

Modelación y análisis de susceptibilidad a la deformación permanente de mezclas asfálticas

Modeling and analysis of susceptibility to permanent deformation in asphalt mixtures

Julián Vidal V.*¹, Alexander Ossa*

* Universidad EAFIT, Medellín. COLOMBIA

Fecha de recepción: 14/ 12/ 2010
Fecha de aceptación: 30/ 03/ 2011
PAG. 128 - 149

Resumen

La deformación permanente de mezclas asfálticas del Área Metropolitana del Valle de Aburrá – Antioquia, las cuales se fabrican en nuestro medio bajo las especificaciones INVIAS (Instituto Nacional de Vías) y del Valle de Aburrá, se estudiaron utilizando un modelo constitutivo propuesto anteriormente. Este modelo mostró previamente ser efectivo en predecir la deformación de mezclas asfálticas en el Reino Unido bajo diferentes tipos de carga bajo condiciones uniaxiales y triaxiales, y temperaturas comprendidas entre 0 °C y 40 °C. Para el caso de las mezclas del Valle de Aburrá se emplearon temperaturas en un intervalo de 20 °C a 50 °C y se implementó el modelo propuesto con el fin de predecir la susceptibilidad a la deformación permanente. Mediante el estudio experimental de las mezclas se encontró que el comportamiento de estado estable de estas siguió el modelo modificado de Cross² (Wang, 2011), con las mezclas exhibiendo comportamiento viscoso lineal y no-lineal a bajos y altos niveles de esfuerzos, respectivamente. Tanto para condiciones de carga como de recuperación se observó una dependencia de la temperatura en el material que fue adecuadamente predicha por el modelo de Arrhenius³ bajo el intervalo de temperaturas estudiado. Al realizar la modelación del comportamiento de las mezclas se encontró que el modelo propuesto por Ossa et al. (2010) aplica a las mezclas estudiadas y se determinó que la susceptibilidad a la deformación de estas varía considerablemente dependiendo de los materiales utilizados por el productor y en especial el agregado empleado, a pesar de ser mezclas teóricamente similares.

Palabras Clave: Asfalto, mezclas asfálticas, deformación permanente, recuperación, pruebas cíclicas

Abstract

Permanent deformation of asphaltic mixtures in the Metropolitan Area of Valle de Aburrá – Antioquia, which are built under INVIAS' specifications (Instituto Nacional de Vías) and Valle de Aburrá, were studied by employing a constitutive model proposed previously. This model had proved to be effective in predicting deformations of asphaltic mixtures in the United Kingdom under different kinds of loads; under uniaxial and triaxial conditions and temperatures at intervals between 0 °C and 40 °C. For the specific case of Valle de Aburrá, temperatures ranged between 20 °C and 50 °C and the model was implemented in order to predict susceptibility to permanent deformation. By means of an experimental study on mixtures, it was found that their behavior under steady state condition followed the model modified by Cross², thus mixtures showed a visco-linear and non-linear behavior at low and high stress levels, respectively. It was observed that under loading and unloading conditions, there is a temperature dependence on the material behavior, which was properly predicted by Arrhenius³ under the studied temperatures interval. When modeling mixtures behavior, it was found that their strain susceptibility varied widely depending on the constituent materials, especially on the aggregate, in spite of the fact that the mixtures are similar.

Keywords: Asphalt, asphaltic mixtures, permanent strain, recovery, cyclic tests

1. Introducción

En Colombia, el uso de mezclas asfálticas en caliente como material de construcción de carpetas de rodadura se ha propagado crecientemente debido a sus características estructurales y funcionales.

1. Introduction

In Colombia the use of high temperature asphaltic mixtures, as construction material for tread layers has been increasingly spread, due to its structural and functional characteristics.

¹ Autor de correspondencia / Corresponding author:

E-mail: jvidal@eafit.edu.co

² Cross MM. Rheology of non-newtonian fluids: a new flow equation for pseudoplastic system. J Colloid Sci 1965; 20: 417-37

³ Wolfgang Stiller. Arrhenius Equation and Non-Equilibrium Kinetics: 100 Years (Paperback), 1989

A pesar de las bondades que ofrecen las mezclas asfálticas, existen diferentes factores que impiden cumplir con sus funciones a cabalidad y que terminan por generar fallas prematuras. Los principales tipos de fallas en capas asfálticas corresponden al agrietamiento por fatiga y la acumulación de deformaciones permanentes o ahuellamiento.

Los factores que determinan la formación del ahuellamiento en la capa de rodadura son la magnitud y frecuencia de las cargas del tránsito vehicular y las condiciones climáticas. En el desarrollo del método del SUPERPAVE⁴, se destaca que las características reológicas del ligante asfáltico también influyen en el comportamiento plástico de las mezclas y que son determinantes de la resistencia de las mismas bajo solicitaciones de servicio. Cuando el asfalto se somete a altas temperaturas o cargas lentas, se comporta como un líquido viscoso; a bajas temperaturas o cargas rápidas se comporta como un sólido elástico y a temperaturas intermedias se comporta como un material viscoelástico⁵.

El ahuellamiento es una deformación o depresión longitudinal que sigue la trayectoria de los vehículos, y que genera mayores riesgos en el servicio de los pavimentos asfálticos. En épocas de lluvia el agua se acumula en las depresiones, presentándose accidentes al producirse el fenómeno de hidro-planeo.

Debido a los diversos problemas que genera el ahuellamiento, se han desarrollado un sinnúmero de ensayos de laboratorio especificados en normas nacionales e internacionales (ej: NAT, SUPERPAVE) y modelos matemáticos a través de todos los tiempos, con el propósito de predecir y evaluar la deformación permanente o ahuellamiento en las capas asfálticas de rodadura (ej: CORAL, L⁶).

Ensayos de laboratorio útiles en la caracterización del comportamiento de las mezclas asfálticas, simulan algunas de las condiciones de carga a las que se someten los pavimentos, tal es el caso de los ensayos monotónicos uniaxiales y triaxiales en los cuales se controla la temperatura, esfuerzo y velocidad de deformación del material. De esta forma es posible analizar el comportamiento y las características de las mezclas asfálticas bajo condiciones de carga axisimétrica para ser comparadas con las normas de construcción establecidas.

In spite of the advantages offered by asphaltic mixtures, there are different factors that prevent them from thoroughly accomplishing their functions and finally leading to premature failures. The main types of failures on asphaltic layers are fatigue cracking and the accumulation of steady strains or rutting.

The factors that determine the origin of rutting on the tread layer are the magnitude and frequency of vehicular traffic loads and climatic conditions. When executing the SUPERPAVE⁴ method, it was observed that rheological characteristics of asphaltic binder also affected the mixture's plastic behavior, which is a determinant resistance factor under service loads. When asphalt is subjected to high temperatures or slow loads, it behaves as a viscose liquid; at low temperatures or shock loads it behaves as an elastic solid; and at intermediate temperatures it behaves as a viscose-elastic material⁵.

Rutting is a strain or longitudinal depression following vehicles' path, which generates higher risks on asphaltic pavement service conditions. In rainfall season, water is accumulated by depressions provoking accidents due to a hydroplaning phenomenon.

Due to diverse problems originated by rutting effect, several laboratory tests have been developed following national and international specifications (e.g. NAT, SUPERPAVE), and mathematical models – available ever since - have been employed in order to predict and to asses permanent strain or rutting on asphaltic tread layers (e.g. CORAL, L⁶).

Laboratory tests - useful to characterize asphaltic mixtures behavior - simulate some loading conditions undergone by pavements. Such is the case of monotonic uniaxial and triaxial testing, which control material temperature, stress and strain speed rate. In this way it is possible to analyze the behavior and characteristics of asphaltic mixtures under axial symmetry loading conditions to be then compared to established construction standards.

⁴ Harman, T., D'Angelo, J., Bukowski, J., Superpave Asphalt Mixture Design – Workshop Workbook, Federal Highway Administration, Washington, 2000.2 PAEZ, D., PEREIRA, H. (2001)

⁵ Estudio del ahuellamiento de mezclas asfálticas. XIII Simposio Colombiano sobre Ingeniería de Pavimentos». Universidad de Los Andes, Bogotá

⁶ CORAL, L (2003). »Refinamiento de un modelo de elementos finitos (FEM) para la estimación de ahuellamiento en pavimentos». Trabajo de Grado. Ingeniería Civil. Universidad de Los Andes, Bogotá



Respecto a los modelos matemáticos, los primeros se basaron principalmente en relaciones empíricas, esto debido a la complejidad del material y al desconocimiento sobre el comportamiento de compuestos heterogéneos. Los modelos más comunes han usado teorías sobre mecánica de medios continuos y actualmente se usan con frecuencia los modelos micromecánicos (ej: F. Martínez, S. Angelone⁷).

Los diferentes métodos de modelación de deformación de mezclas asfálticas están basados generalmente en teorías de viscoelasticidad lineal, pero realmente dichas mezclas presentan un comportamiento viscoelástico no lineal aplicable en condiciones uniaxiales y triaxiales (Huang, 1967). Algunos de ellos además, son sólo aplicables para deformaciones en estado estable y requieren de un elevado número de parámetros o ensayos de calibración, restricciones que los hacen poco prácticos y útiles.

Ossa y colaboradores, desarrollaron en 2004, un modelo constitutivo simple para predecir el comportamiento de las mezclas asfálticas sometidas a deformaciones permanentes, basado en la descomposición de la tasa de deformación en componentes elásticos, viscosos y de recuperación, como en las teorías clásicas de plasticidad y visco-plasticidad.

El propósito de este estudio es verificar la aplicabilidad y/o extender, tanto teórica como experimentalmente, el modelo constitutivo de Ossa y colaboradores, a mezclas asfálticas fabricadas por 3 plantas productoras del Valle de Aburrá (Medellín, Antioquia), las cuales se fabrican bajo las condiciones de las especificaciones del INVIAS y Valle de Aburrá (Entes reguladores a nivel nacional y local, respectivamente). Las mezclas ensayadas se reprodujeron con las fórmulas de trabajo suministradas en las plantas.

Para lograr una determinación adecuada de los parámetros relacionados con el comportamiento y características de las mezclas en el modelo constitutivo, se efectuaron ensayos monotónicos uniaxiales de deformación controlada, termofluencia y recuperación. A partir de los resultados obtenidos de estos ensayos y el ajuste de los parámetros incluidos en el modelo constitutivo, fue posible determinar y caracterizar el comportamiento de las mezclas asfálticas sometidas a deformaciones permanentes.

Regarding mathematic models, the firsts were mainly based on empirical relations, because of the material complexity and due to the lack of knowledge on the heterogeneous compounds behavior. The most common models have employed mechanical theories on continuum media and micro-mechanic models are frequently used nowadays (e.g. F. Martínez, S. Angelone⁷).

Different methods of strain modeling on asphaltic mixtures are generally based on linear visco-elasticity theories; however such mixtures have a non-linear visco-elastic behavior applicable under uniaxial and triaxial conditions (Huang, 1967). Besides, some of them are only applicable on strains under stable conditions, thus demanding a high number of parameters or calibration tests; those restrictions make then poorly practical and useless.

In 2004 Ossa and co-workers developed a simple constitutive model to predict asphaltic mixtures behavior undergoing steady strains, which is based on the strain rate decomposition in elastic, viscose and recoverable components, according to classic theories of plasticity and viscose-plasticity.

The purpose of this study is to check the applicability and/or to expand, theoretically or experimentally, the constitutive model developed by Ossa and co-workers, on asphaltic mixtures manufactured by three production plants in Valle de Aburrá (Medellín, Antioquia), which are elaborated under the specifications by INVIAS and Valle de Aburrá (Regulating entities at national and local level, respectively). The tested mixtures were re-elaborated by using working formulas delivered by the plants.

In order to achieve an adequate determination regarding mixtures behavior and characteristics in the constitutive model, uniaxial monotonic testings were developed for controlled strain, thermo-fluency and recovery. From results of such tests and the adjustment of parameters included in the constitutive model, it was possible to determine and characterize asphaltic mixtures under steady strains.

⁷ F. Martínez, S. Angelone. Un modelo micromecánico simplificado para mezclas asfálticas. XXXIII Reunión del Asfalto, noviembre de 2004, Mendoza. Argentina



2. Descripción del modelo constitutivo

A pesar de la existencia de un buen número de métodos para predecir el comportamiento de mezclas asfálticas bajo diferentes condiciones de carga, el modelo fenomenológico desarrollado por Ossa y colaboradores fue utilizado en este estudio debido a su fácil implementación y capacidad de incorporación de características del material como las no linealidades, dependencia térmica y efectos de presiones de confinamiento. Este modelo se basa en la descomposición de la tasa de deformación en componentes elásticos, viscosos y de recuperación, como en las teorías clásicas de plasticidad y visco-plasticidad. Este modelo fue motivado por observaciones experimentales realizadas en mezclas asfálticas típicas del Reino Unido. Para una descripción más detallada del modelo y obtención de sus parámetros se recomienda ver Ossa et al. (2010).

El modelo está basado en la descomposición del tensor de la tasa de deformación (como en la plasticidad y visco-plasticidad clásica) en componentes plásticos ($\dot{\epsilon}_{ij}^p$) y elásticos ($\dot{\epsilon}_{ij}^e$):

$$\dot{\epsilon}_{ij} = \dot{\epsilon}_{ij}^e + \dot{\epsilon}_{ij}^p, \quad (1)$$

El tensor de la tasa de deformación elástica está representado por:

$$\dot{\epsilon}_{ij}^e = \frac{1+\nu}{E} \dot{\sigma}_{ij} - \frac{\nu}{E} \dot{\sigma}_{kk} \delta_{ij}, \quad (2)$$

donde ν es la relación de Poisson, E es el módulo de Young y δ_{ij} es el delta de Kronecker. Para δ_{ij} se tiene que:

$$\delta_{ij} = \begin{cases} 0 & \text{si } i \neq j \\ 1 & \text{si } i = j \end{cases} \quad (3)$$

El tensor de la tasa de deformación plástica se descompone en la componente desviadora ($\dot{\epsilon}_{ij}^d$) y en una componente media o hidrostática ($\dot{\epsilon}_{ij}^m$):

$$\dot{\epsilon}_{ij}^p = \dot{\epsilon}_{ij}^d + \dot{\epsilon}_{ij}^m, \quad (4)$$

El tensor de la tasa de deformación plástica desviadora está dado por:

$$\dot{\epsilon}_{ij}^d = \frac{\dot{\sigma}_{ij}}{\sigma_e} \left\{ \dot{\epsilon}_{ij}^v - \left[1 - \text{sign} \left(\sigma_e \right) \right] \dot{\epsilon}_{ij}^u \left(\hat{\epsilon}_e^r, \zeta \right) \frac{\epsilon_i^d}{\epsilon_e^d} \right\} \quad (5)$$

2. Description of constitutive model

In spite of the availability of a great number of methods to predict the behavior of asphaltic mixtures under different loading conditions, the logical-phenomenon model developed by Ossa and co-workers was employed by this study, due to its easy implementation and capability to incorporate material characteristics such as non-linearization, thermal dependency and confining pressure effects. This model is based on the strain rate decomposition in elastic, viscose and recoverable components and on classic plasticity and viscose-plasticity theories. This model was brought about because of experimental observations developed on typical asphaltic mixtures in United Kingdom. A detailed description of this model and parameters obtained are available on Ossa et al. (2010).

The model is based on the decomposition of tensor strain rate (as well on plasticity and classic viscose-plasticity) on plastic ($\dot{\epsilon}_{ij}^p$) and elastic ($\dot{\epsilon}_{ij}^e$) components

Elastic tensor strain rate is represented by:

where ν , corresponds to Poisson relation E , corresponds to Young modulus δ_{ij} , is Kronecker delta. For δ_{ij} we have:

Plastic tensor strain rate is decomposed into a deviatoric component ($\dot{\epsilon}_{ij}^d$) and into a mean or hydrostatic component ($\dot{\epsilon}_{ij}^m$):

Plastic tensor of plastic deviatoric strain rate is given by:



donde:

σ'_{ij} , tensor de esfuerzo desviador ($\sigma'_{ij} = \sigma_{ij} - \delta_{ij}\sigma_{kk}/3$).
 σ_e , esfuerzo equivalente de Von Mises ($\sigma_e = \sqrt{3/2\sigma'_{ij}\sigma'_{ij}}$).
 $\dot{\epsilon}_e^v$, componente de la tasa de deformación viscosa equivalente, activa cuando $|\sigma_e| > 0$.
 $\dot{\epsilon}_e^r(\hat{\epsilon}_e^r, \zeta)$, tasa de deformación de recuperación equivalente.

La tasa del deformación de recuperación equivalente es función de la deformación de recuperación parametrizada $\hat{\epsilon}_e^r$ y del factor de rigidez ζ , tal factor está definido como la relación de la tasa de deformación en estado estable, medido con la prueba de creep triaxial, dividido por la tasa de deformación de estado estable de la prueba uniaxial.

La deformación parametrizada $\hat{\epsilon}_e^r$ se expresa como:

$$\hat{\epsilon}_e^r = \left(\frac{\epsilon_e \left(1 + \frac{s}{3} \right)}{\epsilon^{pv}} - 1 \right) \frac{1 - \psi}{\psi} \quad (6)$$

siendo s el gradiente de dilatación, ψ la constante de recuperación y ϵ^{pv} la deformación plástica o permanente.

Por su parte, $\dot{\epsilon}_e^v$ está dada por la siguiente ecuación implícita:

$$\dot{\epsilon}_e^v = \frac{\dot{\epsilon}_e^{pv}}{1 - \psi} = \frac{\sigma_e \dot{\epsilon}_o(\epsilon_e, \zeta)}{\sigma_o} \left[1 + \left(\frac{\dot{\epsilon}_e^v}{\dot{\epsilon}_o(\epsilon_e, \zeta)} \right)^m \right] \quad (7)$$

σ_o y m son constantes del material, $\dot{\epsilon}_e^{pv}$ es la parte plástica o irrecuperable de la tasa de deformación equivalente viscosa y $\dot{\epsilon}_o(\epsilon_e, \zeta)$ es la tasa de deformación de referencia para carga, la cual está en función de la deformación equivalente de Von Mises $\epsilon_e = \sqrt{2/3\epsilon_{ij}^d\epsilon_{ij}^d}$ y del factor de rigidez ζ .

El tensor de la tasa de deformación media o hidrostática esta dado por:

$$\dot{\epsilon}_{ij}^m = \frac{s}{3} \dot{\epsilon}_{ij}^d \quad (8)$$

where:

σ'_{ij} , is stress deviatority tensor ($\sigma'_{ij} = \sigma_{ij} - \delta_{ij}\sigma_{kk}/3$).
 σ_e , is Von Mises equivalent stress ($\sigma_e = \sqrt{3/2\sigma'_{ij}\sigma'_{ij}}$).
 $\dot{\epsilon}_e^v$, is component of equivalent viscose strain rate, active when $|\sigma_e| > 0$.
 $\dot{\epsilon}_e^r(\hat{\epsilon}_e^r, \zeta)$, is equivalent recovery strain rate.

The equivalent recovery strain rate is expresses as function of parameterized recovery strain $\hat{\epsilon}_e^r$ and stiffness factor ζ , such factor is defined as the relation of strain rate under stable condition, measured by means of triaxial test or creep testing, divided by strain rate under stable condition in uniaxial test.

Parameterized strain $\hat{\epsilon}_e^r$ is expressed as:

provided that s is the expansion gradient, ψ recovery constant and ϵ^{pv} plastic or steady strain.

On the other hand, $\dot{\epsilon}_e^v$ is given by the following implicit equation:

σ_o and m are material constants, $\dot{\epsilon}_e^{pv}$ is the plastic or non-recoverable portion of viscose equivalent strain rate and $\dot{\epsilon}_o(\epsilon_e, \zeta)$ is the reference strain rate for loading stress, which is expressed as function of Von Mises equivalent strain $\epsilon_e = \sqrt{2/3\epsilon_{ij}^d\epsilon_{ij}^d}$ and stiffness factor ζ .

The tensor of mean or hydrostatic strain rate is given by:

La dependencia de la tasa de deformación de referencia $\dot{\epsilon}_o^Y(\epsilon_e, \zeta)$ debida a la temperatura puede ser descrita por la ecuación WLF:

$$\dot{\epsilon}_o = \dot{\epsilon}_{oc} \exp\left(\frac{-2.303c_1^s(T - T_s)}{c_2^s + (T - T_s)}\right) \quad (9)$$

donde T_s es la temperatura de referencia, C_1^s y C_2^s son constantes universales equivalentes a 8.86 y 101.6 K respectivamente.

O por la relación de Arrhenius que corresponde a:

$$\dot{\epsilon}_o^Y = \dot{\epsilon}_{pc}^Y * e^{-k\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{273}\right)} \quad (10)$$

donde k es la constante de Arrhenius, equivalente a la relación entre la energía de activación térmica y la constante universal de los gases, $\dot{\epsilon}_{pc}^Y$ es la velocidad de deformación de referencia a 0 °C y $\dot{\epsilon}_o^Y$ es la tasa de deformación de referencia cuando se aplica una carga al material.

Bajo condiciones de carga uniaxial, la relación entre velocidad de deformación y esfuerzo a partir del modelo constitutivo se reduce a:

$$\dot{\epsilon}_o^Y = \frac{\sigma \dot{\epsilon}_o^Y(\epsilon) * e^{k\left(\frac{1}{T+273} - \frac{1}{273}\right)}}{\sigma_o} \left[1 + \left(\left(\frac{\dot{\epsilon}_o^Y}{\dot{\epsilon}_o^Y(\epsilon)} \right) * e^{k\left(\frac{1}{T+273} - \frac{1}{273}\right)} \right)^m \right] \quad (11)$$

Los 6 parámetros para este modelo ($\sigma_o, m, \psi, T, \epsilon_u(\hat{\epsilon}_e^r)$ y $\epsilon_o(\epsilon)$) son fácilmente obtenidos de los ensayos monotónicos (deformación controlada y esfuerzo constante o creep) y de recuperación bajo condiciones uniaxiales como las reportadas experimentalmente en este estudio.

2.1 Procedimiento experimental

Con el propósito de hallar experimentalmente los valores de los parámetros del modelo constitutivo propuesto por Ossa y colaboradores, se fabricaron probetas para ser sometidas a ensayos de deformación controlada y Creep bajo compresión uniaxial y recuperación.

Dependency on reference strain rate $\dot{\epsilon}_o^Y(\epsilon_e, \zeta)$ due to a given temperature can be described by WLF equation.

where T_s , is the reference temperature, C_1^s and C_2^s are universal constants equivalent to 8.86 and 101.6 K, respectively.

Or Arrhenius equation, corresponding to:

where k , is Arrhenius constant, equivalent to the relation between thermal activated energy and gases universal constant, $\dot{\epsilon}_{pc}^Y$ is the reference strain speed rate at 0°C and $\dot{\epsilon}_o^Y$ is the reference strain rate when a material is loaded.

Under uniaxial loading conditions, the relation between strain speed rate and stress in the constitutive model is summarized as follows:

The 6 parameters in this model ($\sigma_o, m, \psi, T, \epsilon_u(\hat{\epsilon}_e^r)$ y $\epsilon_o(\epsilon)$) are easily obtained from monotonic testing (controlled strain and constant stress or creep) and from recovery under uniaxial conditions, as experimentally reported in this study.

2.1 Experimental procedure

In order to experimentally achieve parameter values in the constitutive model proposed by Ossa and co-workers, specimens were elaborated for further use in controlled strain tests and for Creep tests under uniaxial compressive strength and recovery.

Las probetas se fabricaron a partir de muestras de asfaltos y agregados suministrados por tres empresas distintas del Valle de Aburrá, las cuales se identificaron como Empresa A, Empresa B y Empresa C y se utilizó la siguiente nomenclatura en las probetas M1, M3 y M5 correspondientes a las especificaciones del Instituto Nacional de Vías (INVIAS) en su versión de 2002 y las M2, M4 y M6 a las especificaciones del Valle de Aburrá en su versión de 1994. Las mezclas M1 a M4 fueron fabricadas con materiales de depósitos aluviales y las M5 y M6 con materiales de depósito de roca.

La preparación de las mezclas asfálticas para la construcción de las probetas se realizó bajo las indicaciones dadas en las normas establecidas por el INVIAS en el artículo 450-02 y las normas para construcción de pavimentos del Valle de Aburrá.

2.1.1 Materiales utilizados

2.1.1.1 Agregados minerales

Se tomaron tres tipos de agregados pétreos, dos de ellos procedentes de depósito aluvial y el restante de explotación de roca y se determinaron algunas de sus propiedades especificadas por el INVIAS. Los resultados de los ensayos se presentan en la Tabla 1. A la luz de las especificaciones es claro que los agregados no cumplen con las especificaciones, pero igualmente son agregados utilizados en nuestro medio en la producción de las mezclas asfálticas.

Specimens were elaborated from asphaltic and aggregates samples delivered by three different companies in the Valle de Aburrá, which were identified as Company A, Company B and Company C. The following nomenclature was employed for samples M1, M3 and M5 in accordance to specifications provided by INVIAS (Instituto Nacional de Vías), version 2002; samples M2, M4 and M6 according to specifications stated by Valle de Aburrá, version 1994. Mixtures from M1 to M4 were elaborated from alluvial deposit materials and M5 and 6 from sedimentary rock materials.

The preparation of asphaltic mixtures used for the elaboration of samples was executed under standard specifications stated by INVIAS, article 450-02 and regulations for pavement construction of Valle de Aburrá.

2.1.1. Materials employed

2.1.1.1 Mineral Aggregates

Three types of stone aggregates were used, two of them from alluvial deposits and the other from rock exploitation deposit determining some properties specified by INVIAS. Test results are shown in Table 1. According to specifications, it is quite clear that aggregates do not meet such standards, in spite of the fact that these aggregates are employed in our field for asphaltic mixtures production.

Tabla 1. Propiedades físicas de los agregados utilizados
Table 1. Physical property of employed aggregates

Ensayo/Test	A	B	C
Grava todo uno (%)/Untreated gravel (%)	30.5	20.0	55.0
Arena (%)/Sand (%)	69.5	80.0	45.0
Gravedad aparente nominal grava todo uno/Untreated gravel Nominal apparent gravity	2.782	2.724	2.685
Gravedad aparente nominal arena/Sand nominal apparent gravity	2.689	2.67	2,68
Absorción grava todo uno (%)/Untreated gravel Absorption (%)	1.574	1.68	1.58
Absorción arena (%)/Sand absorption rate (%)	1.049	1.22	0.85
Pasa #200 (%)/Sieving #200 (%)	13.66	7.51	7.45
Caras fracturadas (%)/Cracked sides (%)	96.1	80.0	79.0
Índice de alargamiento/Lengthening index	41	32	47
Índice de aplanamiento/Flattening index	19	10	17
Índice de plasticidad/Plasticity index	NP	NP	NP
Equivalente de arena (%)/Equivalent sand (%)	54	58	65

2.1.1.2 Cemento asfáltico

Para la preparación de las mezclas asfálticas se utilizó un asfalto convencional suministrado por Ecopetrol. En la Tabla 2 se presentan los resultados obtenidos en la determinación de sus propiedades físicas. Es evidente que no se cumplen algunas de las propiedades, como es el caso del índice de penetración, pero es claro que en nuestro país no existe refinería y es muy probable encontrar asfalto que no cumplan las especificaciones.

2.1.1.2 Asphaltic cement

In order to prepare asphaltic mixtures conventional asphalt was delivered by Ecopetrol. Table 2 shows the obtained results from physical properties determination. It is clear that it does not meet some properties, such as the case of penetration index, however it is well know that our country does not have a refinery and finding asphalt not complying with specifications is highly usual.

Tabla 2. Propiedades físicas del cemento asfáltico utilizado
Table 2. Physical properties of employed asphaltic cement

ENSAYO/TEST	TEMPERATURA TEMPERATURE (°C)	EMPRESA/COMPANY		
		A	B	C
Penetración promedio/Average penetration (1/10 mm)	25	60	63	60
Ductilidad promedio/Average ductility (cm)	25	No rompió/Not broken	No rompió/Not broken	No rompió/Not broken
Penetración promedio residuo/Average residual penetration (1/10 mm)	25	41.0	45.0	39.2
Ductilidad promedio residuo/Average residual ductility (cm)	25	No rompió/Not broken	127	No rompió/Not broken
Punto de Ablandamiento/Yield point (°C)	----	46.0	45.7	50.0
Índice de Penetración/Penetration index	----	-1.03	-1.01	-0.97
Viscosidad Saybolt Furol (s) a temperatura de mezclado de la planta/Saybolt Furol viscosity (s) at the plant mixing temperature	----	96 T= 142 °C	134 T= 135 °C	88 T= 145 °C
Pérdida por calentamiento/Heating loss (%)	163	0.03	0.08	0.11
Solubilidad/Solubility (%)	23,5	99.89	99.97	99.94
Inmersión estática/Static immersion (%)	25	> 95	> 95	> 95

2.1.1.3 Mezcla asfáltica

El diseño de la mezcla asfáltica fue realizado aplicando la metodología Marshall, el cual fue suministrado por las empresas. En la Tabla 3 se presentan las propiedades obtenidas en las probetas. Aunque algunas de las mezclas no cumplen con las especificaciones, se realizaron las pruebas, pues un fin era evaluar mezclas tal cual como se usan en nuestro medio.

2.1.1.3 Asphaltic Mixture

Design of asphaltic mixture was developed by applying Marshall Methodology, which was provided by the companies. Table 3 shows properties obtained from specimens. Although some mixtures do not meet the specifications, tests were conducted since the purpose was to asses mixtures in the same way they are employed in our field.

Tabla 3. Propiedades físicas y mecánicas de la mezcla asfáltica
Table 3. Physical and mechanical properties of asphaltic mixtures

Identificación Identification	Temperatura/Temperature (°C)	Flujo/Flow (0,01 mm)	Estabilidad/Stability (kN)	Peso Unitario/Unit weight (kN/m³)
A	60	3.8	11.96	24.37
B	60	4.7	14.00	25.23
C	60	4.6	12.77	24.63



La preparación de las probetas de altura aproximada de 20 cm y 10 cm de diámetro se realizó mediante compactación estática aplicando un esfuerzo sostenido de 20 MPa y utilizando doble pistón para así obtener mayor homogeneidad en la probeta. La variación máxima del peso unitario a lo largo de la altura de la muestra no superó el 2%.

The elaboration of specimens, which approximate dimensions are 20cm height and 10cm diameter, was developed by means of static compaction by applying a steady stress of 20 MPa and employing a double piston rod, so as to obtain higher homogeneity in the specimen. Maximum unit weight variation alongside specimen's height did not exceed 2%.

2.1.2 Ensayos uniaxiales

2.1.2 Uniaxial tests

El ensayo de Creep se efectuó bajo diferentes condiciones de carga y temperatura. Se emplearon cargas de 1 kN, 2 kN, 4 kN, 15 kN y 19 kN, y temperaturas de: 20 °C, 30 °C, 40 °C y 50 °C. Se ensayaron tres muestras por cada condición de carga, con el fin de estimar la repetibilidad de la prueba.

Creep testing was conducted under different loading and temperature conditions. Loads of 1 kN, 2 kN, 4 kN, 15 kN and 19 kN were employed; and temperatures at 20 °C, 30 °C, 40 °C and 50 °C. Three samples per each loading condition were tested, so as to assess the test repeatability.

En este ensayo se registró el tiempo y la deformación axial en función del tiempo, manteniendo la carga constante. La Figura 1 muestra el comportamiento típico de una mezcla asfáltica al ensayo de Creep, esto es, la variación de su deformación en función del tiempo.

This analysis recorded time and axial strain as function of time, maintaining steady load. Figure 1 shows the typical behavior of an asphaltic mixture during Creep testing, i.e. strain variation as function of time.

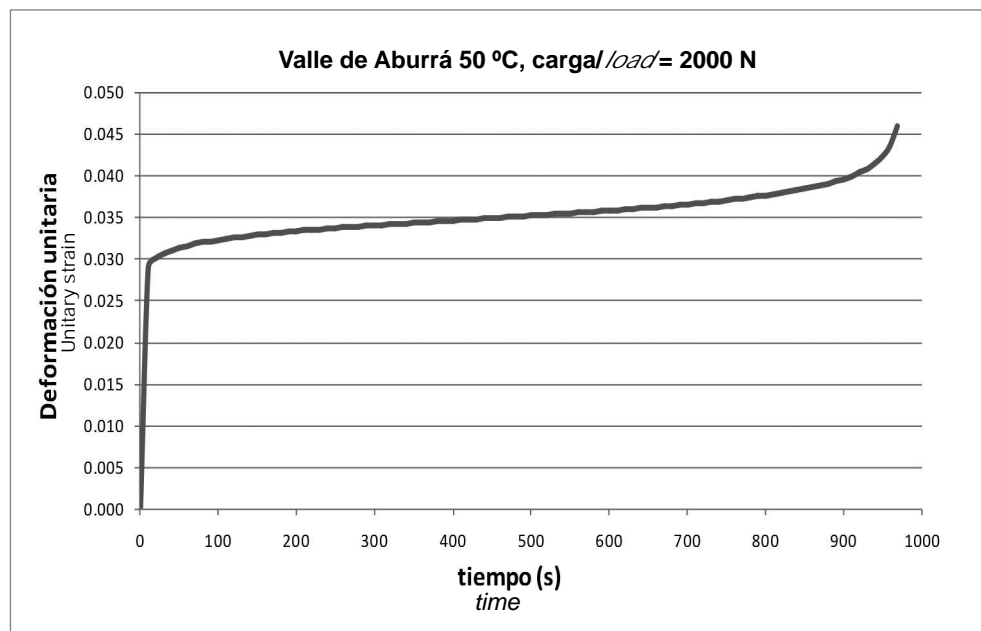


Figura 1. Comportamiento típico de una mezcla asfáltica en el ensayo de Creep. Muestra de Valle de Aburrá, T=50 °C y F=2 kN
 Figure 1. Typical behavior of an asphaltic mixture during Creep testing. Sample from Valle de Aburrá, T=50 °C and F=2 kN

Los resultados obtenidos del ensayo expresan la evolución de la deformación en función del tiempo, para una carga y temperatura específica establecida en el ensayo. Este ensayo ha sido usado ampliamente para evaluar diferentes características de las mezclas asfálticas. En la actualidad, se usa constantemente para predecir el ahuellamiento en carpetas asfálticas.

Los ensayos de deformación controlada se efectuaron a una temperatura de 20 °C y una velocidad de deformación constante de 0.02 mm.s⁻¹. La elección de estas condiciones es arbitraria y podrían haberse igualmente utilizado temperaturas y velocidades de deformación diferentes sin afectar los resultados.

En el ensayo de recuperación se aplica una carga rápidamente y se mantiene constante a un nivel preestablecido equivalente a una de las cargas utilizadas para las pruebas de carga constante (creep). La probeta se deforma hasta un valor total nominal especificado ϵ^T .

En esta deformación el esfuerzo se retira y se registra la deformación de compresión hasta que la velocidad de deformación sea aproximadamente cero ($\dot{\epsilon} \approx 0$). La deformación en este punto es la deformación plástica, tal como se muestra en la Figura 2a. Este ensayo se repitió para diferentes valores de ϵ^T , temperatura y esfuerzo de creep. Como se puede ver en la Figura 2b.

The results obtained from this test express the evolution as function of time, for a specific load and temperature settled for this analysis. Such test has been widely employed to evaluate different characteristics in asphaltic mixtures. Nowadays, it has been constantly used to predict rutting effect on asphaltic layers.

Controlled strain tests were conducted at a temperature of 20 °C and at 0.02 mm.s⁻¹ steady strain speed rate. The selection of such conditions is arbitrary; different temperatures and strain speed rates could have been used without affecting the results.

In the recovery test a given load is quickly applied and it is maintained at a pre-established constant level which is equivalent to one of the loads employed in steady loading test (creep). The specimen is strained up to a total specified nominal value ϵ^T .

From such strain the stress is removed and compressive strain is registered until strain reaches approximately zero value ($\dot{\epsilon} \approx 0$). Strain at this point is a plastic strain, as shown in Figure 2a. This test was repeated for different values ϵ^T , temperatures and creep stress, as observed in Figure 2b.

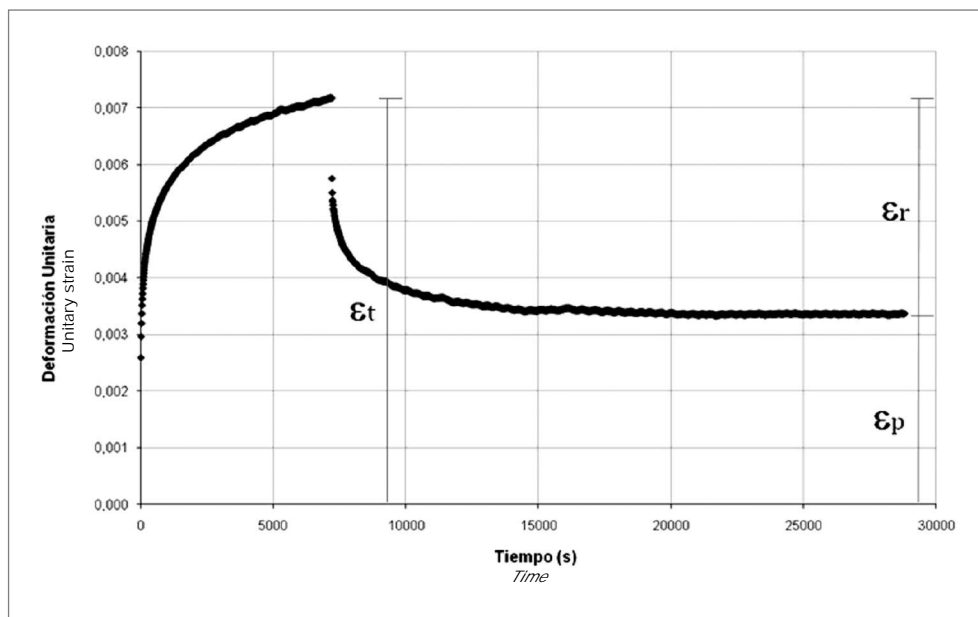


Figura 2a. Evolución de la deformación unitaria en función del tiempo, en un ensayo de recuperación
 Figure 2a. Evolution of unitary strain as function of time during a recovery test

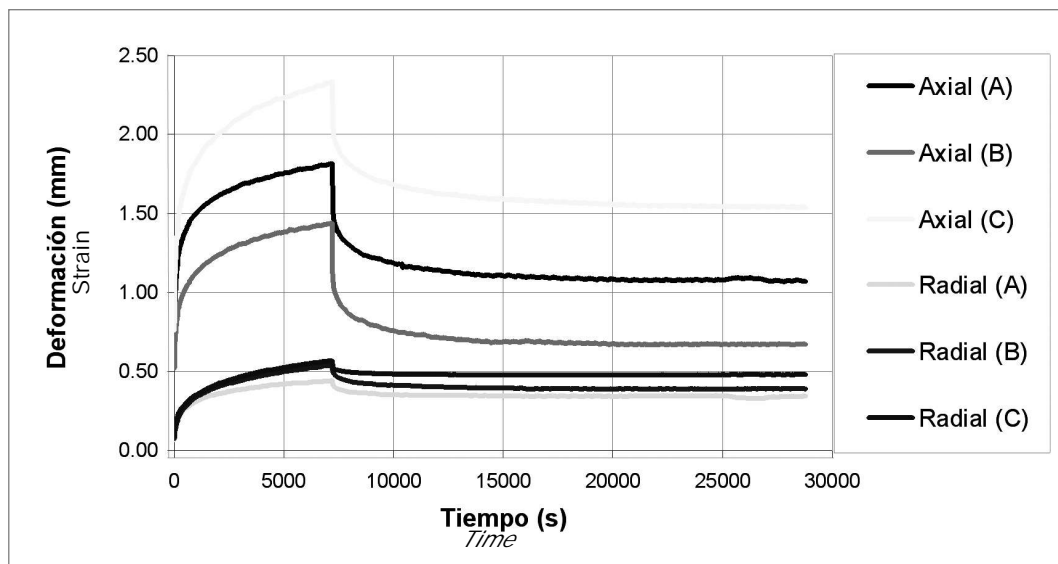


Figura 2b. Evolución de la deformación axial y radial en función del tiempo, en un ensayo de recuperación para diferentes mezclas
Figure 2b. Evolution of radial and axial strain in function of time during recovery test for different mixtures

2.2 Resultados

Para el análisis de resultados, se tomó la mezcla tipo INVIAS producida por la empresa B. Los resultados obtenidos con las otras mezclas y empresas no se presentan porque su comportamiento es similar.

2.2.1 Comportamiento de las mezclas asfálticas bajo ensayos monotónicos

La velocidad de deformación para el ensayo de Creep se obtiene como la pendiente de la deformación unitaria axial en función del tiempo en la zona de estado estable, en la cual la velocidad de deformación se mantiene constante (Askeland y Phule (2004); Ashby et al. (2007)). La Figura 3 muestra el comportamiento típico al Creep en estado estable para la mezcla M1 bajo cuatro condiciones de carga y se indica la velocidad de deformación de estado estable como la pendiente de la curva.

En la Figura 3 se observa que a mayor temperatura existe mayor deformación de la mezcla asfáltica. Esta situación demuestra la validez de la dependencia de temperatura (ecuación 9) incluida en el modelo constitutivo, la cual describe la correspondencia existente entre ambas variables. La temperatura es directamente proporcional a la velocidad de deformación, esto es, al aumentar la temperatura T también existirá un aumento en la velocidad de deformación $\dot{\epsilon}_Y$, que es función de la deformación del material.

2.2 Results

So as to analyze the results, the INVIAS type mixture elaborated by Company B was chosen. The results obtained by the other mixtures and companies are not shown as their behavior is similar.

2.2.1 Behavior of asphaltic mixtures under monotonic testings

Strain speed rate for Creep testing is obtained by the axial unitary strain slope as function of time, in the steady condition zone, where strain speed is maintained constant (Askeland and Phule (2004); Ashby et al. (2007)). Figure 3 shows the typical behavior under Creep testing, in steady condition for mixture M1 under four loading conditions, the strain speed under steady condition is also represented by the slope of the curve.

Figure 3 shows that at higher temperature there is a greater asphaltic mixture strain. This situation proves the validity of temperature dependency (equation 9) included in the constitutive model, which describes the relation existing between both variables. Temperature is directly proportional to strain speed, i.e. when temperature T increases there will also be a strain speed $\dot{\epsilon}_Y$ increase, as a function of material strain.

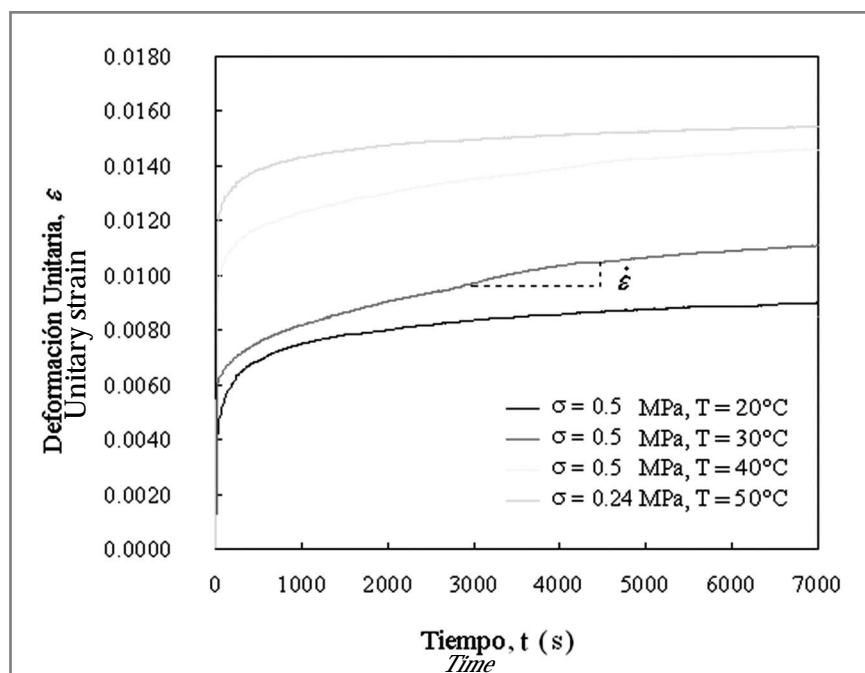


Figura 3. Comportamiento típico de una mezcla asfáltica al ensayo de Creep. Mezcla INVIAS
 Figure 3. Typical behavior of an asphaltic mixture under Creep Testing. Mixtures INVIAS

La Figura 4 resume el comportamiento de estado estable monótonico para la mezcla asfáltica M sobre un intervalo de esfuerzos, velocidades de deformación y temperaturas, en una gráfica de velocidad de deformación de estado estable Vs esfuerzo de estado estable.

Similar a las observaciones de Cheung y Cebon (1997) para el asfalto puro, la mezcla M1 a una temperatura de 20 ° C, describe un comportamiento viscoso no lineal a altos esfuerzos (pendiente de la línea de tendencia diferente de 1, m = 0.8) y comportamiento lineal a bajos niveles de esfuerzo (m = 1.0), tal como se observa en la Figura 4.

Se observa además, que la dependencia de la temperatura en el comportamiento de estado estable de la mezcla M1 está bien caracterizada por la relación WLF (Ecuación 9). Los resultados experimentales se ajustaron a las líneas de tendencia generadas por iteración de los parámetros del modelo constitutivo, asegurando que los valores hallados de los parámetros predicen acertadamente el comportamiento de la mezcla M1.

Figure 4 summarizes the behavior of asphaltic mixture M1 under stable monotonic condition over stress interval, strain speed and temperatures, by means of a graph showing strain speed under stable stress v/s stable stress condition.

Similar to the observations made on ordinary asphalt by Cheung and Cebon (1997), mixture M1 at a temperature of 20°C describes a non-linear viscose behavior at high stress level (trend line slope different to 1, m = 0.8) and linear behavior at low stress levels (m = 1.0) as indicated in Figure 4.

It is also observed that temperature dependency on mixture M1 behavior, under steady condition, is well characterized by the relation WLF (Equation 9). Experimental results complied with trend lines generated by iteration of parameters in the constitutive model, thus ensuring that values obtained from parameters correctly predict the mixture M1 behavior.

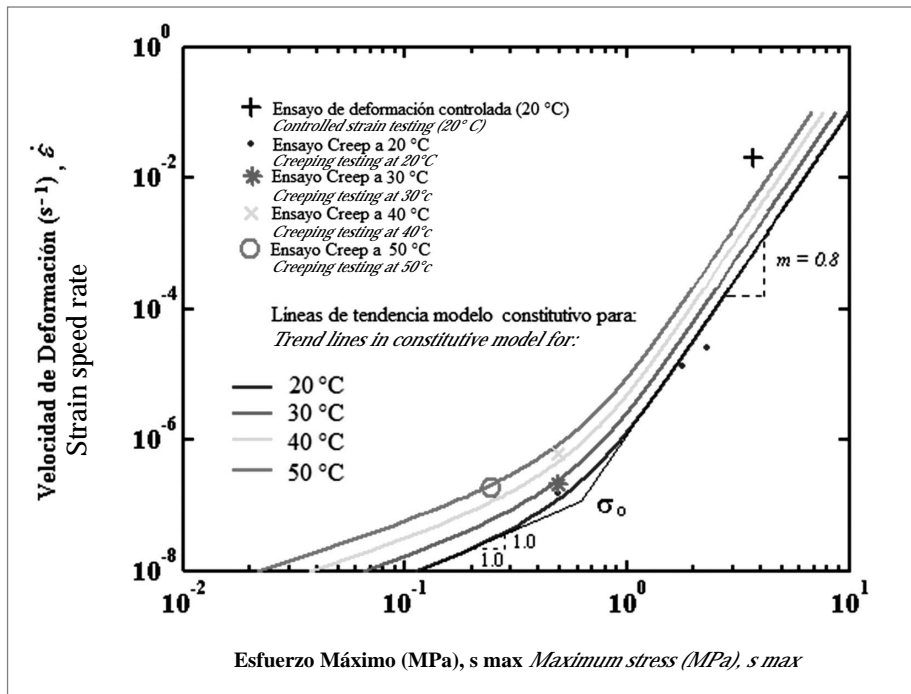


Figura 4. Comportamiento de la mezcla M1 bajo los ensayos de deformación controlada y Creep
 Figure 4. Mixture M1 behaviors under controlled strain and Creep testings

2.2.2 Comportamiento de las mezclas asfálticas bajo ensayos de recuperación

En la Figura 5 se presentan las curvas de deformación unitaria axial en función del tiempo, que describen el comportamiento de la mezcla M1 para dos condiciones de ensayo de creep y recuperación $T = 20^{\circ}C$, $\sigma = 0.5 MPa$ y $T = 40^{\circ}C$, $\sigma = 0.5 MPa$. También se presentan en líneas punteadas las predicciones del modelo constitutivo (Ecuación 10).

2.2.2 Behavior of asphaltic mixtures under recovery tests

Figure 5 shows unitary axial strain curves as function of time, which describe behavior of mixture M1 for two Creep and recovery testing conditions $T = 20^{\circ}C$, $\sigma = 0.5 MPa$ and $T = 40^{\circ}C$, $\sigma = 0.5 MPa$. Dotted lines also indicate the predictions in the constitutive model (Equation 10).

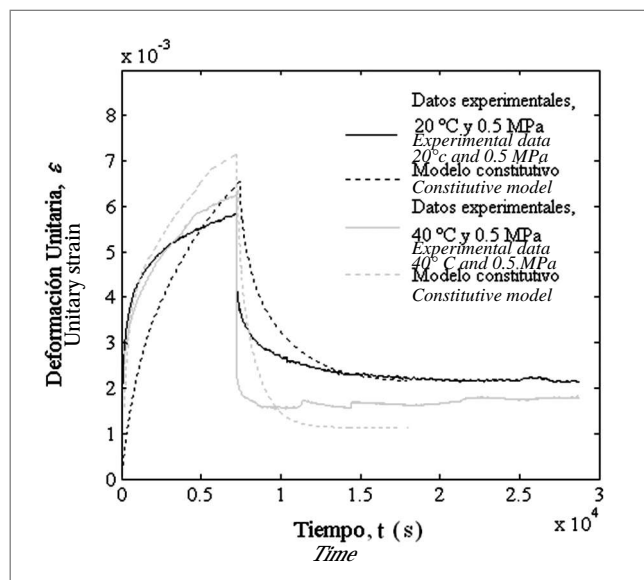


Figura 5. Ensayos de recuperación de la mezcla M1
 Figure 5. Recovery tests for mixture M1

En la Figura 5 tanto las curvas obtenidas de resultados experimentales como las predicciones del modelo constitutivo (Ecuación 10) presentan inicialmente dos comportamientos típicos (etapas) de las mezclas sometidas a ensayos de Creep. Durante la primera etapa, conocida como Creep primario, la mezcla presenta una disminución en la velocidad de deformación, esto debido a que el material se resiste a la deformación. Este fenómeno se evidencia gráficamente, con la disminución de la pendiente de la curva al transcurrir el tiempo. Luego se tiene el Creep secundario, etapa en la cual la velocidad de deformación es constante, haciéndose visible por la forma lineal que presenta el material en este tramo. Finalmente, se tiene la etapa de recuperación, en la cual se retira la carga y la mezcla asfáltica trata de recobrar su estado inicial, es por esto que la deformación en función del tiempo disminuye hasta estabilizarse.

Para las condiciones de ensayo establecidas en este estudio se obtuvo un intervalo de deformaciones totales para la mezcla M1 de $0,0044 \leq \varepsilon^T \leq 0,006$, y que la deformación total es directamente proporcional a la deformación recuperada, cumpliendo con la ecuación:

$$\varepsilon^r = \psi \varepsilon^T \quad (11)$$

Para las demás mezclas se cumple de manera similar la relación descrita entre la deformación total y recuperada. En la Figura 6, se observa dicho comportamiento entre ambas deformaciones para las mezclas asfálticas fabricadas de acuerdo a la norma del INVIAS, estas mezclas son: M1 (INVIAS-Empresa B), M3 (INVIAS – Empresa A) y M5 (INVIAS – Empresa C).

In Figure 5 the obtained curves from experimental results, as well as predictions in the constitutive model (Equation 10); initially show two typical behaviors (stages) for the mixtures under Creep testings. During the first stage, known as primary Creep, the mixture shows a strain speed decrease, because the material endures strain strength. Such phenomenon is graphically evidenced upon the decrease of the curve slope as time goes by. Then we have the secondary Creep, stage when strain speed is constant, which is made quite clear due to the linear shape the material shows in this section. Finally we have recovery stage where load is removed and asphaltic mixture tends to recover its initial condition; that is the reason why strain as function of time decreases until being stabilized.

For conditions established in this study, a total strain interval for mixtures M1 of $0,0044 \leq \varepsilon^T \leq 0,006$ was obtained. Besides, total strain is directly proportional to recovered strain, according to the following equation:

The other mixtures fulfill in a similar way the relation described between total and recovered strain. Figure 6 shows such behavior between both strains for asphaltic mixtures elaborated in accordance with INVIAS specifications. Those mixtures are: M1 (INVIAS-Company B), M3 (INVIAS-Company A) and M5 (INVIAS-Company C).

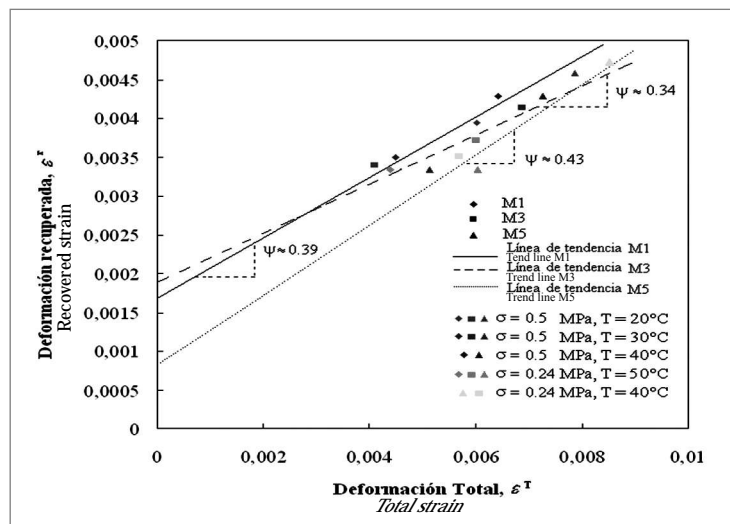


Figura 6. Relación entre la deformación total y recuperada para las mezclas M1, M3 y M5
 Figure 6. Relation between total and recovered strain for mixtures M1, M3 and M5



Los valores de las constantes de recuperación ψ obtenidos para las mezclas cumplen con el rango $0 \leq \psi \leq 1$, y obedecen a la Ecuación (11). Los resultados obtenidos de la gráfica deformación recuperada vs. Deformación total y mostrados en la Figura 6, evidencian que la constante de recuperación ψ es sólo dependiente de la máxima deformación del material y su comportamiento es completamente independiente de la temperatura.

Los valores de los parámetros del modelo constitutivo para todas las mezclas, se registran en la Tabla 4.

The values obtained from mixtures recovery constants ψ comply with the range $0 \leq \psi \leq 1$, and are in accordance with the Equation (11). The results obtained from the graph recovered strain v/s total strain, shown in figure 6, evidence that recovery constant is only dependant on the material maximum strain and its behavior is completely independent on temperature.

The parameters values in the constitutive model for all mixtures are registered in Table 4.

Tabla 4. Resumen de los parámetros del modelo constitutivo en condiciones de estado estable para las 6 mezclas
Table 4. Parameter Summary in the constitutive model for 6 mixtures under steady conditions

VARIABLE <i>VARIANT</i>	MEZCLA/ <i>MIXTURE</i>					
	INVIAS A M3	Valle Aburrá A M4	INVIAS B M1	Valle Aburrá B M2	INVIAS C M5	Valle Aburrá M6
m	0.85	0.82	0.8	0.85	0.82	0.82
σ_o (MPa)	0.75	0.3	0.5	0.6	0.27	0.27
k (K)	5×10^3	8.3×10^3	6×10^3	3.3×10^3	5.5×10^3	7.4×10^3
$\dot{\epsilon}_o$ (s ⁻¹)	8×10^{-8}	8×10^{-9}	3.2×10^{-8}	6×10^{-8}	7×10^{-9}	6.5×10^{-9}
ψ	0.34	0.46	0.39	0.73	0.43	0.20

2.2.3 Análisis de las mezclas asfálticas fabricadas de acuerdo a las especificaciones del INVIAS

Las mezclas tipo INVIAS, están identificadas como M1, M3 y M5. A pesar de estar fabricadas de acuerdo a la misma norma, cada una de ellas presenta características mecánicas diferentes, situación que se puede analizar a partir de los valores hallados de los parámetros $\dot{\epsilon}_o, m, k, \sigma_o, \psi$ del modelo constitutivo (Ecuación 10), registrados en la Tabla 4. El valor de m , expresa la linealidad o no linealidad en el comportamiento de la mezcla y describe además la relación existente entre la velocidad de deformación y el esfuerzo aplicado en la region de altos esfuerzos y altas velocidades de deformación. Siendo $m = (n - 1)/n$ un parametro que relaciona la pendiente de la línea de tendencia (n) resultante de graficar ambas variables, se tiene que cuando $m \rightarrow 0$ el material presenta una velocidad de deformación alta con pequeños incrementos de esfuerzo. Luego, la mezcla asfáltica M3, es la mezcla que presenta mayor velocidad de deformación cuando ocurren cambios pequeños de esfuerzo, seguida por la mezcla M5 y la M1. Lo que implica una mayor susceptibilidad a la deformación permanente.

2.2.3 Analysis of asphaltic mixtures elaborated in accordance with INVIAS specifications

Mixtures of INVIAS type are identified as M1, M3 and M5. Although they are elaborated under the same standard, each one of them has different mechanical characteristics; situation that may be analyzed from values found in parameters $\dot{\epsilon}_o, m, k, \sigma_o, \psi$ in the constitutive model (Equation 10), registered in Table 4. The m value expresses linearization or non-linearization of mixture behavior and, besides, it describes the existing relation between strain speed and stress applied on the zone of high stress levels and high strain speed rates. Thus $m = (n - 1)/n$ is a parameter relating (n) trend line resulting from both variants graphics, then when $m \rightarrow 0$ the material shows a high strain speed rate upon the increase of small stress levels. Asphaltic mixture M3 is the one having the highest strain speed rate when small stress changes take place, followed by mixtures M5 and M1. Consequently it is highly susceptible to permanent strain.

El esfuerzo de referencia σ_0 , difiere considerablemente para las tres mezclas. σ_0 se refiere al punto límite donde el material trasciende de un comportamiento viscoso lineal a viscoso no lineal, asemejándose al punto de cedencia en materiales no viscoelásticos. Al trazar una línea tangente a la zona no lineal de la curva de tendencia y otra tangente a la zona lineal, existirá un punto donde ambas tangentes se cortan, siendo éste el punto límite entre el rango viscoso lineal y viscoso no lineal del material, σ_0 , tal como se muestra en la Figura 4 para la mezcla M1. Para valores pequeños de σ_0 , la etapa viscosa lineal del material es más corta y para valores altos se produce el efecto contrario. El esfuerzo de referencia σ_0 corresponde al mayor valor de esfuerzo hasta el cual el material conserva un comportamiento viscoso lineal. De esta manera, M5 presenta la etapa lineal más corta, pasando rápidamente a la etapa no lineal donde el material se deforma más rápidamente con un pequeño incremento de esfuerzo.

El valor de k representa la susceptibilidad térmica de las mezclas, esto es, que tan sensible es el material a las condiciones dadas de temperatura del ensayo. Dicha constante k es directamente proporcional a la velocidad de deformación, esto es, al aumentar su valor existirá un aumento en la velocidad de deformación $\dot{\epsilon}_0$ por efectos térmicos (el material es más blando y por ende, es fácilmente deformable). De acuerdo con este análisis y verificando los valores registrados de la constante de Arrhenius en la Tabla 4, el material con mayor susceptibilidad a la temperatura, y en consecuencia, el que presenta mayor deformación por condiciones térmicas es la mezcla M1, seguida por M5 y M3.

La velocidad de deformación de referencia $\dot{\epsilon}_0$ se relaciona con la rigidez del material y expresa la rapidez con la que éste se deforma. Así, de acuerdo con los valores registrados en la Tabla 4, M3 es la mezcla de INVIAS que se deforma con mayor velocidad. M1 es la mezcla que se deforma a menor velocidad y en consecuencia el material es más rígido.

La constante de recuperación ψ representa la capacidad del material para recuperarse después de la aplicación de una carga. Valores altos de ψ , indican una mayor recuperación del material y valores pequeños representan el efecto contrario, esto es, a mayor ψ habrá mayor recuperación elástica retardada y viceversa. De acuerdo con la Tabla 4, la mezcla M5 presenta mayor recuperación ante la aplicación de una carga controlada ($\psi_{M5} = 0.43$) seguida por la mezcla M3 con un valor de $\psi_{M3} = 0.39$ y finalmente la mezcla M1 con un valor de $\psi_{M1} = 0.34$.

The reference stress σ_0 is considerably different for the three mixtures. σ_0 is referred to the limit point where material changes from a linear viscose behavior into a non-linear viscose behavior, which is similar to yield point in non-viscose-elastic materials. By drawing a tangent line to the non-linear zone in the trend curve and, other tangent line to the linear zone, there will be a point where both tangents shall intersect; this is the limit point between linear viscose and non-linear viscose range of the material, σ_0 , as shown in Figure 4 for M1 mixture. For smaller σ_0 values, the linear viscose material stage is shorter and for higher values the opposite effect takes place. The reference stress σ_0 corresponds to the highest stress extent where the material keeps a linear viscose behavior. In the same way, M5 has a shorter linear stage, rapidly going into a non-linear stage where material is quickly strained upon a small increase of stress level.

k value represents mixtures' thermal susceptibility, i.e., material sensitivity to temperature conditions provided by the test. Such k constant is directly proportional to strain speed rate, i.e., when increasing its value there will be an increase of strain speed rate $\dot{\epsilon}_0$ due to thermal effects (material is softer and therefore it is easily strainable) According to this analysis and by checking registered values of Arrhenius constant in Table 4, the most susceptible material to temperature, and consequently, having higher strain due to thermal conditions is mixture M1, followed by M5 and M3.

The $\dot{\epsilon}_0$ reference strain speed rate is related to the material stiffness and indicates the speed at which material becomes strained. Therefore, in accordance with values registered in Table 4, mixture M3 is an INVIAS type mixture straining at higher speed. M1 is the mixture straining at lower speed and, consequently, material is stiffer.

Recovery constant ψ represents material ability to recover itself after a loading stress. Greater ψ values indicate a higher material recovery and smaller values represent the opposite effect, i.e., the higher ψ , higher delayed elastic recovery will take place and vice versa. According to Table 4, mixture M5 has a higher recovery rate facing a controlled loading stress ($\psi_{M5} = 0.43$), followed by mixture M3 with a value of $\psi_{M3} = 0.39$ and finally mixture M1 with a value of $\psi_{M1} = 0.34$.

La constante de recuperación ψ también revela la relación existente entre la deformación recuperada y la deformación total, descrita por la Ecuación (11), en donde la deformación total es directamente proporcional a la deformación recuperada, luego para un material con un valor alto de la constante de recuperación ψ y con aumentos en la deformación total, se tiene mayor deformación recuperada que aquel material con un valor de la constante de recuperación menor. Este efecto se muestra en la Figura 7, en la cual se observa la relación entre ambas deformaciones para las mezclas tipo INVIAS. En la práctica, la constante de recuperación ψ determina la respuesta de la capa asfáltica de rodadura ante la aplicación de cargas permanentes que generan el ahuellamiento. Este es pues un parámetro fundamental para identificar el material con mayor susceptibilidad a este tipo de falla.

La influencia de la constante de recuperación ψ en el comportamiento de la mezcla M5 ($\psi_{M5} = 0.43$), se manifiesta con una recuperación mayor que la mezcla M1 y M3. En la Figura 7 se observa el valor de la deformación recuperada para las mezclas M1 y M5 en una gráfica de deformación unitaria en función del tiempo.

Recovery constant ψ also reveals an existing relation between recovered strain and total strain, described by Equation (11), where total strain is directly proportional to recovered strain; therefore, a material with a higher recovery constant ψ value and with increases of total strain, obtains higher recovery strain than a material with lower recovery constant value. Such effect is shown in Figure 7, indicating the relation between both strains for mixtures type INVIAS. Practically, recovery constant ψ determines the response of the asphaltic tread layer upon permanent loading stress that generates the rutting effect. Then, this is a key parameter to identify materials with higher susceptibility to such kind of failures.

The influence of recovery constant ψ and the behavior of mixture M5 ($\psi_{M5} = 0.43$), are demonstrated by means of a fastest recovery than in mixtures M1 and M3. Figure 7 indicates the value of recovered strain for mixtures M1 and M5 on a graph of unit strain as function of time.

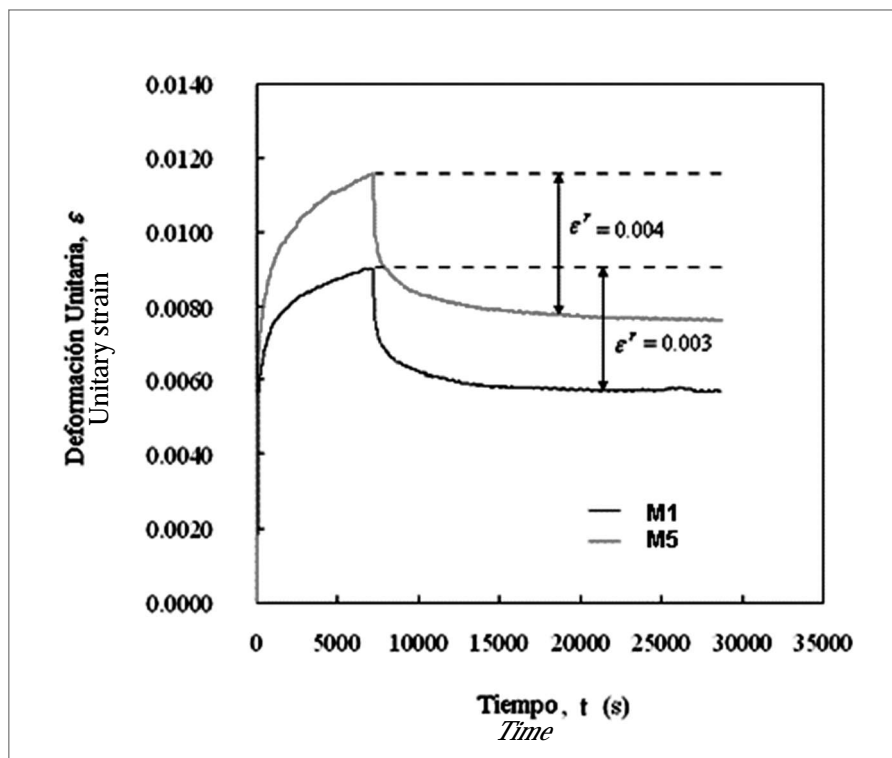


Figura 7. Deformación unitaria en función del tiempo, para las mezcla M1 y M5, con $T = 20^{\circ}\text{C}$ y $\sigma = 0.5 \text{ MPa}$

Figure 7. Unitary strain as function of time for mixtures M1 and M5, at $T = 20^{\circ}\text{C}$ and $\sigma = 0.5 \text{ MPa}$

De acuerdo con el comportamiento de las mezclas asfálticas M1, M3 y M5 revelado a partir de la representación física de los parámetros del modelo constitutivo, se concluye que la mezcla asfáltica que presenta mayor resistencia a las solicitaciones del tránsito es la fabricada con materiales provenientes de la Empresa C (M5). En la Tabla 2 se observa que a pesar de la corta etapa viscosa lineal de la mezcla M5 (valor pequeño de σ_0), ésta presenta la constante de recuperación más alta, lo que se traduce en mayor recuperación de la mezcla ante la aplicación de cargas y posee la velocidad de deformación más baja, una susceptibilidad a la temperatura intermedia y una relación entre el esfuerzo y la velocidad de deformación también intermedia.

2.2.4 Análisis de mezclas asfálticas fabricadas de acuerdo a la norma del Valle de Aburrá

Las mezclas asfálticas fabricadas bajo la normatividad del Valle de Aburrá, corresponden a las mezclas M2, M4 y M6. A pesar de estar fabricadas de acuerdo con la misma norma, cada una de ellas presenta características mecánicas diferentes, situación que se puede predecir a partir de los valores hallados de los parámetros $\dot{\epsilon}_0, m, k, \sigma_0, \psi$ (Ecuación 10), registrados en la Tabla 4.

Los principales comportamientos que se observan a partir de estos parámetros son:

- La mezcla con mayor pendiente m es M2, siendo esta la mezcla que presenta menor velocidad de deformación cuando ocurren pequeños cambios de esfuerzo.
- Las mezclas M4 y M6 presentan un esfuerzo de referencia σ_0 similar entre ellas pero distante y menor del correspondiente a la mezcla M2. La mezcla M2 presenta el mayor valor de σ_0 entre las tres mezclas asfálticas, siendo la mezcla con la etapa viscosa lineal más extensa, y en consecuencia, la que más tarda en llegar a la etapa viscosa no lineal.
- De acuerdo a los valores registrados de la constante de Arrhenius en la Tabla 4, el material con mayor susceptibilidad a la temperatura, y en consecuencia, el que presenta mayor deformación por condiciones térmicas es la mezcla M4, seguida por M2 y M6.
- La velocidad de deformación de referencia $\dot{\epsilon}_0$, se relaciona con la rigidez del material y expresa la rapidez con que éste se deforma. Así, de acuerdo a los valores registrados en la Tabla 4, M2 es la mezcla que se deforma con mayor velocidad, seguida por las mezclas M6 y M4.

According to the behavior of asphaltic mixtures M1, M3 and M5 - revealed from a physical representation of parameters in the constitutive model - it is concluded that the most resistant asphaltic mixture under traffic loads is the one elaborated from materials delivered by Company C (M5). Table 2 indicates that, in spite of the short linear viscose stage of mixture M5 (small σ_0 value), it has the higher recovery constant, which provides a greater mixture recovery under loading stress and it also has the lowest strain speed rate. It has intermediate temperature susceptibility and a relation between stress and strain speed also intermediate.

2.2.4 Analysis of asphaltic mixtures elaborated according to Valle de Aburrá standards

Asphaltic mixtures elaborated under Valle de Aburrá standards correspond to mixtures M2, M4 and M6. Although they are elaborated under the same standards, each one of them has different mechanical characteristics; situation that might be predicted from values obtained by parameters $\dot{\epsilon}_0, m, k, \sigma_0, \psi$ (Equation 10), registered in table 4.

Main behaviors observed from such parameters are the following.

- The mixture with higher m slope is M2, which is the mixture having lower strain speed when small stress changes take place.
- Mixtures M4 and M6 have a similar σ_0 reference stress value between them, however it is remote and minor compared to mixture M2. Mixture M2 has the highest σ_0 value of the three asphaltic mixtures, being the longest the mixture with linear viscose stage; consequently, it is the mixture that takes longer to achieve the non-linear viscose stage.
- In accordance with registered values for Arrhenius constant in Table 4, the material most susceptible to temperature and, consequently, having greater strain due to thermal conditions is mixture M4, followed by M2 and M6.
- Reference strain speed rate $\dot{\epsilon}_0$ is related to material stiffness and expresses a given material strain speed rate. Therefore, according to registered values in Table 4, mixture M2 strains at higher speed, followed by mixtures M6 and M4.

- De acuerdo con la Tabla 4, la mezcla M2 posee el valor más alto de la constante de recuperación ψ (Ecuación 11), esto quiere decir, que la mezcla asfáltica M2 posee mayor capacidad para recuperarse después de la aplicación de un esfuerzo que las mezclas M4 y M6. La constante de recuperación ψ también revela la relación existente entre la deformación recuperada y la deformación total. La Figura 8 muestra la relación entre deformación total y recuperada para las mezclas asfálticas fabricadas de acuerdo a la norma del Valle de Aburrá.

- In accordance with Table 4, mixture M2 has the highest recovery constant value ψ (equation 11). It means that asphaltic mixture M2 has greater ability to recover itself after loading stress than mixtures M4 and M6. Recovery constant ψ also reveals an existing relation between recovered strain and total strain. Figure 8 shows the relation between recovered strain and total strain for asphaltic mixtures elaborated under Valle del Aburrá standards.

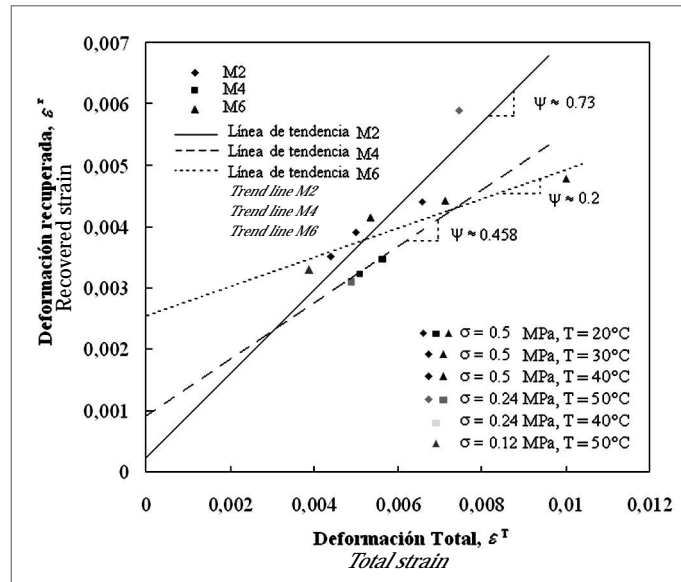


Figura 8. Relación entre la deformación total y recuperada para las mezclas M2, M4 y M6
 Figure 8. Relation between total and recovered strain for mixtures M2, M4 and M6

De acuerdo con el comportamiento de las mezclas asfálticas M2, M4 y M6 revelado a partir de los parámetros del modelo constitutivo, se concluye que la mezcla asfáltica que presenta mayor resistencia a las sollicitaciones del tránsito es la fabricada con materiales provenientes de la Empresa B (M2). En la Tabla 2 se observa que a pesar de que la Mezcla M2 se deforma con mayor velocidad que las otras dos mezclas (M4 y M6) y posee un valor de m (relación entre el esfuerzo y la velocidad de deformación) mayor al de las mezclas M4 y M6, ésta presenta la constante de recuperación más alta, lo que se traduce en mayor recuperación de la mezcla ante la aplicación de cargas, su constante de Arrhenius presenta el menor valor entre las 3 mezclas, siendo la de menor susceptibilidad a las condiciones térmicas, presenta la etapa viscosa lineal más prolongada, en consecuencia, es la mezcla que más tarda en llegar a la etapa viscosa no lineal.

According to behavior of asphaltic mixtures M2, M4 and M6, revealed from parameters in the constitutive model, it is concluded that asphaltic mixture having greater resistance to traffic loads is the one elaborated from materials delivered by Company B (M2). Table 2 indicates that although Mixture M2 is strained at higher speed than the other two mixtures (M4 and M6) and has a m value (relation between stress and strain speed rate) higher than M4 and M6; it has the highest recovery constant, which means it is a highly recoverable mixture under loading stress, its Arrhenius constant has the lowest value among three mixtures and it is the less susceptible to thermal conditions. It has a longer linear viscous stage and, consequently, it is the mixture taking longer to achieve a non-linear stage.

3. Conclusiones

En este estudio se efectuaron ensayos monotónicos de estado estable y de recuperación a probetas fabricadas con materiales provenientes de tres plantas productoras de mezclas asfálticas, bajo dos normas colombianas (INVIAS 2002 y Valle de Aburrá). Para ambos casos, a pesar de que las mezclas asfálticas cumplen con las especificaciones, su comportamiento mecánico es diferente.

De acuerdo a la buena aproximación existente entre las curvas experimentales y aquellas generadas a partir del modelo constitutivo usado en este estudio, se comprobó que el modelo utilizado describe de una manera apropiada el comportamiento de las mezclas asfálticas estudiadas.

A pesar del número de ensayos de recuperación y Creep efectuados en este estudio, se comprobó que para la implementación y calibración del modelo constitutivo son necesarios pocos ensayos y de igual modo se obtienen resultados óptimos.

Todas las mezclas asfálticas sometidas a ensayos monotónicos de estado estable y de recuperación presentaron un comportamiento dependiente de la temperatura que es descrito acertadamente por la relación de Arrhenius.

De igual modo, a partir de los resultados obtenidos, se determina que las mezclas asfálticas presentan cambios en su comportamiento mecánico con la aplicación de un esfuerzo. Ellas describen un comportamiento viscoso no lineal a altos esfuerzos y un comportamiento viscoso lineal a bajos niveles de esfuerzo.

Los parámetros que constituyen el modelo constitutivo, revelan características importantes de las mezclas asfálticas. Se tiene que la constante de recuperación ψ , representa la capacidad del material para recuperarse después de la aplicación de una carga, luego, a partir de su valor es posible determinar la respuesta de la capa asfáltica de rodadura ante la aplicación de cargas permanentes que generan el ahuellamiento. Este es pues un parámetro fundamental para identificar el material con mayor susceptibilidad a este tipo de falla. El parámetro m se obtiene como la pendiente de la curva, al graficar la velocidad de deformación V_s el esfuerzo, luego, su valor representa la relación existente entre ambas. Un valor alto de m revela la linealidad o no linealidad en el comportamiento del material. El esfuerzo de referencia σ_0 , determina el punto límite donde el material trasciende de un comportamiento viscoso lineal a uno viscoso no lineal, siendo entonces, el mayor valor de esfuerzo hasta el cual la mezcla asfáltica conserva un comportamiento viscoso lineal.

3. Conclusions

In this study steady monotonic and recovering testings were conducted on specimens elaborated from materials delivered by three asphaltic mixtures production plants under two Colombian standards (INVIAS 2002 and Valle de Aburrá). In both cases mechanical behavior is different, in spite of the fact that asphaltic mixtures comply with the specifications.

Because of a proper accuracy existing between experimental curves and those generated in the constitutive model employed by this test, it was proven that the used model describes at an adequate extent the behavior of asphaltic mixtures under study.

In spite of the number of recovery and Creep testings conducted by this study, it was proven that for the implementation and calibration of constitutive model only few tests are required and optimum results are obtained any way.

Monotonic and recovery testings were conducted on all asphaltic mixtures under steady condition, all of them showed a behavior dependant on temperature, which is accurately described by Arrhenius relation.

Similarly, from obtained results, it was determined that asphaltic mixtures have changes of mechanical behavior under loading stress. They describe a non-linear viscose behavior at high loading stress and a linear viscose behavior at lower loading stress.

Parameters making up the constitutive model reveal remarkable characteristics of asphaltic mixtures. The recovery constant ψ represents the material ability to recover itself after loading stress, and then from its value it is possible to determine the response of the asphaltic tread layer under steady loading stresses that cause rutting effect. This is a key parameter to identify the material with higher susceptibility to this kind of failure. The m parameter is obtained as the curve slope, when representing strain speed rate v/s stress, and then its value provides the relation existing between them. A higher m value reveals linearization or non-linearization of material behavior. The reference stress σ_0 determines the limit point where material changes from a linear viscose behavior into a non-linear viscose behavior, thus the higher stress value is the extent where the asphaltic mixture maintains a linear viscose behavior.

El valor de k representa la susceptibilidad térmica de las mezclas, indicando que tan sensible es el material a las condiciones dadas de temperatura del ensayo. La velocidad de deformación de referencia $\dot{\epsilon}_0$, revela que tan rígido es el material y expresa la rapidez con que éste se deforma.

De acuerdo a los resultados obtenidos, la mezcla asfáltica fabricada con materiales provenientes de la Empresa C y de acuerdo a la norma del Instituto de vías (INVIAS), posee mejor resistencia al ahuellamiento que las mezclas fabricadas con insumos de las plantas de las Empresas A y B. Posiblemente, esta situación ocurra porque ambas normas establecen una serie de ligantes asfálticos que puede diferir entre una planta y otra y una gradación de los agregados pétreos variable.

Por otra parte, la mezcla asfáltica fabricada de acuerdo a la norma del Valle de Aburrá y usando materiales de la Empresa B, presenta mejores propiedades mecánicas que las fabricadas con materiales de las Empresas A y C.

En este trabajo se utilizó un modelo propuesto y estudiado bajo condiciones específicas de materiales y temperaturas típicas del Reino Unido, bajo condiciones típicas de Colombia, y específicamente de Medellín. Este modelo a pesar de ser basado en consideraciones fenomenológicas, presenta variables con interpretación física que llevan a diferenciar la susceptibilidad a la deformación permanente de diferentes mezclas asfálticas. También es importante resaltar que mediante este trabajo se logro determinar que para mezclas asfálticas que a la luz de la norma son idénticas, ya que cumplen con especificaciones definidas, su respuesta bajo condiciones de carga son muy diferentes. Esta conclusión puede ser un inicio para la modificación de especificaciones o procedimientos de ensay que aseguren una mayor uniformidad en mezclas asfálticas para solicitaciones de carga específicas.

The k value represents thermal susceptibility of mixtures by indicating material sensitivity under given temperatures in this test. The reference strain speed rate $\dot{\epsilon}_0$ reveals material stiffness and expresses its strain speed rate.

In accordance with obtained results, the asphaltic mixture elaborated from materials delivered by Company C, under standards by the INVIAS (Instituto de Vías), has a higher endurance against rutting effect than mixtures elaborated from materials provided by Companies A and B. Probably this situation occurs because both standards establish the use of a number of asphaltic binders, which might differ from one plant to another; and due to variable stone aggregates gradation.

On the other hand, the asphaltic mixture elaborated under the specifications by Valle de Aburrá and employing materials from Company B, has better mechanical properties than the ones elaborated from materials provided by Companies A and C.

This study employed a model proposed and studied under specific material and temperature conditions typical in the United Kingdom, under typical conditions in Colombia, specifically Medellín. Although this model is based on phenomenological considerations, it has variants of physical interpretation that lead to differentiate susceptibility to steady strain on diverse asphaltic mixtures. It is worth mentioning that by means of this study it was possible to determine that although asphaltic mixtures of identical standards, complying with defined specifications, they have quite different responses under loading stress. This conclusion might be a beginning for the adjustment of specifications or testing procedures in order to ensure a higher standardization on asphaltic mixtures for specific loading stress.

4. Referencias / References

- Anderson D. A., Chistensen D. W. y Bahia H. (1991), Physical properties of asphalt cement and the development of performance related specifications. In: Proceedings of the association of asphalt paving technologists, vol. 60, p. 437-532.
- Anderson D. A. y Kennedy T. W. (1992), Development of SHRP binder specification. J AAPT; 481-501.
- Área Metropolitana. Normas para la Construcción de Carreteras Valle de Aburrá, Medellín, 1994.
- Askeland y Phule (2004), Ciencia e Ingeniería de los Materiales. Thomson. Cuarta edición.
- Ashby, Shercliff y Cebon (2007), Materials, engineering, science, procesing and design. Butterworth - Heinemann.
- Bower A. F., Fleck N. A., Needleman A. y Oghonna N. (1993), Indentation of a power law creeping solid. Proc R Soc London, Ser A; 441:97-124.
- Cheung C. Y. y Cebon D. (1997), Experimental study of pure bitumens in tension, compression, and shear. J Rheol; 41(1): 45-73.
- Christensen D. W. y Anderson D. A. (1992), Indentation of dynamic mechanical test data for paving grade asphalt. In: Proceedings of the association of asphalt paving technologists, vol. 61, p. 67-116.



- Coral L. (2003). »Refinamiento de un modelo de elementos finitos (FEM) para la estimación de ahuellamiento en pavimentos«. Trabajo de Grado. Ingeniería Civil. Universidad de Los Andes, Bogotá.
- Cross M. M. (1965), Rheology of non-newtonian fluids: a new flow equation for pseudoplastic system. *J Colloid Sci*; 20: 417-37.
- Derby B. y Ashby M. F. (1987), A microstructural model for primary creep. *Acta Metall*; 35(69): 1349-53.
- Deshpade V. S. (1997), "Steady-state deformation behavior of bituminous mixes", PhD thesis, Engrg. Dept., University of Cambridge, Cambridge, U.K.
- Estudio del ahuellamiento de mezclas asfálticas. XIII Simposio Colombiano sobre Ingeniería de Pavimentos». Universidad de Los Andes, Bogotá.
- F. Martínez y S. Angelone (2004), Un modelo micromecánico simplificado para mezclas asfálticas. XXXIII Reunión del Asfalto", Mendoza. Argentina.
- Harman T., D'Angelo J. y Bukowski J. (2001), Superpave Asphalt Mixture Design – Workshop Workbook, Federal Highway Administration, Washington, 2000.2 PAEZ, D., PEREIRA, H.
- Hill R., Storakers B. y Zdunek A. B. (1999), A theoretical study of the brinell hardness test. *Proc R Soc London. Ser A*; 423:301.
- Huang Y. H. (1967), "Deformation and volume change characteristics of a sand-asphalt mixture under constant direct triaxial compressive stresses." *Hwy. Res. Rec.* 178, 60-74.
- Instituto Nacional de Vías (INVIAS) (2002), Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras y Normas de Ensayo para Materiales de Carreteras. Colombia.
- Mulhearn T. O. y Tabor D. (1960), Creep and hardness of metals: a physical study. *J Inst Met*; 89:7-12.
- Ogbonna N., Fleck N. A. y Cocks C. F. (1995), Transient creep analysis of ball indentation. *Int J Mech Sci*; 37(11): 1179-202.
- Ossa E. A., Deshpande V. S. y Cebon D. (2004a), "Uniaxial monotonic and cyclic behaviour of bituminous mixes", Cambridge University Engineering Department Report. CUED/C-MICROMECH/TR.95.
- Ossa E. A. et al. (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. et al. (2005), "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. et al. (2006), "Dilation behaviour of asphalt mixtures" *Int. Journal of Road Materials and Pavement Design*. VOL 7/SI - 2006 - pp.93-109.
- Ossa, E. A. et al. (2010), "Triaxial deformation behaviour of asphalt mixes" *Journal of Materials in Civil Engineering*, ASCE. Vol 22(2). pp 124-135.
- SHRP-A-369 (1994), Binder characterisation and evaluation. Vol 3: Physical characterisation (A-369). Strategic Highway Research Program, Washington, DC.
- Tabor D. (1951), *Hardness of metals*. Oxford: Clarendon Press.
- Van der Poel C. (1945), A general system describing the visco-elastic properties of bitumen and its relation to routine test dat. *J Appl Chem*; 4:221-36.
- Van der Poel C. (1954), Representation of rheological properties of bitumen over a wide range of temperatures and loading times. In: *Proceedings of the 2nd international congress on rheology*, p. 331-7.
- Vidal, J. (2006), "Comportamiento dinámico de mezclas asfálticas". *Revista Universidad EAFIT*. N° 143, Vol 42, pp. 78-88. Medellín – Colombia.
- Ward IM. (1971), *Mechanical properties of solid polymers*. New York: Wiley/Interscience.
- Wang, L. (2011), *Mechanics of Asphalt, Microstructure and micromechanics*. New York: Mc Graw Hill.
- Whiteoak D. (1990), *The shell bitumen handbook*. IK: Shell Bitumen.
- Wolfgang Stiller (1989), *Arrhenius Equation and Non-Equilibrium Kinetics: 100 Years* (Paperback).