



Vigilada Mineducación

INDENTACIÓN ESFÉRICA EN ASFALTOS ENVEJECIDOS
SPHERICAL INDENTATION ON AGED ASPHALTS

PLINIO D PAOLA PUCHE

TESIS DE GRADO PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE MAESTRÍA EN
INGENIERÍA

ASESOR

JULIAN VIDAL VALENCIA

UNIVERSIDAD EAFIT
ESCUELA DE INGENIERÍAS
MAESTRÍA EN INGENIERÍA

Spherical Indentation On Aged Asphalts

Indentación Esférica En Asfaltos Envejecidos

Plinio D'paola Puche ^a

^a Departamento de Ingeniería Civil. Universidad EAFIT. Medellín. Colombia. pdpaolap@eafit.edu.co

Received: xxxxxxxxxxx. Received in revised form: xxxxxxxxxxxxxxxxxxx. Accepted: xxxxxxxxxxxxxxxxxxx.

Abstract

Permanent deformation is one of the most frequent failures produced in the asphalt pavement, mainly in heavy and low-speed traffic lanes. Predicting this type of defect is made difficult by the high complexity of asphalt, since it is a thermoplastic material that exhibits linear viscoelastic behavior at low loads and nonlinear viscoelastic behavior at high loads. Its behavior also varies due to oxidative aging, produced by environmental effects throughout its useful life, which makes its prediction more complicated. The tests used for its analysis are highly expensive and often require a large number of destructive laboratory tests, which sometimes fail to reproduce the same environmental and support conditions of the tracks. In this work, it is proposed to use the spherical indentation method, for asphalts aged by the mechanical agitation test at high revolutions, which are economic tests that use easily accessible equipment for any pavement laboratory, such as the manual penetrometer (previously established for spherical indentation calculations) and a conventional double helix mechanical stirrer (used in the oxidative aging process). This method was used in a conventional asphalt AC 60-70, aged in times of 30 min, 1 hour, 1.5 hours, 2 hours, 2.5 hours and 3 hours, in order to determine the variation of its properties as it increases. the effect of aging.

Keywords: Asphalt; indentation; permanent deformation; oxidative aging; penetration; mechanical agitation at high revolutions

Resumen

La deformación permanente es una de las fallas más frecuentes producidas en el pavimento asfáltico, principalmente en los carriles de tráfico pesado y de baja velocidad. La predicción de este tipo de defecto se dificulta por la alta complejidad del asfalto, debido a que es un material termoplástico que presenta un comportamiento viscoelástico lineal a baja cargas y viscoelástico no lineal a altas cargas. Su comportamiento también va variando por el envejecimiento oxidativo, producido por los efectos ambientales durante toda su vida útil, lo que hace más complicada su predicción. Los ensayos empleados para su análisis son altamente costosos y en muchas ocasiones necesitan un gran número de pruebas destructivas de laboratorio, los cuales a veces no logran reproducir las mismas condiciones ambientales y de soporte de las vías. En este trabajo se propone emplear el método de indentación esférica, para asfaltos envejecidos por el ensayo de agitación mecánica a altas revoluciones; estos son ensayos económicos que emplean equipos de fácil accesibilidad para cualquier laboratorio de pavimentos, como lo es el penetrómetro manual (previamente establecido para los cálculos de indentación esférica) y un agitador mecánico convencional de doble hélice (empleado en el proceso de envejecimiento oxidativo). Este método se utilizó en un asfalto convencional AC 60-70, envejecido en tiempos de 30 min, 1 hora, 1.5 horas, 2 horas, 2.5 horas y 3 horas, con el fin de determinar la variación de sus propiedades a medida que se incrementa el efecto del envejecimiento.

Palabras clave: asfalto, indentación, deformación permanente, envejecimiento oxidativo, penetración, agitación mecánica a altas revoluciones.

1. Introducción

En Colombia para finalización del año 2022 se espera que los proyectos viales 4G tengan alcance y niveles de ejecución superiores al 80 %. Por lo tanto, el empleo de mezclas asfálticas para vías primarias y secundarias será elevado, teniendo en cuenta la espera de nuevos proyectos en un corto tiempo, por el lanzamiento del programa de infraestructura

5G. Lo que ha generado mayor interés en investigaciones sobre el comportamiento de las mezclas asfálticas para la construcción de carreteras, especialmente en las autopistas de tránsito pesado, ya que se presenta frecuentemente fallas de deformación permanente en los carriles de baja velocidad donde circulan los camiones. Es por ello por lo que se ha investigado en gran medida con la teoría de indentación; tal teoría permite considerar el comportamiento viscoelástico

del material bajo la acción de la carga y la temperatura. Muchas de las investigaciones realizadas sobre indentación emplean equipos sofisticados y costosos, lo que ha generado un menor motivo de aplicarlo en nuestro medio, pues estos equipos solo están a disposición de pocas universidades y empresas consultoras.

Se establece así un reto para los ingenieros del asfalto que consiste en caracterizar el comportamiento del ligante asfáltico por medio de equipos razonablemente asequibles. Algunos estudios como los de Ossa, Deshpande & Cebon (2005) [1] han utilizado máquinas que emplean cargas monotónicas y cíclica en el ensayo de indentación. En otros estudios como los empleados por Bahia et al (2010) [2], disponen en algunas ocasiones de un penetrómetro (Ensayo de penetración ASTM D5), dado que es un equipo de coste relativamente bajo que permite reemplazar la aguja que utiliza como indentador por una con una punta esférica, que tiene una solución conocida obteniéndose mayor conformidad de fluencia de acuerdo con lo investigado por Yang & Li (2008) [3]. Bahia et al (2010) [2] concluyeron que dichas pruebas pueden ser utilizadas para medir el efecto de modificación de las propiedades reológicas

Los métodos de indentación se comenzaron a aplicar en materiales metálicos, en los que en algunas ocasiones emplearon el uso de indentadores esféricos de acuerdo con el procedimiento de Brinell (1900) y Rockwell. Posteriormente, Tabor et al (1951) [4] determinaron mediante ensayos de dureza vickers que la presión bajo el indentador es dependiente a la carga, adicionalmente desarrolló un método empírico mediante mediciones de dureza Meyer (1908) [5] el cual propuso una ley a través de una relación empírica $W = kd^n$ en la que se relaciona la carga aplicada (W) y el indentador esférico (d), siendo n y k constantes del material ensayado.

Se extendieron relaciones empíricas propuestas por Mulhearn y Tabor (1960) [6], aplicando la ley de potencia, utilizando las transformaciones de similitud para la indentación de metales estudiado por Hill (1989) [7]. Adicionalmente, en la investigación realizada por Hill (1992) [8], utilizaron indentadores de forma esférica y cónica, para determinar el efecto de la forma del indentador, ejecutando las pruebas en medios elásticos no lineales y viscosos no lineales.

Bower et al (1993) [9], de acuerdo con lo desarrollado por Mulhearn y Tabor (1960) [6] y el procedimiento de escalado de Hill (1989) [7], proporcionó fundamentos teóricos que permitieron interpretar ensayos de indentación sobre materiales que presentan termofluencia, comprobando así que el modelo es dependiente de las características del material e independiente de la forma del indentador, lo cual permitió generar en su modelo constantes en función de la pendiente de la relación entre el esfuerzo efectivo y la velocidad de deformación efectiva, una vez realizadas representaciones del ensayo por medio de elementos finitos.

Ossa et al (2005) [1], propuso un modelo fenomenológico de indentación esférica sobre asfaltos que, valida el modelo constitutivo multiaxial, y que posteriormente llevó a aplicar a mezclas asfálticas, para la predicción de la deformación acumulada en el tiempo. Jelagin y Larsson (2013) [10], propusieron un modelo para determinar el módulo cortante (G), empleando la indentación esférica para determinar las propiedades viscoelásticas del asfalto.

Uno de los factores más influyentes en la disminución del confort, en la reducción de la resistencia al deslizamiento y en la duración de los pavimentos asfálticos, es el envejecimiento de las mezclas bituminosas. El envejecimiento de la mezcla asfáltica es un fenómeno que hace presencia durante su producción en planta, el transporte, su instalación en obra y en toda su vida de servicio. Con el tiempo los pavimentos asfálticos sufren diferentes tipos de deterioros, siendo los más comunes: El agrietamiento, reducción de la resistencia al deslizamiento y la deformación permanente.

El agrietamiento se ha asociado mayormente al envejecimiento termo-oxidativo del asfalto, el cual es generado por factores ambientales tales como el oxígeno, la temperatura, la radiación ultravioleta, la presión y la humedad (Traxler (1963) [11]; Vallerga, (1981) [12]).

En el mecanismo de envejecimiento de mezclas asfálticas ocurren dos etapas: el envejecimiento a corto y a largo plazo. El envejecimiento a corto plazo cubre el periodo de calentamiento de la mezcla, que ocurre usualmente durante su producción, almacenamiento, transporte e instalación, en el que se presentan pérdidas de componentes volátiles; y el envejecimiento a largo plazo es una oxidación y endurecimiento in situ que se produce durante toda su vida de servicio debido a las condiciones ambientales y los efectos del clima.

Los componentes en las mezclas asfálticas y las condiciones de exposición a las condiciones ambientales y el tiempo influyen en gran medida a los efectos del envejecimiento, generando cambios en las propiedades reológicas, físicas y químicas (Abbas et al., (2002) [13]; Lau et al., (1992) [14]; Lee, (1973) [15]). Se ha demostrado por medio de otras investigaciones que el contenido de vacíos y el espesor de la película de asfalto también generan influencia en el envejecimiento (Kandhal & Chakraborty, (1996) [16]), además de generar cambios en el desempeño del pavimento, en el que también influye en gran importancia la fuente de asfalto, la naturaleza de los materiales con los que interactúa, polímeros, ácidos y agregados (Petersen, (2009) [17]).

Para tener un estudio profundo sobre el envejecimiento de la mezcla asfáltica se debe tener en cuenta un análisis de las variables intrínsecas de la muestra, sus componentes, los agregados, la relación de vacíos y el asfalto; y del otro lado, se deben estudiar las variables extrínsecas que producen el efecto del envejecimiento tales como la temperatura, la

humedad del ambiente, los rayos ultravioleta, el viento, las cargas del tránsito, el tiempo de servicio, la presión y la precipitación atmosférica

En este proyecto se evalúa el efecto del envejecimiento oxidativo para un asfalto 60-70 mediante un ensayo no convencional de agitación mecánica investigado por A. Gamarra & E. A. Ossa (2018) [18]. Posteriormente, en este se realizarán ensayos de indentación esférica por el modelo fenomenológico de Ossa et al (2005) [1], para determinar su comportamiento viscoelástico después del proceso de envejecimiento.

2. Envejecimiento Termo-oxidativo del asfalto

Las características fundamentales del asfalto utilizado en la fabricación de la mezcla asfáltica son consideradas como la razón principal de los cambios fisicoquímicos que se generan en la mezcla durante el proceso de envejecimiento. Por lo tanto, las investigaciones sobre este fenómeno se concentran en el envejecimiento termo-oxidativo del asfalto y el cambio de sus propiedades por encima de los otros componentes que forman la mezcla asfáltica.

Todos los mecanismos que intervienen en el proceso del envejecimiento termo-oxidativo del asfalto se relacionan a cambios de orden químico, físico, mecánico y reológico. (Guerrero, W.M.C., & Pabón, S.B.C., (2020) [19]). Con respecto a los cambios en las propiedades físicas al envejecer el asfalto se ha mostrado a través de resultados de ensayos de laboratorio que disminuye parámetros como la ductilidad, la penetración y aumenta la temperatura del punto de ignición y del punto de ablandamiento (Siddiqui & Ali, (1999^a) [20]). Estos ensayos son utilizados para clasificar los materiales asfálticos en diferentes niveles, pero al realizar un análisis composicional de asfaltos con los mismos grados se observa que no tienen la misma composición química o el mismo comportamiento reológico (Loeber, et al., (1998) [21]). Desde el enfoque de orden químico se ha utilizado el método cromatográfico de fraccionamiento SARA, a partir del cual se separa el asfalto en cuatro familias principales: saturados, aromáticos, resinas y asfaltenos (Corbett, (1969) [22]).

También se ha empleado la microscopía de fuerza atómica (AFM) para conocer los cambios microestructurales en el material, gracias a esto las variaciones químicas se interpretan como un movimiento de los componentes de las fracciones menos polares hasta las más polares debido a que cada una contiene una distribución diferente de moléculas de oxígeno, los cuales presentan reactividades distintas por efecto de la volatilización y la oxidación formando así un reacomodo de las moléculas de asfalto que producen una pérdida de aromáticos y resinas, con el correspondiente incremento en los asfaltenos (Petersen, (2009) [17]). Otra técnica implementada para el análisis de cambio químico es

la FTIR (*Fourier Transform Infrared*) o espectroscopia infrarroja con transformada de Fourier. Esta es una técnica de análisis espectroscópica que utiliza una parte del espectro electromagnético, proporcionando información química adicional sobre los grupos funcionales y la absorción de oxígeno en el asfalto. En estos se evidencia la formación de grupos funcionales carbonilos (cetonas) y sulfoxidos durante el proceso oxidativo y particularmente la producción de cetonas en la oxidación es relativa al incremento de la viscosidad (Petersen, (2009) [17]) (Lu & Isacson, (2002) [23]).

Desde el enfoque mecánico y dinámico se observa que la relación de módulos después del envejecimiento incrementa provocando un endurecimiento del material, reduciendo el ahuellamiento, como la vida útil de fatiga e incrementando el agrietamiento (Bell, (1989) [24]; Bell & Kliever, (1995) [25]). En las propiedades reológicas durante el envejecimiento-oxidativo, se incrementa la respuesta elástica del asfalto más rápido que la respuesta viscosa, debido a un aumento del tamaño de las moléculas por presencia de oxígeno que conlleva a un aumento en la interacción de fuerzas entre las moléculas por las aglomeraciones moleculares, provocando pérdida de movilidad para fluir, decrecimiento del ángulo de fase y aumento de la viscosidad (Read & Whiteoak, (2003) [26]) (Petersen, (2009) [17]).

2.1 Ensayo de envejecimiento termo-oxidativo por agitación mecánica

Para evaluar el efecto del envejecimiento termo-oxidativo se hace uso de diferentes ensayos para determinar la termo-oxidación acelerada a nivel de laboratorio de manera que simule el envejecimiento en el material. Las técnicas comúnmente empleadas son:

RTFOT (*Rotating Thin Film Oven Test*, ASTM D2872, (1997)) o el ensayo de capa delgada en horno en movimiento y TFOT (*Thin Film Oven Test*, ASTM D1754, (1997)) o el ensayo de capa delgada en horno; los cuales han sido utilizados para determinar el envejecimiento a corto plazo de los betunes bituminosos usados para las mezclas bituminosas en caliente, cuando el material está durante el almacenamiento, mezcla, transporte y aplicación de la capa asfáltica. También se emplea PAV (*Pressure Aging Vessel*, ASTM D6521, (2000)) o el ensayo de envejecimiento de ligantes asfálticos utilizando el recipiente de envejecimiento presurizado, que es utilizado para estimar el grado de envejecimiento del asfalto en el largo plazo o en servicio.

Emplear estos ensayos requiere equipo altamente costoso, lo que dificulta su uso cotidiano con el fin de determinar la información necesaria para su análisis. Por lo tanto, en este proyecto se empleó el método de termo-oxidación de agitación mecánica a altas revoluciones el cual mediante la aplicación de agitación mecánica en el asfalto es posible

eliminar la capa de asfalto superficial en contacto con el oxígeno del medio ambiente, acelerando de esta manera el proceso de envejecimiento en todo el material y no solo en la capa superficial.

Diferentes investigaciones han demostrado que la técnica de termo-oxidación de agitación mecánica genera un envejecimiento más acelerado que las técnicas estandarizadas, presentando así cambios sustanciales en las propiedades físicas, reológicas, como en su microestructura y en su composición química. (A. Gamarra & E. A. Ossa, (2018) [18]).

2.2 Mecánicas que intervienen en el envejecimiento de las mezclas asfálticas

Durante el fenómeno del envejecimiento se produce el endurecimiento de la mezcla por la acción de cuatro mecánicas, que son: volatilización, oxidación, tixotropía y sinéresis. Los mecanismos de volatilización, oxidación y sinéresis son de carácter químico y, por tanto, irreversibles (Lu & Isacson, (2000) [27]) debido a que alteran la composición química del asfalto, mientras que el endurecimiento esterítico o tixotropía corresponde a un reajuste estructural que se puede revertir mediante la exposición al calor o al trabajo mecánico (Swiertz, (2010) [28]). La acción de todos estos mecanismos produce un endurecimiento global en el asfalto iniciándose en la capa que tiene contacto directo con las condiciones ambientales.

2.2 Cambios químicos en el asfalto por envejecimiento termo-oxidativo

Gracias al método de fraccionamiento SARA se pueden determinar con más facilidad los cambios químicos realizados en las mezclas asfálticas debido a los procesos termo-oxidativo, en los que se identifica que hay movimientos desde las fracciones menos polares hasta las más polares (desde aromáticos hasta asfáltenos). En el envejecimiento oxidativo al generarse mayor cantidad de asfáltenos conducen a la formación de macroestructuras o micelas. Los asfáltenos forman agregaciones, rodeados por las resinas en un medio aceitoso que son los aromáticos y saturados (Bardon, et al., (1996) [29]). Esto implica que se cuenta con una estructura de alta viscosidad y rigidez, generalmente asociada a una alta cantidad de asfáltenos, conduciendo a un arreglo cuasi-sólido en el asfalto (Loeber, et al., (1998) [21]).

El método de fraccionamiento SARA genera limitaciones a la hora de analizar los cambios químicos en el asfalto durante el proceso de envejecimiento, puesto que este método solo entrega la variación del peso molecular de los componentes (Petersen, et al., (1994) [30]). Por lo tanto, se ha empleado el método de espectroscopia infrarroja con transformada de Fourier FTIR (*Fourier Transform Infrared*), en el que se pueden identificar los cambios en la estructura química

presente en el asfalto sin previa separación de sus componentes, determinando así una formación de carbonilo que indica el nivel de oxidación del asfalto y está relacionado con el incremento de viscosidad.

También se ha identificado la cetona en la región del carbonilo, este es el componente de mayor absorción que forma cadenas unidas al anillo aromático. La formación de cetonas ha sido identificada como el factor más influyente en la formación de asfáltenos en la oxidación (Petersen & Ronald., (2011) [31]). Con este método también se reconoce la formación del grupo funcional de sulfoxido durante el proceso de envejecimiento termo-oxidativo; sin embargo, sus efectos en las propiedades físicas han recibido poca atención, puesto que su reacción está sujeta a la concentración de azufre en el asfalto (Petersen, (2009) [17]).

2.3 Cambios microestructurales en el asfalto por envejecimiento termo-oxidativo

Para establecer las características microestructurales después del proceso de envejecimiento, se ha empleado el método de microscopía de fuerza atómica (AFM) (Bardon et al. (1996) [29]). Esta es una técnica que genera una imagen mediante el barrido de una pequeña punta que escanea e interactúa con la superficie de la muestra, mostrando la topografía y las características de fase en el asfalto (Loeber et al. (1996) [32]).

El primer trabajo realizado con este método describió la presencia de una fase característica de la matriz de asfáltica definida por una serie de líneas claras y oscuras que llamaron estructura “tipo abeja”. (Loeber et al. (1996) [32]). Posteriormente, se atribuyó que el aumento de la densidad de las estructuras de abeja es debido a la presencia de asfáltenos (Pauli & Grimes (2003) [33]).

Usando el método de detección de fase en AFM (Masson et al., (2006) [34]), fueron capaces de describir cuatro fases fundamentales en el asfalto que nombraron fase catana (tipo abeja), perifase (alrededor de la fase catana), parafase (regiones disueltas) y sulfase (zona de más alto contraste). Adicionalmente, determinaron una baja relación entre el contenido de asfáltenos y la estructura tipo abeja, así como entre las fases encontradas y las fracciones SARA, definiendo una relación proporcional entre la estructura de abeja y el contenido de Níquel y Vanadio en el asfalto. Adicionalmente, emplearon AFM a diferentes temperaturas en los que se determinó que la topografía de las imágenes era altamente dependiente del tiempo y a la temperatura de almacenamiento observando que la estructura tipo abeja desaparece completamente a temperaturas superiores a los 70° C.

Otros estudios indican que la estructura de abeja es principalmente de cera y que los estudios anteriores estaban en parte errados, pues observaron ausencia de este tipo de estructura en muestras de asfalto con bajo contenido de cera (Pauliet al, (2011) [35]). Pero estudios más recientes indican que asfaltos expuestos a procesos termo-oxidativos aumentan

la cantidad de este tipo de estructuras. En este sentido, su formación no estaba directamente relacionado con la presencia de cera o átomos metálicos en el material. (Wu et al. (2009) [36], Zhang et al. (2012) [37], Eberhardsteiner et al. (2015) [38] y Hofko et al. (2015) [39]).

Se aplicó el método de envejecimiento por agitación mecánica a altas revoluciones, en el que se realizó el análisis microestructural de AFM, que mostro la cantidad y el tamaño de las estructuras de abejas (asociado a los asfaltos) que aumentaban a medida que se aplicaba el proceso de envejecimiento (A. Gamarra & E. A. Ossa, (2018) [18]). Al día de hoy no hay un entendimiento completo sobre los mecanismos de formación de estas estructuras en el asfalto, pese a todas las diferentes hipótesis de los estudios de AFM. Pero se considera el asfalto como un material con tendencia a la separación de sus fases bajo ciertas condiciones y aun se considera que hace falta el establecimiento de una relación entre la microestructura y el comportamiento macroscópico o volumétrico del asfalto. (A. Gamarra & E. A. Ossa, (2018) [18]).

3. Indentación esférica de asfaltos

La indentación es un método económico y fácil para medir las propiedades mecánicas de los materiales y para validar los modelos constitutivos multiaxiales. La prueba de indentación estándar consiste en aplicar una carga constante y medir la deformación en función del tiempo por medio de un penetrador que presiona el material a una tasa previa de velocidad dando así la deformación y el tiempo en el que ocurrió. Para medir las propiedades del asfalto por medio de la indentación se han realizado muchas investigaciones, debido a que el asfalto es considerado un material termoplástico de comportamiento viscoelástico, siendo un material bastante complejo que presenta cambio en su comportamiento por condiciones de cargas estáticas, cíclicas y cambios de temperatura, que son las condiciones frecuentes que presenta una carpeta asfáltica en carretera. De acuerdo con las investigaciones realizadas se probaron que empleando indentadores esféricos o de punta esférica aplicando cargas monotónicas y tensión efectiva en el momento de la penetración con cambios de temperatura, se desarrolla un modelo analítico y experimental de fácil implementación, basado en la ley de potencia de Bower y colaboradores (1993) [9], que ha sido propuesta por Ossa et al (2005) [1], Bahia et al (2010) [2] y Jelagin y Larsson (2013) [10].

El modelo obtenido por Ossa et al (2005) [1] relacionó los conceptos del comportamiento del asfalto a deformación axial y el comportamiento a indentación de solidos deformables, enfocándose en la descomposición de la tasa de deformación, en sección elástica y otra viscosa, con el fin de validar el modelo constitutivo multiaxial y determinar las propiedades del asfalto, obteniendo la información necesaria para la predicción de la deformación permanente en la carpeta asfáltica en servicio.

Cheung y Cebon (1997) [40] desarrollaron un mecanismo para la deformación del asfalto en estado estable para una amplia gama de temperaturas y esfuerzos. Donde demostraron que, en temperaturas cercanas y superiores a la transición vítrea de un asfalto, la transición de una respuesta viscoso lineal a bajas cargas a una respuesta viscoso no lineal a altas cargas es capturado por el modelo modificado de Cross (1965) [41]. El modelo asocia el estado estable de esfuerzos σ_{ss} y el estado estable de la velocidad de deformación $\dot{\epsilon}_{ss}$ mediante la siguiente ecuación.

$$\frac{\sigma_{ss}}{\dot{\epsilon}_{ss}} = \frac{\sigma_o}{\dot{\epsilon}_p} \left(\frac{1}{1 + \left(\frac{\dot{\epsilon}_{ss}}{\dot{\epsilon}_p} \right)^m} \right) \quad (1)$$

Donde:

σ_o : Es el esfuerzo de referencia

$\dot{\epsilon}_p$: Velocidad de deformación

m : Es el parámetro de la ley de potencia que gobierna el comportamiento del asfalto en el régimen no lineal

Aplicando la ecuación de Arrhenius para la dependencia de la temperatura, tal como se presenta a continuación:

$$\dot{\epsilon}_p = \dot{\epsilon}_{pc} * \exp \left(-k \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{ref}} \right) \right) \quad (2)$$

Donde

$\dot{\epsilon}_{pc}$: Velocidad de deformación de referencia a 273 K (0 °C)

k : Es la constante de Arrhenius

T : Temperatura del ensayo (K) (°C)

T_{ref} : Temperatura de referencia. Para el caso del modelo de Ossa et al [12], dicho valor corresponde a 273 K

La ecuación de William-Landel-Ferry (WLF) para el caso de altas temperaturas la cual puede ser aplicada mediante la siguiente relación:

$$\dot{\epsilon}_p = \dot{\epsilon}_{pc} * \exp \left(\frac{-2.303C_1(T - T_s)}{C_2 + (T - T_s)} \right) \quad (3)$$

Donde:

C_1 y C_2 : Constantes universales con valores de 8.86 y 101.6 respectivamente

T_s : Temperatura de ajuste

y la relación de la ley de potencia de termofluencia para reducir el modelo para el caso de altas velocidades de deformación, tal como se expresa a continuación:

$$\frac{\dot{\epsilon}_{ss}}{\dot{\epsilon}_p} = \left(\frac{\sigma_{ss}}{\sigma_o} \right)^n \quad (4)$$

Donde: $n = 1/(1 - m)$

A partir de estos estudios y de una intensa investigación para dos tipos de asfalto, 50 (1/10 mm) y 100 (1/10 mm), que fueron sometidos a una amplia gama de temperaturas, tasa de

esfuerzos y deformaciones bajo cargas monotónicas y cíclicas, el modelo de Ossa et al [1] explica que la velocidad total de deformación ($\dot{\epsilon}$) es la suma de la velocidad de deformación viscosa o tasa de esfuerzo viscoso $\dot{\epsilon}^v$, que es activada durante la carga ($\alpha \neq 0$) y la velocidad de deformación recuperada o tasa de esfuerzo recuperada $\dot{\epsilon}^r$ y que se presenta cuando no hay aplicación de carga ($\alpha=0$).

De la misma forma, también se puede expresar en términos de la velocidad de penetración (\dot{h}). Las ecuaciones son:

$$\dot{\epsilon} = \dot{\epsilon}^v + \dot{\epsilon}^r \quad (5)$$

$$\dot{h} = \dot{h}^v + \dot{h}^r \quad (6)$$

Como la indentación es independiente de las tensiones hidrostática, el modelo constitutivo tridimensional para cargas multiaxiales, se expresa en la siguiente relación:

$$\dot{\epsilon}_{ij} = \dot{\epsilon}_{ij}^v + \dot{\epsilon}_{ij}^r \quad (7)$$

De acuerdo a lo propuesto por Bower et al (1993) [9], el material asume una deformación de fluencia (h) después de aplicarse en el material una carga con una fuerza (F), por un indentador rígido esférico de baja fricción de diámetro (D), en un radio de contacto (a), el espesor de la muestra indentada se puede considerar semi-infinita y no afecta los resultados de la prueba y asume la ley de potencia de un sólido termoplástico. (ver figura 1).

$$\frac{\dot{\epsilon}_{ij}}{\dot{\epsilon}_0} = \frac{3}{2} \left(\frac{\sigma_e}{\sigma_0} \right)^{n-1} \frac{\sigma'_{ij}}{\sigma_0} \quad (8)$$

Donde:

σ_0 : Es el esfuerzo de referencia

$\dot{\epsilon}_0$: Velocidad de deformación de referencia

n : Es el exponente de la ley de potencia, que son constantes y que depende del material.

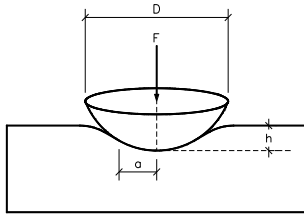


Figura 1: Indentación esférica en un semi-espacio (Fuente: Indentación Esférica de Asfaltos por Julián Vidal Valencia)

Para la indentación por medio de un indentador esférico sin fricción, las similitud de las soluciones dictan que el radio de contacto (a) esta relacionado con la profundidad de indentación (h) por:

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

Siendo c una constante en función del material y de n y puede considerarse como la relación fiel del radio de contacto nominal, donde el radio de contacto nominal es \sqrt{hD} . Del mismo modo la carga aplicada F está relacionada con la velocidad de penetración de indentación \dot{h} , a través de la siguiente ecuación.

$$\frac{F}{\pi a^2 \sigma_0} = \alpha \left(\frac{\dot{h}}{a \dot{\epsilon}_0} \right)^{1/n} = \alpha \left(\frac{2\dot{a}}{\dot{\epsilon}_0 c^2 D} \right)^{1/n} \quad (10)$$

Donde la constante α es solo una función del exponente n de la ley de potencia. Valores de c y α para los valores seleccionados de n , fueron deducidos por Bower et al (1993) [9] de una serie de cálculos de elementos finitos y se enumeran en la tabla 1.

Tabla 1. Constantes de calibración en función de la ley de potencia

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	3.110	1.128
100	3.051	1.201

El esfuerzo efectivo σ^{eff} bajo el indentador se define como:

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

Mientras que la deformación efectiva ϵ^{eff} y velocidad de deformación efectiva $\dot{\epsilon}^{eff}$ bajo el indentador se especifican como:

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

$$\dot{\epsilon}^{eff} = \frac{\dot{a}}{D} = \frac{c \dot{h}}{2\sqrt{hD}} \quad (13)$$

Se sustituyen las definiciones (11), (12) y (13) en las ecuaciones (9) y (10), para hallar la presión de tensión en el indentador, con la ley progresiva de potencia en un sólido.

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

3.1 Modelo de indentación del asfalto

El modelo para la respuesta de indentación esférica monotónica y cíclica del asfalto, se basa en los conceptos de esfuerzo efectivo σ^{eff} y la deformación efectiva ϵ^{eff} bajo un

indentador esférico, introducido por Mulhearn y Tabor (1960) [6] y justificado teóricamente por Bower et al (1993) [9].

Al relacionar las definiciones de las velocidad total de deformacion ($\dot{\epsilon}$) y de penetración (\dot{h}) con el de velocidad de deformacion efectiva $\dot{\epsilon}^{eff}$ de acuerdo a la ley progresiva de potencia de un sólido. Para una carga arbitraria bajo el indentador la velocidad de deformacion total $\dot{\epsilon}$ se puede expresar como:

$$\dot{\epsilon} = \dot{\epsilon}^v + \dot{\epsilon}^r = \frac{c}{2\sqrt{hD}}\dot{h} = \frac{c}{2\sqrt{hD}}(\dot{h}^v + \dot{h}^r) \quad (15)$$

Donde la velocidad de deformacion de indentacion viscosa \dot{h}^v como recuperada \dot{h}^r estan relacionadas con la fuerza de indentacion de la via expresandose como:

$$\dot{h}^v = \frac{2\dot{\epsilon}^v}{c}\sqrt{hD} = \left(\frac{F}{\pi a^2 \sigma_0 \alpha}\right)^n a \dot{\epsilon}_0(\epsilon) \quad (16)$$

$$\dot{h}^r = \frac{2\dot{\epsilon}^r}{c}\sqrt{hD} = \frac{2\sqrt{hD}}{c}[1 - \text{sign}(|F|)]\epsilon_u(\dot{\epsilon}^r) \quad (17)$$

Donde σ_0 es el esfuerzo de referencia, $\dot{\epsilon}_0(\epsilon)$ y $\dot{\epsilon}_u(\dot{\epsilon}^r)$ están en función de la carga y la deformación recuperable ϵ y $\dot{\epsilon}^r$. Mientras que $\dot{\epsilon}^r$ se define en función de la velocidad de deformación irre recuperable $\dot{\epsilon}^{pl}$ mediante la siguiente ecuación

$$\dot{\epsilon}^r = \left(\frac{\epsilon}{\epsilon^{pl}} - 1\right) \left(\frac{1 - \varphi}{\varphi}\right) \quad (18)$$

Donde φ es la constante de recuperación, que al relacionarse con la velocidad de deformación viscosa $\dot{\epsilon}^v$, permite que $\dot{\epsilon}^{pl}$ se exprese de la siguiente forma:

$$\dot{\epsilon}^{pl} = (1 - \varphi)\dot{\epsilon}^v \quad (19)$$

Las ecuaciones 15 y 17 especifican completamente el comportamiento de indentación esférica monotónica y cíclica del asfalto. La integración del tiempo en estas ecuaciones proporciona el historial completo de la profundidad de indentación en función del tiempo para cualquier carga especificada.

3.2 Metodología de aplicación del modelo

De los diferentes ensayos de indentación se grafica el tiempo t contra la penetración de indentación o deformacion h ; posteriormente, se evalúan rangos para cada condición de carga y se grafica la carga F vs deformacion h y se determina la velocidad de deformacion efectiva $\dot{\epsilon}^{eff}$ y el esfuerzo efectivo σ^{eff} . Los valores se agrupan en una sola gráfica para sacar la ecuación correspondiente para el parámetro n y consecuentemente determinar los valores c y α interpolando en la tabla 1 propuesta por Bower et al (1993) [9].

Se despeja $\dot{\epsilon}_0$ de la ecuación 14 y se obtiene la siguiente ecuación.

$$\dot{\epsilon}_0 = \frac{2\dot{\epsilon}^{eff}}{c^2 \left(\frac{\sigma^{eff}}{\alpha \sigma_0}\right)^n} \quad (20)$$

Por medio de iteraciones se determina el valor de σ_0 .

Se grafica las curvas de ϵ^{eff} contra $\dot{\epsilon}_0$ para cada punto con su carga correspondiente, se verifica la repetibilidad de su comportamiento y se toma una de ellas como base para determinar la velocidad de deformación inicial de referencia $\dot{\epsilon}_{oc}$, tomándola del intercepto del eje "y" asumiendo una deformación unitaria inicial aproximadamente a cero $\Delta h = 0.01$.

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

$$\dot{\epsilon}^{eff} = \left(\frac{F}{\pi \Delta h c^2 D a \sigma_0}\right)^n \left(\frac{c^2 \dot{\epsilon}_0}{2}\right) \quad (21)$$

La deformacion efectiva ϵ^{eff} , corresponde a cada una de las variaciones de su velocidad $\dot{\epsilon}^{eff}$ que se dan punto a punto con el cambio del tiempo:

$$\epsilon^{eff} = \dot{\epsilon}^{eff} \Delta t \quad (22)$$

Donde

$$\Delta h = \left(\frac{\epsilon^{eff2}}{c^2}\right) \quad (23)$$

Luego se repiten la ecuación 17, 18 y 19 con el fin de determinar la acumulación de la deformación efectiva para cada cambio de tiempo así:

$$\epsilon^{eff}_{n+1} = \dot{\epsilon}^{eff} \Delta t + \epsilon^{eff}_{n-1} \quad (24)$$

Se aplica la ecuación de ajuste por temperatura por Arrhenius o el de WLF, a temperaturas diferente a las de referencia, siendo presentadas previamente en las ecuaciones 2 y 3 generando una afectación en la velocidad de deformación de referencia $\dot{\epsilon}_{oc}$ y permitiendo determinar la velocidad de deformación $\dot{\epsilon}_0$ para cada punto de la curva.

En la figura 2 se presenta un diagrama de flujo que apoya la explicación del modelo.

4. Metodología experimental

Se ensayo un tipo de asfalto convencional proveniente de la refinaria de Ecopetrol de Barrancabermeja, con grado de penetración de 55 (1/10 mm) y una temperatura de punto de ablandamiento de 47.75°C determinadas en el laboratorio, se realizó el ensayo de envejecimiento termo-oxidativo por agitación mecánica a altas revoluciones empleando un agitador mecánico convencional de doble hélice de diámetro 55 mm, aplicándose a tres muestras de diferente masa, el

proceso de agitación fue continuo por períodos de: 0.5 horas, 1 hora, 1.5 horas, 2 horas, 2.5 hora y por último 3 horas.

A cada muestra con diferente tiempo de envejecimiento se le realizaron ensayos de punto de ablandamiento de materiales bituminosos de acuerdo a la norma I.N.V.E-712-13 (2013) y penetración de los materiales asfálticos según la norma I.N.V.E-706-13 (2013). Después de envejecidas las muestras de asfalto en diferente tiempo y en diferente masa se procedió a realizar la prueba de indentación a partir de una modificación de un penetrómetro de asfaltos manual que corresponde a la norma ASTM D5-D5M20 (2020). La modificación consistió en adaptar un indentador esférico de 22,22mm, donde se acoplo a un vástago que se desplaza sin producir fricción. La toma de datos se realizó de forma manual y fue por deformación controlada, los datos del tiempo se tomaron a través de la lectura de un cronometro en el penetrómetro modificado, que esta provisto de una caratula de medición de deformación o desplazamiento.

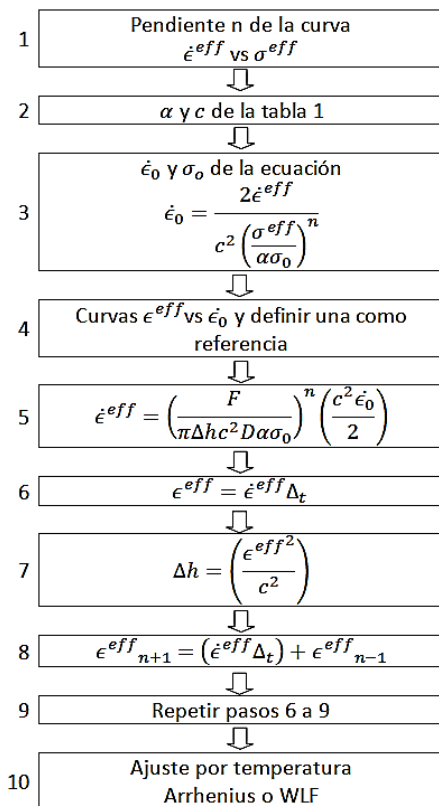


Figura 2: Diagrama de flujo para aplicación del modelo (Fuente: Indentación Esférica de Asfaltos por Julián Vidal Valencia)

4.1 Preparación de las muestras de ensayo

Se tomaron tres muestras de diferente masa: 250 g, 200 g, 150 g, introducidas en un recipiente metálico de dimensiones de 88 mm de diámetro y 104 mm de altura, el recipiente se colocó en una cabina extractora de gases y se calentó mediante una placa en caliente, a 163 °C, la cual es la misma

temperatura utilizada en las pruebas de envejecimiento como la TFOT (ASTMD1754, (1997)) y RTFOT (ASTMD2872, (1997)), con el fin de reducir su viscosidad a aproximadamente 100 Pa.s y facilitar su agitación. Una vez que el material alcanzó esta temperatura, se prosigue al proceso de agitación empleando el agitador mecánico antes mencionado, el cual rota aproximadamente a 1.800 rpm en los periodos de tiempo previamente definidos. Posteriormente, es vertido sin atrapar aire en los recipientes contenedores y en los anillos de bronce para el ensayo de punto de ablandamiento, penetración y indentación.

4.2 Pruebas de indentación

Se realizaron pruebas de indentación sobre el asfalto de penetración 55 (1/10 mm) y sobre las muestras de asfalto con masa de 150 g envejecido con tiempo de agitación de 0.5 horas, 1 hora, 1.5 horas y 2 horas, aplicando carga constante de 2.181 N, empleando una indentación por medio del penetrómetro manual previamente modificado con una punta esférica de diámetro D de 22,22 mm, a una temperatura controlada de 25 °C. Se tomo una profundidad maxima de indentación de 60 (1/10mm), el cual está dentro del rango de 0,065D o el 20% de la deformación efectiva ϵ^{eff} , ya que con valores mucho mayores a estos comienzan a influir efectos de deformación finita.

5. Resultados

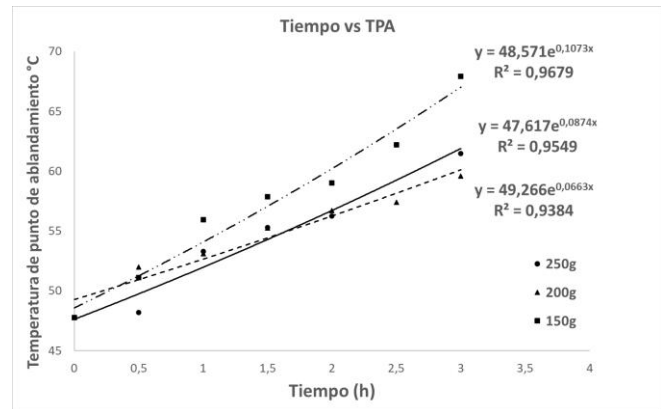


Figura 3: Valores de temperatura de punto de ablandamiento para asfaltos envejecidos a diferentes tiempos con diferentes masas. (Fuente: Propia)

En la figura 3, se presentan curvas de tiempo de envejecimiento vs los ensayos de temperatura de punto de ablandamiento, para las muestras de asfaltos con masas de 250 g, 200 g y 150 g envejecidos por agitación mecánica en tiempos de 0,5 horas, 1 hora, 1,5 horas, 2 horas, 2,5 horas y 3 horas. Como se puede observar a medida que se envejece el asfalto, el punto de ablandamiento va aumentando. Cuando la masa de la muestra envejecida se reduce y se envejece, la temperatura del punto de ablandamiento se incrementa progresivamente, lo que nos indica que el efecto del envejecimiento termo-oxidativo es más eficiente para una menor masa de la muestra.

Se determinan las ecuaciones de tendencia en función exponencial para cada una de las curvas de distinta masa de asfalto, en donde se evidencia que la función exponencial para la curva de 150 g, presenta un mayor ajuste a los datos obtenidos en el laboratorio y una mayor magnitud indicando un crecimiento más acentuado. Mientras que en las curvas de masa de 200g y 250g, la magnitud de las funciones decrece porcentualmente a medida que se aumenta la cantidad del asfalto envejecido. En el caso del envejecimiento a 3 horas, la temperatura del punto de ablandamiento para la masa de 250g, presento un resultado un poco mayor que la de 200g, lo que explica la intersección de las dos funciones, esto es debido a que los resultados de los parámetros de estas dos masas, presentan pocas diferencias en sus magnitudes, permitiendo la posibilidad que distintos factores ambientales, como de manipulación de material y equipo afecten los resultados fácilmente.

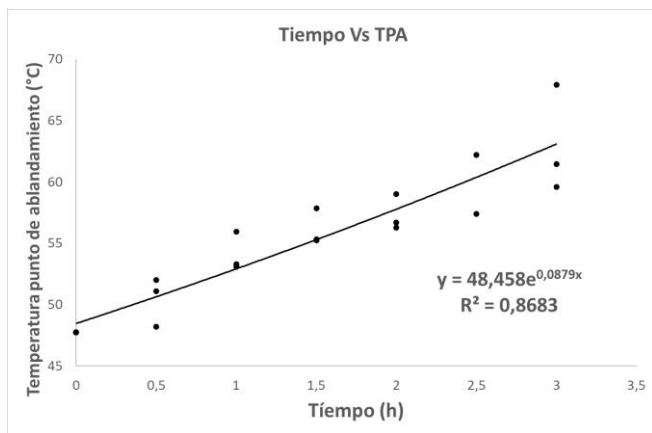


Figura 4: Valores generales y unificados de temperatura de punto de ablandamiento para asfaltos envejecidos a diferentes tiempos con diferentes masas. (Fuente: Propia)

En la figura 4, se presenta una tendencia exponencial unificada de los valores de temperatura de punto de ablandamiento, para el asfalto ensayado. Como se observa la función tiene un menor ajuste a los datos unificados que a los individuales, pero aun así reafirma una vez más su propensión a incrementarse conforme se aumenta el tiempo de envejecimiento.

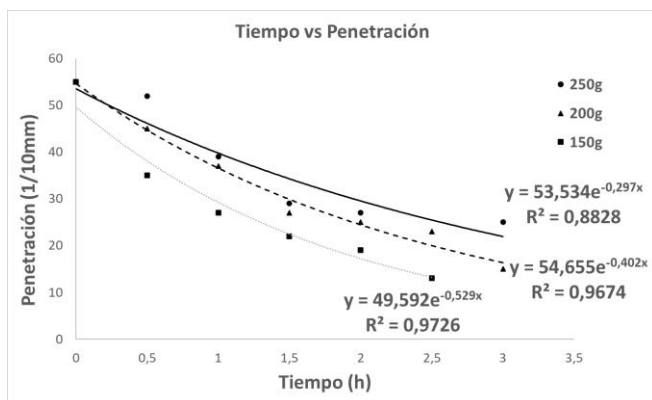


Figura 5: Valores de penetración para asfaltos envejecidos a diferentes tiempos con diferentes masas. (Fuente: Propia)

En la figura 5, se presentan curvas de tiempo de envejecimiento vs los ensayos de penetración, para las muestras envejecidas en los tiempos y en los tamaños mencionados anteriormente. Como se puede evidenciar la penetración se disminuye a medida que se envejece el asfalto comprobando un incremento del endurecimiento del material. Se confirma igualmente que, al reducir la masa de la muestra de asfalto en el proceso de envejecimiento, la penetración se reduce proporcionalmente cerciorando un mayor efecto del envejecimiento termo-oxidativo. En las líneas de tendencia exponencial, se observa que la función que expresa una mayor razón de cambio de reducción y un mejor ajuste a los datos, es la curva de 150g y a medida que se aumenta la masa, la razón de cambio de las funciones exponenciales va disminuyéndose.

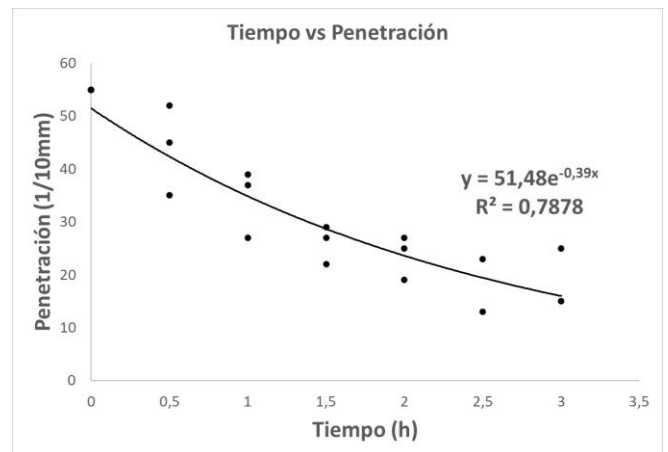


Figura 6: Valores generales y unificados de penetración para asfaltos envejecidos a diferentes tiempos con diferentes masas. (Fuente: Propia)

En la figura 6, se presenta la tendencia exponencial de los valores unificados de penetración. Se observa que la función tiene un ajuste muy por debajo que las presentadas en las curvas individuales, pero enseña una razón de cambio promedio de todos los datos obtenidos, manifestando igualmente una inclinación a la disminución de la penetración a medida en que se aumenta el tiempo de envejecimiento.

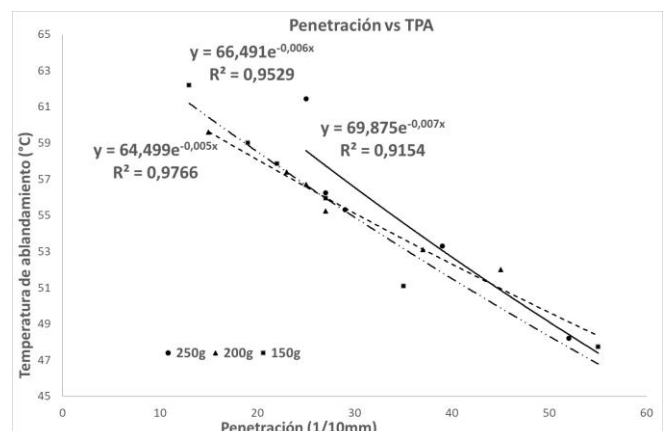


Figura 7: Relación entre penetración y punto de ablandamiento para asfaltos envejecidos a diferentes tiempos con diferentes masas (Fuente: propia)

En la figura 7, y en la figura 8, se relaciona la penetración con la temperatura del punto de ablandamiento, en la que se puede comprobar que estas propiedades físicas son inversamente proporcionales entre sí, a medida que se aumenta el proceso de envejecimiento del asfalto. Observándose que la penetración disminuye y la temperatura del punto de ablandamiento aumenta. Al realizarse nuevamente las líneas de tendencia de función exponencial, se sigue recalcando que la función de mayor razón de cambio es la de 150g la cual sigue presentando un buen ajuste a los datos obtenidos.

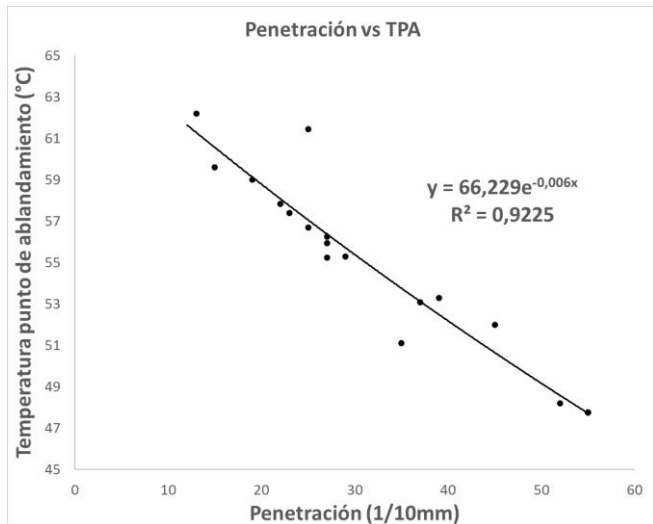


Figura 8: Relación entre los valores generales y unificados penetración y punto de ablandamiento para asfaltos envejecidos a diferentes tiempos con diferentes masas (Fuente propia)

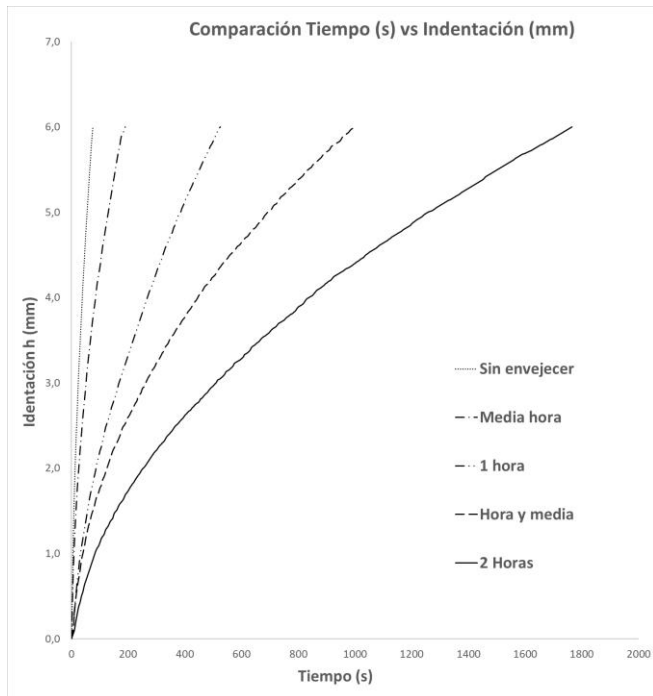


Figura 9: Relación de ensayos de indentación para asfaltos envejecidos a diferentes tiempos. (Fuente propia)

En la figura 9, se revelan ensayos de indentación para una muestra de 150g, con diferentes tiempos de envejecimiento evidenciando que, para una muestra de menor tiempo de envejecimiento, el valor máximo de penetración o de profundidad de indentación (h), se obtienen a menor tiempo de carga y a medida que se aumenta el tiempo de envejecimiento de la muestra, esta profundidad de indentación solo se alcanza a mayor tiempo de carga, demostrando que el material disminuye la velocidad de deformación y aumenta su rigidez a medida que se envejece. Se observa que las pendientes de las curvas van aumentando conforme se incrementa el tiempo de envejecimiento, dando a entender que el efecto del endurecimiento del asfalto crece de manera exponencial.

A partir de la información generada por los ensayos de indentación se aplica el modelo propuesto por Jelagin and Larsson [10], el cual relaciona el diámetro del indentador, la fuerza en función del tiempo y el radio de contacto para estimar el módulo cortante (G) del asfalto. Definido en la siguiente ecuación.

$$G(t) = \frac{1.5DF(t)}{8a_0^3} \quad (33)$$

Donde:

$G(t)$: Módulo cortante en función del tiempo (MPa)

D : Diámetro del indentador esférico (mm)

$F(t)$: Carga en función del tiempo (N)

a_0 : Diámetro de contacto asfalto-indentador (mm)

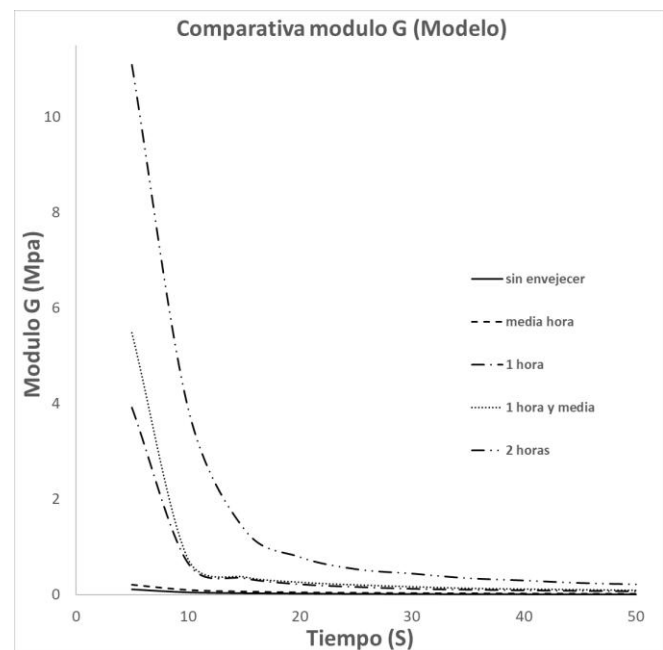


Figura 10: Relación de ensayos de modulo cortante para asfaltos envejecidos a diferentes tiempos. (Fuente propia)

En la figura 10, se observa que, al incrementarse el tiempo de envejecimiento de la muestra asfáltica, aumenta su módulo cortante (G), mostrando un mayor valor y un comportamiento

de mayor incremento para la curva de envejecimiento de 2 horas. Se evidencia en las curvas de, 0.5h-1h y 1.5h-2h que, al completarse una hora de envejecimiento, el comportamiento que presentan define un aumento significativo en la razón de cambio del módulo, ya que existe una mayor separación entre ellas, indicando un incremento más notorio entre sus magnitudes y una mayor diferencia entre sí. Pero si el tiempo de envejecimiento no completa la hora, la razón de cambio del módulo es mucho menor que el envejecimiento anterior como se muestran en las curvas de 0h-0.5h y 1h-1.5h, que presentan menor separación entre ellas y reflejan un menor incremento entre su magnitud.

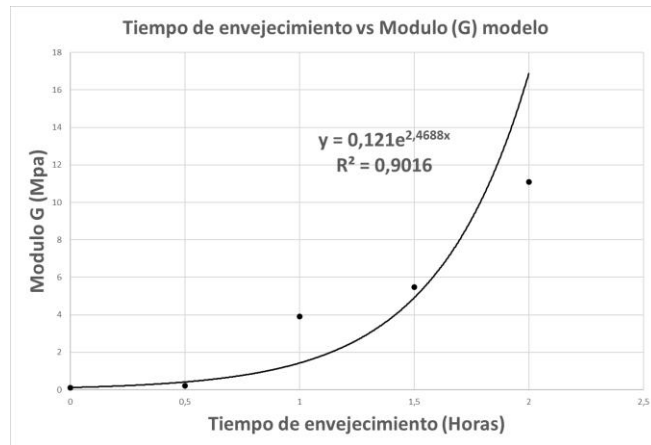


Figura 11: Relación del tiempo de envejecimiento del asfalto con el módulo cortante del modelo (G). (Fuente propia)

En la figura 11, se determina la línea de tendencia exponencial que define el comportamiento del módulo cortante a diferentes tiempos de envejecimiento. Como se puede observar, la función presenta un buen ajuste a los datos obtenidos y un incremento exponencial elevado, lo que describe en buena forma, el aumento del endurecimiento del asfalto a medida que se envejece.

Conclusión

La técnica de envejecimiento termo-oxidativo, mediante agitación mecánica permite obtener resultados más acelerados en un corto tiempo de manera sencilla y económica, en comparación a los métodos estandarizados como lo es el TFOT (ASTMD1754, (1997)) y el RTFOT (ASTMD2872, (1997)), los cuales emplean equipos más costosos y de difícil disposición para cualquier laboratorio. Este método es fácilmente repetible y es independiente de la cantidad del material, permite una mayor interacción entre el asfalto y el oxígeno, al eliminar continuamente la capa superior por agitación, generando así la formación de carbonilo y sulfóxido en todo el material y no sólo en la parte superficial.

El uso de la indentación esférica manual, por medio del penetrómetro modificado con punta esférica, con carga constante, es útil para medir las propiedades viscoelásticas

del asfalto. Permitiendo predecir la velocidad de deformación y su relación de módulos, cuando este ha sido afectado por distintos factores ambientales, tales como el oxígeno y la temperatura. Además de emplear equipos económicos y de fácil accesibilidad.

El modelo propuesto por Ossa et al (2005) [1] para determinar la velocidad de deformación y el modelo propuesto por Jelagin y Larsson (2013) [10] para determinar el módulo cortante (G), son de fácil implementación y se adaptan a cualquier condición de carga, temperatura y estado del asfalto. Permitiendo obtener la información necesaria que aporte a la predicción de la falla de ahuellamiento en mezclas bituminosas, en cualquier momento durante su tiempo en servicio.

En el ensayo de indentación, a medida que se incrementa el efecto de envejecimiento en la muestra asfáltica, la velocidad de deformación comienza a disminuir y las determinaciones del módulo cortante (G) aumentan progresivamente, dando a entender que se produce un endurecimiento del asfalto. Al generarse este endurecimiento del material y al reducirse su velocidad de deformación, se puede comprobar desde un enfoque mecánico y dinámico, un aumento tanto en el agrietamiento del material como en su vida útil por fatiga y una reducción en el ahuellamiento, mostrando así una mayor velocidad en el crecimiento de la respuesta elástica del asfalto en comparación con la respuesta viscosa.

El módulo cortante (G) en relación con el envejecimiento del asfalto, presenta un comportamiento exponencial, generando un mayor incremento de este al completar una hora el proceso de envejecimiento, esto quiere decir que al transcurrir ese tiempo las moléculas de asfalto reaccionan mucho mejor con las de oxígeno, reforzando así las interacciones de las fuerzas entre ellas, produciendo mayores aglomeraciones moleculares, las cuales generan un acrecentamiento de su viscosidad que reduce a su vez su movilidad para fluir.

6. Referencias

- [1] Ossa, E.A., Deshpande, V.S., Cebon, D. (2005). Spherical indentation behavior of bitumen. ELSEVIER.
- [2] Bahia, H., Meruva, A., and Velásquez R. (2010). Modification of the penetration test to measure rheological properties of bitumen. *Asfaltos y Pavimentos - Edición especial*. Vol 12: 13-27.
- [3] *Revista de la Construcción*, 14(1), 69-76. Yang, F., & Li, J. C. M. (2008).
- [4] Tabor, D. (1951). *Hardness of metals*. Oxford University.
- [5] E. Meyer, (1908). *Untersuchungen über Härteprüfung und Härte Brinell Methoden*. Z. Ver. deut. Ing., 52.
- [6] Mulhearn, T.O., and Tabor, D. (1960). Creep and hardness of metals: A physical study. *J. Inst Met*. Vol 89: 7-12.
- [7] Hill, R., Storakers, B., and Zdunek, A. B. (1989). A theoretical study of the Brinell hardness test. *Proc. R. Soc. London, Ser. A*, 423, 301.
- [8] Hill, R. (1992). Similarity analysis of creep indentation tests. *Proc. R. Soc. London Ser. A Math. Phys. Eng. Sci.* 436, 617-630.
- [9] Bower AF, Fleck NA, Needleman A, Ogbonna N. (1993). Indentation of a power law creeping solid. *Proc R Soc London, Ser A*. 441:97-124.
- [10] Jelagin, D., & Larsson, P. (2013). Measurement of the viscoelastic properties of bitumen using instrumented spherical indentation. *Society Experimental Mechanics*. Vol 53: 1233-1244.

- [11] Traxler, R. (1963). Durability of asphalt cements. *Association of Asphalt Paving Technologist* (Vol. 32, págs. 44-63).
- [12] Vallerga, B. (1981). Pavement deficiencies related to asphalt durability. *Association of Asphalt Paving Technologist* (Vol. 50, págs. 481-491).
- [13] Abbas, A., Choi, B. C., Masad, E., & Papagiannakis, T. (2002). The influence of laboratory aging method on the rheological properties of asphalt binders. *Journal of Testing and Evaluation*, 30, 171-176.
- [14] Lau, C., Lunsford, K., Glover, C., Davison, R., & Bullin, J. (1992). Reaction Rates and Hardening Susceptibilities as Determined from Pressure Oxygen Vessel Aging of Asphalts. *Transportation Research Record*, 1342, 8.
- [15] Lee, D. (1973). Asphalt durability correlation in Iowa. *Transportation Research Record*, 468, 43- 60.
- [16] Kandhal, P., & Chakraborty, S. (1996). Effect of asphalt film thickness on short-and long-term aging of asphalt paving mixtures. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1535, 83-90
- [17] Petersen, J. C. (2009). A Review of the Fundamentals of Asphalt Oxidation: Chemical, Physicochemical, Physical Property, and Durability Relationships. *Transportation Research ECircular* (Vol. 1). Transportation Research Board
- [18] A. Gamarra & E. A. Ossa (2018) Thermo-oxidative aging of bitumen, *International Journal of Pavement Engineering*, 19:7, 641-650, DOI: 10.1080/10298436.2016.1199876
- [19] Guerrero, W.M.C., & Pabón, S.B.C. (2020). Efecto del envejecimiento de mezclas asfálticas en el ciclo de vida del pavimento desde el aspecto técnico y ambiental. *Revisión del estado de conocimiento. Revista Vínculos*, 17(1), 7-23.
- [20] Siddiqui, M. N., & Ali, M. F. (1999a). Studies on the aging behavior of the Arabian asphalts. *Fuel*, 78(9), 1005-1015.
- [21] Loeber, L., Muller, G. & Morel, J., (1998). Bitumen in colloid science: a chemical, structural and rheological approach. *Fuel*, pp. 1443-1450.
- [22] Corbett, L. W., (1969). Composition of Asphalt Based on Generic Fractionation Using Solvent Deasphalteneing, Elution- Adsorption Chromatography and Densimetric Characterization. *Analytical Chemistry*, Volume 41, pp. 576-579.
- [23] Lu, X. & Isacson, U., (2002). effect of aging on bitumen chemistry and rheology. *Construction and Building Materials* , pp. 15-22.
- [24] Bell, A. (1989). Summary report on the aging of asphalt-aggregate systems. *Transportation Research board*, 10, 10PM.
- [25] Bell, C. A., & Kliewer, J. E. (1995). *Evaluating Aging of Asphalt Mixtures*
- [26] Read, J., & Whiteoak, D. (2003). *The Shell bitumen handbook*. Thomas Telford.
- [27] Lu, X., & Isacson, U. (2000). Artificial aging of polymer modified bitumens. *Journal of applied polymer science*, 76(12), 1811-1824.
- [28] Swiertz, D. (2010). Asphalt aging characteristics, Rheological implications and laboratory techniques. University of Wisconsin - Madison.
- [29] Bardon, C., Barre, L., Espinat, D. & Guille, V., (1996). The colloidal structure of crude oils and suspensions of asphaltenes and resins. *Fuel Science and Technology International*, pp. 203-242
- [30] Petersen, J., Robertson, R. & Harnsberger, P., (1994). *Binder Characterization and Evaluation*. Washington, DC: SHRP A-370. Strategic Highway Research Program, National Research Council.
- [31] Petersen, J. C. & Ronald, G., (2011). Asphalt Oxidation Mechanisms and the Role of Oxidation Products on Age Hardening Revisited. *Road Materials and Pavement Design*, pp. 795-819.
- [32] Loeber, L. et al., (1996). New direct observations of asphalts and asphalt binders by scanning electron microscopy and atomic force microscopy. *Journal of Microscopy*, pp. 32-39.
- [33] Pauli, A. & Grimes, W., (2003). Surface morphological stability modeling of SHRP asphalts. *ACS division of fuel chemistry preprints*, pp. 19-23.
- [34] Masson, J., Leblond, V. & Margeson, J., (2006). Bitumen morphologies by phase-detection atomic force microscopy. *Journal of Microscopy*, pp. 17-29.
- [35] Pauli, A., Grimes, A. G., Beemer, T. & Branthaver, J. F., (2011). Morphology of Asphalts, and asphalt fractions and model wax-doped asphalts studied by atomic force microscopy. *International Journal of Pavement Engineering*, pp. 291-309
- [36] Wu, S., et al., (2009). Influence of aging on the evolution of structure, morphology and rheology of base and SBS modified bitumen. *Construction and Building Materials*, 23 (2), 1005-1010.
- [37] Zhang, H.L., et al., (2012). Effect of aging on the morphology of bitumen by atomic force microscopy. *Journal of Microscopy*, 246 (1), 11-19.
- [38] Eberhardsteiner, L., et al., (2015). Towards a microstructural model of bitumen aging behavior. *International Journal of Pavement Engineering*, 16 (10), 939-949.
- [39] Hofko, B., et al., (2015). Alternative approach toward the aging of asphalt binder. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2505 (2505), 24-31.
- [40] Cheung CY, Cebon D. (1997). Experimental study of pure bitumens in tension, compression, and shear. *J Rheol*. 41(1):45-73.
- [41] Cross MM. (1965) Rheology of non-newtonian fluids: a new flow equation for pseudoplastic systems. *J Colloid Sci*. 20:417-37.