

# DEFORMACIONES PERMANENTES Y FATIGA EN CONCRETO ASFALTICO (C.A.)\*

Jhonny Alexander Pérez Saldaña, Estudiante de Ingeniería Civil, Tecnólogo en Topografía, Técnico Ambiental<sup>1</sup>, Pedro Alexander Urrea Gómez, Estudiante de Ingeniería Civil, Ingeniero Topográfico<sup>2</sup>, y Jhosman David Barahona Puentes, Estudiante de Ingeniería Civil, Técnico en Construcciones Civiles<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Universidad La Gran Colombia, Colombia, [johnnyalexander.perez@ulagrancolombia.edu.co](mailto:johnnyalexander.perez@ulagrancolombia.edu.co)

<sup>2</sup> Universidad La Gran Colombia, Colombia, [pedroalexander.urrea@ulagrancolombia.edu.co](mailto:pedroalexander.urrea@ulagrancolombia.edu.co)

<sup>3</sup> Universidad La Gran Colombia, Colombia, [jhosmandavid.barahona@ulagrancolombia.edu.co](mailto:jhosmandavid.barahona@ulagrancolombia.edu.co)

**Resumen-** Cuando una mezcla de concreto asfáltico es sometida a cargas repetidas producidas por vehículos y además, expuesta a cambios climáticos bruscos, puede llegar a presentar fatiga y posteriormente deformaciones permanentes. En las obras de infraestructura vial en Colombia y en el mundo son pocas las investigaciones en relación con esta temática, principalmente por la escasez de equipos y tecnología en asfalto.

La utilización de mezclas en caliente, en la ciudad de Bogotá D.C., puede verse afectada por las condiciones climáticas variables. La temperatura media anual promedio de la ciudad es de 14 °C y la precipitación anual menor a 2000 mm. (Secretaría Distrital de Ambiente, 2014) [1]. En algunas obras se ha reportado la disminución de la temperatura de compactación de la mezcla hasta de 30 °C (Rondón et al., 2012). Además, recientemente ha venido creciendo la utilización inadecuada de materiales estabilizados, debido principalmente a que el agregado pétreo que se extrae en las canteras de la ciudad, no cumple con los requisitos mínimos de calidad que exigen las especificaciones del Instituto de Desarrollo Urbano – IDU (2005) [2] y del Instituto Nacional de Vías – INVIAS (2007) [3]. La intención principal de este artículo es presentar de manera cronológica, algunos trabajos e investigaciones de los últimos 20 años, sobre las deformaciones permanentes y fatiga en C. A.

**Palabras Claves:** Módulo resiliente, Deformación permanente, Envejecimiento, Concreto asfáltico, Mezclas asfálticas.

## I. INTRODUCCIÓN

Los esfuerzos y deformaciones permanentes se pueden determinar en cualquier punto del modelo estructural, pero en este caso del diseño de las estructuras de las carreteras “PAVIMENTOS” interesan algunos puntos especiales para poder realizar los estudios y análisis correspondientes que permitan controlar la fatiga y la deformación permanente de los pavimentos como se puede observar en la Fotografía No. 1 el ahuellamiento que se presenta en un carril del sistema de Transmilenio Carrera 50 # 18-6, Bogotá - Colombia, ya que

esta mezcla asfáltica no cumple con la rigidez necesaria para el tipo de carga solicitada.

El incremento en el parque automotor (MINTRANSPORTE 2008) [4], y de las cargas impuestas por éste, demanda mezclas cada vez más durables y con mejor desempeño, por lo que acciones como el diseño, producción, extensión y compactación de la mezcla asfáltica deben producirse al más alto nivel, mejorando los recursos disponibles.



Fotografía No. 1. Deformaciones permanentes en pavimentos flexibles. A la izquierda un asfalto que muestra ahuellamiento, la fotografía central falla debido a repeticiones por carga y a la derecha fatiga llamada también piel de cocodrilo. (Rondón 2012).

\* Los autores agradecen a la Universidad La Gran Colombia por la gestión y el apoyo brindado, al igual que la Oficina de Relaciones Internacionales (ORI) de la Universidad, para participar en el Seminario internacional en Geotecnia realizado en el Instituto tecnológico de Monterrey – Sede Chihuahua, México.

Frecuentemente, la experiencia actual del diseño de mezclas asfálticas sólo se limita a determinar el contenido de asfalto en la mezcla. No obstante, a este hecho le debe anteceder una serie de investigaciones en donde se tomen en cuenta todas las variables que van a intervenir directamente en su comportamiento.

Dentro de los principales factores que afectan la durabilidad de las mezclas asfálticas están el envejecimiento y el daño por humedad (Airey G. 2003). Es decir, una mezcla asfáltica debe ser diseñada y construida no solo para que resista las cargas impuestas por el tránsito, sino también la acción del medio ambiente. La representación como se realiza actualmente, es separando cada uno de los mecanismos que lo conforman (agua, temperatura y rayos ultra-violeta entre otros). Frecuentemente, la experiencia actual para el diseño de mezclas asfálticas sólo se limita a estipular el contenido de asfalto en la mezcla. No obstante, a este hecho le debe anteceder una serie de estudios en donde se intercepten todas las variables que van a intervenir claramente en su comportamiento [5].

La intención primordial de este artículo es realizar una revisión y análisis de las variables de mayor influencia en la deformación permanente de la carpeta asfáltica, siendo este criterio de desempeño uno de los más significativos en el diseño de un pavimento tomando como referencia las experiencias registradas en documentos e investigaciones.

De igual forma se presenta la comparación de la resistencia a la deformación permanente de mezclas asfálticas en Colombia (de acuerdo a INVIAS, 2007 y México SCT, 2010).

## II. ANTECEDENTES DE INVESTIGACIÓN EN EL CONTEXTO NACIONAL E INTERNACIONAL

De acuerdo a investigaciones desarrolladas en países con mayor tecnología en pavimentos se presenta este artículo realizando un estado del arte que muestre el comportamiento del concreto asfáltico en algunos países que han generado investigaciones importantes en relación a esta temática.

Como se observa en la Fotografía No. 2 el paso repetido de los vehículos generan deformaciones permanentes en las capas, su caracterización es fundamental, y a la vez compleja dada la gran distribución de cargas elevadas.

Uno de los trabajos de investigación que adelantaron los ingenieros Téllez Gutiérrez Rodolfo y Villamil Jorge en (1991), con respecto a los deterioros en pavimentos flexibles pretendió proporcionar una ayuda práctica para los ingenieros de campo y de proyecto del Sector Comunicaciones al describir con detalle los deterioros o fallas más comunes que se presentan en las carreteras Mexicanas [6].



Fotografía No. 2. Cargas que se pueden encontrar en la actualidad sobre una carretera. (Consejo de directores de carreteras de Iberoamérica 2002).

En Estados Unidos uno de los investigadores en el tema de deformación por ahuellamiento es Shami, (1996). El propone mediante la utilización de un equipo que simula la carga repetida que es producida por vehículos, realizar un análisis en laboratorio de muestras mejoradas obteniendo los parámetros para poder establecer el mejor diseño en las capas inferiores del pavimento asfáltico que están sometidas a la tensión, determinando que puede minimizarse el ahuellamiento mediante la reducción de dichas tensiones y teniendo en cuenta que la formación de surcos en la superficie todavía puede ocurrir en la capa superior que se somete a cargas repetidas por fatiga. La acción de trabajo de esta máquina simula estrechamente la compactación real de concreto asfáltico en campo por los rodillos de compactación y a partir de los resultados utiliza métodos de diseño de mezclas de asfalto, pero con poca capacidad para evaluar la susceptibilidad de ahuellamiento de las mezclas. Aunque con esta tesis no se logró un buen engranaje con datos reales que se puede obtener en campo puede tomarse como punto de partida para más investigaciones [7].

Posteriormente Garnica Paul desarrolló una investigación en la Universidad Nacional autónoma de México “UNAM” 1998, sobre La característica propia del ligante y sobre la susceptibilidad térmica del asfalto. El uso del cemento asfáltico es dependiente del clima y del tiempo de aplicación de la cargas vehiculares, ambas variables pueden presentarse en el mismo instante [8].

De esta forma, la caída de velocidad de carga puede simularse con temperaturas mayores, y una alta velocidad de carga con bajas temperaturas. Seguidamente, los ensayos de caracterización de los C.A. deben puntualizar la temperatura y la velocidad de aplicación de carga, para que los resultados del ensayo sean leídos eficazmente. En la figura No. 1 se observa la susceptibilidad térmica del asfalto cuando se aumenta la temperatura; el asfalto pasa de estar en una condición sólida a una condición elástica perdiendo su viscosidad y con esto es posible determinar la rigidez de la mezcla asfáltica; entre más viscoso es más rígido.

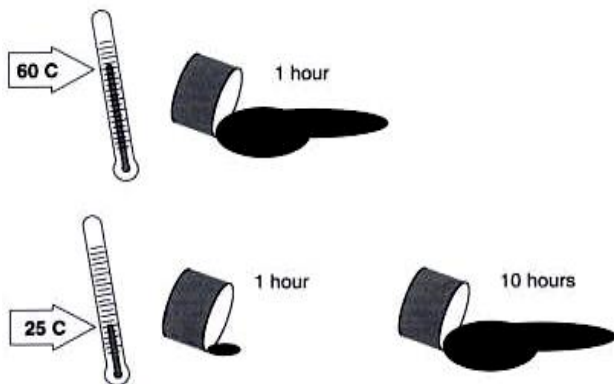


Figura No. 1. Dependencia tiempo-temperatura del cemento asfáltico (Rondón, 2012).

Ghuzlan, K. A. en el año 2001. Desarrollo su tesis donde determino que la relación de fatiga con la energía es una relación de unidades consistentes que aparece entre los dos modos de carga, formas de impulsos de carga, y duraciones. Además, diseño una curva de daño que se relaciona con el porcentaje de daño a producir de energía disipada al material bajo carga cíclica, que se puede obtener basada en el concepto de cambio de energía [9].

Este mismo año Garnica y Pérez, publican sobre la influencia de las condiciones de compactación en las deformaciones permanentes de suelos cohesivos utilizados en la construcción de pavimentos, realizando un estudio del problema de fatiga de los materiales utilizados en la construcción de la infraestructura vial, el cual siempre estuvo en ultimo plano y nunca se tenía en cuenta, lo que ha dado como resultado que el fundamento de las metodologías de análisis y diseño actuales para pavimentos sea de carácter totalmente empírico [10].

Smith, B. J. también en 2001 examina el efecto del tamaño de partícula de relleno sobre la fatiga y los mecanismos de endurecimiento a bajas temperaturas en asfaltos y mezclas. En el modelo de masillas los sistemas estaban preparados conteniendo esferas de vidrio y piedra caliza rellenas con significativas gradaciones. También se estudiaron mezclas asfálticas que contuvieran relleno calizo, regular y grueso [11].

El ingeniero Garnica (2002), muestra las propiedades del cemento asfáltico el cual es un material visco-elástico, que presenta paralelamente características viscosas. A altas temperaturas (mayor a 100 °C), el cemento asfáltico funciona casi como fluido viscoso, y a muy baja temperatura (menor a 0 °C) se comporta como un sólido elástico. A una temperatura intermedia, que es la condición presagiada en el pavimento, el cemento asfáltico tiene características de uno y otro de estos estados, un fluido viscoso y un sólido elástico [12].

Además su comportamiento químico como compuesto de moléculas orgánicas, el C.A reacciona con el oxígeno del medio ambiente. Esta reacción se denomina oxidación, y cambia la composición y la estructura de las moléculas de asfalto, haciéndolo más duro y frágil dando origen al “endurecimiento por envejecimiento”. En la Figura No. 2 se observa una de las propiedades más importantes del C.A. Cuando se aumenta la temperatura el asfalto pasa de ser un sólido elástico a un fluido viscoso y con esto se puede determinar y clasificarlo de acuerdo con su dureza o consistencia. De acuerdo al ensayo de Índice de penetración según la norma INV. E-724 para CA 60-70 y 80-100 es -1/+1.

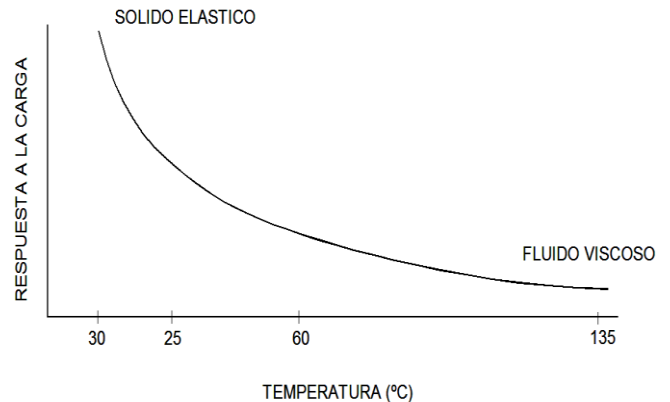


Figura No. 2. Comportamiento Visco-elástico del asfalto (Fuente Propia).

Al año siguiente Bahuguna publica sobre la deformación y tipos de efectos permanentes en concreto asfáltico estableciendo un modelo con 4 componentes: elástico, visco-elástico, visco-plástico y plástico. El modelo elástico es un tercer modelo de hiper-elástico de orden, que capta el desarrollo de las tensiones normales bajo carga de cizallamiento. El modelo visco-elástico es una forma generalizada del modelo de Kuhn modificado. El modelo de plasticidad está basado en la teoría de la plasticidad generalizada. Definitivamente, el modelo visco-plástico está basado en la teoría de visco-plasticidad de Perzyna. Los resultados del modelo son comparados con las observaciones experimentales realizadas. Para el componente de visco-elástico, la fluencia y la frecuencia los resultados de rastreo son captados [13].

Basándose en los resultados de pruebas de caminos e investigaciones del fenómeno de la deformación permanente realizadas por la AASHTO (American Association of State and Highway Officials) el ingeniero Garnica (2005), define la deformación permanente como un canal longitudinal, o depresión, que se forma en las huellas debido a la compresión, movimiento lateral, o ambos, en una o más de las capas que forman el pavimento, como resultado de la aplicación de las cargas del tránsito [14].

Asimismo clasifican la deformación permanente en una manifestación de dos diferentes mecanismos, uno es la densificación (cambio de volumen) y la otra es la deformación cortante (flujo plástico sin cambio de volumen).

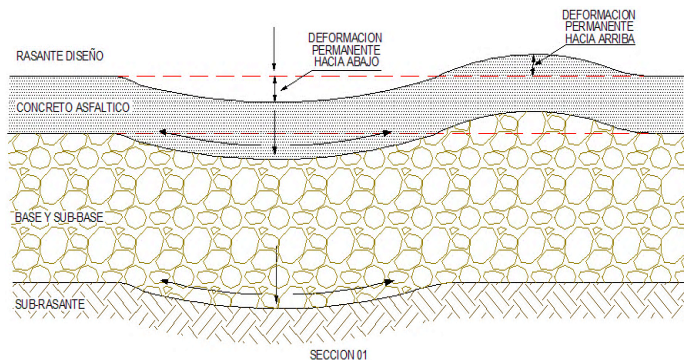


Figura No. 3. Mecanismo típico de deformación permanente en la trayectoria de la rueda externa. (Fuente Propia).

En el proceso de densificación el material es empujado hacia abajo, mientras que la deformación cortante provoca que el material fluya lateralmente y hacia arriba, como se muestra en la Figura 3.

La profundidad total del fenómeno de “rodera” es la diferencia en elevación entre la cresta y cresta de la superficie. Como se muestra en la figura No 4, los esfuerzos de tensión sobre la superficie y el lado exterior del área cargada pueden ocasionar grietas longitudinales en el concreto asfáltico. A continuación el ingeniero Carlos Sandoval de la Universidad Autónoma de Chihuahua 2005, describe los tipos de deformación permanente [15].

- “Deformación plástica: Es una depresión cercana al centro de la carga aplicada, con ligeros montículos o protuberancias ubicados a los lados de la depresión. Este tipo de deformación longitudinal, generalmente se debe a un contenido insuficiente de vacíos de aire en la carpeta. Bajo estas condiciones se puede concluir que la compactación provoca que el asfalto rellene los vacíos de aire entre los agregados, lo que impide que estos se enlacen entre sí”.
- “Deformación mecánica: Es resultado de un hundimiento en la base, sub-base o terracerías, acompañada por un disturbio en el patrón de agrietamiento. Este tipo de falla puede ocurrir cuando la estructura de un pavimento no fue diseñada de manera apropiada para la dimensión de las cargas que soportará”.

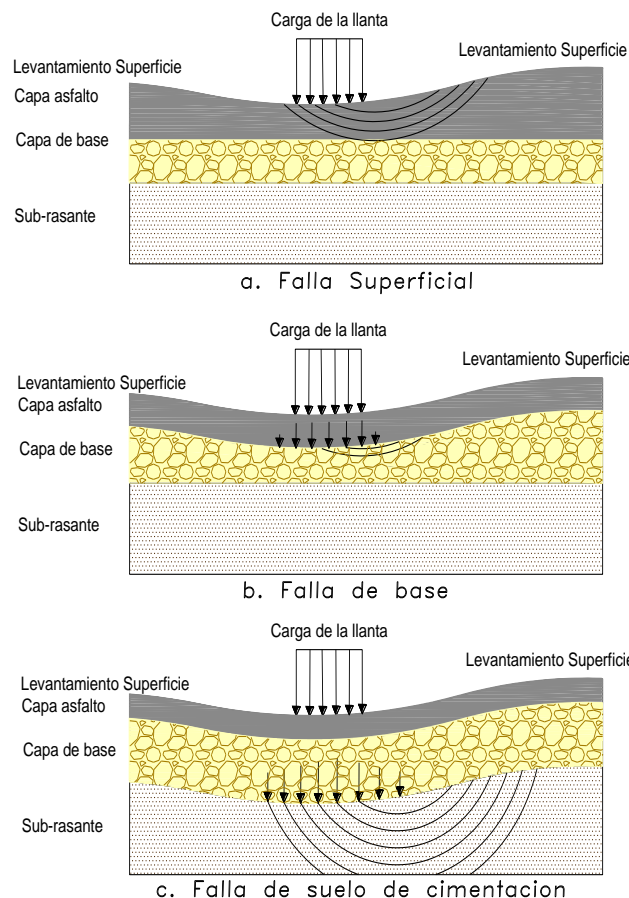


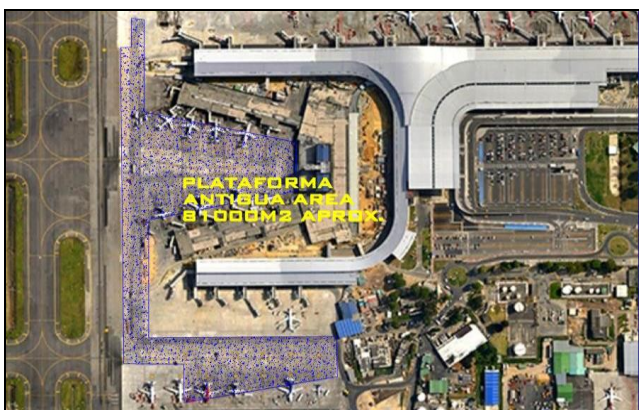
Figura No. 4. Causas de la deformación permanente en mezclas asfálticas. En las imágenes se muestran las deformaciones permanentes que sufre un pavimento por diferentes fallas. (Según Carlos Sandoval de la Universidad Autónoma de Chihuahua 2005).

Según el manual de pavimentos para mezclas en caliente del Departamento de Transporte y la Administración de Carreteras de los Estados Unidos (FHWA, 1997), las causas principales de deformación permanente o longitudinal de los pavimentos asfálticos, son las siguientes [16]:

- Baja cantidad de vacíos de aire (menos del 4%)
- Exceso de vacíos de aire (más del 8%)
- Cemento asfáltico de baja viscosidad, principalmente por:
  - Errores en el diseño de la mezcla, debido a que las propiedades del asfalto a 25°C y 60°C no son iguales a las propiedades del asfalto en servicio.
  - El asfalto no es envejecido, como en el proceso de producción, en planta.

Posteriormente la investigación realizada por Ing. Adalberto Hernández Ortiz, Tecnológico Oaxaca México 2006, en el tema de agrietamiento por fatiga y Caracterización geomecánica de mezclas asfálticas debido a que el patrón de espaciamiento entre las grietas es muy similar a la forma

exterior de la piel del cocodrilo [17]. En la fotografía No.3 se puede observar la deformación permanente por temperatura y fatiga en la plataforma de estacionamiento de aeronaves en el Aeropuerto Internacional El Dorado.



Fotografía No.3 Pavimento asfáltico que presenta agrietamiento por fatiga antigua plataforma comercial del Aeropuerto El dorado. (Fuente propia).

Las fisuras longitudinales intermitentes a lo largo de la huella son un signo prematuro de agrietamiento por fatiga. Este tipo de falla, generalmente ocurre cuando el pavimento ha sido esforzado hasta el límite, por la repetición de aplicaciones de carga. El agrietamiento por fatiga está comúnmente asociado con las cargas, las cuales son mucho más pesadas para la estructura del pavimento, o a que el número de repeticiones de carga fue mayor a las consideradas en el diseño. El problema se hace más grave cuando existe un drenaje inadecuado en el pavimento, lo cual contribuye a que las capas inferiores lleguen a saturarse y pierdan resistencia. En estos casos la capa con la mezcla asfáltica experimenta deformaciones grandes, cuando las capas subyacentes son debilitadas por exceso de humedad, produciendo la falla prematura por fatiga. El agrietamiento por fatiga puede ser también causado por el paso repetido de camiones sobrecargados y/o espesores de pavimento inadecuados, debido a un control de calidad deficiente durante la construcción.

El agrietamiento por fatiga puede conducir al desarrollo de baches cuando las piezas individuales de mezcla asfáltica se separan físicamente del material adyacente, y se desprenden de la superficie del pavimento por acción del tránsito. Los baches generalmente ocurren cuando el agrietamiento por fatiga se

encuentra en etapas muy avanzadas, o cuando se han empleado espesores de carpeta asfáltica, relativamente delgados.

En general, se considera que el agrietamiento por fatiga es más un problema estructural, que uno de materiales, ya que es provocado por un número de factores que tienen que ocurrir simultáneamente: cargas pesadas repetidas, drenaje pobre de la subrasante, un diseño o construcción deficiente de las capas del pavimento, o que el número de cargas para el que se diseñó fue excedido (NCAT, 2006).

En otros casos, la fisuración por fatiga es sólo un signo que un pavimento ha alcanzado el número de cargas para el cual fue diseñado; esto no sería necesariamente una falla, sino la progresión natural de una estrategia de diseño del pavimento. Algunas medidas expresadas por el ingeniero Hernández Adalberto para evitar la figuración por fatiga (2006):

- Estimación adecuada del número de ejes equivalentes en la etapa de diseño.
- Mantener por todos los medios posibles seca la subrasante
- Pavimentos con espesores adecuados de tal forma que no permitan grandes deflexiones en la estructura.
- Utilizar materiales que no sean excesivamente débiles ante la presencia de humedad.
- Emplear materiales en el pavimento.

En el año 2007 en una publicación Técnica del Instituto Mexicano del Transporte la ingeniera Natalia Pérez García estudio el comportamiento del agregado mineral, evidenciando que los materiales pétreos utilizados para la producción de concreto asfáltico no tienen algún tipo de tratamiento antes de la utilización. La aplicación de procesos al agregado mineral, tienen como esencia optimizar ciertas características de la mezcla asfáltica; estos métodos pueden ser el lavado del agregado, el cribado y la trituración parcial o total [18].

Aparte de la fuente (origen mineralógico) se espera que el agregado suministre una resistencia pétreo para soportar las frecuentadas aplicaciones de carga. Agregados de textura rugosa, dan más firmeza que los redondeados (Figura No. 5). Aunque una pieza de agregado redondeado podría poseer la misma resistencia interna de una pieza angular, las partículas angulares tienden a cerrarse más apretadamente, resultando una fuerte trabazón de las partículas, a diferencia de lo que ocurre con las partículas redondeadas, ya que tienden a deslizarse unas sobre otras.

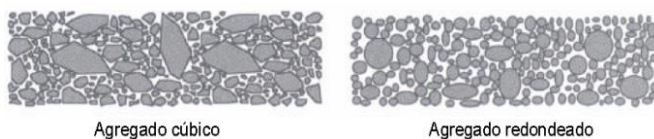


Figura No. 5. Estructura pétreo de la mezcla (fuente propia).

Cuando una masa de agregados es cargada (Figura 6), puede generarse dentro de la masa un plano por el que las partículas sean deslizadas o cizalladas unas respecto a otras, lo cual resulta en una deformación permanente de la masa.

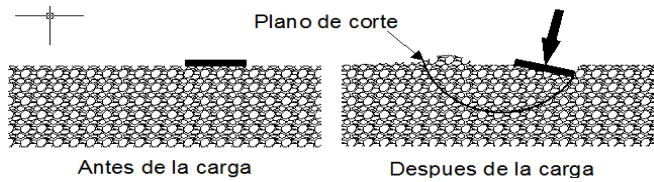


Figura No. 6. Comportamiento del agregado a la carga de corte. En la izquierda el pavimento en estado original y en la derecha cuando falla al estar sometido a una carga. (Fuente Propia).

Es en este plano, donde las tensiones de corte exceden a la resistencia al corte de la masa de agregados. La resistencia al corte del agregado pétreo es de crítica importancia en el desempeño de una carpeta asfáltica, ya que provee en gran medida la resistencia a la deformación permanente de la mezcla.

El comportamiento a la resistencia al corte de los agregados con superficies fracturadas y de los agregados lisos se puede observar fácilmente en las pilas de acopio, en que los agregados triturados forman pilas más empinadas y estables que los redondeados (Figura 7). Los ángulos de reposo son mayores en los materiales con caras fracturadas.

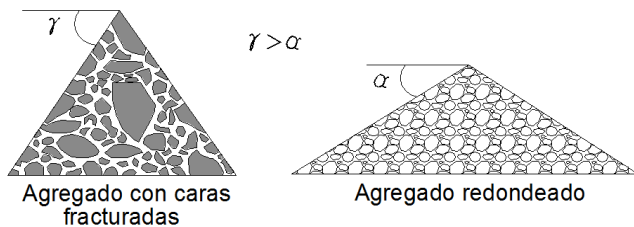


Figura No. 7. Comportamiento de los agregados en las pilas de acopio. (Fuente Propia).

De acuerdo con la teoría de Mohr-Coulomb, la resistencia al corte de una mezcla de agregados depende de que tanto estén unidas las partículas del agregado (Cohesión), la tensión normal a que están sometidos los agregados, y la fricción interna de los agregados.

Una masa de agregados tiene relativamente baja cohesión. Así, la resistencia al corte depende principalmente de la oposición al movimiento que ofrecen los agregados. Además, cuando es cargada, la masa de agregados tiende a ser más fuerte porque la tensión resultante tiende a unir a los agregados más estrechamente entre sí, lo que ocasiona que la resistencia al corte en la masa de agregados aumente.

El ángulo de fricción interna indica la capacidad del agregado para entrelazarse y así crear una masa de agregados casi tan fuerte como las partículas individuales. Para asegurar una mezcla de materiales resistente a emplear en la elaboración de un concreto asfáltico, se deben especificar propiedades del agregado que mejoren la fricción interna de la mezcla de agregados; esto se logra normalmente recurriendo a porcentajes de caras fracturadas en el material grueso que integra la mezcla.

Es necesario identificar los tipos básicos de deterioros que el ingeniero trata de evitar: la fisuración por baja temperatura, la fisuración por fatiga, y la deformación permanente.

En la última década el ing. Hugo Rondón de la Universidad Francisco de Paula Santander 2007, analizó e hizo un artículo del estado del arte en Colombia con respecto al agrietamiento por baja temperatura. Caracterizó la aparición de fisuras transversales que se producen con un espaciamiento notablemente uniforme en las vías de Colombia fisuración perpendicular al eje del camino, por lo general no se asocia a las cargas del tránsito. Cuando la carpeta se encuentra sobre una losa de concreto asfáltico, el fenómeno puede atribuirse a la reflexión de las grietas que existen en la losa como se muestra en la fotografía No. 4 [19].



Fotografía No. 4. Agrietamiento por baja temperatura (Rondón 2012).

La carpeta se contrae debido a las bajas temperaturas, originando esfuerzos de tensión dentro de la capa; en algún lugar a lo largo de la carpeta se excede la resistencia a la tracción, y la capa asfáltica se fisura. Las mezclas asfálticas elaboradas con un cemento asfáltico de naturaleza dura o propensa a la oxidación, serán más susceptibles a presentar este tipo de deterioro.

Se ha visto que el empleo de ligantes blandos y resistentes al envejecimiento, reducen la fisuración por baja temperatura; también es importante lograr mezclas asfálticas impermeables con un contenido de vacíos de aire adecuado, con el propósito de que el cemento asfáltico que constituye la mezcla no resulte excesivamente oxidado [20].

La deformación se produce por la aplicación repetida de carga a la subrasante, la sub-base, o la base por debajo de la carpeta asfáltica y aunque el empleo de materiales más rígidos reduce parcialmente este tipo de deformación, el fenómeno normalmente se considera más como un problema estructural de materiales.

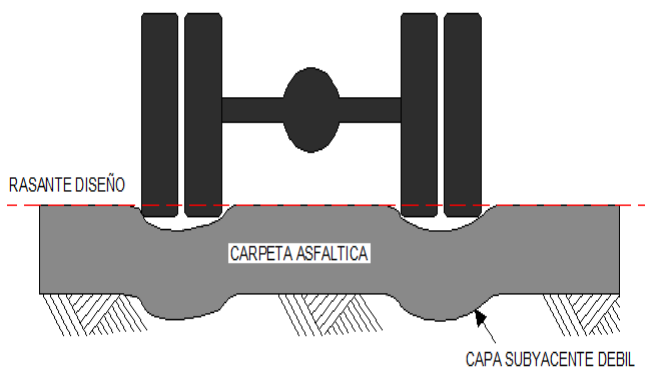


Figura No. 8. Deformación permanente debido a una capa subyacente débil. (Fuente Propia).

Frecuentemente es el resultado de una sección de pavimento demasiado delgada, sin la suficiente profundidad para reducir a niveles tolerables la tensión sobre la subrasante cuando las cargas se aplican. Podría ser también producto de una subrasante debilitada por el ingreso inesperado de humedad como se muestra en la figura No. 8.

Cuando una mezcla asfáltica presenta roderas, es evidente que su resistencia al corte es demasiado baja para resistir las cargas repetidas a las que está sujeta. La deformación por corte se caracteriza por un movimiento de la mezcla hacia abajo y lateralmente (Ver figura No. 9).

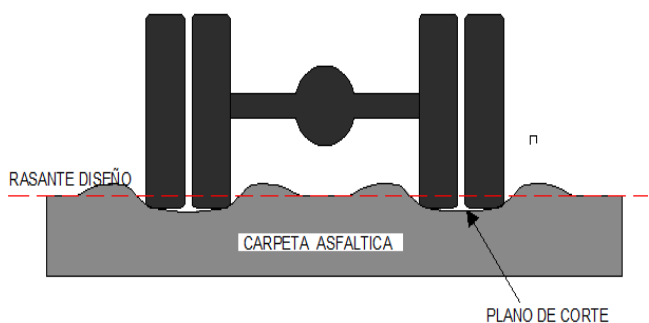


Figura No. 9. Deformación permanente debido a una mezcla asfáltica débil. (Fuente Propia).

Las superficies de rodamiento que presentan este tipo de problema representan un peligro para el usuario, ya que los surcos que se forman retienen suficiente agua como para provocar hidroplaneo o acumulación de hielo.

Entre otras investigaciones en Colombia está la del Profesor Fredy Reyes de la Universidad Javeriana (2010), sobre el comportamiento reológico de la mezcla asfáltica donde muestra las mezclas asfálticas como materiales cuyo comportamiento mecánico no depende sólo de la magnitud de las tensiones resistidas, sino también de la forma en que éstas se aplican; en particular de la temperatura, y de la velocidad de aplicación. La ciencia de los materiales que estudia estas características es la reología. Su comportamiento reológico es bastante complejo y para su estudio hay que adoptar soluciones más o menos aproximadas que en general, consideran las mezclas como materiales viscoelásticos lineales y termo reológicamente simples. Esto significa que las variables temperatura y tiempo de aplicación de carga son intercambiables; es decir, que su influencia es equivalente; es análogo, por ejemplo, considerar unas bajas temperaturas o unos tiempos de aplicación de carga pequeños [21].

### III. DISCUSIÓN ACERCA DEL ESTADO DEL ARTE ACTUAL SOBRE LAS DEFORMACIONES PERMANENTES Y FATIGA EN C.A.

La deformación permanente en mezclas asfálticas es el resultado de la combinación de dos factores: la densificación de la mezcla (disminución de volumen), y la deformación plástica por esfuerzos de corte. En estudios de diseño de la AASHTO e investigaciones más recientes realizadas con equipos de ruedas cargadas (Hofstra y Klomp 2010), indican que la deformación plástica (sin cambio de volumen) por esfuerzo de corte, es por mucho el principal mecanismo de deformación permanente [22].

De igual manera equivale a la acumulación de pequeñas deformaciones generadas con cada aplicación de carga. Esta deformación es irre recuperable. La aparición de roderas en un pavimento flexible se debe principalmente a dos causas: deformación permanente en las capas subyacentes y/o deformación permanente en la carpeta asfáltica. La deformación permanente en pavimentos flexibles equivale a la acumulación de pequeñas deformaciones generadas con cada aplicación de carga. Valdés y Pérez (2013). Contribuyen en información al tema objeto de este artículo, con un nuevo procedimiento para evaluar el comportamiento a fatiga en pavimentos asfálticos a través del ensayo Fénix, realizado en cuatro tipos de mezclas; el cual consiste en aplicar un esfuerzo de tracción a media probeta cilíndrica de mezcla asfáltica, fabricada por el ensayo Marshall y seccionada en su plano diametral, permitiendo evaluar la tenacidad y la resistencia a la fisuración de las mezclas asfálticas a través del cálculo de la energía disipada en el proceso de fractura. La principal conclusión obtenida de los resultados de esta investigación fue que la metodología propuesta basada en el ensayo Fénix permite evaluar la vida a fatiga de una estructura de pavimento por medio de un procedimiento sencillo [23].

#### IV. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Las investigaciones adelantadas en distintas partes del mundo sobre las deformaciones permanentes y fatiga en C.A. (Concreto asfáltico) nos brindan una posibilidad de predecir el comportamiento mecánico de resistencia a las deformaciones permanentes y número de repeticiones de carga, además de poder concebir una deformación permanente en el periodo de diseño de un pavimento, poder pronosticar cual va a ser la deformación acumulada total en 20 años que por lo general son los periodos de diseños de pavimentos en nuestro medio, y es además un reto para el ingeniero poder predecir cuál es la deformación que se va a tener en la estructura de pavimento. Teniendo en cuenta que esto exige conocer y caracterizar en el laboratorio, los materiales de mezcla asfáltica que es la unión del agregado pétreo y el ligante asfáltico además de la BG, SBG y subrasante cumpliendo cada uno los requisitos de calidad de cada una de las capas de la estructura como lo exige el INVIAS. Además el ingeniero tiene la responsabilidad de diseñar por medio de estrategias de conservación con modelos de deterioro como en la actualidad el banco mundial lo exige como por ejemplo el HMD4.

Se puede decir también que la deformación permanente muestra tres fases: la inicial es prácticamente instantánea, se determina en los inicios de ciclos de carga continuamente se da la pauta que puede apreciarse como transitoria, en la que la deformación se almacena progresivamente durante los ciclos de aplicación de la carga; y definitivamente, se tiende a un estado estable en el que deformación es muy pequeña; desde este instante, la concentración de carga ya no tiene consecuencia en la deformación.

Ahora bien, teniendo en cuenta que en nuestro país son pocas las investigaciones efectuadas sobre este fenómeno, un punto importante que existe es la falta de recursos por parte de las instituciones, argumentado en el bajo presupuesto asignado para investigación y los altos costos de dicho análisis. Además, no se cuenta con los equipos necesarios y apropiados para realizar los estudios pertinentes como es el caso de México que posee grandes avances en esta materia.

#### AGRADECIMIENTOS

El presente artículo es un esfuerzo grandísimo en el cual, directa o indirectamente, participaron varias persona leyendo, opinando, corrigiendo, dando ánimo, acompañando en todos y cada uno de los momentos.

Agradecemos primero que todo a Dios.

A la Universidad La Gran Colombia, a la Oficina de Relaciones Internacionales (ORI) en Colombia y al Tecnológico de Monterrey sede Chihuahua en México, quienes con su gestión y esfuerzo lograron establecer la

alianza estratégica para poder realizar el seminario Internacional sobre Geotecnia Aplicada en Obras de Infraestructura y que nos dio la oportunidad de escalar otro peldaño más en nuestra vida profesional.

A los docentes Ing. Christian Camilo Gutiérrez y Roy Morales Pérez por la paciencia, dedicación y continuo apoyo en la dirección de este trabajo. De igual manera a los docentes Ing. Mateo Gutiérrez e Ing. Leonel Barrientos por sus comentarios, explicaciones y apoyo incondicional para la elaboración de este proyecto.

A nuestras familias que nos acompañaron en esta aventura que significo la Ingeniería Civil y que, de forma incondicional, entendió las ausencias y el esfuerzo que se realizó.

#### REFERENCIAS

- [1] Secretaría Distrital de Ambiente-SDA. 2014. Atlas ambiental de Bogotá D.C.: Imprenta Nacional de Colombia <[www.habitatbogota.gov.co](http://www.habitatbogota.gov.co)>Página web consultada el 10 de enero 2015.
- [2] IDU–Instituto de Desarrollo Urbano. Especificaciones generales de Construcción de carreteras. Bogotá D.C. (2005).
- [3] INVIAS – Instituto Nacional de Vías. (2007), Normas para Carreteras. V. I y II. Bogotá D.C.
- [4] Ministerio De Transporte. (2008), <[www.mintransporte.gov.co/descargar.php?idFile=4305](http://www.mintransporte.gov.co/descargar.php?idFile=4305)>Página web consultada el 05 de enero 2015.
- [5] Airey G. D, State of the art report on ageing test methods for bituminous pavement materials. International Journal of Pavement Engineering 4, No 3, 165-176. (2003).
- [6] Téllez Gutiérrez Rodolfo, Villamil Jorge. “Catálogo de deterioros en pavimentos flexibles de carreteras mexicanas” Secretaría de Comunicaciones y Transportes. Instituto Mexicano del Transporte. Publicación Técnica No 21, Sanfandila, Qro (1991).
- [7] Shami, H. I. Evaluating permanent deformation in asphalt concrete using georgia loaded wheel tester (Order No. 9709754). Available from ProQuest Dissertations & Theses Global. (304287946). <http://search.proquest.com/docview/304732200?accountid=11643>. (1996).
- [8] Garnica Anguas Paul. Pavimentos flexibles. Problemática, metodologías de diseño y tendencias. Secretaría de Comunicaciones y Transportes. Instituto Mexicano del Transporte. Publicación Técnica No. 104 Sanfandila, Qro. (1998).
- [9] Ghuzlan, K. A. Fatigue damage analysis in asphalt concrete mixtures based upon dissipated energy concepts (Order No. 3030432). Thesis. Available from ProQuest Dissertations & Theses Global. (250901836). <http://search.proquest.com/docview/304732200?accountid=11643>. (2001).
- [10] Garnica Anguas Paul, Pérez García Natalia. Influencia de las condiciones de compactación en las deformaciones permanentes



- de suelos cohesivos utilizados en la construcción de pavimentos. Secretaría de Comunicaciones y Transportes. Instituto Mexicano del Transporte. Publicación Técnica No. 165. Sanfandila, Qro. (2001).
- [11] Smith, B. J. Low-temperature and dynamic fatigue toughening mechanisms in asphalt mastics and mixtures (Order No. MQ55931). Available from ProQuest Dissertations & Theses Global. (304732200). Retrieved from <http://search.proquest.com/docview/304732200?accountid=11643>. (2001).
- [12] Garnica Anguas Paul, Gómez López José Antonio y Sesma Martínez Jesús Armando. "Mecánica de materiales para pavimentos", Secretaría de Comunicaciones y Transportes. Instituto Mexicano del Transporte. Publicación Técnica No 197, Sanfandila, Qro (2002).
- [13] Bahuguna, Saurabh. Permanent deformation and rate effects in asphalt concrete: Constitutive modeling and numerical implementation. Case Western Reserve University, ProQuest, UMI Dissertations Publishing, 3086232. (2003).
- [14] Garnica Anguas Paul, Báez Andrade Francisco. Evaluación de la pérdida de resistencia en concretos asfálticos por contacto de sustancias agresivas. SCT. Instituto Mexicano del Transporte. Publicación Técnica No. 171. Sanfandila, Qro,
- [15] Sandoval Sandoval Carlos Daniel. Análisis comparativo de los métodos Marshall y SUPERPAVE para compactación de mezclas asfálticas. Secretaría de Comunicaciones y Transportes. Instituto Mexicano del Transporte. Publicación Técnica No 271 Sanfandila, Qro. (2005).
- [16] Federal High way Cost A location Retrieved, from [www.fhwa.dot.gov](http://www.fhwa.dot.gov). (1997)
- [17] Hernández Ortiz Adalberto. "Análisis de varianza del efecto de algunos factores que influyen en la deformación permanente de mezclas asfálticas" Secretaría de Comunicaciones y Transportes. Instituto Mexicano del Transporte. Publicación Técnica No 272, Sanfandila, Qro. (2006).
- [18] Pérez García Natalia. "Mecánica de materiales para pavimentos", Secretaría de Comunicaciones y Transportes. Instituto Mexicano del Transporte. Publicación Técnica No 197, Sanfandila, Qro. (2007).
- [19] Rondón Quintana Hugo Alexander, Reyes Lizcano Fredy Alberto. Metodologías de diseño de pavimentos flexibles: tendencias, alcances y limitaciones. Ciencia e Ingeniería Neogranadina, Vol. 17-2, pp. 41-65. Bogotá, Diciembre de 2007. ISSN 0124-8170. Recuperado de <http://www.umng.edu.co/documents/63968/74787/17n2art3.pdf>. (Diciembre de 2007).
- [20] Rondón Hugo Alexander, Reyes Fredy Alberto, Ariel Vacca Hermes. "Caracterización dinámica de una mezcla asfáltica sometida a las condiciones ambientales de Bogotá". Revista EIA, ISSN 1794-1237 Número 14, p. 135-145. Escuela de Ingeniería de Antioquia, Medellín (Colombia). (Diciembre 2010).
- [21] Reyes Lizcano Fredy Alberto, Reyes Ortiz Oscar Javier, Camacho Tauta Javier Fernando, "Influencia de la temperatura y nivel de energía de compactación en las propiedades dinámicas de una mezcla asfáltica". Revista EIA ISSN: 1794-1237. Editorial: Escuela de Ingeniería de Antioquia, Colombia v.36 fasc.1 p.121 - 130, (2006).
- [22] Hofstra y Klomp. Prediction of Permanent Deformation of Pavement Base and Subgrade Materials under Accelerated Loading. International Journal of Pavement Research and Technology. Vol.4 No.4, (Jul. 2010).
- [23] Valdés, G., A.V., Pérez-Jiménez, F.,E., & Botella, R. N. Nuevo procedimiento para evaluar el comportamiento a fatiga en pavimentos asfálticos a través del ensayo Fénix/New procedure to assess the fatigue behavior in asphalt pavements by fénix test. Ingeniare: Revista Chilena De Ingeniería, 21(3), 362-371. Retrieved from. (2013).
- [24] Carvalho, R. L. E. d. Prediction of permanent deformation in asphalt concrete (Order No. 3517762). Available from ProQuest Dissertations & Theses Global. (1033562201). Retrieved from <http://search.proquest.com/docview/1033562201?accountid=11643> (2012).
- [25] Didier Bodin, Gilles Pijaudier-Cabot, Member, ASCE, Chantal de La Roche and Jean-Michel Piau. "A continuum Damage Approach of Asphalt Concrete Fatigue Tests", 15th ASCE Engineering Mechanics Conference, Columbia University, New York. (Junio 2-5 de 2002).
- [26] Park, D. Characterization of permanent deformation in asphalt concrete using a laboratory prediction method and an elastic-viscoplastic model (Order No. 3131367). Available from ProQuest Dissertations & Theses Global. (305076292). Retrieved from <http://search.proquest.com/docview/305076292?accountid=11643>. (2004).
- [27] Lefevre C. de La Roche and J.-M. Piau, Asphalt material fatigue test under cyclic loading: the lengthening of samples as a way to characterize the material damage experiments and modeling. Volume 38, Issue 1, pp 115-119. (January-February 2005)
- [28] Montejo Fonseca Alfonso. Ingeniería de pavimentos. Tomo I. Fundamentos, estudios básicos y diseño. Editorial: Universidad Católica de Colombia. Tercera Edición. (2006).
- [29] Montejo Fonseca Alfonso. Ingeniería de pavimentos. Tomo II. Ensayos de Materiales para Carreteras. Editorial: Universidad Católica de Colombia. Tercera Edición. (2006).
- [30] Fredy Alberto Reyes Lizcano, Juan Ricardo Troncoso Rivera. Efecto de la presión de contacto y la temperatura en el ahuellamiento de una mezcla asfáltica. Pontificia Universidad Javeriana. Ingeniería y Universidad, vol. 10, núm. 1, enero-junio de 2010, p. 0, Colombia.
- [31] Salgado Barra Brano, MSc., Momm Leto, Bariani Bemucci Leidi Lligi, D. "Influencia de la graduación de los agregados a la de formación permanente" Infraestructura Vial, (2006) Vol 8 (#15).