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Pruebas a 10 °C. Realizadas con la norma INV-702	7
Tabla 2. Pruebas a 5 °C. Realizadas con la norma INV-702	7
Tabla 3. Pruebas a 10 °C. Realizadas con las probetas modificadas	11
Tabla 4. Comparación de los tiempos norma INV-702 y los propuestos en la modificación del ensayo	14
Tabla 5. Pruebas a 10 °C. Realizadas con las probetas y tiempos de acondicionamiento modificados	15
Tabla 6. Resultados asfaltos Mastic proporción 20-80	16
Tabla 7. Resultados asfaltos Mastic proporción 40-60	17
Tabla 8. Resultados asfaltos de penetración 13	17
Tabla 9. Pruebas a 10 °C. Realizadas con asfaltos modificados con polímeros	18

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Esfuerzo deformación	1
Figura 2. Ensayo a tracción para asfaltos	3
Figura 3. Fallas típicas producidas por el empleo de asfaltos con elevada ductilidad	4
Figura 4. Fallas típicas producidas por el uso de asfaltos poco dúctiles	5
Figura 5. Dimensiones. Probeta original	8
Figura 6. Probeta Original	9
Figura 7. Probeta 1 propuesta	9
Figura 8. Probeta 2 propuesta	10
Figura 9. Probeta 3 propuesta	10
Figura 10. Probeta original y propuestas	11
Figura 11. Preparación de probetas	12
Figura 12. Probetas sumergidas a la temperatura a ensayar	13
Figura 13. Desmonte de pinzas	13
Figura 14. Probetas sumergidas antes de ser ensayadas	14
Figura 15. Probetas falladas con asfaltos de penetración 13	17
Figura 16. Deformaciones Probeta Original	21
Figura 17. Deformaciones Probeta Original (acercamiento cuerpo de la probeta)	21
Figura 18. Deformaciones Probeta 1	22
Figura 19. Deformaciones Probeta 1 (acercamiento cuerpo de la probeta)	22
Figura 20. Deformaciones Probeta 2	23

Figura 21. Deformaciones Probeta 2 (acercamiento cuerpo de la probeta)	23
Figura 22. Deformaciones Probeta 3	24
Figura 23. Deformaciones Probeta 3 (acercamiento cuerpo de la probeta)	24
Figura 24. Distribución de Esfuerzos Probeta Original	25
Figura 25. Distribución de Esfuerzos Probeta 1	25
Figura 26. Distribución de Esfuerzos Probeta 2	26
Figura 27. Distribución de Esfuerzos Probeta 3	26

## RESUMEN

**TÍTULO:** MODIFICACIÓN DEL ENSAYO DE DUCTILIDAD PARA ASFALTOS EN PRO DE UN MEJORAMIENTO EN EL ANALISIS DE RESULTADOS.\*

**AUTORES:**

Andres Felipe Melendez Suarez  
Jose Fernando Ortiz Salinas \*\*

**PALABRAS CLAVES:** Ductilidad de los asfaltos, Ensayos de ductilidad de asfaltos a 10°C, Modificación del ensayo de ductilidad para asfaltos.

**DESCRIPCIÓN:**

Este trabajo se desarrolla debido a la pérdida de importancia del ensayo de ductilidad, pues se ha visto rezagado por nuevos ensayos, como es el caso del ensayo de recuperación elástica que hasta el momento es materia de estudio y no ha sido normalizado en Colombia. Ésta carencia de valor del ensayo de ductilidad se debe a la poca información que suministran los resultados como esta planteado en la normatividad existente. Interesa modificar dicho ensayo de manera tal que su repetibilidad sea notable. Para tal fin se propone cambios en la temperatura de ensayo, forma de la probeta, tiempos de enfriado y reposo del asfalto, además de realizar pruebas con asfalto modificado para corroborar los resultados obtenidos.

---

\* Proyecto de Grado

\*\* Escuela de Ingeniería Civil, Facultad de Ingenierías Físico-mecánicas.  
Ing. PhD. Eduardo Castañeda Pinzón

## SUMMARY

**TITLE:** MODIFICATION OF THE TEST OF DUCTILITY FOR ASPHALTS FOR AN IMPROVEMENT IN THE ANALYSIS OF RESULTS.\*

**AUTHORS:**

Andres Felipe Melendez Suarez  
Jose Fernando Ortiz Salinas \*\*

**KEY WORDS:** Ductility of asphalts, Tests of asphalt ductility to 10°C, Modification of the test for asphalts

**DESCRIPTION:**

This work is developed due to the loss of importance of the ductility test, because straggler by new tests has seen itself, as it is the case of the test of elastic recovery that until the moment is study matter and has not been standardized in Colombia. This one deficiency of value of the ductility test must to the little information that provides the results like this raised in the existing normatividad. It interests to modify this test of way so that their repeatability is remarkable. For such aim one sets out changes in the temperature of test, forms of the test tube, times of cooled and rest of asphalt, besides to make tests with modified asphalt to corroborate the obtained results.

---

\* Project of Grade

\*\* School of Civil Engineering, Faculty of Physical-mechanical Engineerings.  
Ing. PhD. Eduardo Castañeda Pinzón

## INTRODUCCIÓN

El ensayo de ductilidad de asfaltos ha perdido importancia debido a la poca información que suministran los resultados como esta planteado en la normatividad existente, los cuales casi siempre están por encima al limite superior de la maquina, por consiguiente carecen de respuestas útiles tanto en el campo teórico como en el práctico.

Interesa modificar la ejecución del ensayo con el fin de reducir los valores de ductilidad de manera tal que su repetibilidad sea notable, el análisis de resultados mas provechoso y enriquecedor. Por esto, se propone cambiar la temperatura de ensayo y la forma de la probeta, ya que estas variables, son las más particulares para está prueba.

Los tiempos de enfriado y de reposo de las probetas se modificaran, con el fin de corroborar si estos factores son suficientes para transmitir las condiciones de térmicas del ensayo a la probeta tal como están descritos en la norma y observar si dichas modificaciones afectan de forma alguna los resultados del ensayo.

## 1. GENERALIDADES

El asfalto empleado en la construcción de pavimentos debe poseer un comportamiento dúctil. Los conceptos básicos de esta propiedad de los materiales se resumen a continuación.

### 1.1 DUCTILIDAD

La ductilidad es una propiedad inherente a los materiales y hace referencia a la facultad de poder deformarse (estirarse) sin romperse, bajo la acción de una fuerza, permitiendo obtener alambres o hilos. Sin embargo cualquier material que presente esta propiedad se denomina dúctil. Este proceso se explica porque los átomos del material se disponen de manera tal que es posible que se deslicen unos sobre otros.

En el ámbito de la ingeniería se entiende por material dúctil aquel que sufre grandes deformaciones antes de romperse, siendo el opuesto al material frágil, que se rompe bajo deformación, de manera repentina.

En un ensayo de tracción, los materiales dúctiles presentan una fase de fluencia caracterizada por una gran deformación sin incremento de la carga, como lo muestra la figura 1.

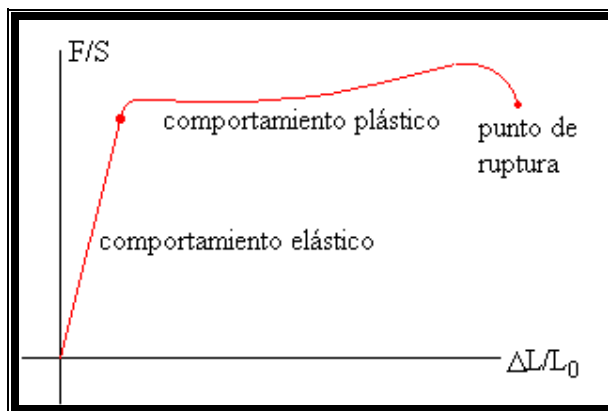


Figura 1. Esfuerzo deformación

No debe confundirse dúctil con blando, ya que la ductilidad es una propiedad que se manifiesta una vez que el material está soportando una fuerza y como se menciona anteriormente, hace referencia a la capacidad que tiene el material de deformarse sin romperse, de manera tal, que mientras el valor de la carga sea pequeño, la deformación también lo será, pero alcanzado cierto punto el material cede, deformándose en mucha mayor medida de lo que lo había hecho hasta entonces pero sin llegar a romperse. Por otro lado, lo blando o duro que sea un material, es una medida de la resistencia del material a ser penetrado.

Desde un punto de vista tecnológico, al margen de consideraciones económicas, el empleo de materiales dúctiles presenta considerables ventajas, ya que presentan deformaciones notorias antes de romperse proporcionando un margen de seguridad adicional, ya que en el momento de presentarse una falla en el material este dará “aviso” y se podrán tomar los respectivos correctivos a tiempo, antes que se presente el colapso, ya que después será necesario que la fuerza aplicada siga aumentando para que se provoque la rotura ; caso contrario, con lo que se puede apreciar en un material frágil.

## **1.2 MEDIDA DE LA DUCTILIDAD**

El concepto de ductilidad es cualitativo, pues es una propiedad subjetiva del material. En general, las medidas de ductilidad son de interés en tres formas:

- Para indicar hasta cuanto el material puede ser deformado sin fracturarse en los diferentes procesos de conformación, tales como laminación o extrusión.
- indican al diseñador de modo general la habilidad del material para fluir plásticamente antes de provocarse la fractura.

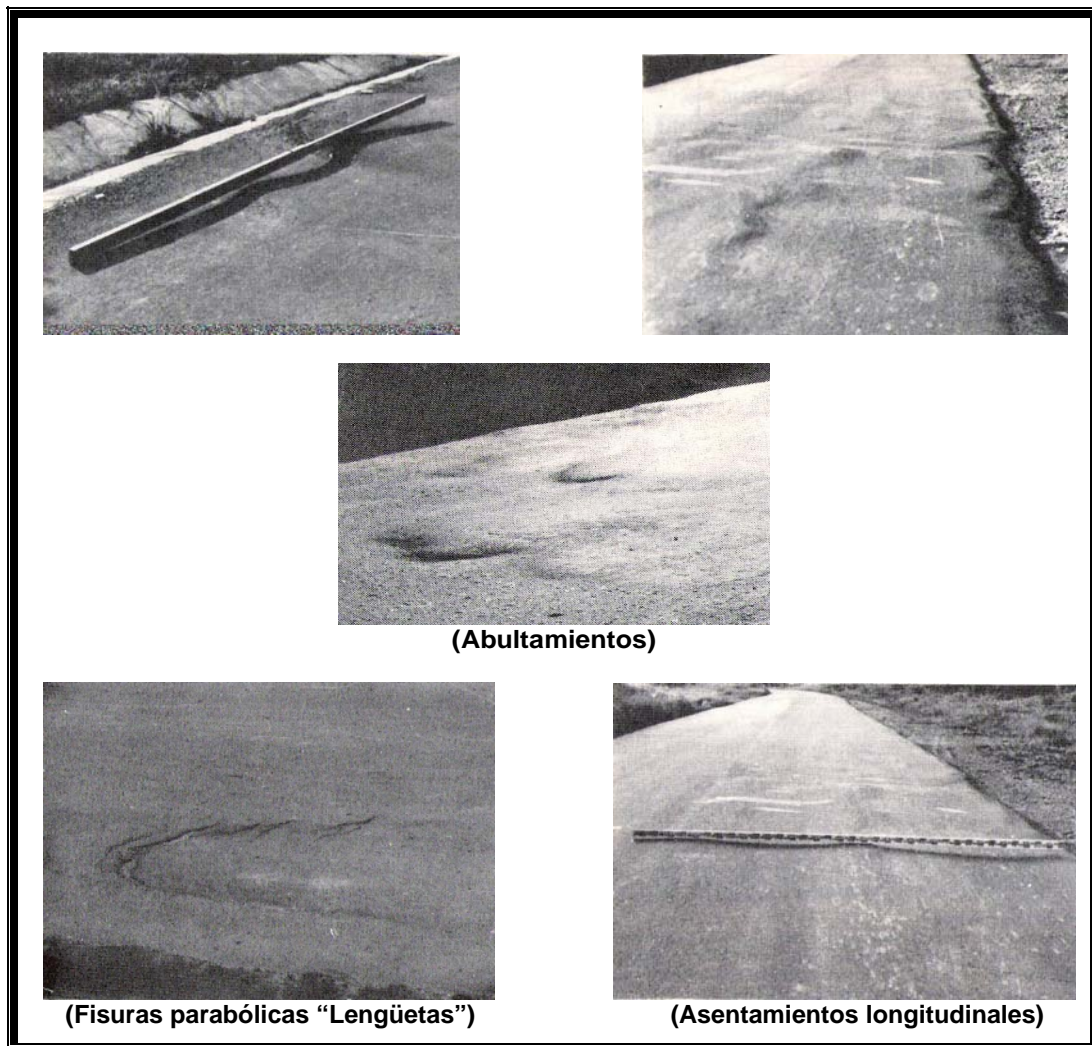
- Sirve como un indicador de cambio en los niveles de impurezas o condiciones del material.

Las medidas convencionales de ductilidad, obtenidas del ensayo a tracción, son las deformaciones a la cual se produce la fractura y la reducción del área del elemento a ensayar una vez producida la rotura, esta última no aplicable al ensayo de tracción para asfaltos pues para este caso la reducción del área sería del ciento por ciento, pues como se puede observar en la figura 2, al momento de la rotura, la sección de la probeta en la que se produce la falla (cuerpo) se transforma en un hilo que apenas si tiene sección transversal .

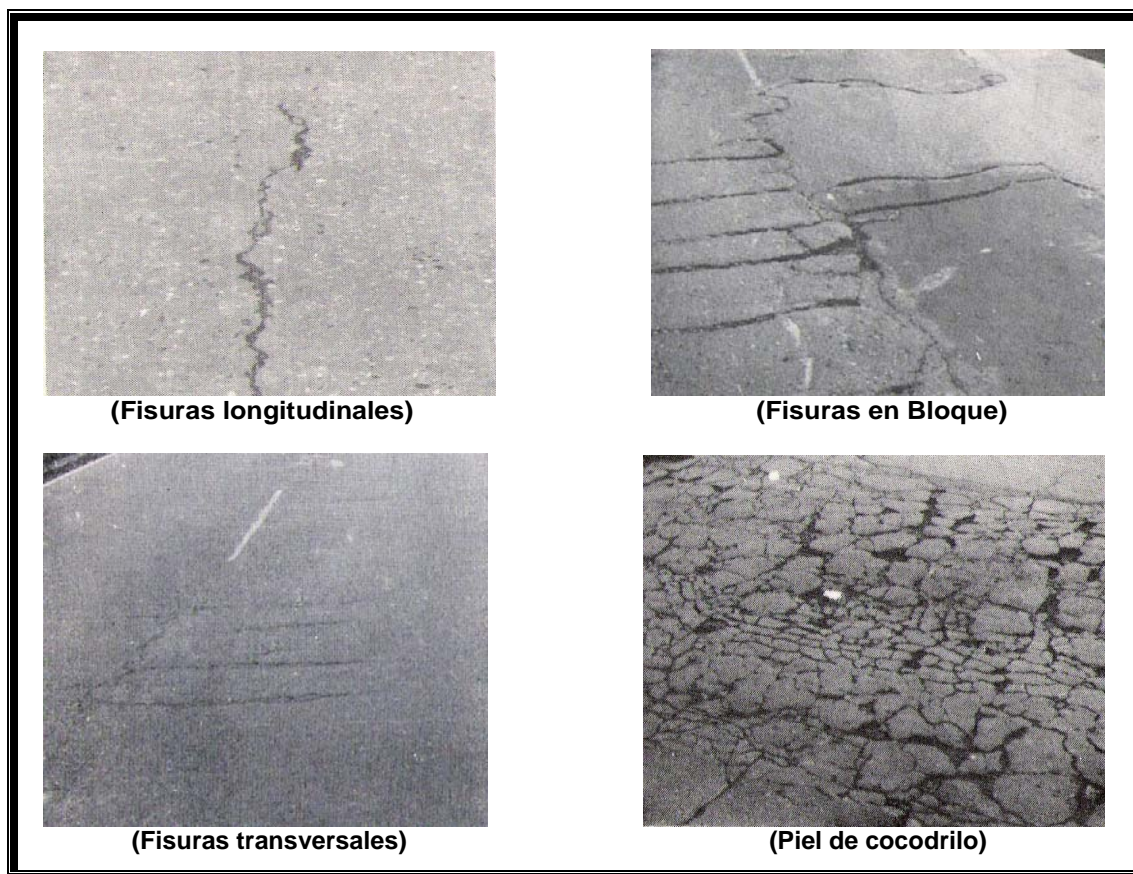


**Figura 2. Ensayo a tracción para asfaltos**

Un asfalto con una medida de ductilidad elevada si bien presenta buenas propiedades ligantes, por otra parte hace que la mezcla sea susceptible a los cambios de temperatura, presentando deformaciones excesivas que acarrearán fallas futuras en la estructura de pavimento producidas por el frenado de los vehículos y en general por las acciones del tránsito a las que se vaya ver sometida durante su vida. En contraste, un asfalto con una ductilidad baja proporciona rigidez a la mezcla, pero debido a la falta de adherencia de este, la mezcla se torna quebradiza y susceptible a la presencia de fracturas del tipo “piel de cocodrilo” u otras.



**Figura 3. Fallas típicas producidas por el empleo de asfaltos con elevada ductilidad**



**Figura 4. Fallas típicas producidas por el uso de asfaltos poco dúctiles.**

La medida de ductilidad en asfalto consiste en someter una probeta del material asfáltico a un ensayo de tracción, en condiciones determinadas de velocidad y temperatura, en un líquido de densidad similar, definiéndose la ductilidad como la distancia máxima en centímetros que se estira la probeta hasta el instante de la rotura. Normalmente, el ensayo se realiza con una velocidad de tracción de  $50 \pm 2.5$  mm por minuto y la temperatura de  $25 \pm 0.5^{\circ}\text{C}$  ( $77 \pm 1.0^{\circ}\text{F}$ ); aunque puede realizarse en otras condiciones de temperatura, debiendo concretarse en este caso la velocidad correspondiente.

La distancia en centímetros que se han separado las pinzas desde su posición inicial hasta que se produce la rotura en un ensayo normal, es del valor de la ductilidad de una probeta.

## 2. CAMPAÑA EXPERIMENTAL

Para llevar a cabo el estudio, se desarrollarán una serie de pruebas de ductilidad de asfaltos en diferentes condiciones. A continuación se presenta la metodología de la ejecución de la tesis y los resultados obtenidos.

### 2.1 METODOLOGIA

Esté estudio, busca la manera de reducir los valores de ductilidad de los asfaltos, para lo cual, es necesario tener presente las variables mas evidentes para dicho propósito.

Como primera medida, se tendrá en cuenta, la temperatura, ya que los pavimentos asfálticos presentan diferentes tipos de fallas ocasionados por este agente (los cuales se mencionan en el capítulo anterior). Para observar el efecto de este factor, se realizaron ensayos de ductilidad en asfaltos, utilizando temperaturas por debajo a la especificada en la prueba normalizada.

Por otra parte, la geometría de la probeta se modifico, buscando optimizar los resultados obtenidos en las pruebas realizadas a bajas temperaturas.

Finalmente se evaluarán diferentes tipos de materiales para determinar la repetibilidad y capacidad de discriminación que presenta el ensayo.

### 2.2 RESULTADOS

Para poder tener un criterio de comparación que facilitara el análisis de los resultados obtenidos, se utilizo el coeficiente de variación el cual se define como el cociente entre la desviación estándar y el promedio de una serie de datos.

Coeficiente de variación = 
$$CV = \frac{S_x}{\bar{x}}$$

Donde: CV... Coeficiente de variación.  
 Sx ... Desviación típica (estandar).  
 $\chi$  ... Promedio.

A continuación se presentan los diferentes resultados y análisis de las pruebas realizadas en el transcurso de esta investigación.

### 2.2.1 Pruebas modificando el condicionamiento térmico

Se realizaron probetas normalizadas y se falló un grupo de nueve (9) a temperatura de 5°C y un numero igual a 10°C, en el proceso se utilizo un asfalto de denominación 80-100.

- Pruebas realizadas a 10°C.

Temperatura °C	Ductilidad (cm)			Promedio parcial	desviación	COEF. DE VARIACIÓN
10	34	31	59.6	41.5	14.96	35.5%
	28	23	43.8	31.6		
	47	40	72.5	53.2		

Promedio= 42.1 cm

**Tabla 1. Pruebas a 10°C. Realizadas con la norma INV-702**

- Pruebas realizadas a 5°C.

Temperatura °C	Ductilidad (cm)			Promedio parcial	desviación	COEF. DE VARIACIÓN
5	15	19.8	48.5	27.8	10.80	55.6%
	10	10.7	19.5	13.4		
	16	17.6	17.5	17.0		

Promedio= 19.4 cm

**Tabla 2. Pruebas a 5 °C. Realizadas con la norma INV-702**

Las pruebas a 5 y 10 grados centígrados se realizaron con dos fines básicos:

- Reducir los valores de ductilidad, puesto que en el ensayo a 25 grados centígrados este valor casi siempre resulta ser mayor al límite superior del aparato, es decir 150 cm.

- Reducir los efectos de la manipulación de la probeta por parte de la persona que realice el ensayo, esto se logra gracias a la rigidez que adopta el asfalto a las temperaturas indicadas, ya que las deformaciones sufridas por la probeta antes de ser montada en el ductilómetro son mucho menores.

Los valores de ductilidad a 10 y 5°C presentan coeficientes de variación de 36% y 56% respectivamente. Muestran estos resultados la baja repetibilidad del ensayo y en conclusión que el cambio en la variable temperatura, por si solo, no acarrea mejora en los resultados del ensayo.

### 2.2.2 Pruebas modificando las probetas

Se propusieron tres (3) tipos de probeta (figuras 7, 8 y 9), en las cuales solo se varió la forma de las piezas laterales, ya que es ahí, en el cuerpo de la probeta donde se concentran la mayoría de los esfuerzos y deformaciones a las que se ve sometido el material a lo largo de la prueba, mientras que las secciones correspondientes a las mordazas no presentan variaciones representativas en el transcurso del ensayo por lo que se decidió mantener la forma y no realizar ningún cambio, ya que se puede suponer que el material esta “empotrado” en ellas, es decir, que su movimiento esta totalmente restringido.

Las variaciones propuestas se muestran a continuación:

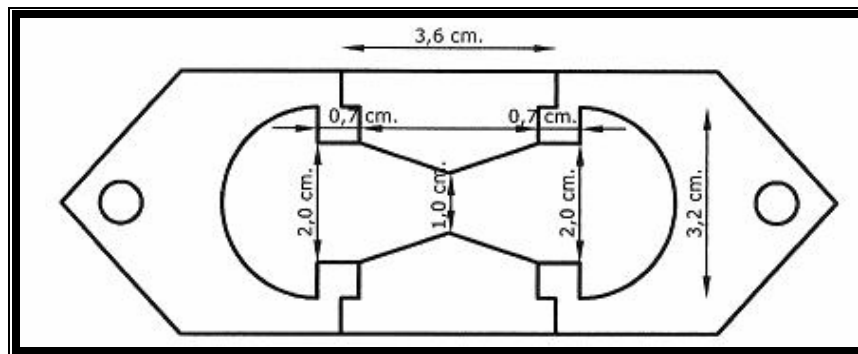


Figura 5. Dimensiones. Probeta original



Figura 6. Probeta original

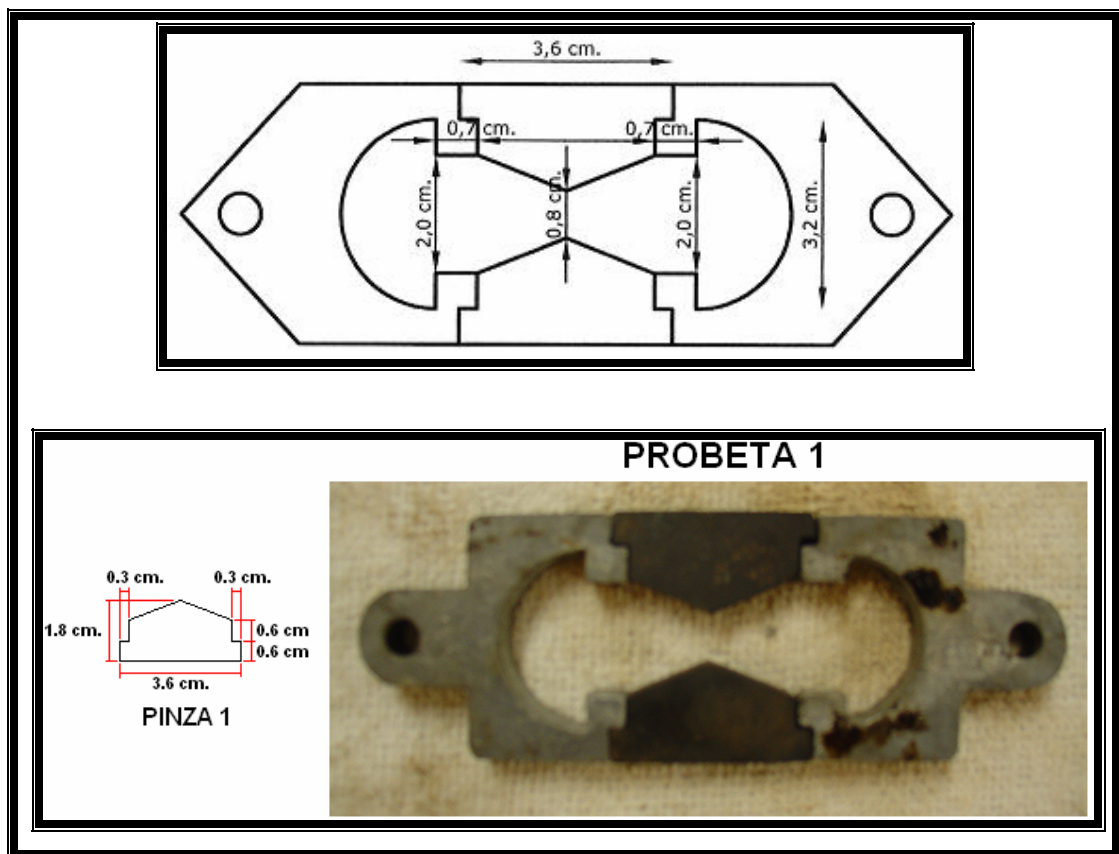


Figura 7. Probeta 1 propuesta

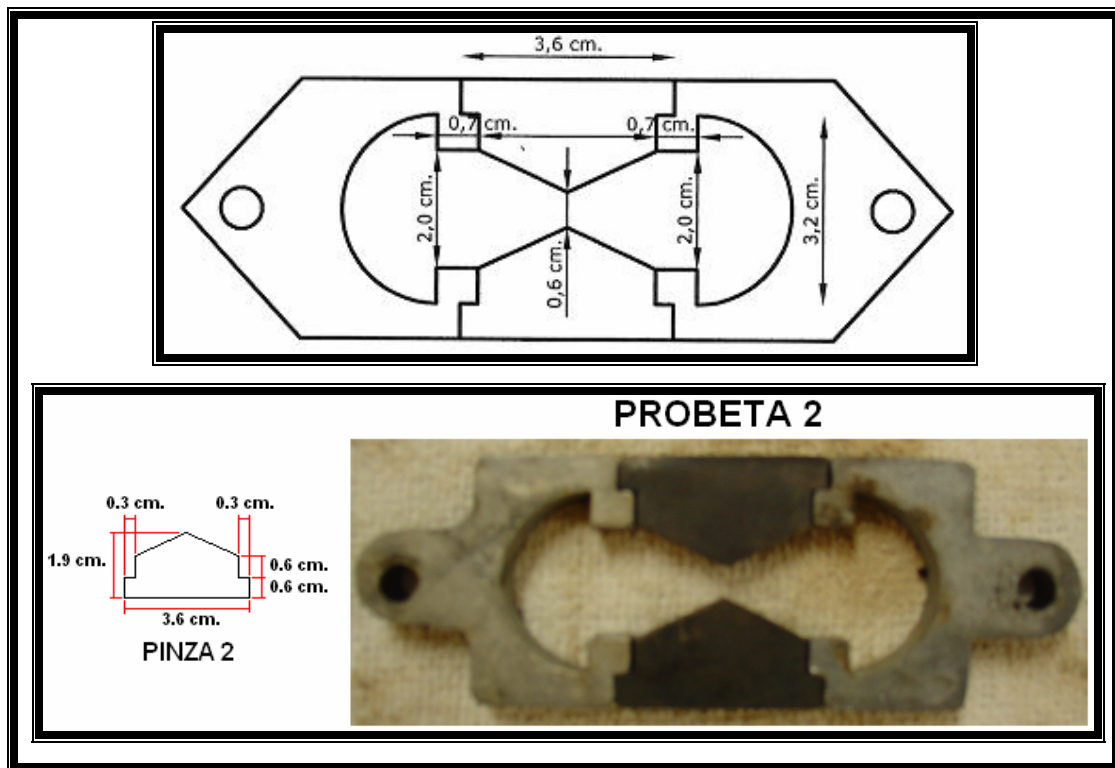


Figura 8. Probeta 2 propuesta

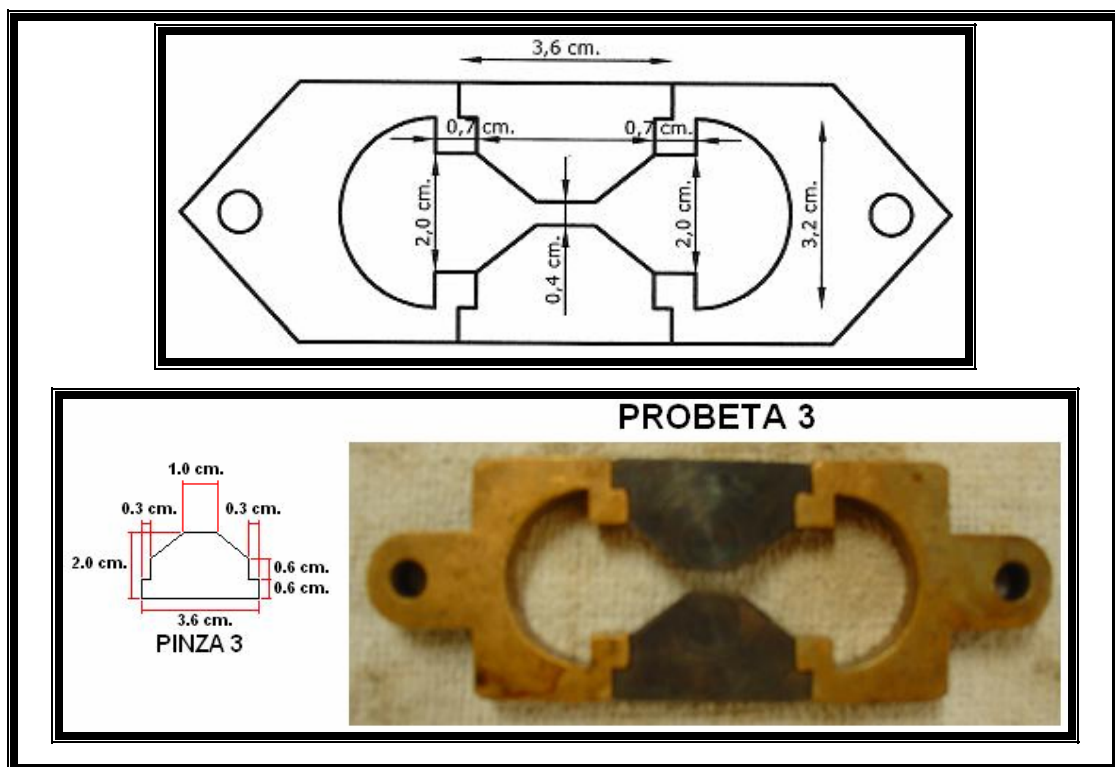


Figura 9. Probeta 3 propuesta

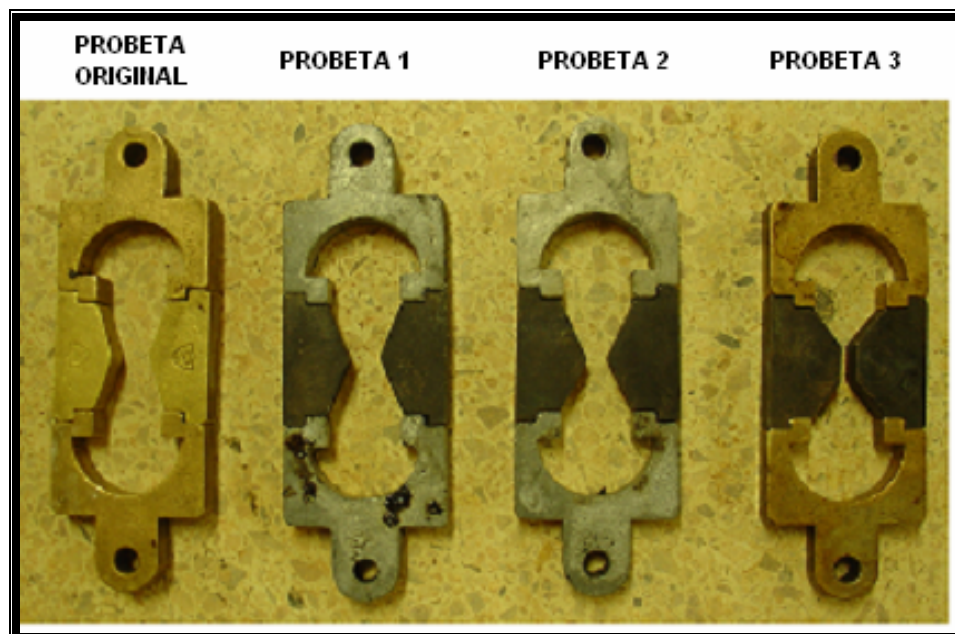


Figura 10. Probetas original y propuestas

Con estas nuevas probetas se realizaron pruebas a diez grados centígrados (10° C), no se consideraron las pruebas a cinco grados centígrados, puesto que a esta temperatura la variabilidad en la primera prueba fue mayor.

Se realizaron nueve (9) pruebas con cada una de las probetas propuestas, para de esta forma tener una base para comparar el comportamiento mostrado por cada una de ellas. (Las pruebas se realizaron con asfalto 80-100).

- Resultados a 10 °C.

PROBETA	DUCTILIDAD (cm)			DUCTILIDAD PROMEDIO(cm)	PROMEDIO	DESVIACIÓN	COEF. DE VARIACIÓN
1	21.5	8	11.5	13.7	19.2	6.24	32.4%
	17.7	21.5	17.8	19.0			
	19.8	29.5	25.9	25.1			
2	10	7.5	5.8	7.8	10.5	2.30	22.0%
	10.3	11.5	11.8	11.2			
	13.5	12.3	11.7	12.5			
3	35.2	12.3	35.2	27.6	31.1	7.33	23.6%
	28.5	37.5	29	31.7			
	37.3	31.3	33.6	34.1			

Tabla 3. Pruebas a 10 °C. Realizadas con las probetas modificadas

Las pruebas realizadas mostraron una mejora en el comportamiento, principalmente por parte de la probeta número 2, pues presentó una serie de resultados que muestran puntos de falla cercanos entre si, logrando mayor repetibilidad.

Como las probetas 2 y 3 son las de menor sección transversal, se podría pensar que la reducción de la sección mejora los resultados. Sin embargo aun la repetibilidad no es del todo satisfactoria.

### **2.2.3 Verificación de tiempos de acondicionamiento de probetas**

Con el ánimo de comprobar que los tiempos de acondicionamiento descritos en la norma son suficientes para garantizar una temperatura uniforme en toda la probeta se propusieron los siguientes cambios al procedimiento allí descrito. Los tiempos de enfriado y reposo de la probeta a ensayar se modificaron, una vez vertido el asfalto en el molde y protegido del polvo dejamos enfriar la probeta un periodo de 15 minutos contrario a lo que indica la norma INV E 702 (30 minutos)



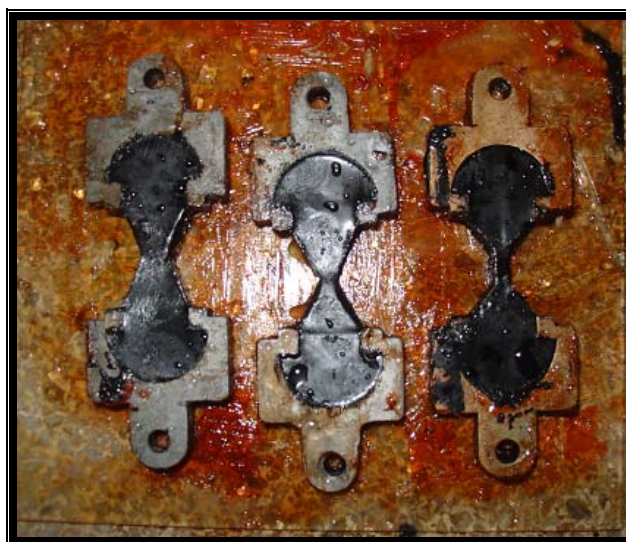
**Figura 11. Preparación de probetas**

y luego se procedió a enrasar el molde sin sumergir la probeta en agua a la temperatura del ensayo contrariando lo dispuesto en la norma, ya con las probetas enrasadas el siguiente paso consiste en sumergir las probetas durante 15 minutos a la temperatura a la cual se va a realizar el ensayo,



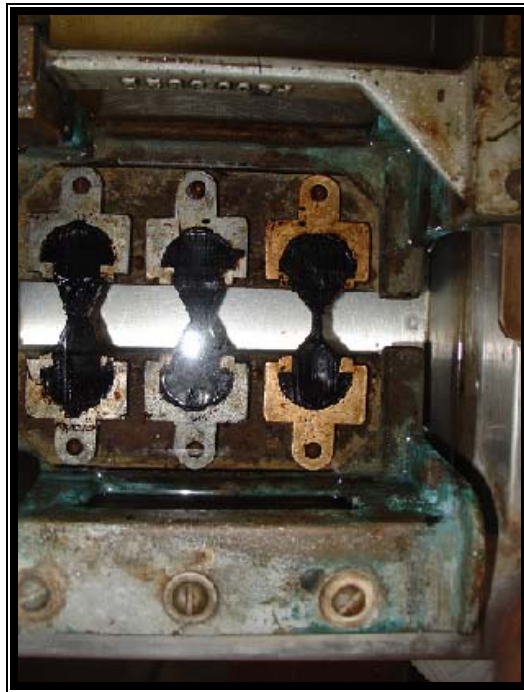
**Figura 12. Probetas sumergidas a la temperatura a ensayar**

para luego desmoldarla, es decir, proceder al retiro de las piezas laterales teniendo cuidado de no alterar la forma de la probeta.



**Figura 13. Desmonte de pinzas**

Una vez retiradas las piezas laterales se “montan” las probetas en el ductilómetro y se dejan allí sumergidas durante 15 minutos, para luego poner a funcionar el aparato y así dar por terminado el ensayo.



**Figura 14. Probetas sumergidas antes de ser ensayadas**

De esta forma se pasó de un tiempo de ensayo de 150 minutos a uno de 45 minutos.

TIEMPO ENSAYO	Tiempo de enfriado ( Temperatura ambiente)	Tiempo de inmersión antes del erase	Tiempo de inmersión antes del desmolde	Tiempo de inmersión sobre las clavijas del ductilómetro	Tiempo total de ensayo (min)
INV - E - 702	30	30	90	0	150
MODIFICADO	15	0	15	15	45

**Tabla 4. Comparación de los tiempos norma INV-702 y los propuestos en la modificación del ensayo**

### 2.2.3.1 Ensayos con modificaciones en los tiempos de acondicionamiento

Siguiendo con la metodología planteada en el numeral anterior, se realizaron nueve (9) pruebas con cada probeta y fueron realizadas con el mismo tipo de asfaltos.

- Resultados a 10°C.

PROBETA	DUCTILIDAD (cm)			DUCTILIDAD PROMEDIO(cm)	PROMEDIO	DESVIACIÓN	COEF. DE VARIACIÓN
1	17.8	16.2	20.4	18.1	19.8	3.05	15.4%
	15.4	23.7	21.4	20.2			
	18.7	19.3	25.1	21.0			
2	9.8	10.4	9.5	9.9	10.1	0.42	4.1%
	10.3	9.6	10.8	10.2			
	9.8	10.5	10.2	10.2			
3	33.7	15.6	29.1	26.1	29.6	5.66	19.1%
	31.3	35.2	27.6	31.4			
	35.6	28.7	29.8	31.4			

**Tabla 5. Pruebas a 10 °C. Realizadas con las probetas y tiempos de espera modificados**

La variación en los tiempos de reposo y enfriado, sumado a las anteriores modificaciones, trajo consigo muy buenos resultados en el comportamiento de las tres probetas en general, pero la mejora más radical, la muestra la probeta 2 pasando de un coeficiente de variación del 22% al 4%, indicando así su buena repetibilidad bajo las condiciones en las que se desarrolló el ensayo y comprobando que los tiempos establecidos en la norma son suficientes, ya que no se observaron cambios en la ductilidad del asfalto, y por el contrario muestra una mejoría en la repetibilidad a la hora de realizar la prueba a 10°C.

Debido a que el asfalto es un material susceptible a los cambios bruscos de temperatura, el excluir el paso de sumergir las probetas para el acondicionamiento a la temperatura de ensayo y después enrasarse producirá un menor choque térmico en el material, razón por la cual, presentará una mayor repetibilidad.

## 2.2.4 Verificación de repetibilidad con materiales diversos

Se realizaran ensayos con diferentes tipos de materiales con el fin de observar si el procedimiento que se viene realizando muestra repetibilidad y discriminación de los materiales.

### 2.2.4.1 Pruebas realizadas con materiales diversos

Estas pruebas se realizaron con un asfalto modificado del tipo MASTIC mezclado en una proporción 20-80 en peso (20% cemento Pórtland – 80% asfalto 80-100) y otra con proporción 40-60 (40% cemento Pórtland – 60% asfalto 60-70), también se realizaron, ensayos con asfalto de penetración 13, para determinar su comportamiento en las condiciones propuestas.

Se realizaron nueve (9) pruebas con cada probeta con asfalto modificado del tipo MASTIC mezclado en una proporción 20-80 en peso (20% cemento Pórtland – 80% asfalto 80-100), tres (3) pruebas con cada probeta con asfalto modificado del tipo MASTIC mezclado en una proporción 40-60 (40% cemento Pórtland – 60% asfalto 60-70) y otras tres (3) pruebas con cada probeta con asfalto de penetración 13.

- Resultados asfaltos Mastic proporción 20-80.

PROBETA	DUCTILIDAD (CM)			PROMEDIO	DESVIACIÓN	COEF. DE VARIACIÓN
1	20	15.5	18.3	16.1	3.4	21.3%
	17.8	16.2	15.6			
	11.4	10.2	19.8			
2	9.5	10.5	9.9	9.8	0.4	3.6%
	9.3	9.6	10.1			
	10	9.8	9.7			
3	22.5	32.5	21.8	22.9	6.4	27.8%
	21.8	19.3	16.8			
	33.7	15	22.7			

**Tabla 6. Resultados asfaltos Mastic proporción 20-80.**

- Resultados asfaltos Mastic proporción 40-60.

PROBETA	DUCTILIDAD (cm)			PROMEDIO	DESVIACIÓN	COEF. DE VARIACIÓN
1	3,5	4,1	3,9	3,8	0,31	8%
2	2,4	2,2	2,3	2,3	0,10	4%
3	4,1	3,5	4,9	4,2	0,70	17%

Tabla 7. Resultados asfaltos Mastic proporción 40-60.

-Resultados asfalto de penetración 13.

PROBETA	DUCTILIDAD (cm)			PROMEDIO	DESVIACIÓN	COEF. DE VARIACIÓN
1	0,3	0,3	0,3	0,3	0,00	0,00
2	0,3	0,3	0,3	0,3	0,00	0,00
3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,00	0,00

Tabla 8. Resultados asfaltos de penetración 13.

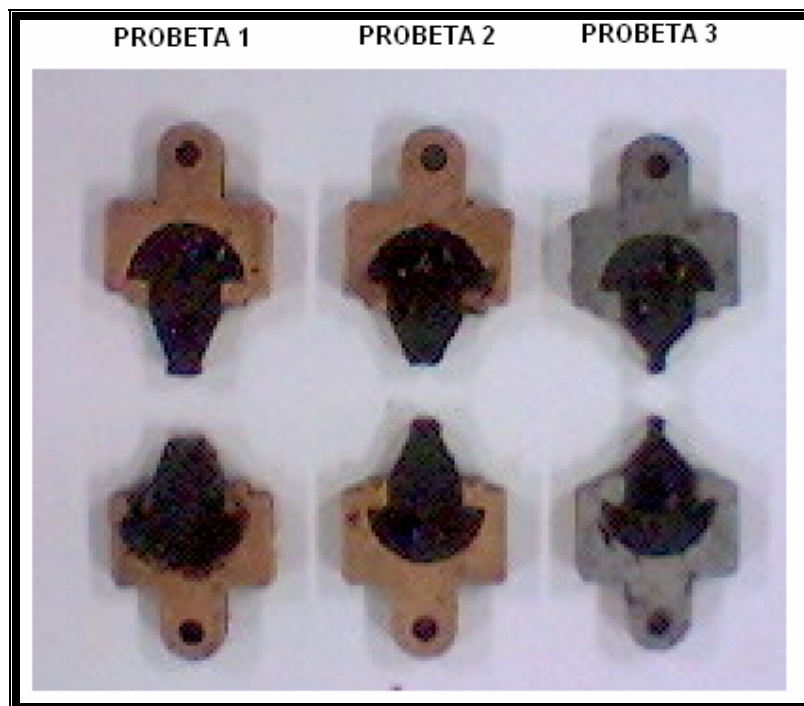


Figura 15. Probetas falladas con asfaltos de penetración 13.

Con base en los resultados obtenidos en los ensayos a diferentes tipos de asfaltos, se puede dar como parte de esta investigación, la discriminación de los asfaltos por medio del procedimiento acá descrito.

En el caso del ensayo del asfalto de penetración 13, este presenta una particularidad, pues muestra, aparentemente una carencia de ductilidad a 10°C, ya que falla de forma súbita, sin mostrar deformación previa (figura 15), obteniendo el mismo resultado para las tres probetas.

### 2.2.5 Ensayos De Recuperación Elástica

De igual modo, se hicieron ensayos de recuperación elástica, con cada una de las probetas modificadas con el fin de determinar la repetibilidad de cada una de ellas y juzgar si los resultados obtenidos son útiles para dicho ensayo.

El ensayo de recuperación elástica con ductilómetro consiste en estirar las probetas una longitud de 10 cm, para luego realizar un corte con la ayuda de unas tijeras en el punto medio de estas, esperar un lapso de 30 minutos y registrar la distancia recuperada. El valor de recuperación se da como porcentaje de la longitud inicial de la probeta (10 cm).

- Resultados a 10 °C. (Asfalto modificado con polímeros "MEXPHALTE PM TIPO II)

PROBETA	RECUPERACIÓN (CM)			% DE RECUPERACIÓN	PROMEDIO	DESVIACIÓN	COEF. DE VARIACIÓN
1	4.9	5	4.8	52.2	4.8	0.2	3.3%
	4.8	4.5	4.7				
	4.6	4.9	4.8				
2	4.8	4.6	4.6	53.1	4.7	0.1	2.2%
	4.5	4.8	4.7				
	4.8	4.7	4.7				
3	4.6	4.4	4.6	54.7	4.5	0.1	2.7%
	4.3	4.6	4.5				
	4.6	4.7	4.5				

**Tabla 9. Pruebas a 10 °C. Realizadas con asfaltos modificados con polímeros**

Queriendo dar a la probeta una mayor utilidad se realizaron ensayos de recuperación elástica, buscando que una sola probeta funcione para los dos ensayos, los resultados que se muestran en la tabla 9 corresponden a ensayos realizados con asfalto modificado con polímeros. Esto obedece a que los asfaltos probados anteriormente, sometidos a las condiciones del ensayo no tienen la ductilidad requerida para tal fin (10 cm).

Los resultados muestran porcentajes de recuperación muy similares entre las tres probetas demostrando así que cualquiera de ellas puede ser útil para este ensayo.

### **3. ANÁLISIS MECÁNICO**

Por medio de este estudio, se examinará el comportamiento de las probetas sometidas a tensión, a continuación se presentará el proceso con el cual se ejecutó este análisis.

#### **3.1 MODELAMIENTO MECANICO**

Se simuló de forma virtual el procedimiento que se lleva a cabo en la ejecución del ensayo. El análisis ubica lugares en los cuales se concentran las deformaciones y los esfuerzos en las probetas a medida que se le aplica una fuerza, exponiendo las secciones críticas de cada una, para así, estimar puntos de comparación y diferencias entre cada una de ellas.

Este análisis se realiza con un software especializado de elementos finitos, en este caso, el ANSYS, el cual presenta de forma gráfica los resultados de la simulación del ensayo, en lo referente a esfuerzos y deformaciones en donde el espectro varía de colores azules a rojos, siendo los azules los valores mínimos y los rojos los máximos.

Los parámetros que se tuvieron en cuenta para la elaboración del modelo fueron el módulo de elasticidad del asfalto a 10°C el cual se tomó igual a 8000 Mpa y una relación de Poisson de 0.48, las cargas aplicadas se variaron en un rango tal, que permitiera observar el comportamiento mostrado por cada una de las probetas. Vale la pena resaltar que para la realización del modelo se consideró el comportamiento elástico del material.

- **DEFORMACIONES**

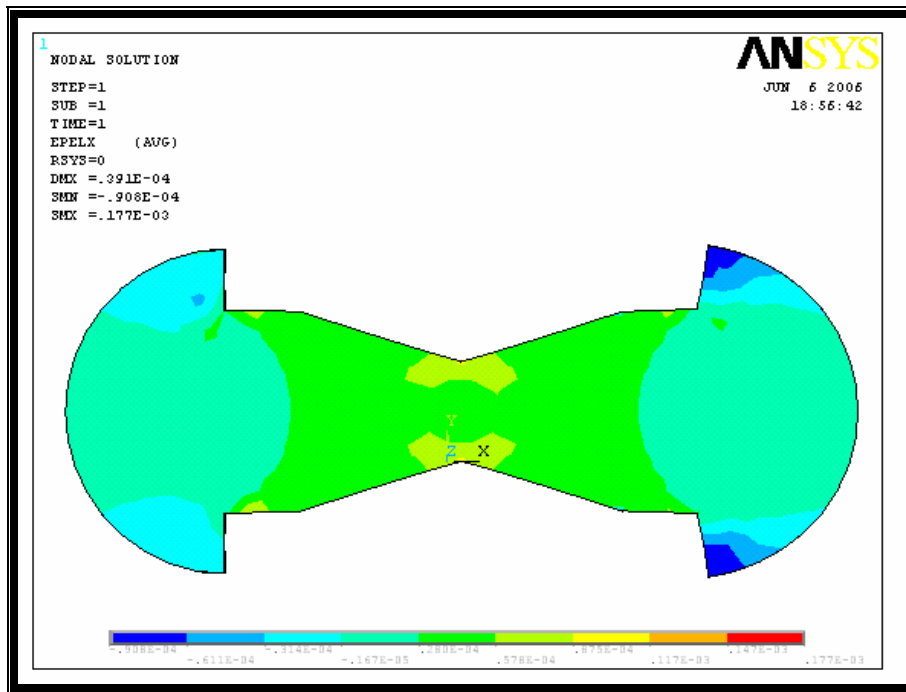


Figura 16. Deformaciones Probeta Original

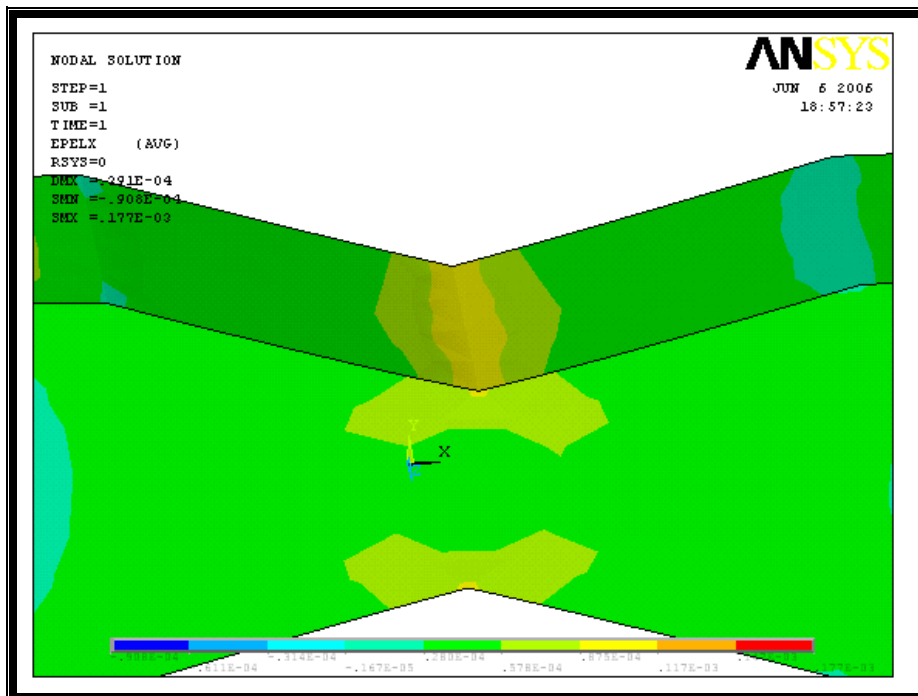


Figura 17. Deformaciones Probeta Original (acercamiento cuerpo de la probeta)

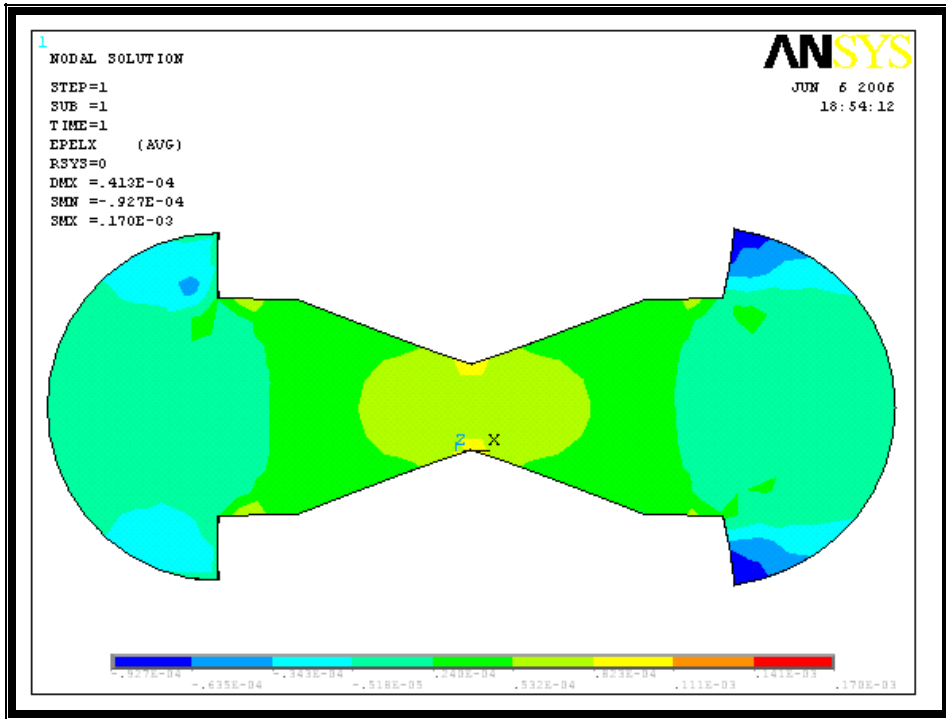


Figura 18. Deformaciones Probeta 1

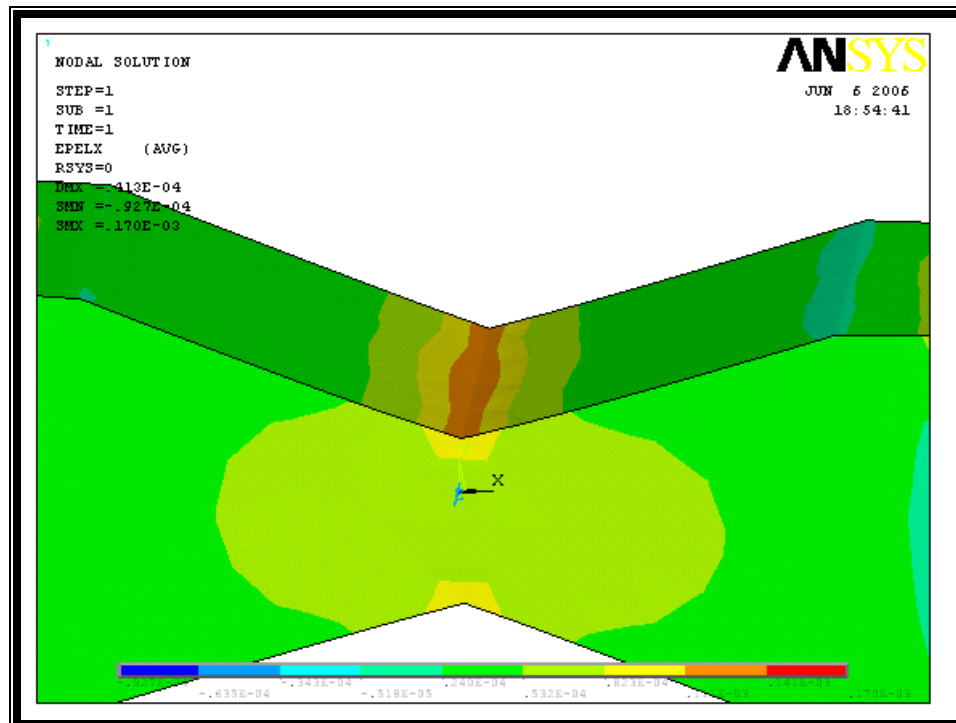


Figura 19. Deformaciones Probeta 1 (acercamiento cuerpo de la probeta)

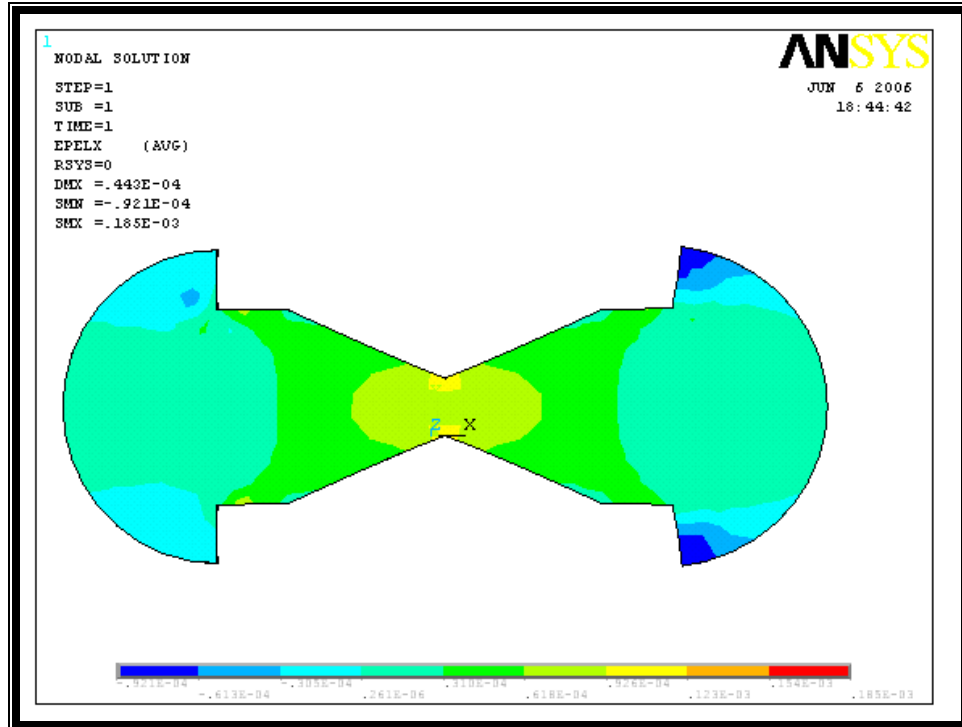


Figura 20. Deformaciones Probeta 2

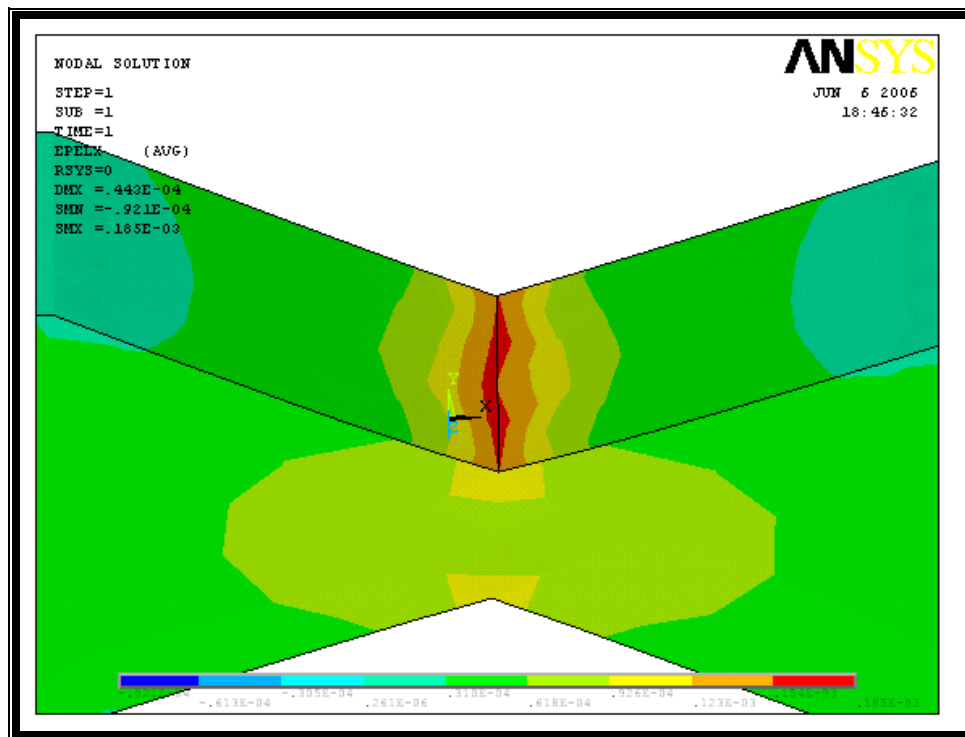


Figura 21. Deformaciones Probeta 2 (acercamiento cuerpo de la probeta)

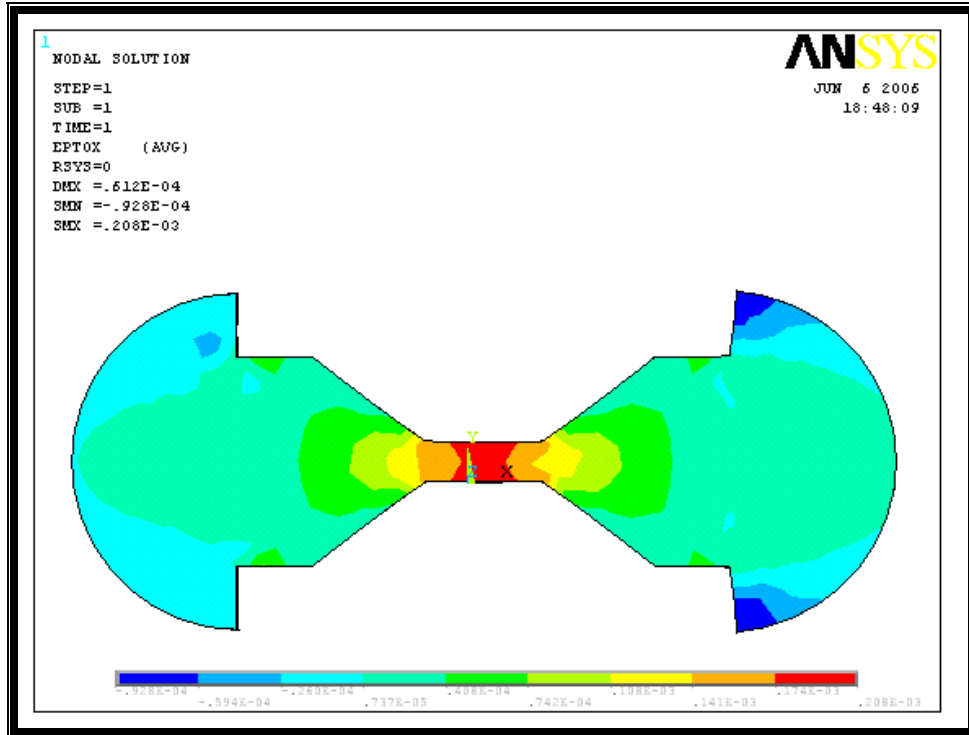


Figura 22. Deformaciones Probeta 3

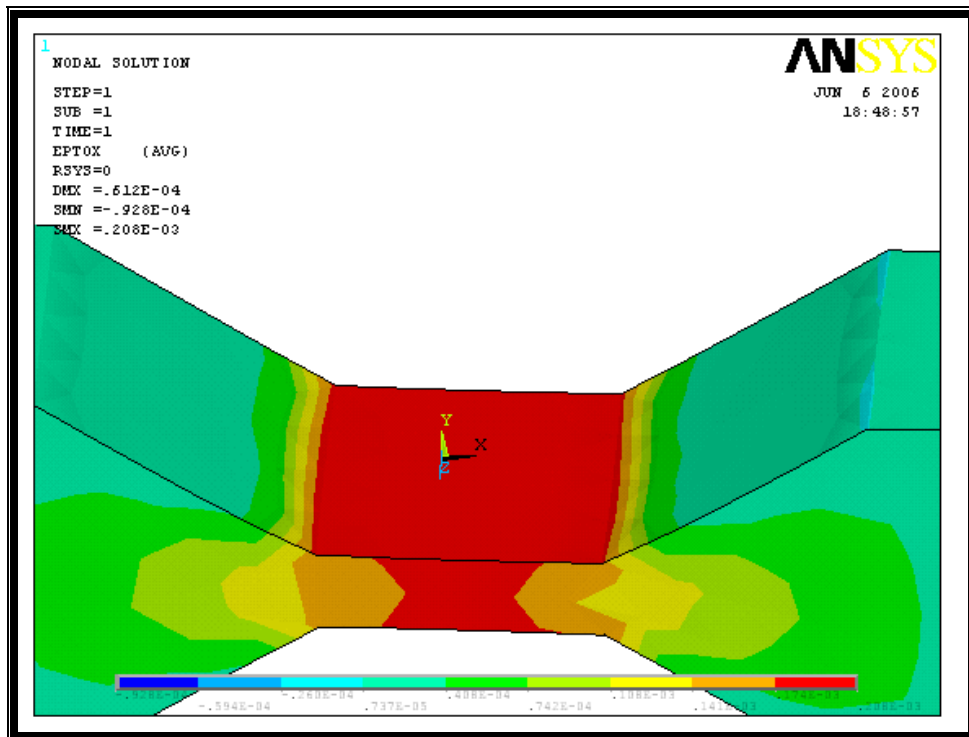


Figura 23. Deformaciones Probeta 3 (acercamiento cuerpo de la probeta)

- **ESFUERZOS**

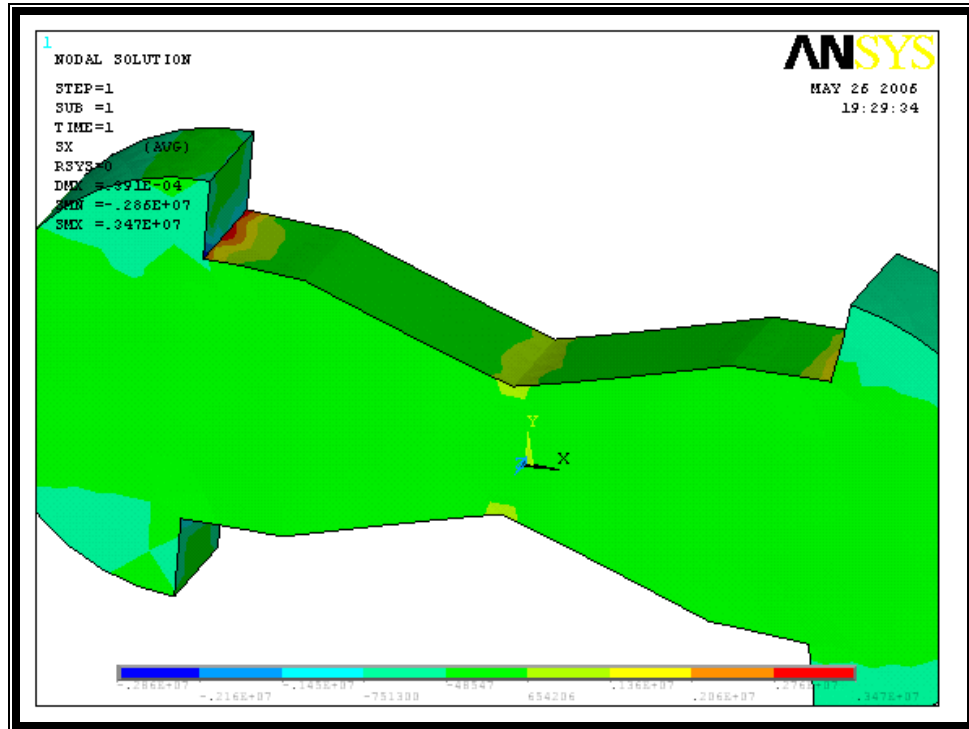


Figura 24. Distribución de Esfuerzos Probeta Original

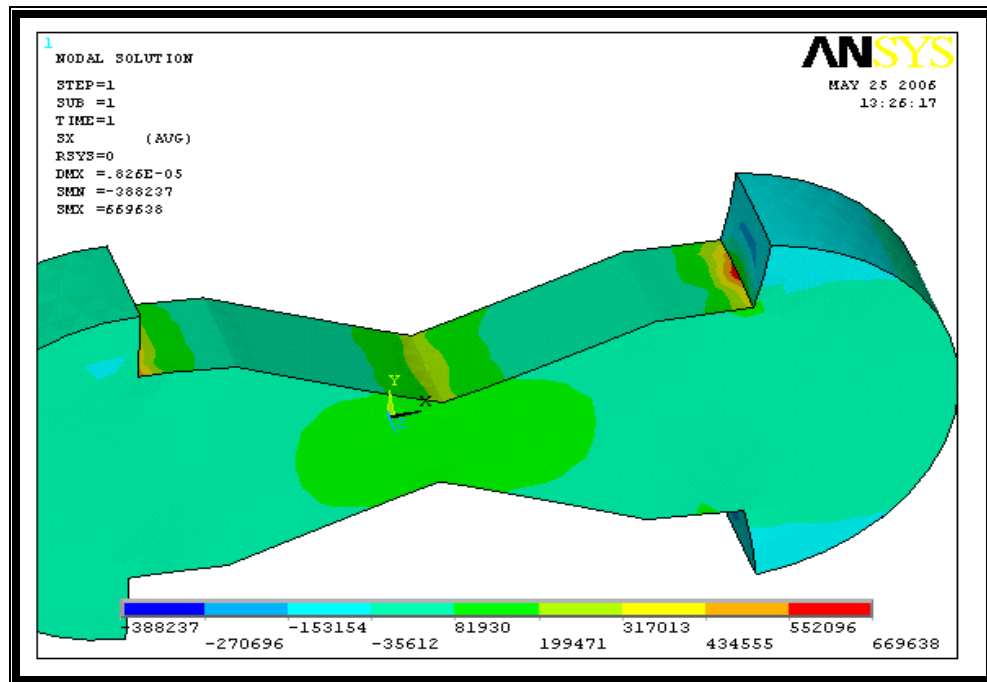


Figura 25. Distribución de Esfuerzos Probeta 1

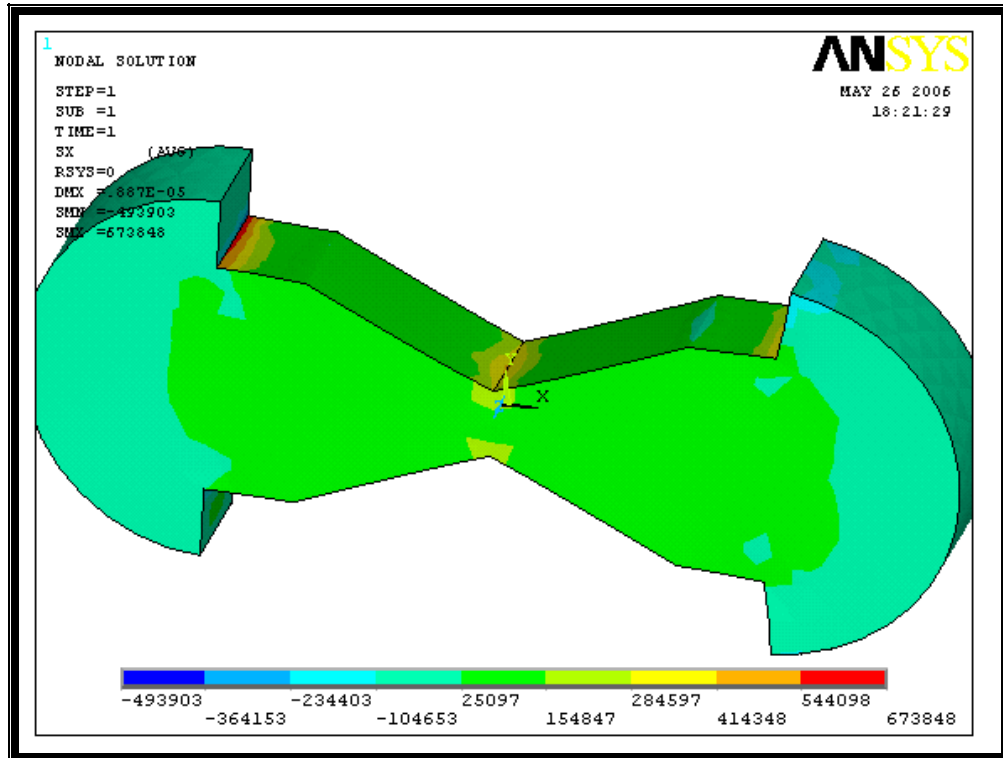


Figura 26. Distribución de Esfuerzos Probeta 2

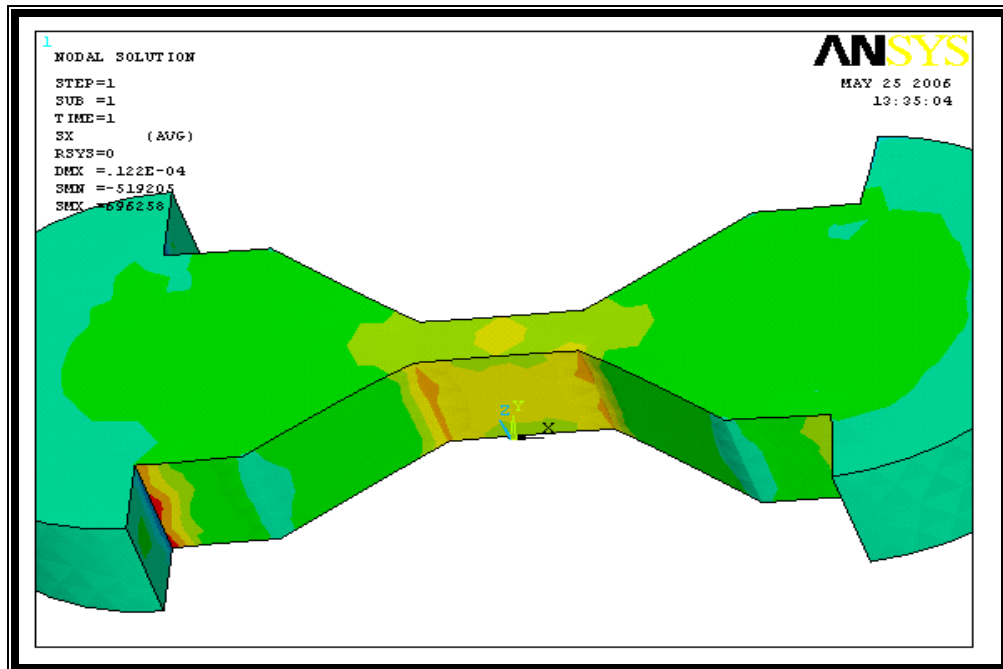


Figura 27. Distribución de Esfuerzos Probeta 3

Los resultados obtenidos mediante este análisis de elementos finitos muestra el comportamiento de cada una de las probetas al ser sometidas a una fuerza de tracción.

Las gráficas que describen las deformaciones sufridas por cada una de las probetas demuestran que estas se concentran en el punto medio en el cual la sección transversal es mínima y que las áreas correspondientes a las mordazas presentan deformaciones que pueden ser despreciables.

La probeta 3, por ser la de menor sección transversal, presenta mayor concentración de esfuerzos en los puntos de transición, es decir, en las esquinas y quiebres que conforman su cuerpo, y altas deformaciones en el punto medio, que para este caso no es un sólo punto, sino que corresponde a toda el área plana que conforma dicha sección, este hecho no garantiza un punto de falla fijo, por lo cual su repetibilidad se encuentra comprometida.

Las probetas 1 y 2 por tener la misma forma que la probeta original muestran un comportamiento muy similar entre si, ya que debido a la reducción gradual de la sección transversal se puede garantizar que la falla ocurrirá en el punto medio. Aunque la probeta 1, muestra un comportamiento uniforme de esfuerzos, se puede observar que se concentran en el centro de ella y no se reparten gradualmente a lo largo de ésta, como es el caso de la probeta original y la probeta 2. Como la probeta 2 tiene menor sección transversal que la probeta original, ésta presenta una mayor concentración de esfuerzos y deformaciones, aunque se distribuyen de forma similar a la probeta original. Por esto, se podría afirmar que la probeta 2, presenta un mejor comportamiento a la hora de ejecutar los ensayos de ductilidad de asfaltos a 10°C.

#### 4. CONCLUSIONES

Las pruebas de ductilidad de asfaltos realizadas a través de este estudio, corroboraron las apreciaciones acerca del funcionamiento de la probeta 2 con un coeficiente de variación de 4%, muy por debajo de los mostrados por el resto, conservando su repetibilidad a lo largo de todas las pruebas, razón por la cual se recomienda para futuros ensayos.

Al final, el balance que deja el presente estudio se puede resumir así:

- ❖ Pruebas de ductilidad de asfaltos, realizadas a 10°C, permiten discriminar diferentes tipos de materiales bituminosos.
- ❖ Se modificó la geometría de la probeta tradicional del ensayo de ductilidad y se obtuvo mayor repetibilidad en los resultados.
- ❖ El anclaje de las probetas afecta la repetibilidad del ensayo.

## 5. RECOMENDACIONES

- ❖ Se deben realizar un mayor número de ensayos para dar confiabilidad a la prueba.
- ❖ Se pueden formular nuevos diseños de probetas que permitan reducir el coeficiente de variación, basados en un aumento en el valor de la media (Aumentar el valor de la ductilidad y disminuir la desviación).
- ❖ La medida de ductilidad debe acompañarse de una medida de rigidez. Instalando un sensor de fuerza en el equipo de ensayo.
- ❖ Es de interés modelar el comportamiento del material bajo las condiciones reales del ensayo.

## BIBLIOGRAFÍA

- [ 1 ] MONTEJO FONSECA, Alfonso. Ingeniería de pavimentos para carreteras. Universidad Católica de Colombia. Santafe de Bogotá. Segunda Edición. 1998.
- [ 2 ] REYES LIZCANO, Fredy Alberto. Diseño racional de pavimentos. Pontificia Universidad Javeriana. Santafe de Bogotá. 2005.
- [ 3 ] Portales en Internet:
- [es.wikipedia.org/wiki/Ductilidad](http://es.wikipedia.org/wiki/Ductilidad)
  - [www.e-asphalt.com](http://www.e-asphalt.com)
  - [http://materiales.eia.edu.co/laboratorios/traccion/medida\\_de\\_la\\_ductilidad.htm](http://materiales.eia.edu.co/laboratorios/traccion/medida_de_la_ductilidad.htm)