

BOLETÍN TÉCNICO

PITRA-LanammeUCR

Volumen 11, N.º 6, Agosto 2020

El fenómeno de la deformación permanente y la evolución de ensayos en ligantes asfálticos

Ing. Rafael Ernesto Villegas Villegas

rafael.villegas@ucr.ac.cr

Unidad de Investigación en Infraestructura del Transporte (UIIT)

1. Introducción

En general, la principal característica que se busca del asfalto es su desempeño y su trabajabilidad a las condiciones de diseño. La metodología de análisis a utilizar para el control de calidad va en función no sólo de un mejor proceso productivo de los asfaltos, sino que debe dar una explicación exhaustiva de los parámetros obtenidos y, estos a su vez, deben predecir el comportamiento del asfalto bajo sus distintas condiciones de servicio en campo (Villegas et al., 2012).

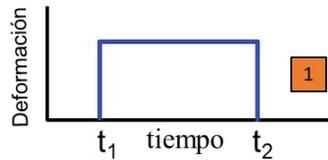
En este boletín se presenta un resumen de este trabajo, el cual está planteado para que el lector pueda comprender el fenómeno de deformación permanente y con base en esto, dilucidar la dinámica que ha conllevado a la evolución en los ensayos de control de calidad del asfalto.

2. El fenómeno de la deformación permanente en asfaltos

La deformación permanente de un pavimento es producto de la acumulación de deformación no recuperable ante la aplicación de cargas repetidas de tráfico y la contribución del asfalto la cual puede ser evaluada mediante la aplicación de cargas repetidas. Por medio de la selección de los periodos de carga y descarga se pueden modelar efectivamente las velocidades del tráfico y las diferentes condiciones de cargas de tránsito de acuerdo con los rangos de esfuerzos aplicados.

Cuando se habla de deformación permanente en asfalto y su forma de estudiarla, surgen a la memoria dos teorías que marcan la formación del ingeniero:

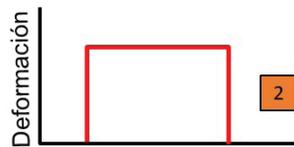
- La teoría clásica de la elasticidad: considera las propiedades mecánicas de los sólidos elásticos de acuerdo con la Ley de Hooke, puesto que la mayoría de los materiales con los que se construye son sólidos (es la primera a la que se recurre para tratar de explicar el fenómeno), se considera según la mecánica de sólidos que la deformación conseguida es directamente proporcional al esfuerzo aplicado, es decir, a mayor esfuerzo mayor deformación.
- Por otra parte, se podría asumir la respuesta del material según las propiedades de los líquidos viscosos para los que, de acuerdo con la ley de Newton, el esfuerzo aplicado es directamente proporcional a la velocidad de deformación, pero independiente de la deformación misma. En otras palabras, es una respuesta que es dependiente del tiempo, lo que confiere al material un comportamiento diferencial.



Respuesta en los Extremos Clásicos

Sólido Elástico

- Deformación para $t > t_1$ es constante
- Deformación para $t > t_2$ es 0



Líquido Viscoso

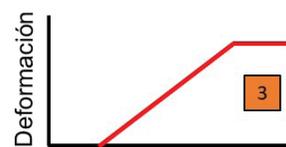


Figura 1. Respuesta de los materiales elásticos y viscosos ante un esfuerzo.

En la Figura 1 anterior se puede observar en el gráfico 1, como en t_1 se aplica un esfuerzo y en t_2 dicho esfuerzo cesa por completo. Si aplicáramos el esfuerzo anteriormente descrito ante un sólido elástico (acero), no excediendo de su punto de cedencia, dicho material sufriría una deformación instantánea entre t_1 y t_2 , pero una vez la carga cesa, el material experimenta una recuperación instantánea y total (gráfico 2). El gráfico 3 hace referencia a un líquido viscoso (aceite), como se observa su tasa de deformación es diferencial (varía en el tiempo), pero al cesar la carga el material queda permanentemente deformado y no tiene capacidad de recuperación.

El asfalto es un material viscoelástico con un comportamiento más complejo que los analizados anteriormente, esto quiere decir que su comportamiento se rige por una mezcla entre la mecánica de sólidos y la mecánica de fluidos. Desde el punto de vista mecánico, el asfalto es un material que a temperaturas bajas se comporta casi como un sólido y a temperaturas altas se comporta casi como un líquido o material fluido, pero que, por lo general, a temperaturas intermedias, presenta un comportamiento viscoelástico, o sea, un comportamiento entre sólido y líquido.

En cuanto a los materiales viscoelásticos, tal como se presenta en la Figura 2, el comportamiento de estos a deformaciones muy bajas, cercanas al equilibrio, presentan una relación lineal entre esfuerzo y deformación, encontrándose en la zona denominada como de viscoelasticidad lineal. Para deformaciones mayores, dicha relación deja de ser lineal y se alcanza la denominada zona de viscoelasticidad no lineal.

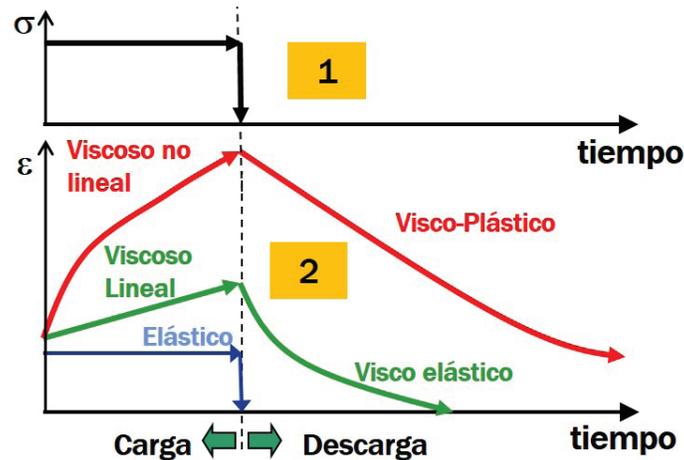


Figura 2. Respuesta de los materiales viscoelásticos ante un esfuerzo.

En la Figura 2 en el gráfico 1, se observa una carga constante la cual cesa completamente en un instante t . Es importante tener claro que el comportamiento de los materiales viscoelásticos está regido de acuerdo con la característica de carga aplicada, tal y como lo muestra el gráfico 2 de la figura anterior:

- Cuando la carga es sumamente pequeña y el nivel de deformación es muy bajo, el comportamiento del material es el de un pseudo sólido, con una respuesta pseudo elástica, en la cual su recuperación es casi completa, en donde se podría considerar una respuesta independiente del tiempo (gráfico azul).
- Cuando se trabaja en la región viscosa lineal (gráfico verde), el módulo complejo (G^*), permanece constante ante los esfuerzos, por tanto, las deformaciones viscoelásticas son recuperables y dependientes del tiempo. Dado que la respuesta del material está asociada a su respuesta molecular, esta región también conocida como Región Lineal Viscoelástica (LVR), es utilizada para diseñar la mayoría de los ensayos de caracterización de materiales viscoelásticos, entre ellos, los asfaltos.
- En la región viscosa no lineal, el comportamiento plástico genera una destrucción de interacciones moleculares, por lo que las deformaciones visco-plásticas son dependientes del tiempo y permanentes, llegando a un punto tal, que dichas deformaciones ya no tienen capacidad de recuperar, convirtiéndose en deformaciones plásticas, entrando en zona de flujo, las cuales son independientes del tiempo.

3. Evolución de ensayos en ligantes

3.1. Grado de desempeño, PG (Performance Grade)

Durante los años 90 en Estados Unidos, como resultado de estudios del Programa Estratégico de Investigación de Carreteras (SHRP por sus siglas en inglés), se dio un salto significativo en las metodologías de caracterización de ligantes asfálticos. Dichos estudios resultaron en la metodología Superpave®, la cual fue altamente novedosa en términos de caracterización de ligantes asfálticos puesto que se incorporó el concepto de desempeño del ligante y el efecto de la temperatura en el mismo, algo que las metodologías previas de caracterización de ligantes (ej. penetración, viscosidad) no consideraban directamente (McGennis et al., 1994; McGennis et al., 1995; West et al., 2010).

El Grado de Desempeño (PG por sus siglas en inglés), establece un rango de temperaturas dentro de las cuales el asfalto se comporta de manera adecuada. Este rango debe ser comparado con las temperaturas extremas de la zona donde se ubicará el proyecto y de esta manera definir si el asfalto es apto para ser utilizado.

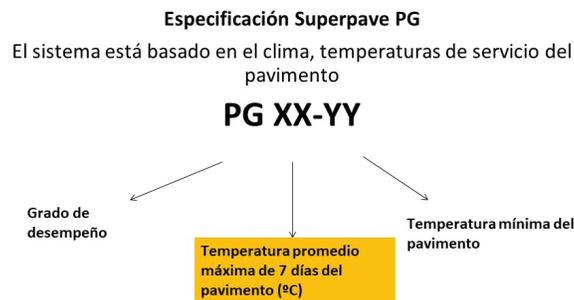


Figura 3. Esquema de clasificación de PG.

En la Figura 3 se muestra de manera sencilla como se clasifica el asfalto de acuerdo al PG, en donde XX se refiere a su temperatura máxima (amarillo), la cual determina la máxima temperatura en donde el asfalto resiste a la deformación permanente según diseño. Importante tener presente, que al hablar de máxima temperatura no se refiere a la temperatura ambiente, está referida a la temperatura máxima del pavimento, la cual suele ser mucho mayor que la ambiente.

El reómetro es utilizado para caracterizar el comportamiento viscoelástico de los ligantes asfálticos. Los ensayos de PG en el asfalto para evaluar la deformación, se diseñaron para ser evaluados en la Región Lineal Viscoelástica (LVR), las condiciones de ensayo son:

- Deformación controlada 12% para asfaltos originales y 10% para asfaltos provenientes de RTFO.
- Velocidad de ensayo 10 rad/s.
- Temperatura depende del diseño.

El PG brinda información sobre el comportamiento a deformación del asfalto utilizando dos parámetros esenciales: el módulo de corte complejo (G^*) y el ángulo de fase (δ). G^* es la resistencia total del ligante a la deformación bajo carga. La deformación recuperable y no recuperable son dadas por el ángulo de fase, si el ángulo de fase es $\delta=90^\circ$ el asfalto es fluido por lo que no recuperará su forma, si es $\delta=0^\circ$, el asfalto será capaz de recuperar su forma (Takamura, 2002).

Esta relación de entre G^* y δ proporciona los parámetros de aceptación a deformación permanente de asfaltos según las ecuaciones:

- $G^* / \sin\delta > 1,0$ kPa, para asfaltos originales, o sea, el asfalto que procede de refinería.
- $G^* / \sin\delta > 2,2$ kPa para asfaltos envejecidos en el Horno de Película Delgada Rotacional (RTFOT), que simula el envejecimiento en planta y la compactación en carretera.

Entre las desventajas del método se tiene:

- PG se basa en el concepto de superposición tiempo-temperatura asumido igual para todos los asfaltos.
- PG establece temperaturas de pruebas cada 6°C en la parte alta, asumiendo una misma susceptibilidad térmica para todos los asfaltos.
- PG es conceptualmente inapropiado a altas temperaturas, sobre todo mayores a 76°C.
- Los asfaltos modificados se comportan de manera no lineal en esfuerzos menores a 0,8 kPa debido a la interacción de las fases polímero-modificado.

3.2. Creep and Recovery (Creep Repetido) o Fluencia y Recuperación

Superpave® con PG permite, concebir a los asfaltos desde el punto de vista de su comportamiento viscoelástico, integrando conceptos como temperatura real de desempeño, velocidad de carga, capacidad de recuperación del asfalto, introduciendo por primera vez el concepto de que los asfaltos se pueden diseñar.

Por otro lado, el PG mide solo el comportamiento del asfalto ante una carga puntual y como el lector conoce, el asfalto en carretera está expuesto al continuo transitar de los vehículos, en otras palabras, a cargas repetidas en las cuales se pone a prueba una y otra vez, la capacidad de deformarse y recuperarse del material.

Por ende, Creep and Recovery aplica carga durante 1 segundo hasta que la muestra alcance un nivel de deformación, luego la carga cesa y el asfalto tiene 9 segundos para recuperarse e inmediatamente la carga se vuelve a aplicar, algo similar a lo que sucede en una autopista de alto tránsito. Estos ciclos de carga y descarga se repiten el número de veces necesarias para hacer comparaciones significativas de deformación permanente acumulada, entre dos o más asfaltos.

En el Creep and Recovery el ensayo se podría descomponer en dos etapas:

- **CREEP**, el esfuerzo o carga se aplica a la muestra instantáneamente, t_1 , y se mantiene constante por un tiempo definido. La deformación (strain) es monitoreada en función de tiempo $\gamma(t)$.
- **RECOVERY**, el esfuerzo se reduce a cero, t_2 , y la deformación es monitoreada en función de tiempo $\gamma(t)$.

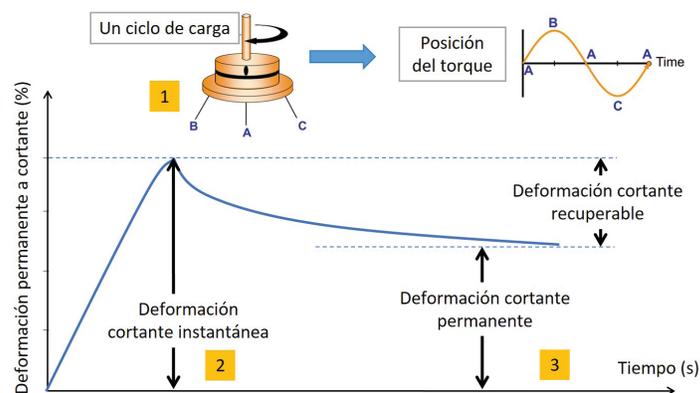


Figura 4. Ensayo de Creep and Recovery.

Si se observa la Figura 4, el ensayo a grandes rasgos se puede describir fácilmente:

- En 1, el Reómetro Dinámico de Cortante (DSR por sus siglas en inglés) aplica un ciclo de carga al asfalto mediante un esfuerzo de corte, en un periodo de 1 segundo.
- En 2, el asfalto experimenta una respuesta a deformación dependiente del tiempo hasta llegar a su deformación instantánea máxima, en este punto la carga cesa, lo cual marca el final del periodo de Creep. A partir de ahí comienzan los 9 segundos de reposo propios del periodo de Recovery.
- En 3, el asfalto ha recuperado, pero no al 100% por lo que muestra una deformación permanente producto del primer ciclo de carga.

El esfuerzo o carga se aplica repetitivamente según recomendaciones establecidas simulando condiciones de tráfico y se identifica la acumulación de deformación con el tiempo $\gamma(t)$, esto hasta encontrar diferencias significativas entre dos o más asfaltos, tal como se muestra en la Figura 5.

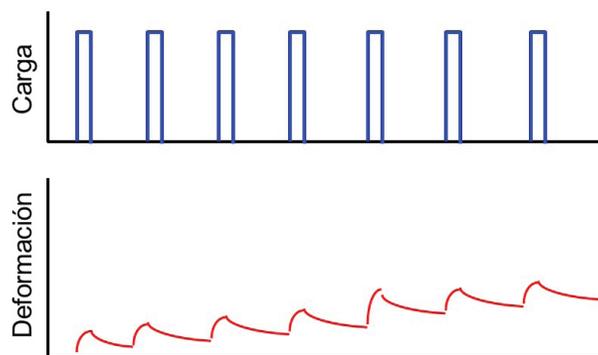


Figura 5. Ensayo de Creep and Recovery con varios ciclos de carga.

3.3. Multi Stress Creep and Recovery (MSCR)

El ensayo está basado en el **Creep and Recovery**, el cual es un método estándar y protocolizado donde el espécimen es sometido a una carga constante en un tiempo determinado para luego dejar que se relaje (recupere) con carga cero en un tiempo igualmente determinado, midiendo la respuesta elástica en un ligante asfáltico sometido a un esfuerzo cortante y recuperación, tal como se presenta en la Figura 6.

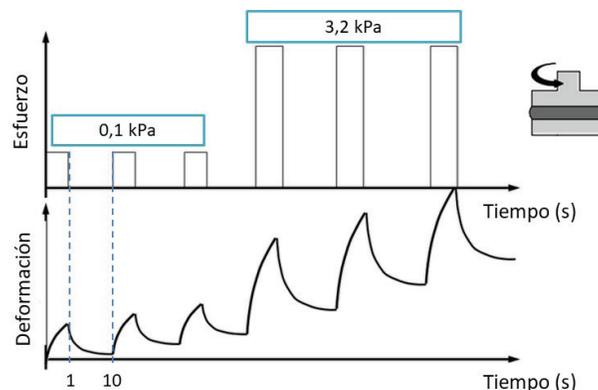


Figura 6. Ensayo de Multi Stress Creep and Recovery (MSCR).

Por otro lado, hay dos parámetros fundamentales propios del ensayo, los cuales brindan información determinante y es preciso conocerlos:

- **Percent Recovery:** Es una medida de cuánto puede recuperar la muestra luego de ser deformada en un tiempo determinado.
- **Non-Recoverable Creep Compliance (J_{NR}):** Es una medida de la deformación residual en el espécimen después del *Creep and recovery*, relativo al esfuerzo aplicado.

Entre los aspectos más relevantes del ensayo MSCR están:

Parámetros del ensayo:

- Asfalto envejecido en el RTFO.
- Equipo reómetro dinámico de cortante DSR, plato de 25 mm, 1 mm de espesor.
- Niveles de esfuerzo, 100 Pa y 3200 Pa.
- Esfuerzo aplicado por 1 s, recuperación de 9 s.
- Diez ciclos para cada nivel de esfuerzos.
- Temperatura de servicio.

El ensayo utiliza el Reómetro Dinámico de Cortante (DSR) para llevar a cabo el ensayo de esfuerzo cortante repetido bajo condiciones de temperatura y carga típicas del pavimento en el campo. Este método permite determinar la componente viscosa de la rigidez. La deformación permanente de un pavimento es producto de la acumulación de deformación no recuperable, ante la aplicación de cargas repetidas de tráfico y la contribución del asfalto puede ser evaluado mediante la aplicación de cargas repetidas. Por medio de la selección de los periodos de carga y descarga se pueden modelar efectivamente las velocidades del tráfico y las diferentes condiciones de cargas de tránsito mediante los rangos de esfuerzos aplicados (Elizondo et al., 2010).

El gran aporte del ensayo MSRC es que introduce una relación entre la deformación resultante en el asfalto a una determinada temperatura y el tránsito al cual va a estar sometida (en ejes equivalentes). Esto se logra sometiendo el material a dos ciclos de esfuerzo controlado, con el fin de determinar su idoneidad para el proyecto donde va a ser utilizado.

Parámetros reportados:

- Promedio del porcentaje de recuperación a los 100 Pa y 3200 Pa
- Diferencia porcentual entre la recuperación a los 100 Pa y los 3200 Pa
- El creep compliance (JNR) a los 100 Pa y 3200 Pa
- Diferencia porcentual entre el JNR a 100 Pa y 3200 Pa

Nuevo Sistema de Grado de Desempeño PG (MSCR)			
J_{NR}	Se utiliza para determinar el grado de desempeño del ligante. Ligantes asfálticos modificados y sin modificar.		
	Condición	$J_{NR} @ 3,2 \text{ kPa}$	$\frac{J_{NR} @ 3,2 \text{ kPa} - J_{NR} @ 0,1 \text{ kPa}}{J_{NR} @ 0,1 \text{ kPa}}$
	Tránsito estándar < 1 x 10 ⁷ ESALs	< 4	< 0,75
	Tránsito alto 1 x 10 ⁷ - 3 x 10 ⁷ ESALs	< 2	< 0,75
	Tránsito muy alto > 3 x 10 ⁷ ESALs	< 1	< 0,75

Una reducción de J_{NR} a la mitad típicamente genera una reducción de la mitad de la deformación.

Figura 7. Parámetros de ensayo de Multi Stress Creep and Recovery.

De la Figura 7 se observa como el valor $J_{NR} @ 3,2 \text{ kPa}$ que brinda el ensayo, es correlacionado con la condición del tránsito y la capacidad de soportar una determinada carga a la condición de temperatura que determina el ensayo, esto ligado a los requerimientos de proyecto.

Se ha mostrado que el creep compliance (J_{NR}) es un indicador de la resistencia de un ligante asfáltico a la deformación permanente bajo carga repetida.

4. Conclusión

El alto tránsito y las altas cargas hacen que los asfaltos se tengan que desempeñar cada vez a condiciones más extremas. Esto converge en el uso cada vez mayor de asfaltos modificados con polímeros, los cuales brindan un gran aporte a las características mecánicas que se le exigen al material. Conforme las exigencias al material fueron en aumento, producto del cambio en la dinámica del tránsito en carretera, los controles de calidad del asfalto han ido evolucionando hasta hacerse cada vez más exhaustivos, brindando condiciones cada vez más apegadas al comportamiento real de material en carretera.

Por tanto, la importancia del Método de prueba para Fluencia y Recuperación bajo Esfuerzo Múltiple (MSCR por sus siglas en inglés) de ligantes de asfálticos, evoluciona el concepto y el alcance del PG, puesto que basado en propiedades fundamentales del material, da la posibilidad de identificar la presencia de polímeros elastómeros en asfaltos modificados, pero además brinda el poder relacionar el efecto de la carga en la respuesta del asfalto, aspectos que no consideraban las metodologías anteriores.

5. Referencias

- Elizondo, F., Salazar, J., & Villegas, E. (2010). Caracterización de asfaltos modificados con diferentes aditivos. *Revista red Iberoamericana de innovación y conocimiento científico [en línea]*, 20 (1-2).
- McGennis, R.B.; Shuler, S.; Bahia, H.U. Background of SUPERPAVE Asphalt Binder Test Methods. Federal High25 Figura 11. Equipo para Espectrometría Infrarroja. Figura 12. Espectro Infrarrojo (FTIR) para ligante asfáltico con SBS. way Administration Report No. FHWA-SA-94-069. Washington, D.C., 1994.
- McGennis, R.B.; Anderson, R.M.; Kennedy, T.W.; Solaimanian, M. Background of SUPERPAVE Asphalt Mixture Design and Analysis. Federal Highway Administration Report No. FHWA-SA-95-003. Washington, D.C., 1995.
- Takamura K., (2002). Applications for Asphalt Modification. Polymer Dispersion and their Industrial Applications. Chapter 12. Pp. 301-327.
- Villegas, R. E., Aguiar, J. P., & Loría, L. G. (2012). Procedimientos para la caracterización de ligantes asfálticos modificados. *Asfalto y pavimentación*, 19-25.
- West, R.C.; Watson, D.E.; Turner, P.A.; Casola, J.R. Mixing and Compaction Temperatures of Asphalt Binders in Hot-Mix Asphalt. Transportation Research Board NHCPR Report 648. Washington, D.C., 2010.



LABORATORIO NACIONAL
DE MATERIALES Y MODELOS ESTRUCTURALES

PITRA

Programa de
Infraestructura del Transporte

Ing. Ana Luisa Elizondo Salas, M.Sc.
Coordinadora General - Programa de Infraestructura del Transporte

Unidad de Seguridad Vial y Transporte (USVT)

Ing. Javier Zamora Rojas, M.Sc.
Coordinador USVT

Unidad de Normativa y Actualización Técnica (UNAT)

Ing. Raquel Arriola Guzmán, M.Sc.
Coordinadora UNAT

Unidad de Investigación en Infraestructura del Transporte (UIIT)

Ing. Ana Luisa Elizondo Salas, M.Sc.
Coordinadora UIIT

Unidad de Gestión y Evaluación de la Red Vial Nacional (UGERVN)

Ing. Roy Barrantes Jiménez, M.Sc.
Coordinador UGERVN

Unidad de Gestión Municipal (UGM)

Ing. Erick Acosta Hernández
Coordinador UGM

Comité Editorial 2020:

- Ing. Ana Luisa Elizondo Salas, M.Sc., Coordinadora General PITRA.
- Ing. Raquel Arriola Guzmán, M.Sc. Unidad de Normativa y Actualización Técnica, PITRA.
- Rosa Isella Cordero Solano, Unidad de Normativa y Actualización Técnica, PITRA.

CENTRO DE TRANSFERENCIA TECNOLÓGICA

Diagramación: Licda. Daniela Martínez Ortiz.

Control de calidad: Óscar Rodríguez Quintana.

El fenómeno de la deformación permanente y la evolución de ensayos en ligantes asfálticos.

Palabras clave: asfalto, deformación permanente, viscoelasticidad, grado de desempeño, fluencia y recuperación.

(506) 2511-2500

✉ direccion@lanamme.ucr.ac.cr • www.lanamme.ucr.ac.cr