

**IMPLEMENTACIÓN DE PRUEBAS DE INDENTACIÓN ESFÉRICA
EN ASFALTOS**

NATALIA GIRALDO BELTRÁN

NATALIA MARÍA MALDONADO ESTRADA

**UNIVERSIDAD EAFIT
ESCUELA DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL
MEDELLÍN
2011**

**IMPLEMENTACIÓN DE PRUEBAS DE INDENTACIÓN ESFÉRICA
EN ASFALTOS**

NATALIA GIRALDO BELTRÁN

NATALIA MARÍA MALDONADO ESTRADA

Trabajo de grado para optar al título de Ingeniera Civil

Asesor

INGENIERO JULIAN VIDAL VALENCIA

**UNIVERSIDAD EAFIT
ESCUELA DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL
MEDELLÍN
2011**

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos especialmente al ingeniero Julián Vidal Valencia, asesor e investigador de este proyecto de grado.

Al ingeniero Alexander Ossa, director de la investigación.

A la Universidad EAFIT, por el préstamo de equipos y de sus instalaciones, así como a aquellos docentes y personal del laboratorio de suelos y del laboratorio de materiales que hicieron posible el desarrollo experimental de esta tesis de grado.

CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN	11
1. ESTADO DEL ARTE	14
1.1 GENERALIDADES DEL ASFALTO	14
1.2 PROPIEDADES DEL ASFALTO	15
1.2.1. Propiedades químicas	16
1.2.2 Propiedades físicas	16
1.2.2.1 Cohesión	16
1.2.2.2 Ductilidad	17
1.2.2.3 Punto de ablandamiento	17
1.2.2.4 Penetración.	17
1.3 TIPOS DE ASFALTO	17
1.3.1 Por su estructura	17
1.3.1.1 Asfalto tipo sol	18
1.3.1.2 Asfalto tipo gel	18
1.3.1.3 Asfalto mediano	18
1.3.2 Por obtención	18
1.3.2.1 Asfaltos naturale	18
1.3.2.2 Asfaltos artificiales	18
1.4 DEFORMACIÓN PLÁSTICA O PERMANENTE EN MEZCLAS ASFÁLTICAS	22
1.4.1 Métodos para hallar la deformación permanente	23
1.4.1.1 Representación de la rigidez	23
1.4.1.2 Modelos de Creep	25
1.4.1.3 Modelos viscoelásticos lineales	25
1.4.1.4 Modelos viscoelástico no lineales	25
1.4.1.5 Modelos viscoelastoplásticos	26
1.4.1.6 Modelos basados en elementos finitos	26
1.4.1.7 Modelos triaxiales	26
1.4.1.8 Modelo de indentación esférica	26
2. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL	27
2.1 INTRODUCCIÓN	27

2.2	DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO	28
2.3	PROCEDIMIENTO DE ENSAYO	29
3.	MODELO CONSTITUTIVO	32
3.1	INTRODUCCIÓN	32
3.2	EXPLICACIÓN DEL MODELO CONSTITUTIVO	32
3.3	METODOLOGÍA DE MODELACIÓN	35
3.3.1	Parámetros del modelo matemático	35
4.	RESULTADOS Y ANÁLISIS: COMPORTAMIENTO DE LOS ENSAYOS EXPERIMENTALES	40
4.1	Indentador con diámetro de 15 mm.	44
4.2	Indentador con diámetro 25 mm	49
4.3	Indentador con diámetro 35 mm	51
	CONCLUSIONES	55
	BIBLIOGRAFÍA	57

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Curva de calibración de temperatura contra viscosidad	15
Figura 2. Proceso de destilación del petróleo para obtener productos asfálticos	19
Figura 3. Componentes de la máquina universal	29
Figura 4. Programación del ensayo en Bluehill	30
Figura 5. Dimensiones de los indentadores	30
Figura 6.(a). Colocación de los recipientes. (b). Proceso de deformación.	31
Figura 7. Deformación final del asfalto	31
Figura 8. Esquema de contacto de indentación	33

LISTAS DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Aditivos usados en la fabricación de asfaltos modificados	21
Tabla 2. Datos generales de la máquina universal	28
Tabla 3. Datos técnicos de la máquina universal	28
Tabla 4. Constantes de calibración	34
Tabla 5. Cálculos para el ajuste experimental y teórico de la deformación efectiva y la velocidad de deformación de referencia	41

LISTA DE GRÁFICAS

	pág.
Gráfica 1. Esfuerzo efectivo contra velocidad de esfuerzo de referencia a 22 °C.	36
Gráfica 2. Esfuerzo efectivo contra velocidad de esfuerzo de referencia, Ossa (2005)	37
Gráfica 3. Esfuerzo efectivo contra velocidad de esfuerzo de referencia modificada a 22 °C.	37
Gráfica 4. Comportamiento experimental del esfuerzo efectivo contra la velocidad de esfuerzo de referencia ajustado.	38
Gráfica 5. Ajuste de la velocidad de deformación contra el esfuerzo efectivo experimental y teórico.	41
Gráfica 6. Gráfica correspondiente a la ecuación patrón.	42
Gráfica 7. Deformación contra tiempo experimental y patrón.	43
Gráfica 8. a. Curva experimental y curva patrón de 5 N.	44
Gráfica 8. b. Curva experimental y curva patrón de 7.5 N.	44
Gráfica 8. c. Curva experimental y curva patrón de 12.5 N.	45
Gráfica 8. d. Curva experimental y curva patrón de 15 N.	45
Gráfica 8. e. Curva experimental y curva patrón de 20 N	46
Gráfica 8. f. Curva experimental y curva patrón de 30 N.	46
Gráfica 8. g. Curva experimental y curva patrón de 40 N.	47
Gráfica 8. h. Curva experimental y curva patrón de 50 N.	47
Gráfica 8. i. Curva experimental y curva patrón de 60 N.	48
Gráfica 8. j. Curva experimental y curva patrón de 70 N.	48
Gráfica 9. a. Curva experimental y curva patrón de 5 N.	49

Gráfica 9. b. Curva experimental y curva patrón de 10 N.	49
Gráfica 9. c. Curva experimental y curva patrón de 15 N.	50
Gráfica 9. d. Curva experimental y curva patrón de 20 N.	50
Gráfica 10. a. Curva experimental y curva patrón de 5 N.	51
Gráfica 10. b. Curva experimental y curva patrón de 10 N.	51
Gráfica 10. c. Curva experimental y curva patrón de 15 N.	52
Gráfica 10. d. Curva experimental y curva patrón de 20 N.	52
Gráfica 11. a. Unión de gráficas experimentales de 15 mm.	53
Gráfica 11. b. Unión de gráficas experimentales de 25 mm.	53
Gráfica 11. c. Unión de gráficas experimentales de 35 mm.	54

RESUMEN

Los pavimentos son diseñados para proveer una superficie de rodadura suave, cómoda y duradera con una adecuada resistencia al deslizamiento, de una manera económica a lo largo de su vida útil. Para cumplir estos requerimientos, la base, sub-base y capas que subyacen son protegidas del tráfico y los efectos ambientales mediante la utilización de un material superficial que no sufra un deterioro inaceptable; siendo una de las opciones de material superficial más comunes en nuestro medio, el uso de pavimentos asfálticos. Existen diferentes formas en las que un pavimento asfáltico puede fallar, las más comunes son fractura por fatiga, deformación permanente, reducción de la resistencia al deslizamiento y fractura a temperaturas bajas.

La deformación permanente, es el defecto producido en el material asfáltico que no presenta falla estructural; la predicción de este tipo de defecto se dificulta por la alta complejidad del material, que presenta comportamiento viscoelastoplástico no lineal, y los métodos comúnmente utilizados para su análisis son altamente complejos, lo que hace difícil su utilización en la práctica del día a día. Además, para utilizar estos métodos de análisis se requiere un buen número de pruebas destructivas de laboratorio que muchas veces no logran reproducir las mismas condiciones ambientales y de soporte que se encuentran en las vías. Se hace necesario entonces contar con un modelo simple y de fácil implementación para predecir la deformación permanente de estos materiales y así reducir el número y periodicidad de mantenimientos en las vías.

En este proyecto se caracterizan a nivel de laboratorio el asfalto como material comúnmente utilizado en la construcción en Colombia, ajustándolo a parámetros de un modelo constitutivo para la predicción del efecto de deformación permanente sobre dicho material.

INTRODUCCIÓN

Las carreteras son un factor importante de las características que permiten el desarrollo de la sociedad desde el principio de los tiempos, estas empezaron a ser construidas para realizar trueques e intercambio de mercancías, originando el intercambio mercantil entre ciudades. Desde estas épocas las carreteras han tenido varios cambios, enfocados en la adecuación del suelo, para ofrecer menor tiempo en sus recorridos y mejor calidad, para el desarrollo de las comunidades.

Uno de los materiales utilizados para estas mejoras ha sido el asfalto, ya que proporciona más estabilidad en la estructura del pavimento por ser un material viscoso, altamente impermeable, adherente, cohesivo, derivado del crudo y compuesto casi por completo por asfalto, por esto es utilizado como aglomerante en mezclas asfálticas para la construcción de carreteras y autopistas.

En la actualidad la capa de rodadura ha tenido mucha importancia y se han hechos estudios para mejorar la capacidad portante, la seguridad y la comodidad de esta. El asfalto es utilizado en todo el mundo, para carreteras, autopistas y pistas de aeropuertos, pero estas sufren una variedad de desgaste y falla en los mecanismos de servicio. Las fallas pueden ser desniveles o hendiduras, debido a la deformación permanente y al flujo del material en la superficie de la carpeta asfáltica causada por el tráfico, la temperatura o infiltración de agua, en especial en los carriles de baja velocidad y donde hay paso de tráfico pesado como los camiones.

El asfalto tiene como función principal unir los agregados de la mezcla para resistir las cargas que se inducen en la estructura del pavimento por los vehículos, disminuir las dimensiones de la base y subbase e impermeabilizar y brindar seguridad en la vía. Es utilizado en la última capa de la estructura del pavimento para proporcionar una superficie tersa y segura al rodamiento de los vehículos, sellando los materiales que pertenecen a la base de la estructura de la vía. Esta capa debe tener suficiente resistencia al desgaste, a la deformación permanente y a la fractura para soportar las cargas. Está dividida en:

- Carpeta de desgaste: es la parte superior expuesta a los vehículos.
- Capa de liga: es la parte inferior que está en contacto con la base por medio de una capa de imprimación.

La deformación de los pavimentos asfálticos consiste en el deterioro gradual de la superficie y se manifiesta como una depresión bajo las bandas de circulación vehicular. Las causas que lo determinan son la formación y acumulación de deformaciones plásticas por la magnitud y frecuencia de una aplicación de carga en la base de las capas que ocasionan grandes esfuerzos verticales y por las condiciones de temperatura. Este fenómeno ocasiona hidroplaneo, que consiste en la acumulación de agua en las hendiduras.

El nivel de servicio es un factor importante para la estructura del pavimento por la carga y velocidad que se genera sobre él; también la variación de la temperatura es un factor que afecta las características mecánicas del material, donde se ha demostrado que a altas temperaturas o bajo cargas lentas el asfalto se comporta como un líquido viscoso; a bajas temperaturas o bajo cargas rápidas el asfalto se comporta como un sólido elástico; y a temperaturas intermedias, el asfalto se comporta como un material viscoelástico. A partir de estas falencias naturales del asfalto, se han hecho cambios para evitarlas; usando aditivos para su mejoramiento, tales como los plastómeros, elastómeros termoplásticos, fibras y material natural.

La investigación descrita en este proyecto es parte de un desarrollo de modelos micromecánicos constitutivos del asfalto para su uso en el análisis y el diseño del pavimento. Los primeros trabajos que relacionan el índice de penetración y punto de ablandamiento del asfalto, muestran que el asfalto tiene un comportamiento viscoelástico lineal.

Para la realización del modelo de curvas patrón, las cuales están influenciadas por el módulo dinámico, el ángulo de fase y del tiempo, de temperatura, existen dos grandes inconvenientes. En primer lugar, es aplicable solamente para las capas relativamente pequeñas (hasta 0,1 m), ya que en el rango viscoelástico lineal, entre las películas delgadas del asfalto y las partículas del agregado existen grandes esfuerzos y tensiones. En segundo lugar, se necesita un gran número de experimentos para calibrar estos modelos.

El modelo fenomenológico del asfalto propuesto por Ossa y colaboradores arrojó una respuesta del asfalto donde se muestran los problemas en la superficie de carreteras ocasionados por las cargas de los vehículos; en condiciones de intervalos de temperaturas, presiones y carga; utilizando carga monótonica con el ensayo de indentación esférica, haciendo la validación del modelo constitutivo multiaxial, lo cual es el foco de este

proyecto y proporciona facilidad en el momento de medir las propiedades mecánicas del material.

La prueba de indentación consiste en aplicar una carga, dando la deformación en función del tiempo por medio de un penetrador o indentador que presiona el material a una tasa previa de velocidad, dando así la deformación y el tiempo en el cual ocurrió. Para la interpretación de estos resultados existen varios modelos desarrollados por investigadores, pero todos están basados en la relación de deformación de presión con la respuesta de los materiales. Varios investigadores hicieron aportes para este modelo, hasta llegar al utilizado (Ossa) en el proyecto; Tabor (1951) propuso relaciones empíricas para correlacionar la presión de indentación de la velocidad independiente de esfuerzo con la respuesta de tracción uniaxial del material y después con Mulhearn (1960) ampliaron estas relaciones empíricas con una ley de potencias. Bower (1993) y colaboradores utilizaron unas leyes constitutivas que dan cuenta del endurecimiento por deformación; este tipo de análisis proporciona la base para la investigación de la respuesta de la indentación del asfalto en este proyecto.

Con lo dicho anteriormente se quiere comprobar con un estudio experimental que el modelo de Ossa (2005) es aplicable también para temperaturas mayores a las establecidas en su proyecto, desarrollando así el modelo de comportamiento de la deformación en asfaltos aplicados en la industria colombiana, analizado con las condiciones de temperatura y disposición de materiales al alcance.

1. ESTADO DEL ARTE

1.1 GENERALIDADES DEL ASFALTO

El asfalto se encuentra en depósitos naturales, pero la mayoría del que se usa en la actualidad es obtenido del crudo del petróleo. Para pavimentar se destinan asfaltos de destilación, hechos con los hidrocarburos no volátiles que permanecen después de refinar el petróleo para obtener gasolina y otros productos.

Los depósitos naturales de asfalto están presentes en pozos o lagos a partir de residuos de petróleo que transpiran hacia la superficie por medio de grietas en la tierra. También se aprovechan los depósitos de rocas asfálticas o rocas impregnadas de asfalto.

Las carreteras en el siglo XX estaban constituidas, por un material de granulometría discontinua; extendiendo y compactando un material grueso cuyos vacíos se rellenaban con material fino. Provocaban grandes nubes de material particulado y el control de las deformaciones era nulo; esto originó los tratamientos superficiales a base de emulsiones en el año 1903. Así pues, en los albores del siglo XX, ya existían los principales componentes de la técnica de revestimientos bituminosos.

El asfalto es un material cohesivo, adherente e impermeable, con capacidad de resistir altos esfuerzos instantáneos y fluir bajo la acción de cargas permanentes. Como aplicación de estas propiedades el asfalto puede cumplir, en la construcción de pavimentos, las siguientes funciones:

- Evita la humedad y las filtraciones del agua proveniente de la precipitación en la estructura del pavimento.
- Facilita una cohesión óptima entre agregados, permitiendo resistir la acción mecánica de separación producida por las cargas de los vehículos. Igualmente mejora la resistencia al corte de la estructura, posibilitando la abreviación de su espesor.

Este material asegura la satisfacción simultánea y económica de estas dos funciones, al mismo tiempo que proporciona una estructura de pavimento

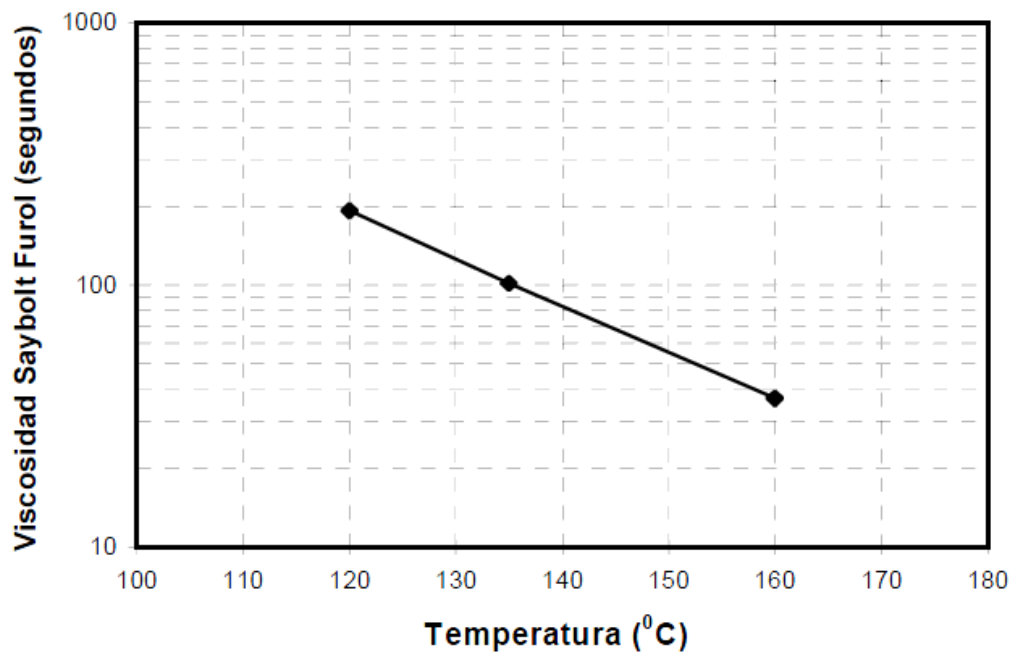
con características flexibles que permiten acomodarse, sin fisuras, a eventuales movimientos de las capas subyacentes.

1.2 PROPIEDADES DEL ASFALTO

Su comportamiento depende de la temperatura, por lo cual se denomina como material termoplástico (Figura 1), a temperaturas muy altas se comporta como un material plástico viscoso, ambientes fríos se comporta como un sólido elástico y a temperaturas intermedias (0 °C a 70 °C) presenta un estado visco-elástico.

Una de sus propiedades importantes es la sensibilidad a la temperatura, por lo cual en la fabricación de las mezclas asfálticas es importante determinar la temperatura de calentamiento del asfalto se determina mediante una curva de calibración de temperatura contra viscosidad (Figura 1), de la cual se determina el intervalo de temperaturas con las cuales se logran viscosidades Saybolt Furol de 75 segundos a 155 segundos o en otras condiciones mediante una curva reológica obtenida mediante el viscosímetro Brookfield.

Figura 1. Curva de calibración de temperatura contra viscosidad



1.2.1. Propiedades químicas. El asfalto está compuesto por una suspensión de pequeñas partículas en hidrocarburos donde difícilmente se discierne la fase permanente de la dispersa. Nellensteyn desarrolló en 1924 un modelo basado en procedimientos analíticos para configurar la estructura del asfalto, que posteriormente fue adoptado y mejorado por Pfeiffer y Saal en 1940.

El modelo micelar es finalmente aceptado para establecer la estructura del asfalto. Este tiene dos fases:

- Fase continua: formada por los maltenos, allí están los componentes de bajo peso molecular, resina y aceites; donde las resinas aportan las cualidades ligantes del asfalto y los aceites contribuyen a la maleabilidad. Es decir esta fase describe las propiedades elásticas.

- Fase discontinua: formada por los asfáltenos, componentes de mayor peso molecular, azufre, oxígeno y nitrógeno en dosis altas. Estos le producen la propiedad aglutinante al asfalto y su dureza.

Los asfaltos contienen fracciones bituminosas insolubles en parafinas. Como ya se dijo, cerca del 90 % al 95 % del peso del asfalto está compuesto por carbono e hidrógeno, o lo que se había denominado como hidrocarburos.

1.2.2 Propiedades físicas. El asfalto es un material aglomerante, resistente, muy adhesivo, altamente impermeable y duradero; capaz de resistir altos esfuerzos instantáneos y fluir bajo acción de calor o cargas permanentes. Componente natural de la mayor parte de los petróleos, en los que existe en disolución y que se obtiene como residuo de la destilación al vacío del crudo pesado. Es una sustancia plástica que da flexibilidad controlable a las mezclas de materiales con las que se le combina usualmente. Su color varía entre el café oscuro y el negro; de consistencia sólida, semisólida o líquida, dependiendo de la temperatura a la que se exponga o por la acción de disolventes de volatilidad variable o por emulsificación.

1.2.2.1 Adherencia. Es la interacción entre los materiales pétreos o granulares, dando a la capa mayor resistencia al desgaste y mejorando de forma considerable la capacidad de soporte de la estructura, permitiendo disminuir los espesores.

1.2.2.2 Ductilidad. El valor de la ductilidad es un indicativo de la disposición del asfalto en cuanto a la afinidad con el agregado, en otros términos: a mayor ductilidad mayor afinidad con el agregado o mayor adherencia. Los asfaltos presentan un comportamiento no Newtoniano, por lo que la variación de sus propiedades al incrementar la temperatura o por acción de la misma son algo impredecibles. El valor de la ductilidad corresponde a la longitud a la cual ocurrió el rompimiento.

1.2.2.3 Punto de ablandamiento. Es la temperatura a la cual un asfalto se ablanda. A menor temperatura de ablandamiento existe la posibilidad de que el asfalto sea más susceptible a los cambios de deformación.

1.2.2.4 Penetración. Es una medida indirecta de la consistencia del material, a mayor penetración menor consistencia del material. Según la penetración se clasifican los asfaltos y aceptar o rechazar un material por no cumplir con la especificación del pedido de la planta de mezclas.

La clasificación depende de los milímetros deformados, los cuales son:

- AC 40 - 50
- AC 60 - 70
- AC 85 - 100
- AC 120 - 150
- AC 200 – 300

1.3 TIPOS DE ASFALTO

Su clasificación principal es por la forma en la que fue captado y por su estructura.

1.3.1 Por su estructura. Debido a esta, el asfalto se clasifica en asfalto tipo sol y asfalto tipo gel; de acuerdo con la dosificación de los maltenos y los asfaltenos.

1.3.1.1 Asfalto tipo sol. Es muy susceptible a cambios climáticos, posee alto grado de ductilidad, su elasticidad es imposible de medir y su resistencia aumenta a medida que pasa el tiempo. Cuando es usado como ligante en mezclas asfálticas, conduce deformaciones plásticas muy altas. Este asfalto posee baja proporción de asfáltenos, los cuales se juntan en cadenas homogéneas dispersándose fácilmente en los maltenos, que es un medio aceitoso.

1.3.1.2 Asfalto tipo gel. Al contrario que el tipo sol posee una gran cantidad de asfáltenos y resinas, formando un tejido enredado con algunos vacíos, donde se localizan los maltenos. Es muy susceptible a cambios de temperatura, no se le puede medir la elasticidad y su ductilidad es escasa. Es el usado, para la construcción de carreteras, ya que tiene un comportamiento frente a las cargas repetitivas y cambios de temperatura.

1.3.1.3 Asfalto mediano. Este posee una estructura intermedia entre asfalto gel y asfalto sol.

1.3.2 Por obtención. Se puede obtener de yacimientos naturales o por destilación de crudo.

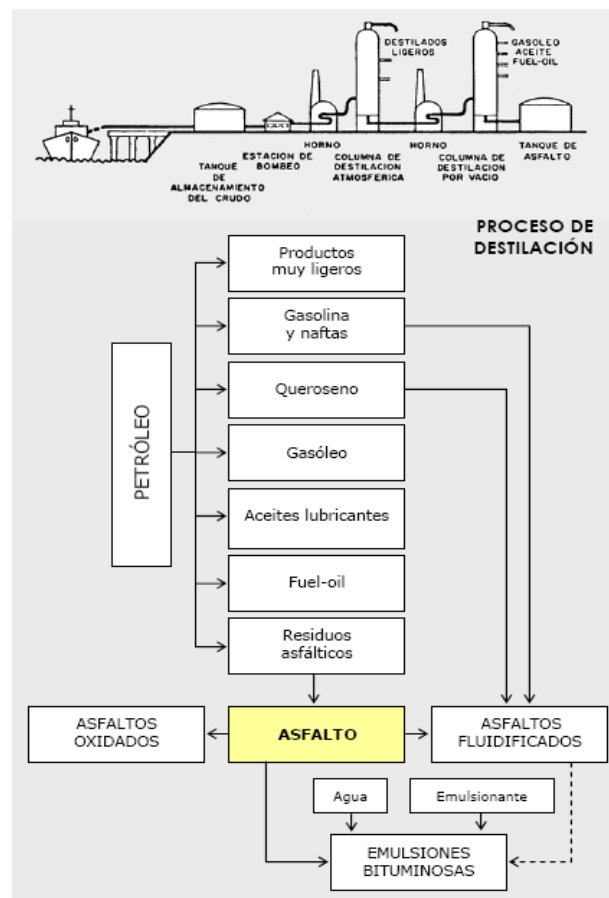
1.3.2.1 Asfaltos naturales. Este se genera cuando el petróleo asciende por medio de las fisuras a la superficie, donde actúan los elementos atmosféricos como el viento, la humedad y la temperatura. Ocasionando aceites de viscosidad más alta, separando los aceites más ligeros y los gases.

Estos aceites viscosos son los asfaltos y se pueden encontrar puros o combinado con otros minerales, sí llegase a ocurrir la combinación, se deberá someter a purificación para poder ser usados en la elaboración de mezclas asfálticas. Los asfaltos naturales también pueden ser encontrados en rocas asfálticas, donde el material se filtra por los poros.

1.3.2.2 Asfaltos artificiales. Son los derivados del petróleo, después de haber sido refinado, lo cual se basa en la segregación de los compuestos más pesados de los volátiles, por medio de la vaporización, fraccionamiento y condensación de las mismas.

El petróleo se almacena en tanques cilíndricos, donde es bombeado a la destilación primaria, deshidratación y desalación. Este se expande por un horno de alta temperatura y se vaporiza parcialmente, para ser acogido por la torre de destilación, donde los fragmentos livianos se elevan y los pesados se sedimentan. Luego, los fragmentos pesados que no se evaporaron se someten a un proceso de destilación al vacío para recuperar los gasóleos de vacío y obtener los residuos finales de destilación. En la figura (2), se muestra un esquema del proceso de destilación del petróleo para obtener productos asfálticos

Figura 2. Proceso de destilación del petróleo para obtener productos asfálticos



Tomado de Proyecto de Grado, Modelación y análisis de susceptibilidad a la deformación permanente de mezclas asfálticas (2007), Universidad Pontificia Bolivariana.

El asfalto puede o no ser apto para la elaboración de mezclas asfálticas dependiendo de los componentes estructurales del petróleo; sí los componentes bases son de tipo parafínica el aprovechamiento directo será

prácticamente nulo; mientras que los que tienen base tipo nafténica la explotación de asfalto sería bastante buena.

Los asfaltos provenientes de petróleos parafínicos no son aptos para la construcción, debido a que se precipitan a temperaturas bajas, creando una estructura discontinua, perdiendo así ductilidad.

Los asfaltos artificiales tienen la ventaja de la durabilidad como los asfaltos naturales y también presentan mejor uniformidad, ya que está libre de minerales extraños y materia orgánica, por el proceso de refinación.

- Asfaltos fluidificados o cutbacks. Se diluyen en un agente fluidificante derivado del petróleo o aceite, para que su aplicación sea más simple.

El agente fluidificante es un aditivo, usado únicamente en obra y después de mezclarse con el asfalto es eliminado por evaporación; en algunas ocasiones se puede recuperar las propiedades originales del asfalto.

Estos asfaltos se usan para la reparación de carreteras y en capas de adherencia.

Dependiendo del tipo de fluidificante, se clasifican en:

- Asfalto de curado rápido. Gasolina o disolvente tipo nafta, muy volátil.
- Asfalto de curado medio. Disolvente tipo queroseno de volatilidad media.
- Asfalto de curado lento. Se usan como disolventes aceites de volatilidad relativamente baja.

- Asfaltos fluxados. Se diluyen en un fluidificante derivado del alquitrán, para ablandar el asfalto; se usa en pavimentos flexibles en condiciones climáticas muy frías.

- Emulsiones asfálticas. Es asfalto en agua o dispersiones finas de asfalto. Se usan cuando hay exceso de frío o lluvia en el medio, porque sus propiedades permiten la aplicación sin previo calentamiento.

▪ **Asfaltos modificados.** Son asfaltos de penetración que con aditivos, se modifican algunas propiedades, mejorando así las características deseadas, como la resistencia de cargas altas y evitar deformaciones precipitadas por condiciones climáticas extremas. Para mejorar estas características se ha utilizado aditivos como polímeros, fibras y entre otros (Tabla 1).

▪ **Asfaltos modificados con polímeros.** El efecto principal es el cambio en la relación viscosidad – temperatura, permitiendo mejorar el comportamiento del asfalto tanto a bajas como altas temperaturas, también aportando mayor plasticidad, cohesión, resistencia al agua y resistencia a el envejecimiento.

Tabla 1. Aditivos usados en la fabricación de asfaltos modificados

TIPO DE ADITIVO		EJEMPLOS
POLÍMEROS	Plastómeros	<ul style="list-style-type: none"> • Etileno-Acetato de vinilo • Etileno-Acetato de metileno • Polietileno • Polipropileno • Poliestireno
	Elastómeros termoplásticos	<ul style="list-style-type: none"> • Estireno butadieno-estireno • Estireno butadieno • EPDM • BPD
FIBRAS		<ul style="list-style-type: none"> • Amianto • Celulosa • Fibras acrílicas
OTROS PRODUCTOS		<ul style="list-style-type: none"> • Asfaltos naturales • Caucho natural • Azufre

Tomado de Proyecto de Grado, Modelación y análisis de susceptibilidad a la deformación permanente de mezclas asfálticas (2007), Universidad Pontificia Bolivariana.

- **Asfalto con fibras.** Aumenta fundamentalmente la resistencia a la tracción y flexión. Se adicionan mediante dispositivos de reparto en el momento de aplicación en obra, creando una especie de malla entre el asfalto y los agregados.

- **Asfalto con azufre.** El azufre es utilizado como un diluyente del asfalto para mejorar el punto de ablandamiento, la susceptibilidad con la temperatura, la viscosidad, la gravedad específica y la ductilidad.

- Asfalto con caucho natural. Los cauchos sirven para mejorar la resistencia y brindar la característica de termoplaticidad.

La principal propiedad del asfalto analizada en este proyecto es la deformación plástica o permanente en asfaltos convencionales, la cual es el objetivo de este mismo.

1.4 DEFORMACIÓN PLÁSTICA O PERMANENTE EN MEZCLAS ASFÁLTICAS

Es una deformación longitudinal que va en dirección de la trayectoria de los vehículos; la cual depende de los cambios climáticos, el paso de tráfico pesado, mala compactación, exceso de liga y el mal diseño de la estructura del pavimento.

Este fenómeno es una acumulación de pequeñas deformaciones plásticas presentado en carriles de baja velocidad y vías donde se permite el estacionamiento.

En épocas de lluvia, es altamente peligro para el tránsito, porque al acumular en las hendiduras es difícil el control del vehículo.

La deformación permanente, plástica o rutting de la capa de rodadura se presenta frecuentemente y es asociada en gran porcentaje al trabajo que realiza el asfalto.

A lo largo del tiempo se han desarrollado modelos matemáticos para predecir las deformaciones permanentes en los asfaltos. Los más sobresalientes son los estudiados con regresiones empíricas, leyes típicas de deformación plástica o de ensayos de laboratorio para determinar los parámetros que las constituyen.

Inicialmente se basaron en regresiones empíricas, ya que se desconocía el comportamiento de los compuestos heterogéneos; desarrollados sobre teorías de medios continuos, pasando en la actualidad a los modelos micromecánicos. Generalmente están apoyados en teorías de visco-

elasticidad lineal, aunque las mezclas presentan un comportamiento visco-elástico no lineal, en condiciones uniaxiales como triaxiales.

1.4.1 Métodos para hallar la deformación permanente.

1.4.1.1 Representación de la rigidez. Van Der Poel (1995) fue el que introdujo la variable de rigidez en el comportamiento mecánico del asfalto, el cual relaciona la vida útil de la mezcla asfáltica con la adhesividad de los agregados, al ser expuesta a tensiones generadas por el tráfico y la temperatura. El módulo de rigidez lo definió como:

$$(S)_{t,T} = \left(\frac{\sigma}{\varepsilon} \right)_{t,T} \quad (1)$$

De donde,

σ : Esfuerzo

ε : Deformación

Las mezclas asfálticas bajo pequeñas deformaciones, tienen un comportamiento lineal. Van der Poel (1995) asumió que la rigidez de la mezcla está en función de la rigidez del asfalto puro y la fracción volumétrica del agregado.

En base a la suposición anterior en 1964, Herrim y Heukelom, modelaron la rigidez de la mezcla así:

$$\frac{S_{mezcla}}{S_{asfalto}} = \left\{ 1 + \frac{2.5c}{k(1-c)} \right\}^k \quad (2)$$

siendo,

S_{mezcla} : módulo de rigidez de la mezcla, [MPa]

$S_{asfalto}$: módulo de rigidez del asfalto puro, [MPa]

La concentración volumétrica del agregado c está dada por:

$$c = \frac{V_{\text{agregado}}}{V_{(\text{agregado} + \text{asfalto})}} \quad (3)$$

y κ es definida como:

$$\kappa = 0.83 \log \left\{ \frac{4 \times 10^4}{S_{\text{asfalto}}} \right\} \quad (4)$$

Este modelo se dedujo por ajustes empíricos de mezclas compactadas con aproximadamente 3 % de vacíos y con valores de concentración volumétrica del agregado c de 0.7 a 0.9.

Luego, Brown, S.F. y Brunton, J.M. (1992), incluyeron el porcentaje de vacíos en el agregado de la mezcla, pero esta ecuación solo es aplicable si estos están entre 12% y 30% y que el módulo de rigidez del asfalto sea mayor o igual a 5 MPa.

$$\frac{S_{\text{mezcla}}}{S_{\text{asfalto}}} = \left\{ 1 + \frac{257.5 - 2.5VMA}{\kappa(VMA - 3)} \right\}^{\kappa} \quad (5)$$

VMA: suma del porcentaje en volumen de aire más el porcentaje en volumen de asfalto. Porcentaje de vacíos en los agregados minerales.

Sí la rigidez es mayor de 5 MPa, el asfalto se comporta como un sólido elástico y la relación de la rigidez de la mezcla y el asfalto representa la medida del efecto rigidizante. Pero sí la rigidez es menor a 5 MPa, esta relación está en función de las respuestas elásticas, viscoelásticas y viscosas del material.

1.4.1.2 Modelos de Creep. Los modelos viscoelásticos lineales ignoran que el ahuellamiento depende de las temperaturas extremas y las cargas de corta duración. Por esta razón los modelos mecánicos, para el diseño de pavimentos, están fundamentados en ensayos creep en compresión en mezclas asfálticas con condiciones uniaxiales y triaxiales (Hills y colaboradores, 1974; Van de Loo, 1976; Nunn, 1986; Mahboub, 1990; Collop y colaboradores, 1995; Lu y Wright, 2000). Al comparar ciertos modelos con datos tomados in-situ o resultados experimentales, se ajustaban bastante; pero se debe tener una previa y rigurosa calibración, para que estos resultados encajen con los experimentales.

1.4.1.3 Modelos viscoelásticos lineales. En general miden parámetros del modelo a partir de experimentos particulares, Francken y Verstraeten, 1974; Collop y colaboradores, 1995, usaron especificaciones de muestra para predecir esos parámetros. Los resultados para bajas deformaciones y niveles de esfuerzo eran buenos, caso contrario para altas deformaciones, donde el material no se comporta linealmente.

Sin importar esto, la modelación viscoelástica lineal sigue siendo bastante usada para mezclas asfálticas, por su comodidad de manejo.

1.4.1.4 Modelos viscoelástico no lineales. Fueron desarrollados para poder incluir el comportamiento no lineal. Pero son difíciles de usar para modelar el comportamiento de pavimentos reales por su complejidad, su naturaleza uniaxial y la cantidad de parámetros necesarios para su desarrollo.

Estos modelos describían el comportamiento de las mezclas a altas deformaciones y esfuerzos y bajo condiciones monotónicas y cíclicas en el dominio del tiempo, presentando resultados razonables al ser comparados con resultados experimentales (Kim y Dallas, 1989; Lee y Kim, 1998; Zhao y Kim, 2003).

Saleeb y colaboradores (2003); Krishnan and Rajagopal, 2004, han desarrollado modelos viscoelásticos no lineales basados en teorías termodinámicas. Estos modelos son de difícil adaptación ya que necesitan muchas constantes de calibración y procedimientos de ajuste complejos.

1.4.1.5 Modelos viscoelastoplásticos. Dunhill y colaboradores (2000) emplearon un modelo constitutivo basado en una aproximación fenomenológica propuesta por Scarpas y Blaauwendraad (1998) para modelar materiales que exhiben tasas de deformación plástica dependientes de la velocidad de deformación, en conjunto con el criterio de cedencia de Desai y colaboradores. (1986). La falencia de estos procedimientos es que tienen demasiados parámetros ajustados experimentalmente, para que pueda funcionar correctamente.

1.4.1.6 Modelos basados en elementos finitos. La modelación de la deformación de las mezclas asfálticas en la última década han sido modelados en elementos finitos (FEM). Se basan en modelos constitutivos viscoplásticos o viscoelásticos. Por ejemplo, Long (2001) utilizó una extensión viscoelástica no lineal de los modelos propuestos bajo el SHRP-A-415 (1994).

1.4.1.7 Modelos triaxiales. Es importante incluir las características triaxiales, pese a que la mayoría de las investigaciones están basadas en el comportamiento uniaxial, ya que así se pueden caracterizar las muestras de una forma más completa.

Brown y colaboradores demostraron que la deformación de mezclas asfálticas es función tanto de esfuerzos hidrostáticos bajo cargas monotónicas o cíclicas. A principios del siglo XXI Deshpande y Cebon y Collop and Khanzada, investigaron el comportamiento monotónico de estado estable de mezclas asfálticas idealizadas bajo condiciones triaxiales de esfuerzos, encontrando una fuerte dependencia entre esfuerzos deviatoricos e hidrostáticos en la deformación de mezclas densas (fracciones volumétricas de agregado mayores a 64 %).

1.4.1.8 Modelo de indentación esférica. Es un modelo analítico y experimental, basado en la ley de potencias de Bower y colaboradores (1993) para demostrar el comportamiento de la recuperación del asfalto, aplicando cargas monotónicas y tensión efectiva en el momento de la penetración con cambios de temperatura.

Apoyandose en el modelo de indentación esférica, Ossa (2005) desarrolló un prototipo matemático basado en teorías elásticas, viscosas y de recuperación, de fácil implementación. Para este proyecto, se busca comprobar esta teoría aplicándolo a asfaltos a una temperatura mayor.

2. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

2.1 INTRODUCCIÓN

Con el fin de obtener experimentalmente, los valores de los parámetros del modelo matemático constitutivo propuesto por Ossa y colaboradores (2005), que cumple con condiciones de temperatura, esfuerzos y carga, se sometieron varios recipientes con asfalto 60/70 procedente de ECOPETROL sometidas a ensayos de deformación controlada.

El material fue suministrado y analizado por el laboratorio de suelos de la Universidad EAFIT. Para la caracterización de este se hicieron los siguientes ensayos:

- Penetración promedio (INVIAS E-706) a 25 °C = 60 mm
- Punto de ablandamiento (INVIAS E-712) = 48.9 °C
- Índice de penetración a 25 °C (INVIAS E-724) = - 1.062
- Residuo (INVIAS E-712) = 53.1 °C
- Viscosidad promedio a 60 °C (INVIAS 717) = 2062.15 P
- Ductilidad a 25 °C (INVIAS E-702) > 155 cm
- Solubilidad (INVIAS E-713) = 99.9 %
- Agua los materiales asfálticos (INVIAS E-704) = 0 %
- Porcentaje de pérdida a 163 °C (INVIAS E-721) = 0.243 %

A continuación, se describe el procedimiento, los resultados de las pruebas de laboratorio, los equipos empleados en el desarrollo de los ensayos de deformación controlada, el montaje de los recipientes para efectuar los ensayos y finalmente la ejecución de los ensayos.

2.2 DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO

Sistema de ensayo de maquina universal y doble columna de la serie 3366. En las tablas (1) y (2) se presentan las características físicas y mecánicas de la maquina universal Instron.

Tabla 2. Datos generales de la máquina universal

Datos Generales	Marca	INSTRON
	Modelo	3366
	Serie	Q 5582
	Voltaje	120 V
	Potencia	300 VA

Tabla 3. Datos técnicos de la máquina universal

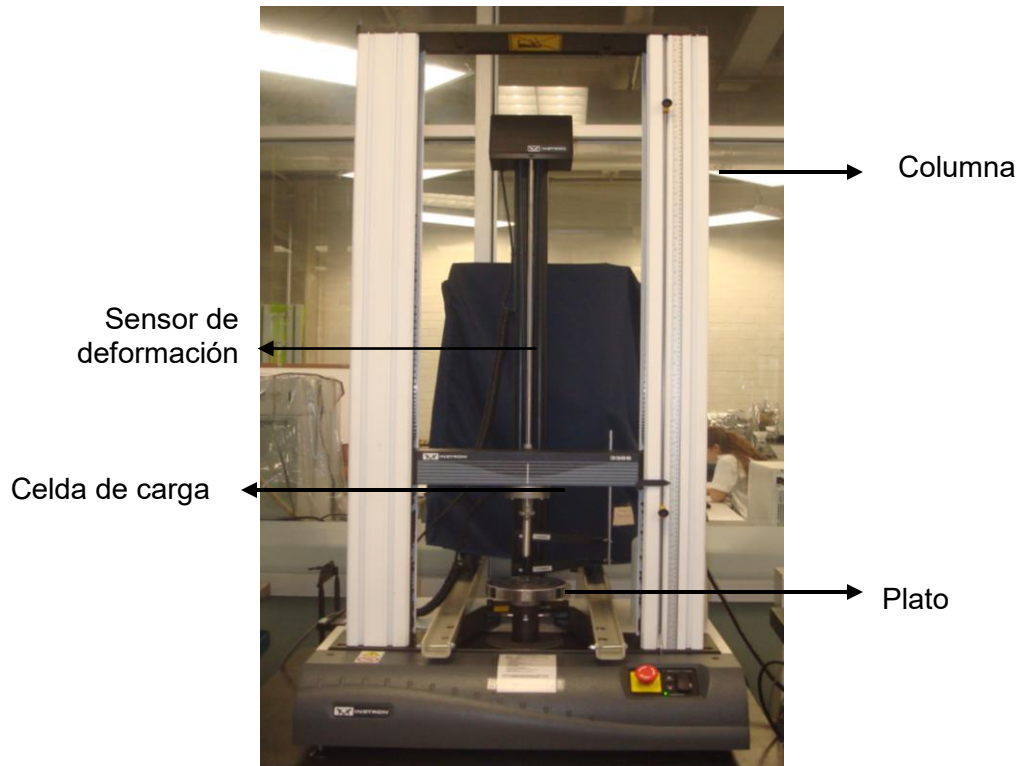
Datos Técnicos	Capacidad máxima	10 kN
	Altura de la máquina	1582 mm
	Ancho total	756 mm
	Velocidad máxima	500 mm/min
	Velocidad mínima	0,005 mm/min
	Deflexión máxima	0,26 mm
	Mordazas planas	0 -16 mm; 16 - 32 mm
	Diámetro de los platos de compresión	59 mm
	Máximo espacio de compresión entre barras	420 mm

Este equipo fabricado por la empresa INSTRON, está compuesto básicamente por, células de carga, doble columna con extensómetros para la medición de deformación, panel de control personalizable y opciones de altura.

El elemento superior del marco de carga es fijo, está compuesto por la celda de carga de 500 N que permite que la plato superior se alinee libremente con

la muestra (probeta). El máximo recorrido de aprisionamiento es indicado por un puntero ubicado en el martinete hidráulico. En la figura (3), se muestra los elementos que componen la maquina universal.

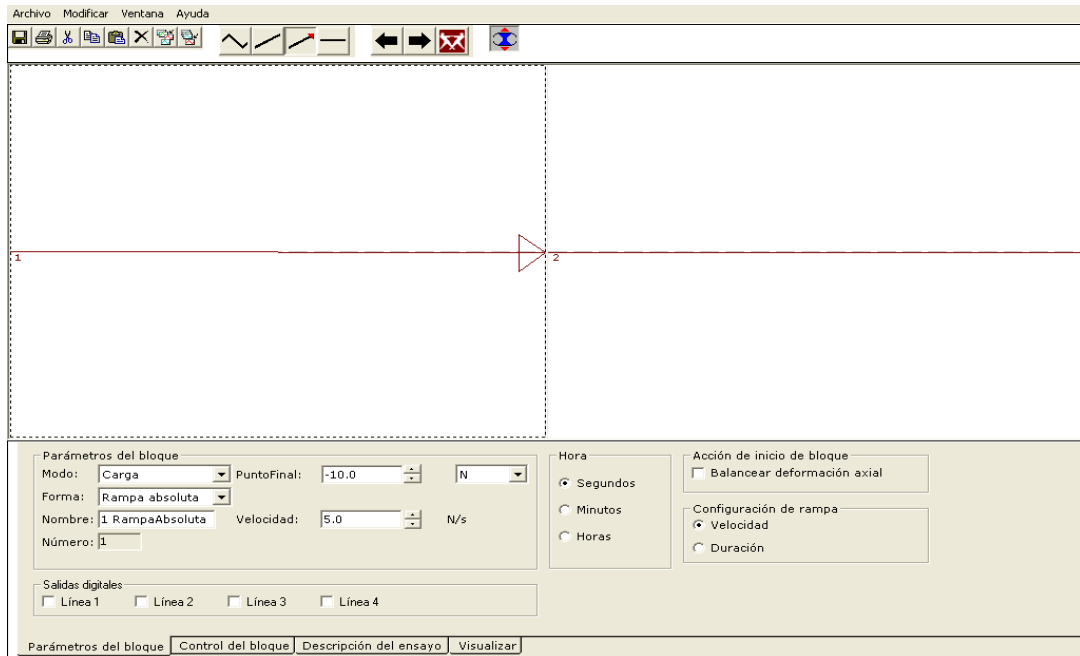
Figura 3. Componentes de la máquina universal



2.3 PROCEDIMIENTO DE ENSAYO

Para los ensayos se determina el tipo de procedimiento, que para este caso es monotónico, los parámetros de carga, velocidad y la toma de datos en milisegundo en el software correspondiente, Bluehill (Figura 4). Los recipientes con asfalto se colocan centrados con el indentador en el plato de la maquina universal Instron para comenzar con cada una de las pruebas (Figura 6.a).

Figura 4. Programación del ensayo en Bluehill



Los indentadores fueron diseñados con diámetros de 15 mm, 25 mm y 35 mm, como se muestra en la figura (5). A estos se les aplica jabón natural con glicerina, para evitar la fricción y la adherencia del asfalto al indentador.

Figura 5. Dimensiones de los indentadores

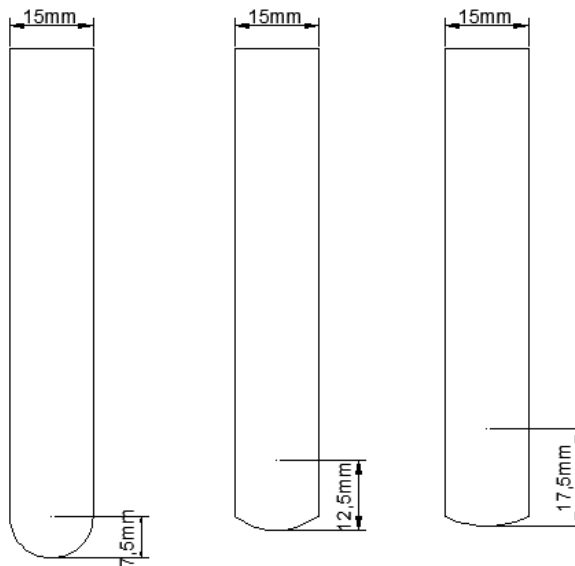
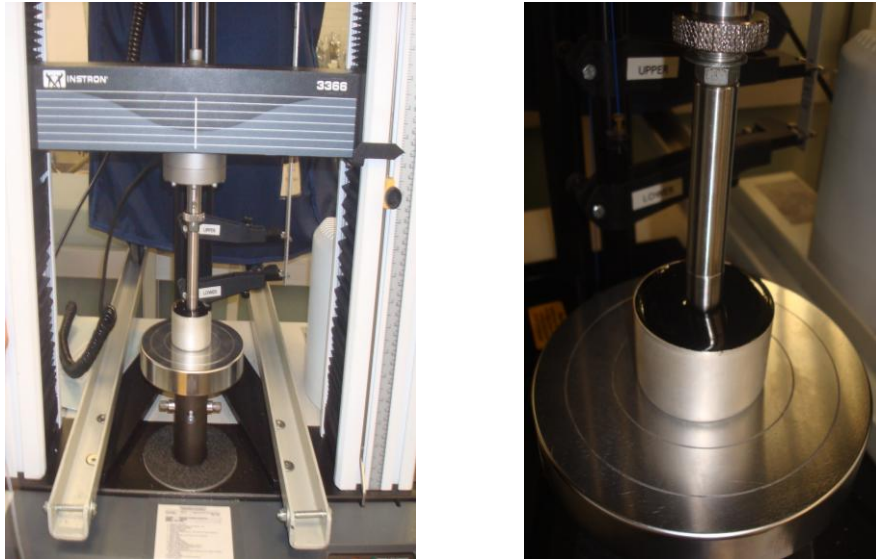


Figura 6.(a). Colocación de los recipientes. (b). Proceso de deformación.



El ensayo se deja correr y se detiene cuando haya una penetración de más o menos en un 20 % o 30 % del diámetro del indentador (Figura 6.b).

La figura (7) muestra la deformación del asfalto ocasionada por los parámetros asignados.

Figura 7. Deformación final del asfalto



3. MODELO CONSTITUTIVO

3.1 INTRODUCCIÓN

El modelo fenomenológico propuesto por Ossa (2005), es el más reciente registrado en estudios de asfaltos, el cual es aplicado en este proyecto; tiene un análisis con una amplia respuesta con respecto a un intervalo de temperatura, presiones y condiciones de carga monotónica, esto es, una carga que al pasar el tiempo aumenta hasta llegar al valor deseado, en donde se mantiene.

Este modelo se enfoca en la descomposición de la tasa de deformación en componentes elásticos y viscosos, con la finalidad de validar el modelo constitutivo multiaxial del asfalto y la investigación de la respuesta a la indentación que sirve para predecir la deformación acumulada en el tiempo, como lo es la deformación permanente en las capas asfálticas o carpetas asfálticas.

3.2 EXPLICACIÓN DEL MODELO CONSTITUTIVO

En su modelo Ossa (2005), concluyó que la velocidad de deformación, ($\dot{\epsilon}$), es la suma de la velocidad de deformación viscosa o tasa de esfuerzo viscoso, ($\dot{\epsilon}^V$), el cual es activado durante la carga ($\sigma \neq 0$), y la velocidad recuperada de la deformación o tasa de esfuerzo recuperada $\dot{\epsilon}^r$ ($\sigma = 0$).

De donde la velocidad total de deformación, ($\dot{\epsilon}$), es representada así:

$$\dot{\epsilon} = \dot{\epsilon}^V + \dot{\epsilon}^r \quad (6)$$

Sabiendo que la indentación es independiente de la tensión hidrostática, el modelo constitutivo tridimensional para cargas multiaxiales, se puede expresar así:

$$\dot{\epsilon}_{ij} = \dot{\epsilon}^V_{ij} + \dot{\epsilon}^r_{ij} \quad (7)$$

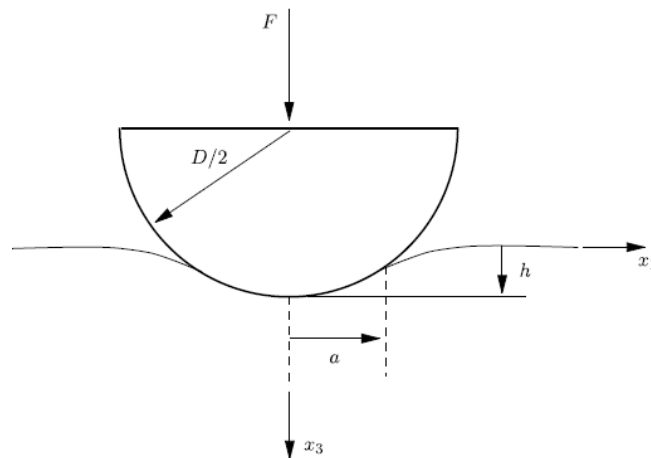
Dependiendo de la amplitud de las taras y del penetrador (indentador) esférico de diámetro D , el material se carga con una fuerza F que después de aplicada llega a una deformación h de acuerdo con la ley de fluencia de la forma (ley de potencia).

$$\frac{\dot{\epsilon}_j}{\dot{\epsilon}_o} = \frac{3}{2} \left(\frac{\sigma_e}{\sigma_o} \right)^{n-1} \frac{\sigma'_{ij}}{\sigma_o} \quad (8)$$

Donde σ_o , $\dot{\epsilon}_o$ y n son constantes del asfalto.

Para resolver el problema de la deformación y la indentación de la simetría axial se observó que en un momento dado la velocidad, la velocidad de deformación y el esfuerzo de la esfera en el semi-espacio, depende únicamente de la zona de contacto a (Figura 8) y la velocidad de indentación \dot{h} .

Figura 8. Esquema de contacto de indentación



Para indentación con penetrador esférico sin fricción, se dice que el radio de contacto está relacionado con la profundidad de penetración h , así:

$$h = \frac{1}{c^2} \frac{a^2}{D} \quad (9)$$

Donde c , es una constante función del material y se puede considerar como el verdadero contacto radial nominal \sqrt{hD} ; del mismo modo la carga aplicada F está relacionada con la rata de indentación \dot{h} .

$$\frac{F}{\pi a^2 \sigma_o} = \alpha \left(\frac{\dot{h}}{a \dot{\epsilon}_o} \right)^{1/n} = \alpha \left(\frac{2\dot{a}}{\dot{\epsilon}_o c^2 D} \right) \quad (10)$$

Las constantes de calibración α , n y c , fueron deducidos por una serie de elementos finitos por Bower y colaboradores (1993), como se muestra en la tabla (4).

Tabla 4. Constantes de calibración

n	α	c
1.00	0.849	0.707
1.11	1.085	0.747
1.25	1.332	0.788
1.43	1.602	0.831
1.66	1.886	0.875
2.00	2.176	0.920
2.50	2.465	0.966
3.33	2.734	1.013
5.00	2.973	1.065
10.00	3.110	1.128
100.00	3.051	1.201

Las ecuaciones (9) y (10), son escritas en términos del esfuerzo efectivo (σ^{eff}) y de la velocidad de deformación efectiva ($\dot{\epsilon}^{eff}$).

$$\sigma^{eff} = \frac{F}{\pi a^2} \quad (11)$$

$$\dot{\epsilon}^{eff} = \frac{\dot{a}}{D} = \frac{c\dot{h}}{2\sqrt{hD}} \quad (12)$$

$$\epsilon^{eff} = c \sqrt{\frac{h}{D}} \quad (13)$$

Se sustituyen estos valores en las ecuaciones (9) y (10), para hallar la presión de tensión en el indentador, con la ley progresiva de potencia en un sólido.

$$\sigma^{eff} = \alpha \sigma_0 \left(\frac{2 \times \dot{\epsilon}^{eff}}{c^2 \times \dot{\epsilon}_0} \right)^{1/n} \quad (14)$$

3.3 METODOLOGÍA DE MODELACIÓN

Para hallar el modelo de una indentación monotónica se basa en los conceptos de tensión y esfuerzo efectivo como se nombraron anteriormente, los cuales fueron analizados por Mulhearn y Tabor (1960) y justificado teóricamente por Bower (1993).

3.3.1 Parámetros del modelo matemático. Después de realizados los ensayos, se obtuvieron resultados de tiempo, deformación y carga; se elimina el ruido al principio de estos, es decir, por el mal contacto inicial entre el indentador y la muestra, se excluyen las cargas antes de su estabilización.

Para hallar las constantes de calibración α , c , n y σ_0 , se halla una pendiente de un solo punto por cada ensayo, en este caso 3 mm, donde se observa más constante de la gráfica tiempo vs. deformación, evaluándolo en un rango entre 2.95 mm y 3.05 mm. Organizado estos puntos, se gráfica carga (F) Vs. deformación (h), para sacar de la ecuación correspondiente y hallar el parámetro n y consecuentemente el valor de α y c , interpolando con los valores de la tabla (4). Los valores de esta gráfica se calculan con las ecuaciones (11) y (12).

Para calcular el esfuerzo de referencia (σ_0) y la velocidad de deformación de referencia ($\dot{\epsilon}_0$), se grafica experimental y teóricamente el esfuerzo efectivo (σ^{eff}) y la velocidad de deformación efectiva ($\dot{\epsilon}^{eff}$). Experimentalmente se hace un tanteo del esfuerzo de referencia (σ_0) y la velocidad de deformación de referencia ($\dot{\epsilon}_0$), ya que la velocidad de deformación efectiva ($\dot{\epsilon}^{eff}$), está en función de estos mismos, para llegar a un ajuste de la gráfica teórica y experimental, como muestra a continuación:

$$\dot{\epsilon}^{eff} = \left(\frac{\sigma^{eff}}{\alpha \sigma_0} \right)^n \times c^2 \frac{\dot{\epsilon}_0}{2} \quad (15)$$

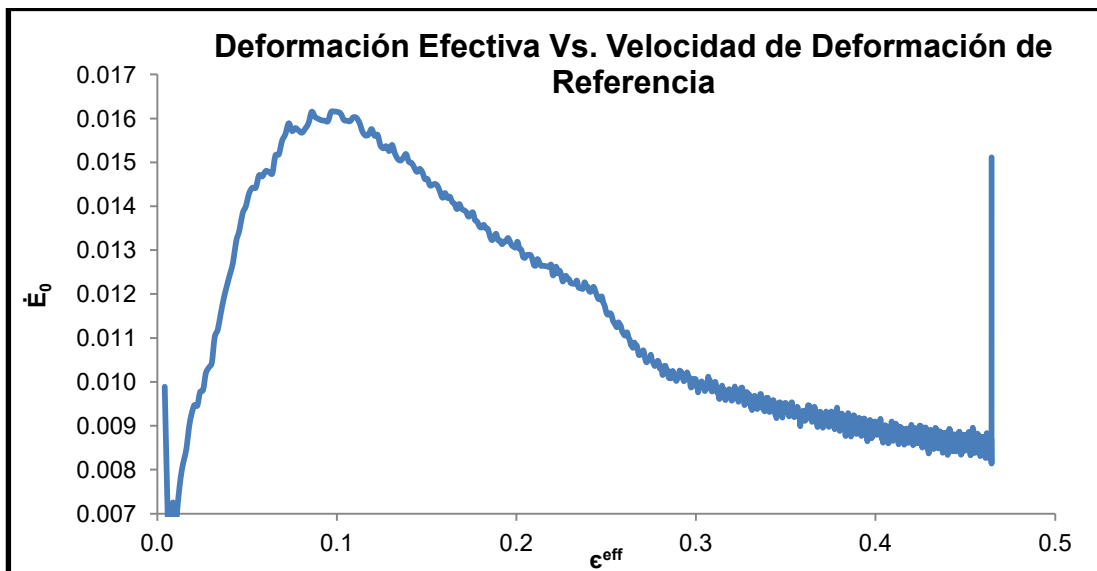
En el ajuste se observa que los valores se dispersan más al final de la tendencia, esto indica que los datos experimentales pueden estar al final por encima o por debajo del modelo, sin perder la pendiente de esta.

Los parámetros α , n , c y σ_0 ; son constantes para hallar los valores de velocidad de deformación efectiva ($\dot{\epsilon}^{eff}$), deformación efectiva (ϵ^{eff}), esfuerzo efectivo (σ^{eff}) y velocidad de deformación de referencia ($\dot{\epsilon}_0$), respectivos a cada punto con su carga correspondiente, para graficar ($\dot{\epsilon}^{eff}$) Vs. ($\dot{\epsilon}_0$) y tiempo (t) Vs. deformación (h). Las ecuaciones para este procedimiento son la (11), (12), (13), respectivamente y para la velocidad de deformación de referencia ($\dot{\epsilon}_0$), se despeja de la ecuación (14), quedando así:

$$\dot{\epsilon}_0 = \frac{2 \times \dot{\epsilon}^{eff}}{c^2 \left(\frac{\sigma^{eff}}{\alpha \sigma_0} \right)^n} \quad (16)$$

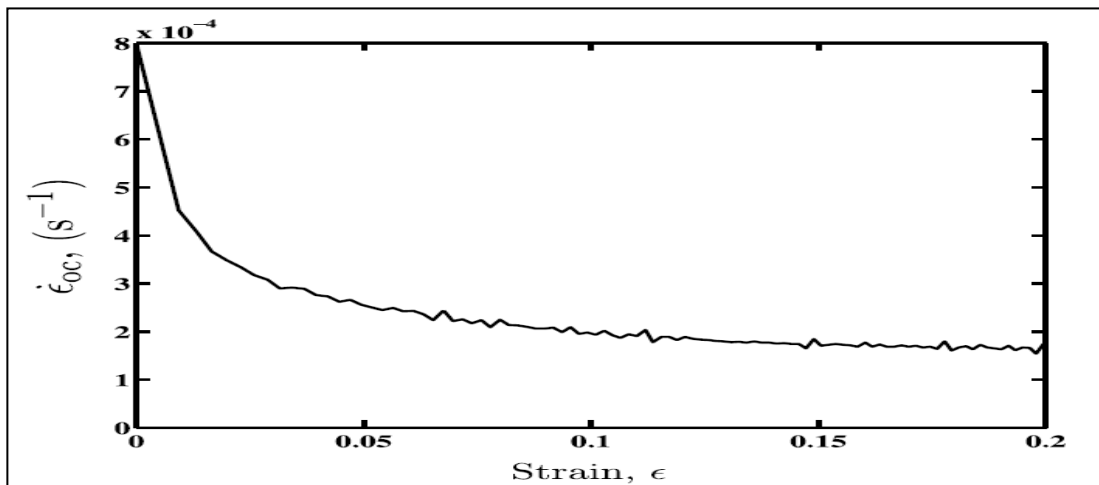
Los siguientes cálculos y gráficas que se muestran como ejemplo pertenecen a una carga de 10 N con un indentador de diámetro de 15 mm (Gráfica 1).

Gráfica 1. Esfuerzo efectivo contra velocidad de esfuerzo de referencia a 22 °C.



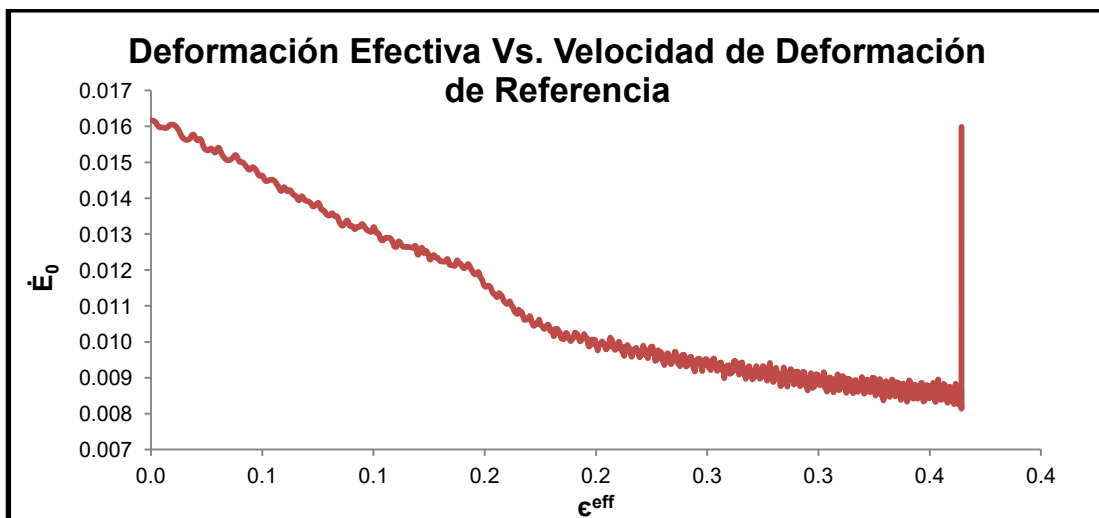
Al comparar la gráfica (1) desarrollada en este proyecto con la gráfica estudiada por Ossa. (2005) (Gráfica 2), se ve que no se acomoda a esta última, esto no indica que no cumple, solo que hubo errores en el experimento, como el contacto del indentador con el asfalto y que en el año 2005 fue analizada a muy bajas temperaturas; por esto se modifica la gráfica (1) eliminando algunos datos iniciales hasta que tenga una aproximación a la estudiada.

Gráfica 2. Esfuerzo efectivo contra velocidad de esfuerzo de referencia, Ossa (2005)



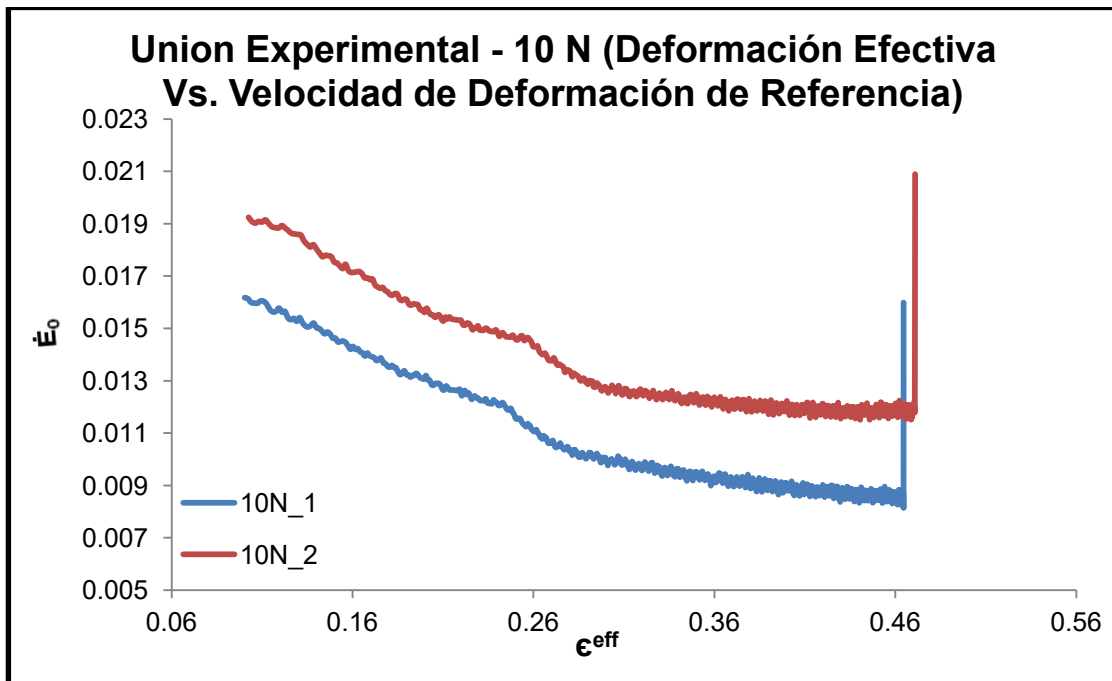
Por consiguiente la gráfica (3) es la óptima para la continuación del análisis, queda así:

Gráfica 3. Esfuerzo efectivo contra velocidad de esfuerzo de referencia modificada a 22 °C.



Para empezar con el cálculo de la curva patrón, se hace un recuento de las gráficas de $\dot{\epsilon}^{eff}$ Vs. $\dot{\epsilon}_0$, y de acuerdo con el comportamiento que tuvieron las uniones de los ensayos experimentales de cada carga, se escogió la carga de 10 N (Gráfica 4), ya que comparando el comportamiento experimental de cada ensayo, se analiza que esta se comportan similarmente y se utiliza como la base para evaluar la ecuación patrón.

Gráfica 4. Comportamiento experimental del esfuerzo efectivo contra la velocidad de esfuerzo de referencia ajustado.



Se inicia el procedimiento tomando del intercepto con el eje “y” una velocidad de deformación de referencia $\dot{\epsilon}_0 = 0.0161$, y se asume una deformación unitaria inicial aproximadamente cero, ya que si se inicia con cero darían valores indeterminados en $\dot{\epsilon}^{eff}$, el $\Delta h=0.01$.

Para calcular la deformación unitaria en su respectivo tiempo, se hace la siguiente metodología:

- a. Se reemplaza la ecuación (11) en la (14) y se halla $\dot{\epsilon}^{eff}$, así:

$$\dot{\epsilon}^{eff} = \left(\frac{F}{\pi \Delta_h c^2 D \alpha \sigma_0} \right)^n \left(\frac{c^2 \epsilon_0}{2} \right) \quad (17)$$

La carga corresponde a cada una de las variaciones que se dan punto a punto experimentalmente.

$$\epsilon^{eff}_1 = \dot{\epsilon}^{eff} \Delta_t \quad (18)$$

b. Con la ecuación (21), se halla ϵ_0

c. Para los valores de Δh_{n+1} , se emplea la siguiente ecuación:

$$\Delta h = \left(\frac{\epsilon^{eff2}}{c^2} \right) \quad (19)$$

Luego se repiten todos los pasos; pero acumulando la deformación efectiva, así:

$$\epsilon^{eff}_{n+1} = (\dot{\epsilon}^{eff} \Delta_t) + \epsilon^{eff}_{n-1} \quad (20)$$

En una sola plantilla, se grafican tiempo Vs. deformación del experimento y de la curva patrón que se acaba de hallar, teniendo en cuenta que Δt , debe ser cambiado para ajustar ambas gráficas.

4. RESULTADOS Y ANÁLISIS: COMPORTAMIENTO DE LOS ENSAYOS EXPERIMENTALES

Para los ensayos experimentales, se fabricaron indentadores esféricos de acero con diámetros de 15 mm, 25 mm y 35 mm, para verificar el cumplimiento de la ecuación patrón de predicción de la deformación, sin que el cambio de diámetro influya en el comportamiento de esta.

Experimentalmente se debe cumplir que la deformación alcancé el 20 % de cada diámetro y siga la misma tendencia de la curva patrón. La temperatura promedio en la que fueron realizadas las pruebas fue de 23 °C.

Al hacer el ajuste de la gráfica (5), la línea de tendencia se aproxima potencialmente con la siguiente ecuación $\epsilon^{eff} = 0.5092\sigma^{eff 1.2486}$, donde el exponente de la ecuación n es igual a 1.2486, en el cual se observa que queda entre los puntos 1.1 y 1.25, de la tabla (4); esta interpolación para α y c queda:

$$\alpha = 1.7643 \times n - 0.8734$$

$$\alpha = 1.33$$

$$c = 0.2929 \times n + 0.4219$$

$$c = 0.788$$

Gráfica 5. Ajuste de la velocidad de deformación contra el esfuerzo efectivo experimental y teórico.

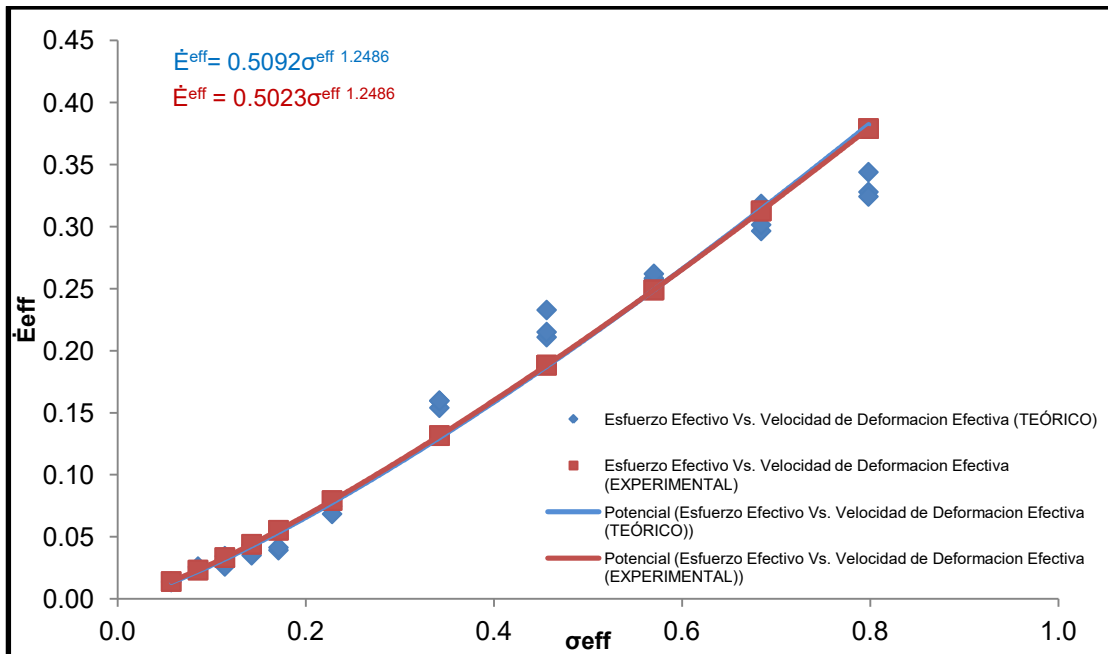


Tabla 5. Cálculos para el ajuste experimental y teórico de la deformación efectiva y la velocidad de deformación de referencia

CARGA (N)	PENDIENTE	ñ	σ^{off}	$\dot{\epsilon}^{eff}$	$\dot{\epsilon}_0$	σ_0	$\dot{\epsilon}^{eff}$
5	-0.2316	0.2316	0.0570	0.0136	0.0120	0.0148	0.0140
5	-0.2388	0.2388	0.0570	0.0140	0.0120	0.0148	0.0140
7.5	-0.4448	0.4448	0.0855	0.0261	0.0120	0.0148	0.0233
7.5	-0.4281	0.4281	0.0855	0.0251	0.0120	0.0148	0.0233
10	-0.4468	0.4468	0.1140	0.0262	0.0120	0.0148	0.0334
10	-0.5883	0.5883	0.1140	0.0345	0.0120	0.0148	0.0334
12.5	-0.7433	0.7433	0.1425	0.0436	0.0120	0.0148	0.0441
12.5	-0.5996	0.5996	0.1425	0.0352	0.0120	0.0148	0.0441
15	-0.6695	0.6695	0.1710	0.0393	0.0120	0.0148	0.0554
15	-0.7062	0.7062	0.1710	0.0415	0.0120	0.0148	0.0554
20	-1.2734	1.2734	0.2281	0.0748	0.0120	0.0148	0.0793
20	-1.1673	1.1673	0.2281	0.0685	0.0120	0.0148	0.0793
30	-2.7223	2.7223	0.3421	0.1598	0.0120	0.0148	0.1316
30	-2.6249	2.6249	0.3421	0.1541	0.0120	0.0148	0.1316
30	-2.7200	2.7200	0.3421	0.1597	0.0120	0.0148	0.1316

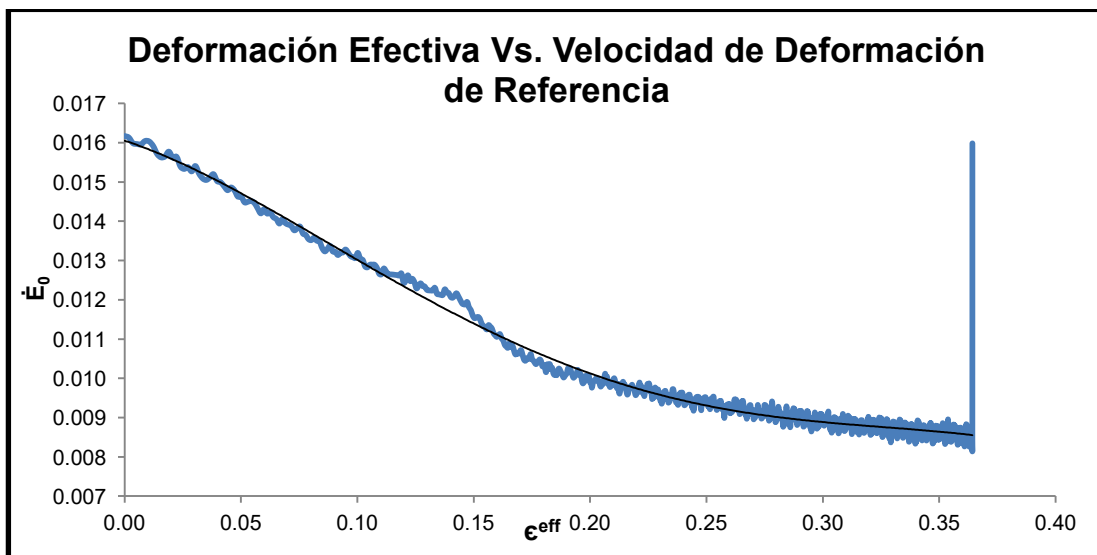
CARGA (N)	PENDIENTE	h	σ^{eff}	$\dot{\epsilon}^{eff}$	$\dot{\epsilon}_0$	σ_0	$\dot{\epsilon}^{eff}$
40	-3.5941	3.5941	0.4561	0.2110	0.0120	0.0148	0.1885
40	-3.9673	3.9673	0.4561	0.2329	0.0120	0.0148	0.1885
40	-3.6644	3.6644	0.4561	0.2151	0.0120	0.0148	0.1885
50	-4.4030	4.4030	0.5701	0.2585	0.0120	0.0148	0.2490
50	-4.3775	4.3775	0.5701	0.2570	0.0120	0.0148	0.2490
50	-4.4635	4.4635	0.5701	0.2620	0.0120	0.0148	0.2490
60	-5.0519	5.0519	0.6842	0.2966	0.0120	0.0148	0.3127
60	-5.4230	5.4230	0.6842	0.3184	0.0120	0.0148	0.3127
60	-5.1369	5.1369	0.6842	0.3016	0.0120	0.0148	0.3127
70	-5.5874	5.5874	0.7982	0.3280	0.0120	0.0148	0.3791
70	-5.8593	5.8593	0.7982	0.3440	0.0120	0.0148	0.3791
70	-5.5250	5.5250	0.7982	0.3243	0.0120	0.0148	0.3791

De acuerdo con la tabla (5), se encontró tanteando que el esfuerzo de referencia (σ_0) es igual a 0.148 y la velocidad de deformación de referencia ($\dot{\epsilon}_0$) es igual a 0.012.

De la gráfica escogida con carga de 10 N, $\dot{\epsilon}^{eff}$ Vs. $\dot{\epsilon}_0$ (Gráfica 6), se saca la ecuación de línea de tendencia, la cual fue:

$$\dot{\epsilon}_0 = -1.0932\dot{\epsilon}^{eff4} + 0.9076\dot{\epsilon}^{eff3} - 0.1886\dot{\epsilon}^{eff2} - 0.0195\dot{\epsilon}^{eff} + 0.0161 \quad (21)$$

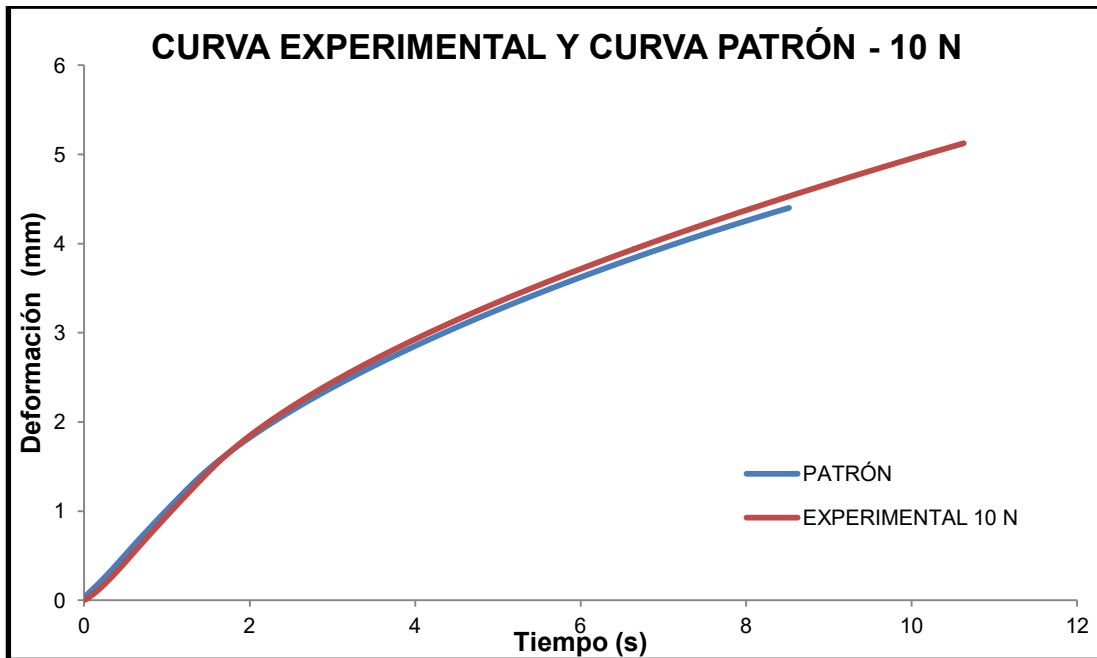
Gráfica 6. Gráfica correspondiente a la ecuación patrón.



Al tener los resultados arrojados por los ensayos de laboratorio, se visualiza que el contacto inicial entre el indentador y el asfalto no es óptimo y al realizar los cálculos desarrollados para cada una de las cargas, como se explicó en el numeral anterior; se corrige para el cálculo de la curva patrón los datos hasta donde en el ensayo se evidencie carga, generalmente valores de 1 N; fue el valor límite de corte.

Al aplicar la ecuación hallada para la velocidad de deformación de referencia ($\dot{\epsilon}_0$) y adaptándolo al modelo constitutivo desarrollado en este proyecto, se observa que graficando deformación contra tiempo como se muestra en la gráfica (7), cumple con lo propuesto por Ossa.

Gráfica 7. Deformación contra tiempo experimental y patrón.



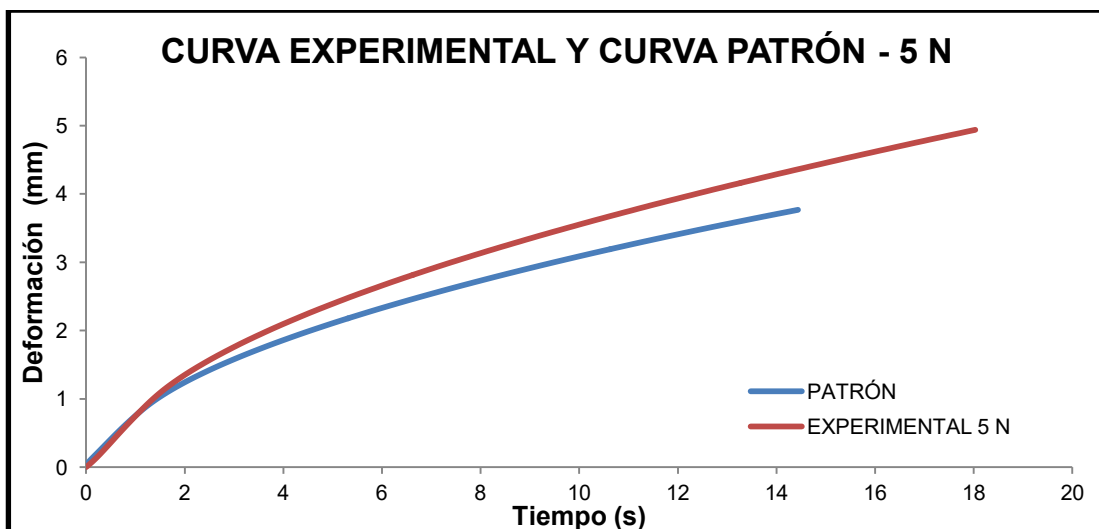
La pendiente va disminuyendo a medida que el tiempo pasa, hasta alcanzar la estabilidad de esta.

Como se puede ver, la curva patrón se ajusta completamente a la curva experimental, esto indica que cumple para diferentes combinaciones de diámetros y cargas.

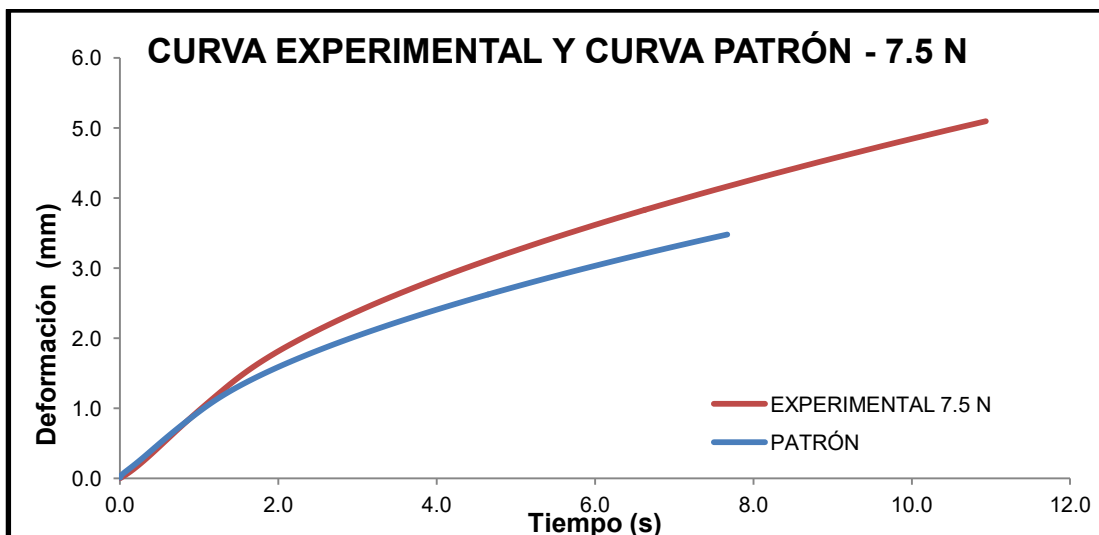
4.1 Indentador con diámetro de 15 mm.

Con este diámetro se realizó el análisis del desarrollo de la curva patrón. Como se ve en las gráficas (8.a), (8.b), (8.c), (8.d), (8.e), (8.f), (8.g), (8.h), (8.i), (8.j), la curva experimental se encuentra por encima del último tramo de la curva patrón y como se mencionó anteriormente, se acepta por lo deducido en la de ajuste, es decir, en dicho tramo, puede no haber un ajuste satisfactorio, pero siempre seguirá la misma tendencia.

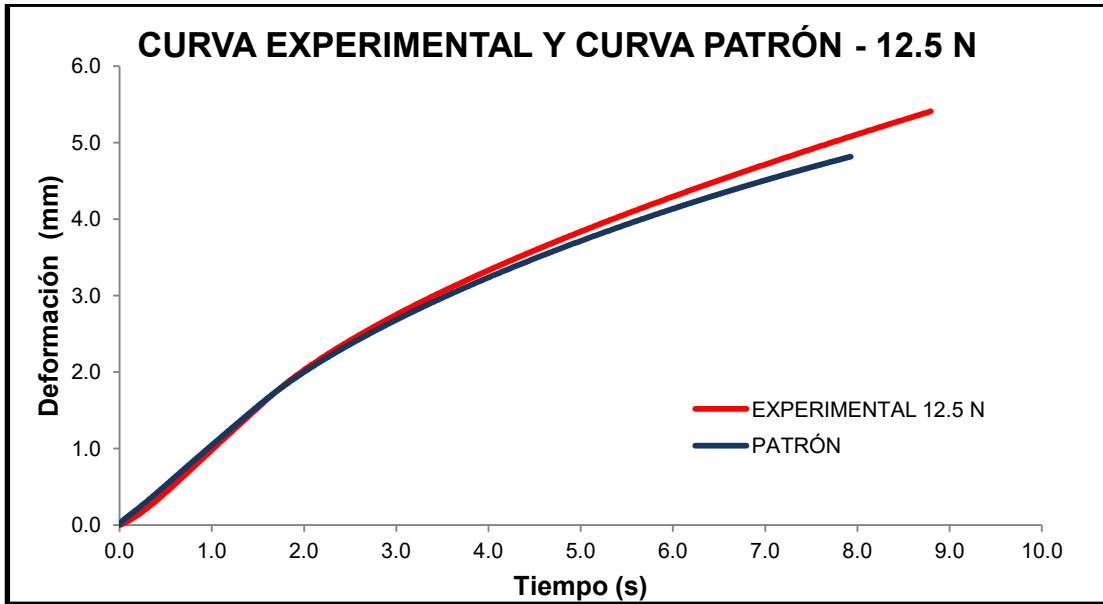
Gráfica 8. a. Curva experimental y curva patrón de 5 N.



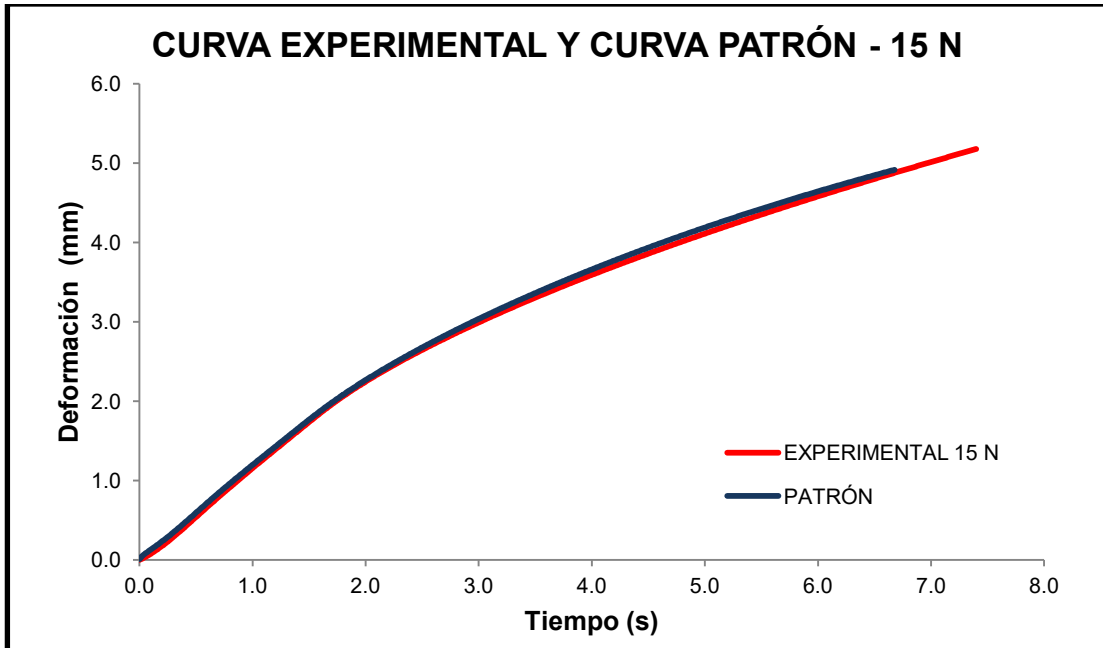
Gráfica 8. b. Curva experimental y curva patrón de 7.5 N.



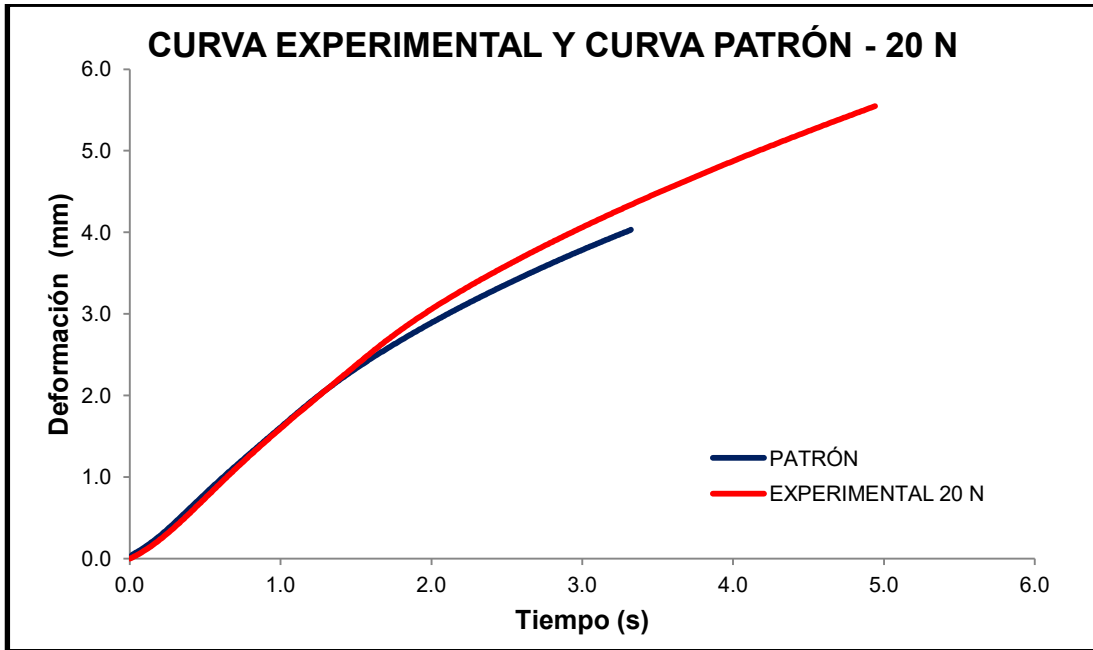
Gráfica 8. c. Curva experimental y curva patrón de 12.5 N.



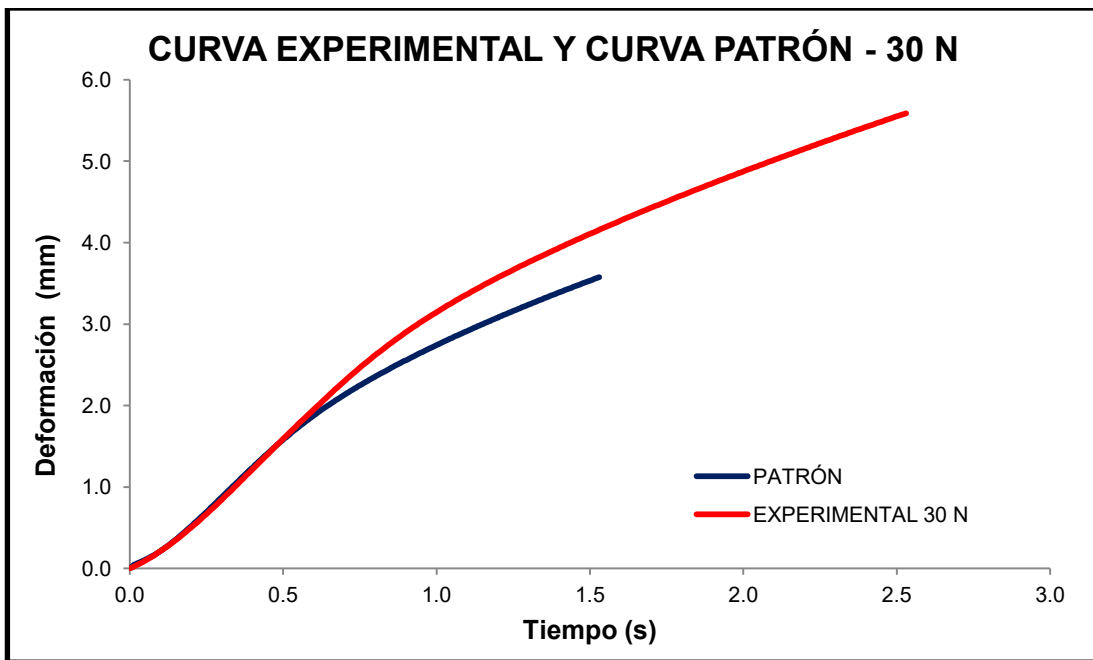
Gráfica 8. d. Curva experimental y curva patrón de 15 N.



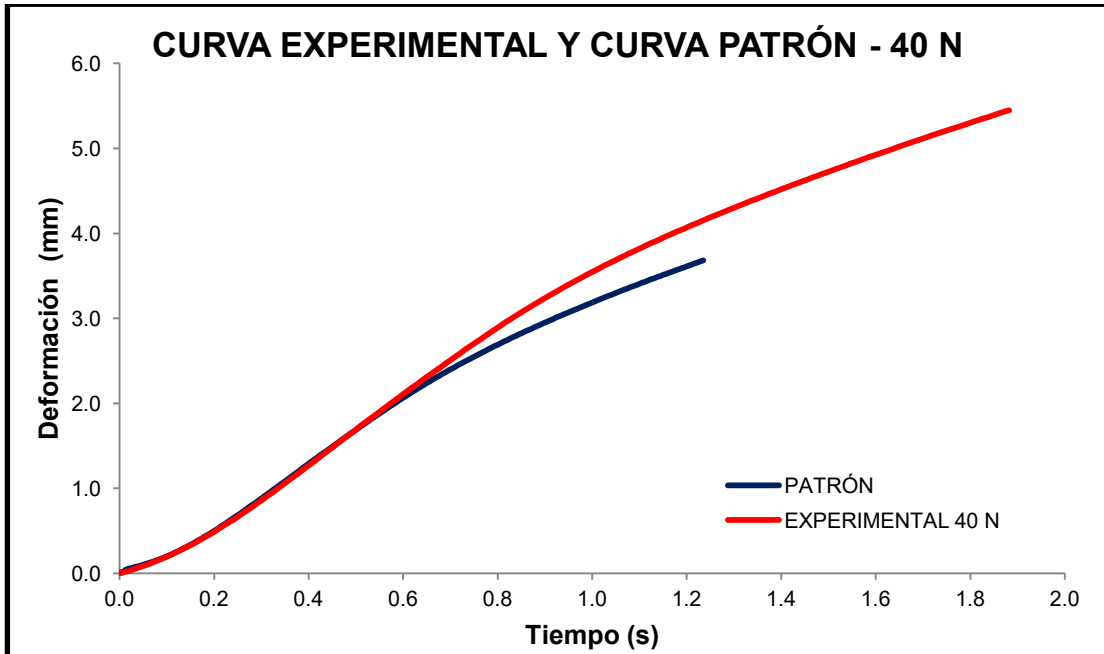
Gráfica 8. e. Curva experimental y curva patrón de 20 N.



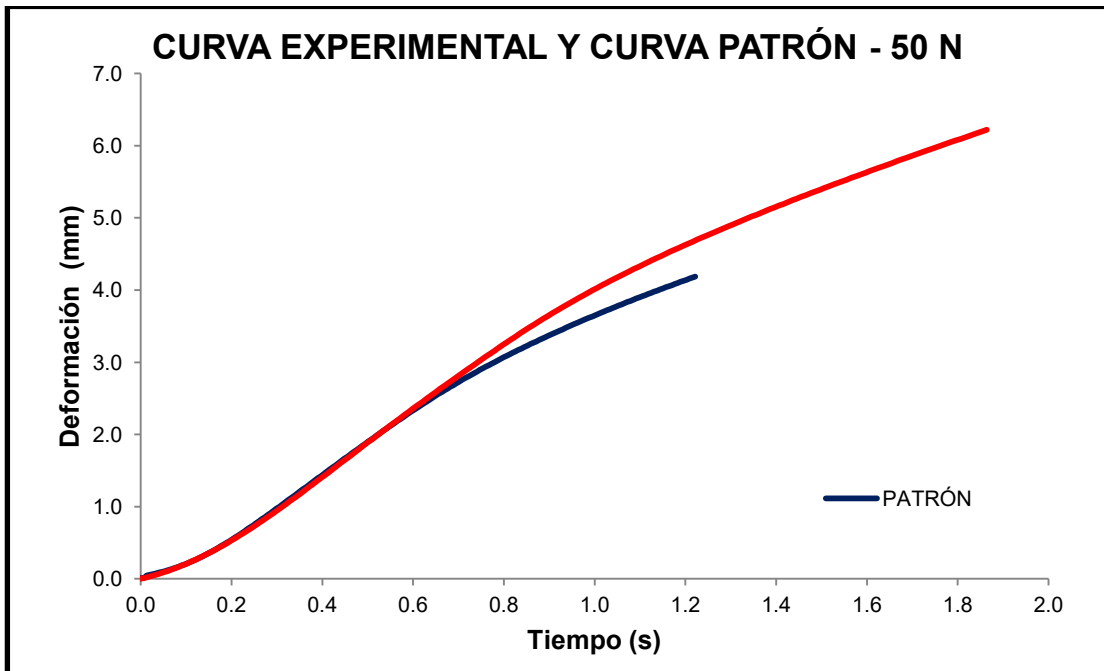
Gráfica 8. f. Curva experimental y curva patrón de 30 N.



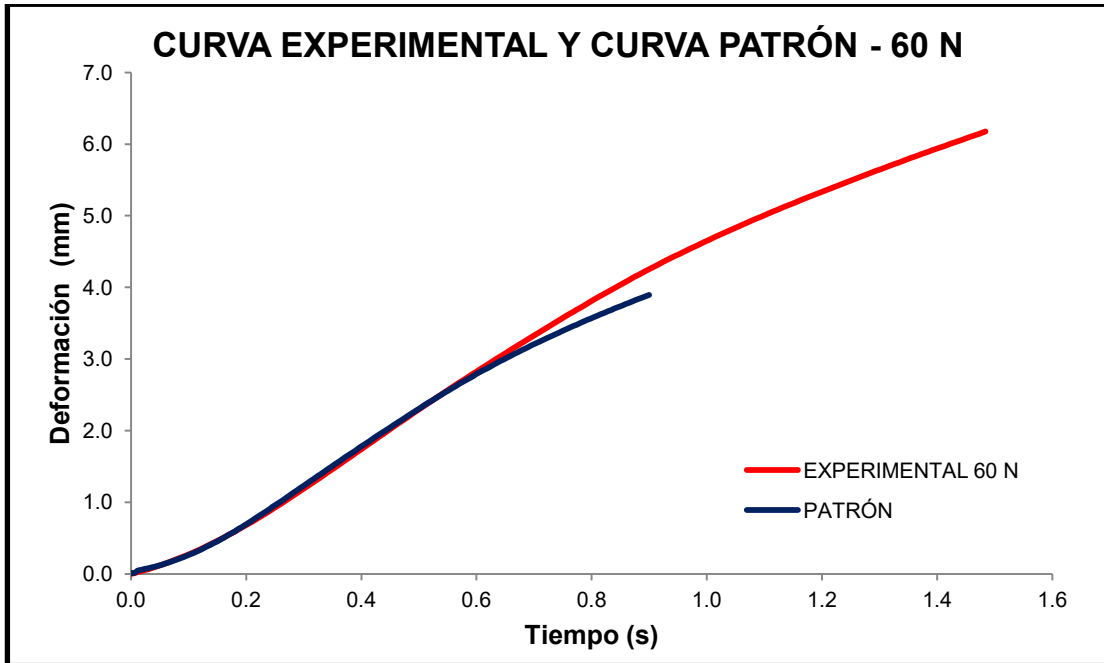
Gráfica 8. g. Curva experimental y curva patrón de 40 N.



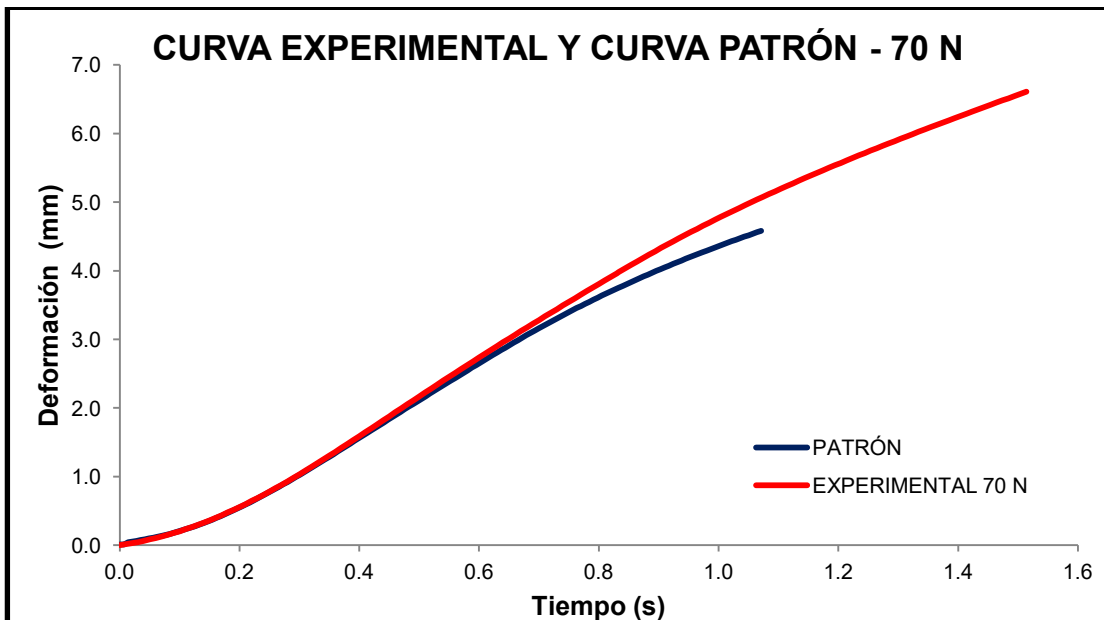
Gráfica 8. h. Curva experimental y curva patrón de 50 N.



Gráfica 8. i. Curva experimental y curva patrón de 60 N.



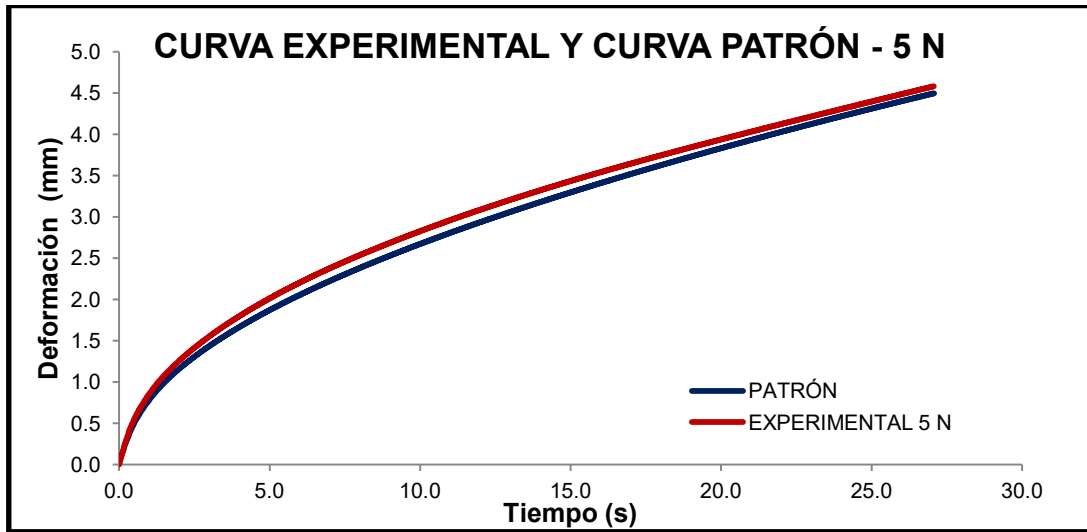
Gráfica 8. j. Curva experimental y curva patrón de 70 N.



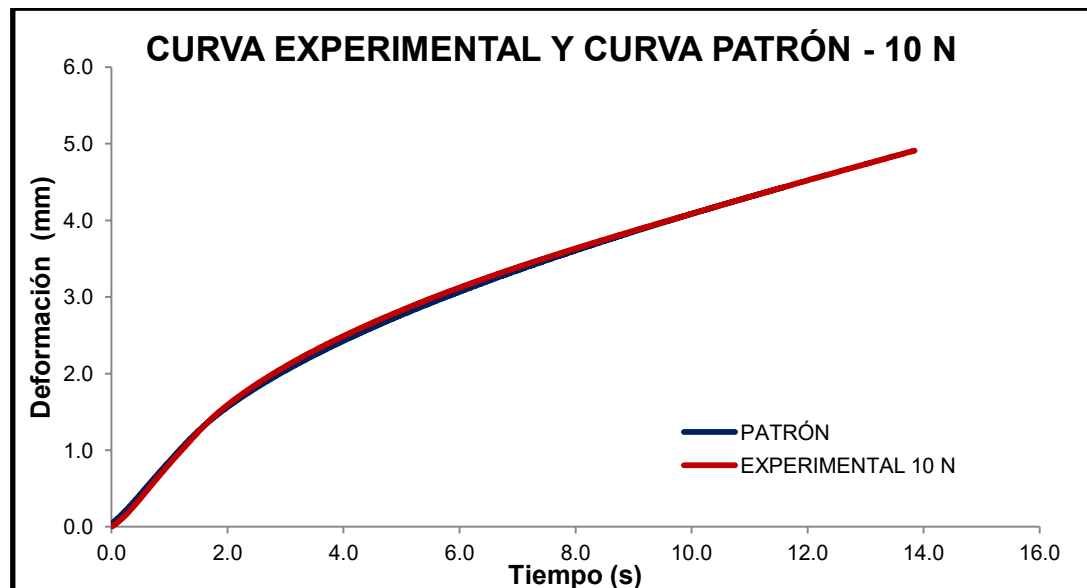
4.2 Indentador con diámetro 25 mm

Al aumentar el diámetro del indentador a 25 mm ocurre una velocidad de deformación mayor, ya que existe un área mayor de contacto para ser deformada, como se ve en las gráficas (9.a), (9.b), (9.c), (9.d). A pesar de este cambio el modelo desarrollado sigue siendo útil.

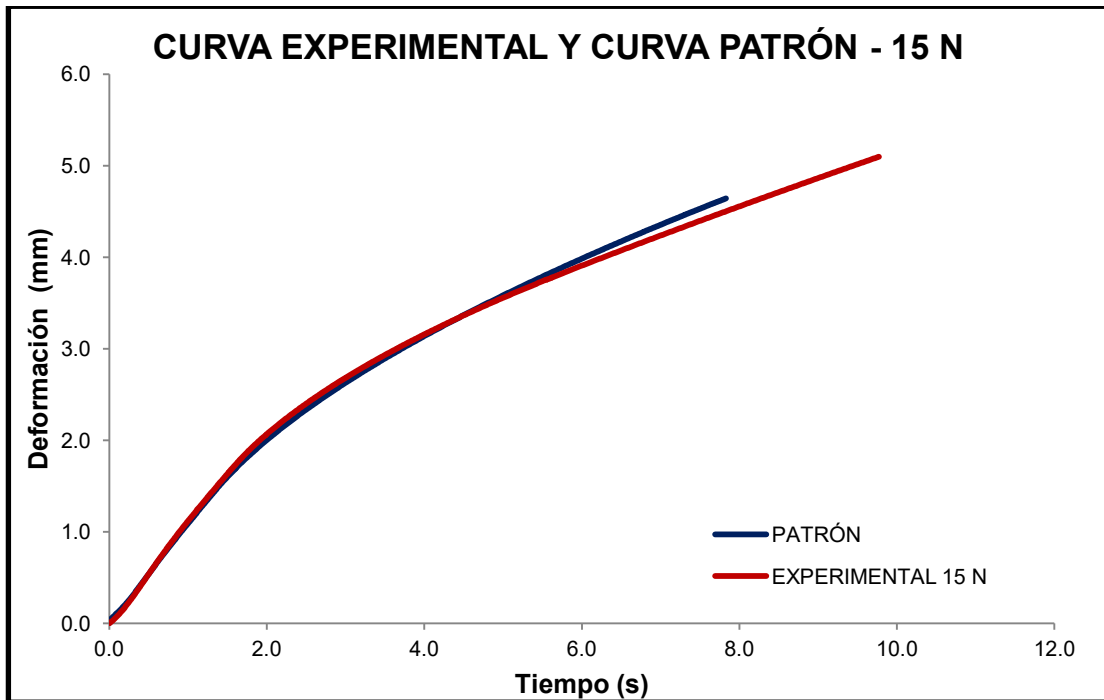
Gráfica 9. a. Curva experimental y curva patrón de 5 N.



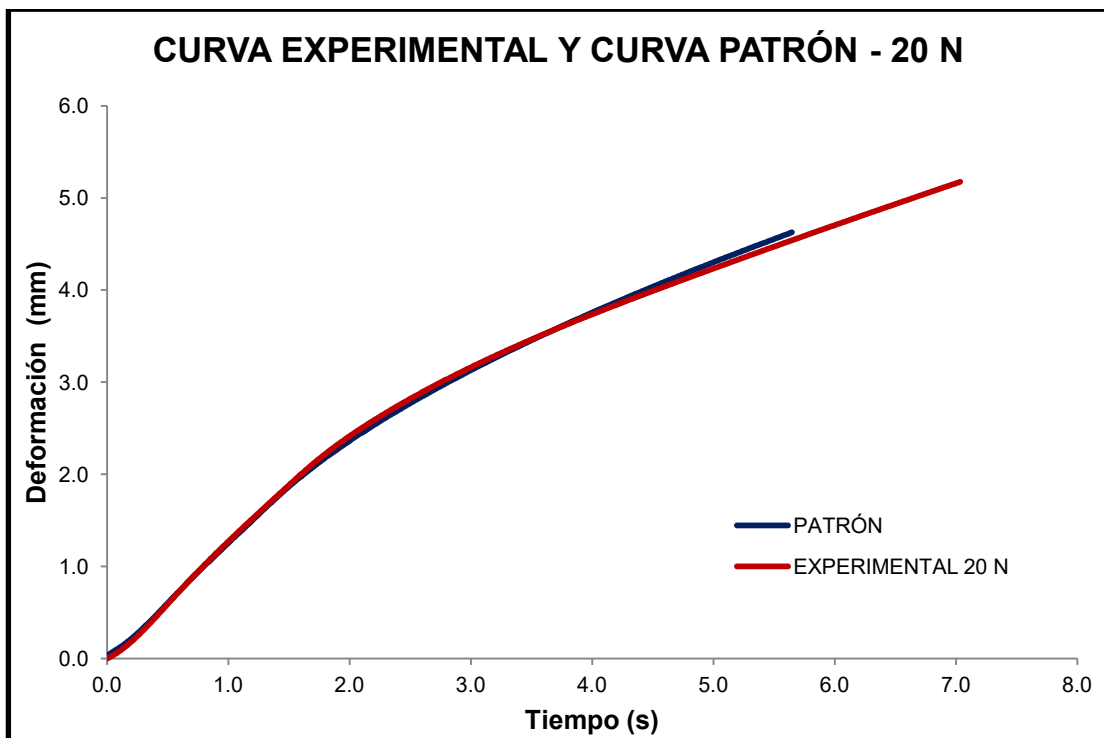
Gráfica 9. b. Curva experimental y curva patrón de 10 N.



Gráfica 9. c. Curva experimental y curva patrón de 15 N.



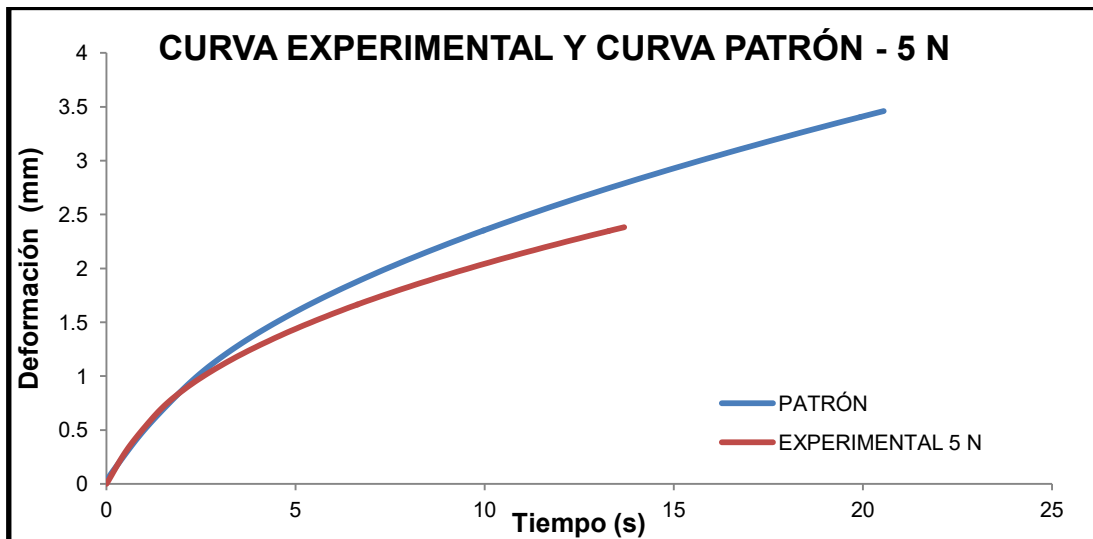
Gráfica 9. d. Curva experimental y curva patrón de 20 N.



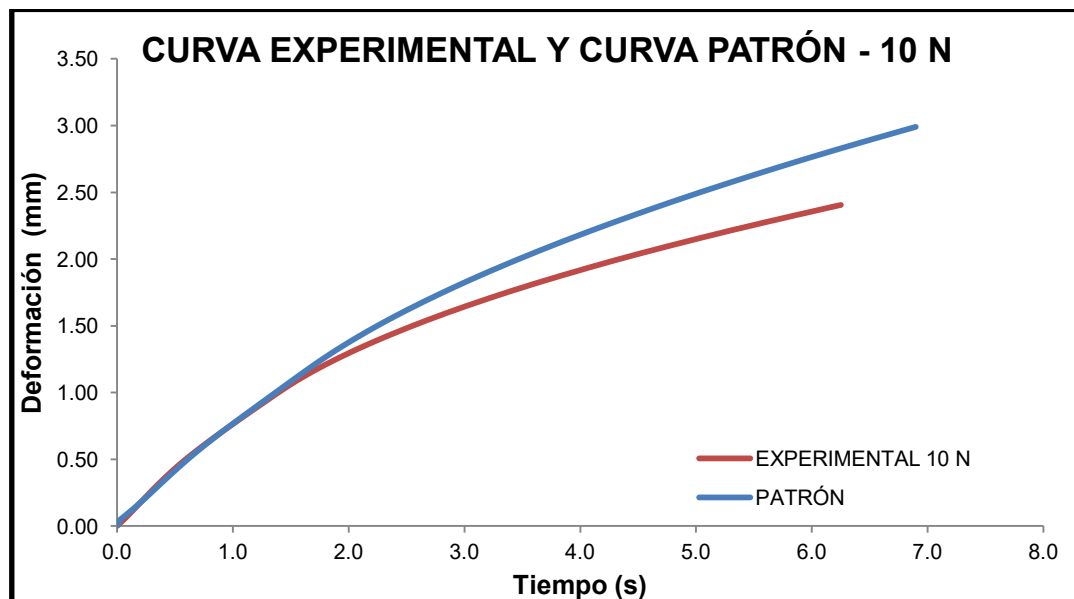
4.3 Indentador con diámetro 35 mm

En estos ensayos la velocidad de deformación aumenta, porque al subir las dimensiones del diámetro del indentador a 35 mm el área de contacto también aumenta, lo cual es demostrado en las gráficas (10.a), (10.b), (10.c) y (10.d).

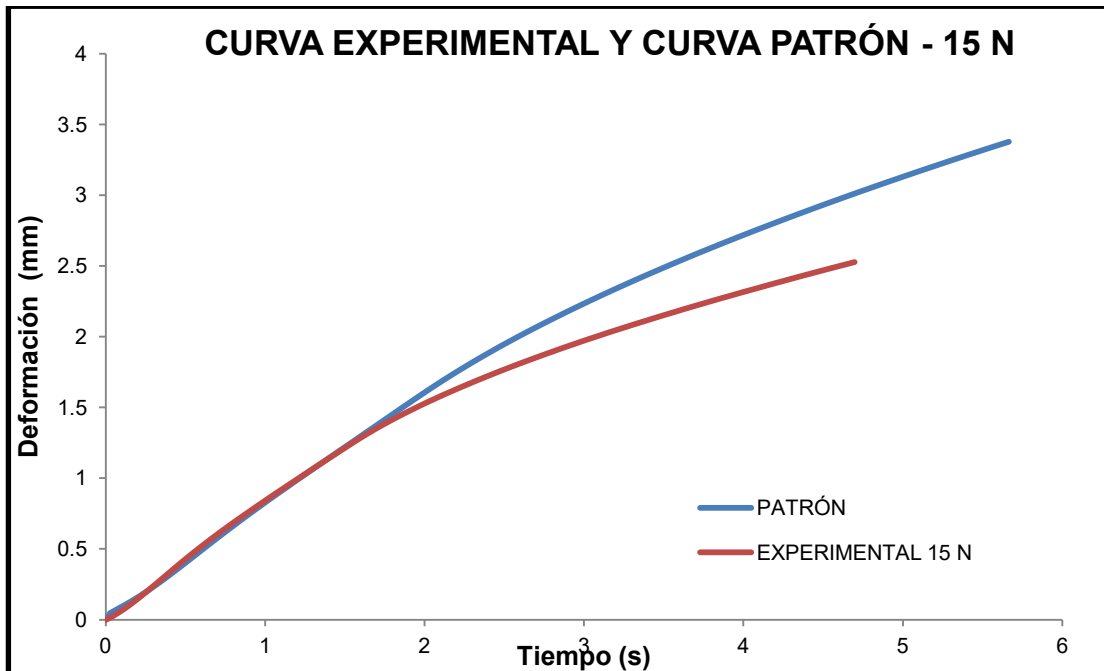
Gráfica 10. a. Curva experimental y curva patrón de 5 N.



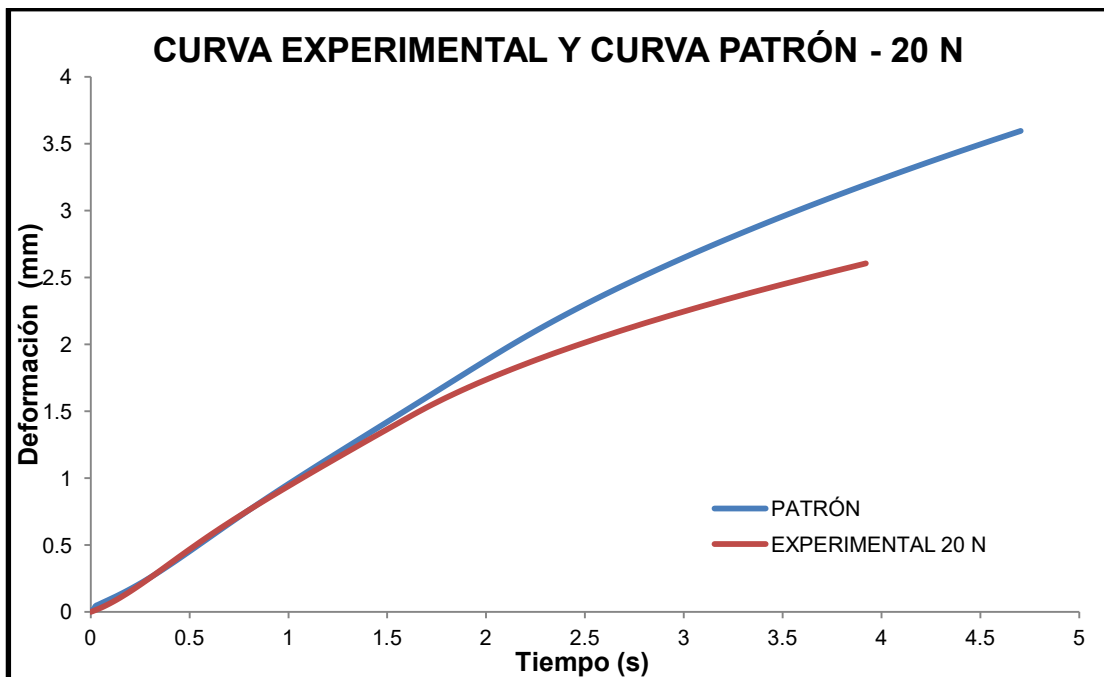
Gráfica 10. b. Curva experimental y curva patrón de 10 N.



Gráfica 10. c. Curva experimental y curva patrón de 15 N.

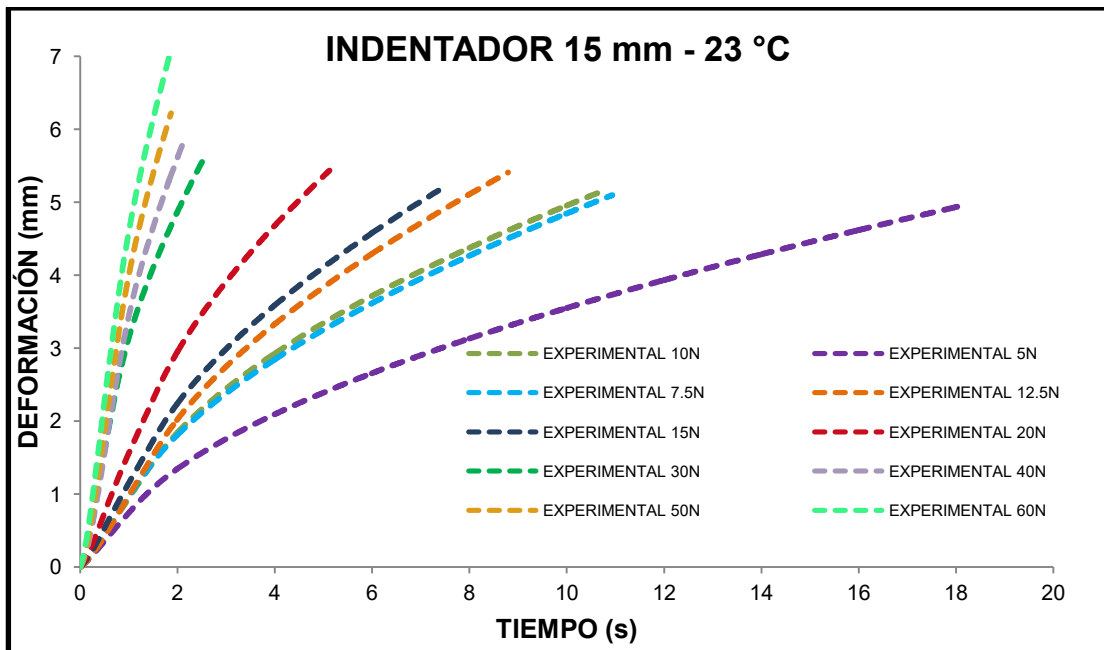


Gráfica 10. d. Curva experimental y curva patrón de 20 N.

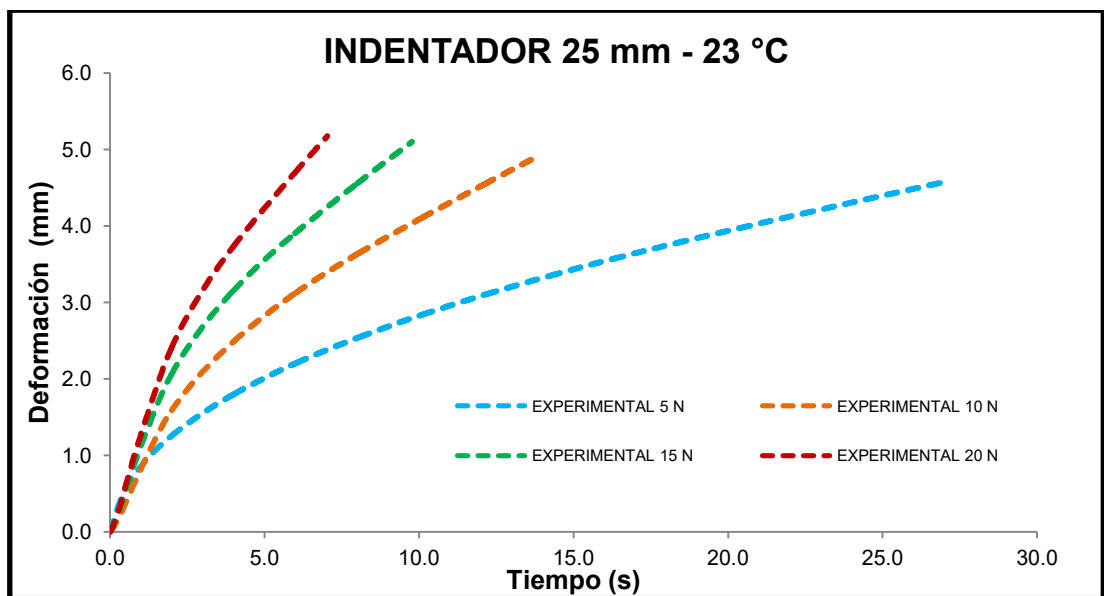


Al unir las curvas experimentales de cada diámetro, se puede ver que estas conservan la misma tendencia de la pendiente, lo cual indica que la metodología de ensayo fue óptimamente desarrollada, como se muestra en las gráficas (11.a), (11.b), y (11.c).

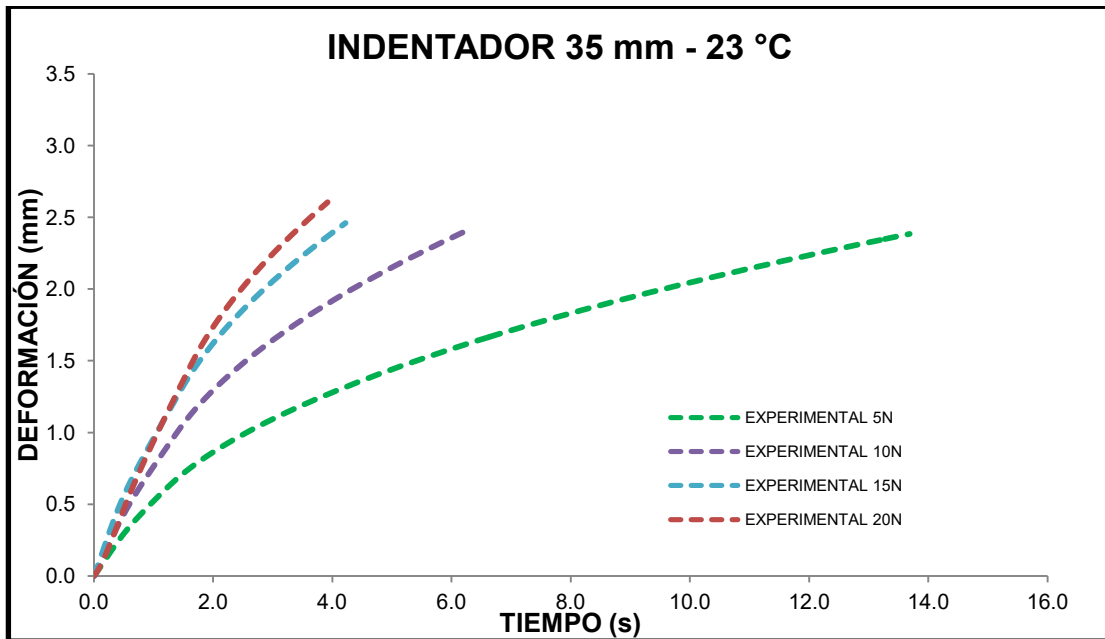
Gráfica 11. a. Unión de gráficas experimentales de 15 mm.



Gráfica 11. b. Unión de gráficas experimentales de 25 mm.



Gráfica 11. c. Unión de gráficas experimentales de 35 mm.



CONCLUSIONES

- De acuerdo con la buena afinidad que se tuvo entre la curva patrón desarrollada en este proyecto y las curvas experimentales, se comprueba que este estudio es acertado para el análisis de deformaciones del asfalto.
- Se comprobó que la solución desarrollada, en este proyecto es acorde al modelo que propuso Ossa en 2005, para cargas monotónicas aplicadas al asfalto.
- Con este modelo se puede predecir el comportamiento de las deformaciones del asfalto, teniendo la limitación de una temperatura constante, ya que fue analizado a una temperatura de 23 °C, la cual es la temperatura promedio de Medellín.
- Para lograr el objetivo de este estudio, se llega a la respuesta de la velocidad de deformación de referencia ($\dot{\epsilon}_0$), definida por la ecuación constitutiva del modelo, la cual puede ser aplicada para diferentes diámetros y/o cargas, siendo esta:

$$\dot{\epsilon}_0 = -1.0932\dot{\epsilon}^{eff4} + 0.9076\dot{\epsilon}^{eff3} - 0.1886\dot{\epsilon}^{eff2} - 0.0195\dot{\epsilon}^{eff} + 0.0161$$

- Con el indentador de diámetro de 15 mm, se hicieron los ensayos con cargas de 5 N a 70 N, para visualizar que la velocidad de deformación aumentaba, sin abandonar el ajuste con la curva patrón; al cumplirse esto los ensayos con los diámetros de 25 mm y 35 mm, se hicieron solo con cargas desde 5 N a 20 N.
- Como se observa en las gráficas (11.a), (11.b) y (11.c), las cargas de 5 N a 20 N tienen un ajuste muy cercano entre ellas, donde se demuestra que a mayor carga, mayor velocidad de deformación.
- Las gráficas (11.a), (11.b) y (11.c), muestran que al cambiar el diámetro del indentador sigue cumpliendo con el modelo desarrollado en este proyecto.

- La carga es directamente proporcional a la curva, es decir, a mayor carga hay un aumento de la pendiente en la curva sin abandonar la tendencia.
- Este proyecto puede ser el inicio, para estudios futuros de predicciones de deformación permanente, por medio de instrumentos más sencillos y mayor asequibilidad, en otros asfaltos, a diferente temperatura y mezclas asfálticas.

BIBLIOGRAFÍA

A F. Bower, N. A. Fleck, A. Needleman, and N. Ogbonna. Indentation of a power lawcreeping solid. Proceedings of the Royal Society London, Series A(441):97–124, 1993.

ARQUITECTUBA. Asfalto obras públicas. [En línea]. <<http://www.arquitectuba.com.ar/monografias-de-arquitectura/asfalto-obras-publicas/>> [Consulta:14 Septiembre 2011].

ASPHALT-GUIDE. Asphalt History. [En línea]. <http://www.asphalt-guide.com/asphalt-history.html>. [Consulta: 6 Julio. 2011].

Brown, S. F. and Snaith, M. S. (1974) "The permanent deformation characteristics of a dense bitumen macadam subjected to repeated loading" Proceedings of the Association of asphalt Paving Technologists, Vol. 45, pp. 224-252.

BROWN et al. (1992) "Bituminous pavements. Materials, design and evaluation. Residential course lecture notes". Department of Civil Engineering. University of Nottingham.

Deshpande, V. S. And Cebon, D. (1999b) "Models of particle reinforced nonlinear-viscous composite" J. of engineering mechanics, Vol 125, Pag 255-262.

E-ASPHALT. Propiedades del Asfalto. [En línea]. <<http://www.e-asphalt.com/propiedades/propiedades.htm>> [Consulta: 5 Agosto. 2011].

Francken, L. and Verstraeten, J. (1974) "Methods for predicting moduli and fatigue laws of bituminous road mixes under repeated bending" Transportation research record, Vol 515, Pag 114-123.

Guía para la búsqueda de información y elaboración de bibliografías. Medellín. 2009, 2^{da} edición, Universidad EAFIT.

HUANG, Y.H. (1967) "Stresses and displacements in viscoelastic layered systems under circular loaded areas " Proceedings of the 2nd International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements.

MARÍN, franco mario y Valera, Cardona carolina. Modelación y análisis de susceptibilidad a la deformación permanente de mezclas asfálticas. Trabajo de grado. Ingeniero mecánico. Medellín: Universidad Pontificia Bolivariana. 2007.

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. Documentación. Presentación de tesis, trabajos de grado y otros trabajos de investigación. NTC -1486, Bogotá: ICONTEC, 2008.

Ossa, E.A. and Deshpande, V.S. and Cebon, D. (2004a) "Uniaxial monotonic and cyclic behaviour of bituminous mixes", Cambridge University Engineering Department Report. CUED/C-MICROMECH/TR.95.

Ossa, E.A. and Deshpande, V.S. and Cebon, D. (2004b) "Triaxial deformation behaviour of bituminous mixes ", Cambridge University Engineering Department Report. CUED/C-MICROMECH/TR.96.

Ossa, E.A. (2004c) "Deformation behaviour of bitumen and bituminous mixes ", PhD Thesis, Cambridge University Engineering Department, 2004.

Ossa, E.A. and Deshpande, V.S. and Cebon, D. (2005a) "Phenomenological model for the monotonic and cyclic behaviour of pure bitumen" Journal of materials in Civil Engineering, ASCE Vol. 17 No 2 March/April, pag. 188-197.

Ossa, E.A. and Taherkhani, H. and Collop, A. C. (2006) "Compressive deformation behaviour of asphalt mixtures", En prensa. Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists.

Ossa, E.A. and Collop, A. C. (2005) "Spherical indentation behaviour of asphalt mixtures" Submitted to: ASCE J. of Materials in Civil Engineering. October, 2005.

Ossa, E.A. and Collop, A. C. (2006) "Dilation behaviour of asphalt mixtures" Submitted to: Int. Journal of Road Materials and Pavement Design. October, 2005.

PAEZ, D. F. y Suarez, J. F. (2001) "Estudio de ahuellamiento en mezclas asfálticas" Universidad de los Andes.

PROYECTO AREA Q. Historia del asfalto. <
<http://proyectos.blogdiario.com/1140707220/>> [Consulta: 26 Abril. 20011].

Salgado, Bocaz Cristian. Diseño de Base tratada de Escoria de Vanadiocon Asfalto espumado para Caminos Básicos. Chile: Universidad del Bío-Bío.2008. < <http://es.scribd.com/doc/52889603/11/Tipos-de-asfalto-utilizados-en-Pavimentos>> [Consulta: 26 Abril. 2011].

Universidad Nacional de Colombia, Palmira. Guía rápida para la presentación de tesis y trabajos de grado en formato digital.<
<http://www.disenio.palmira.unal.edu.co/paginas/documentos/DNB-SI>>
[Consulta: 13 Octubre. 2011]

van der POEL, C (1955) "Time and temperature effects on the deformation of asphaltic bitumens and bitumen-mineral mixtures" J. of the society of petroleum engineers.