

# INTRODUCCIÓN A LOS MODELOS REOLÓGICOS DEL ASFALTO

Rafael Ernesto Villegas Villegas  
rafael.villegas@ucr.ac.cr  
Unidad de Materiales y Pavimentos

## I. INTRODUCCIÓN

El asfalto es un material viscoelástico que presenta susceptibilidad a la temperatura y a la frecuencia de carga. Adicionalmente, cuando se oxida, el material también tiende a ser susceptible a la falla de tipo frágil. Por tanto, métodos de caracterización del asfalto que se basan en mediciones puntuales de alguna propiedad empírica o fundamental, tienden a no ser apropiados para escoger asfaltos que se apeguen a los requisitos de demanda (esfuerzos y temperaturas) a que están sometidos los pavimentos en la actualidad (Villegas Villegas, Aguiar Moya, Loría Salazar, & Navas Carro, 2012). La utilización masiva de este material conlleva a la búsqueda de distintos métodos para controlar la calidad del mismo. Muchas de las teorías que se aplican actualmente están basadas en aspectos meramente empíricos, los cuales se toman como verdaderos sin una valoración profunda por parte de quienes la utilizan. Por tanto, para poder realizar un adecuado diseño o control de calidad del asfalto, es importante comprender la naturaleza propia del material, su comportamiento y su desempeño.

Habitualmente se está acostumbrado a materiales con comportamiento definido: por ejemplo, el acero el cual es resistente a la deformación y su comportamiento está estrictamente relacionado con su módulo. Los aceites a menudo tienen una tendencia al flujo, que se describe de forma exhaustiva con la mecánica de fluidos. La respuesta mecánica de los asfaltos es compleja, en ella coexisten fundamentos teóricos de la mecánica de fluidos y la mecánica de sólidos. El asfalto tiene un comportamiento viscoelástico y su comportamiento se debe a una interacción entre su componente elástica y viscosa, las cuales buscan el dominio en la respuesta del material.

Los modelos viscoelásticos han sido estudiados desde hace tiempo pensando en una amplia gama de materiales, que van desde los polímeros hasta los asfaltos. El estudio de la modelación mecánica del comportamiento viscoelástico de los materiales, se cimenta en trabajos realizados por Maxwell, Kelvin, Voigt, Burgers, entre otros (Holdsworth, 1971). Estos modelos ayudan a comprender como funciona el asfalto y como los cambios en la composición química, la velocidad de carga, el tipo de carga y el cambio en la temperatura afectan directamente la respuesta del material.

## II. MODELOS REOLÓGICOS DEL ASFALTO

El análisis de sistemas viscoelásticos se realiza mediante modelos provenientes de ecuaciones diferenciales lineales variantes en el tiempo. El motivo de este trabajo no consiste en el análisis matemático de los modelos, sino más bien, en una mejor comprensión del lector, de cómo es la respuesta del asfalto.

### Comité Editorial 2018:

- Ing. Luis Guillermo Loría Salazar, PhD, Coordinador General PITRA, LanammeUCR
- Ing. Raquel Arriola Guzmán, Unidad de Normativa y Actualización Técnica, PITRA, LanammeUCR

## Componente Elástica

En un material elástico cuando se aplica carga constante, la deformación es instantánea y proporcional a la carga aplicada. Este comportamiento se representa mediante un resorte, el cual se comporta según la ley de Hooke.

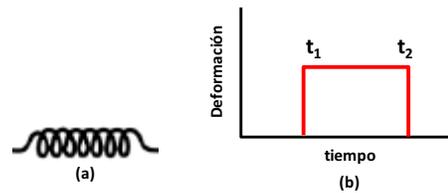


Figura 1. (a) Modelo elástico de resorte y (b) respuesta mecánica de un material elástico.

El resorte en la Figura 1(a), representa el comportamiento elástico del material, esto es, la capacidad que tiene este de retener su forma o de recuperarla, cuando el material producto del esfuerzo se deforma, pero tiene la capacidad de recuperarse. En la Figura 1(b), se muestra la respuesta de un material puramente elástico. Nótese como al aplicarse la carga el material llega a un nivel de deformación, pero cuando la carga cesa el material experimenta una recuperación total de su forma.

Por otro lado el comportamiento de la componente elástica está definido por el comportamiento típico del resorte, tal como se muestra en la Figura 2(a):

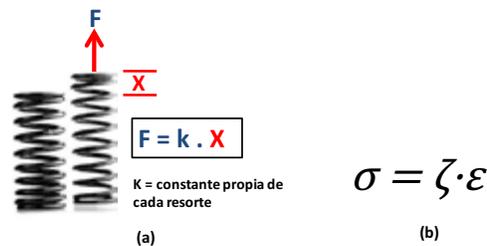


Figura 2. (a) Modelo físico del resorte y (b) ecuación viscoelástica del resorte.

En la Figura 2(b) se muestra la ecuación que representa la componente viscoelástica del resorte, donde  $\sigma$  es el esfuerzo aplicado,  $\epsilon$  la elongación y  $\zeta$  la constante de proporcionalidad del resorte. Para un elemento elástico puro, la deformación es inmediata y no depende de la variable tiempo (Bryan, 1999).

## Componente Viscosa

En un material viscoso cuando se aplica carga constante, la deformación depende de la capacidad de relajación del material. Matemáticamente la forma en que actúa la componente viscosa, está descrita por una ecuación diferencial en función del tiempo. Este comportamiento se representa mediante un émbolo o amortiguador, el cual se comporta según la ley de de Newton de la mecánica de fluidos.

El módulo de pérdida corresponde a la componente viscosa del módulo complejo de cortante, representa la parte imaginaria de la ecuación del módulo complejo de cortante. Cuanto menor sea el tiempo de respuesta del material ante la acción de un esfuerzo, menor será el módulo de pérdida.

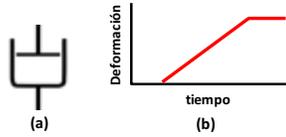


Figura 3. (a) Modelo émbolo o amortiguador y (b) respuesta mecánica de un material viscoso.

En la Figura 3(a) se denota el símbolo del émbolo o amortiguador. En la Figura 3(b), se muestra la respuesta de un material puramente viscoso, nótese como al aplicarse la carga el material llega a un nivel de deformación dado, pero cuando la carga cesa no experimenta una recuperación de su forma.

La componente viscosa es la que confiere al material la capacidad de fluir, esta componente es fácilmente influenciada por la temperatura, la velocidad y el tipo de carga que se aplique. El émbolo o compensador representa el comportamiento viscoso del material, esto es, la capacidad a fluencia del material. Cuando el material producto del esfuerzo se deforma, tiene poca o nula capacidad de recuperarse. Para un elemento puramente viscoso, su comportamiento se describe según la mecánica de fluidos de Isaac Newton (Georgiopoulos, 2015).

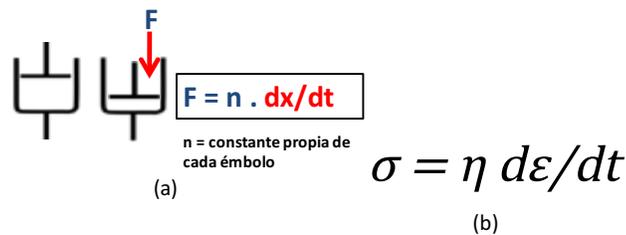


Figura 4. (a) Modelo físico del émbolo o amortiguador y (b) ecuación viscoelástica del émbolo o amortiguador.

Como se observa en la ecuación de la Figura 4(b), el esfuerzo ( $\sigma$ ) es proporcional a la velocidad de deformación ( $d\epsilon/dt$ ), donde la constante de proporcionalidad viene dada por la constante viscosa del fluido en el interior del émbolo ( $\eta$ ). La parte diferencial de la ecuación ( $d\epsilon/dt$ ), es análoga al tiempo que dura el fluido en un viscosímetro capilar, en desplazar una distancia acotada entre dos meniscos y la constante viscosa ( $\eta$ ), corresponde a la constante del viscosímetro. Por tanto la resolución matemática del amortiguador es más compleja, pues depende de una ecuación diferencial que contiene una parte imaginaria. Hay que recordar en este punto que cuanto menor sea el tiempo de respuesta del material ante la acción de un esfuerzo, menor será el módulo de pérdida.

### Modelo de Maxwell

Este modelo está basado en una combinación de un elemento elástico y un elemento viscoso en serie.

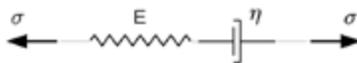


Figura 5. Modelo de Maxwell con elemento elástico y viscoso en serie (Loría, 2013).

Al aplicar un esfuerzo al material este ofrecerá una respuesta dual. Se produce primeramente en el material una respuesta elástica, de forma inmediata y no cambia con el tiempo. Seguidamente, el émbolo presenta un comportamiento de líquido viscoso y la deformación incrementa con el paso del tiempo. Por tanto, la variación de la deformación con el tiempo será proporcional a  $(\sigma/\eta)$ .

Cuando ambas componentes, tanto la elástica como la viscosa actúan en serie, la deformación total del material ( $\epsilon$ ) es la suma de la deformación elástica ( $\epsilon_1$ ) y la viscosa ( $\epsilon_2$ ). Siendo ( $\epsilon_1$ ) independiente del tiempo, en tanto que ( $\epsilon_2$ ) será creciente con el tiempo.

Cuando el material viscoelástico está a tensión constante, experimentará una deformación inmediata debido a la componente elástica ( $\epsilon_0 = \sigma_0/E$ ) y una deformación lineal creciente con el tiempo debido a la respuesta viscosa ( $\epsilon = \sigma_0 t/\eta$ ), siendo  $\sigma_0 t/\eta$  la pendiente de dicha recta (Ferry, 1980).

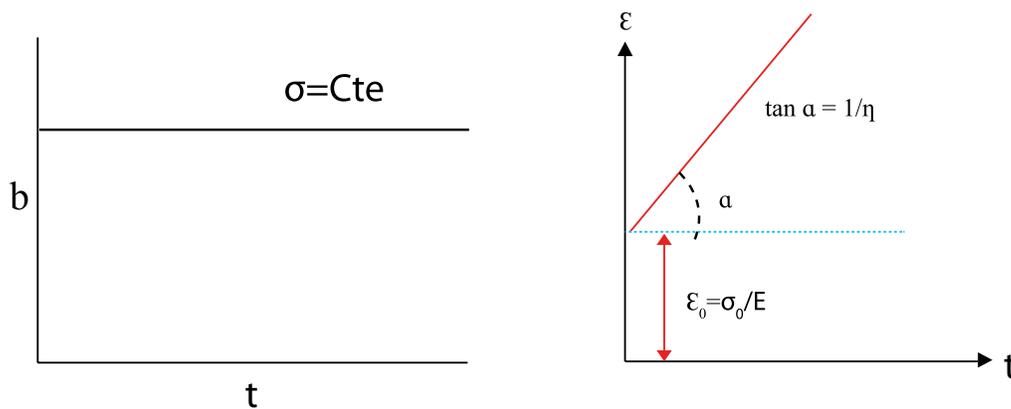


Figura 6. Deformación con respecto al tiempo a esfuerzo constante según modelo de Maxwell.

El modelo de Maxwell es un modelo sencillo, de fácil interpretación y base para sistemas más complejos. Este modelo estima la deformación elástica inicial, pero no ajusta a la realidad de la fluencia en la componente viscosa con el paso del tiempo, puesto que es lineal.

### Modelo de Kelvin-Voigt

En este modelo el comportamiento viscoelástico del material surge en paralelo de un émbolo y un resorte:

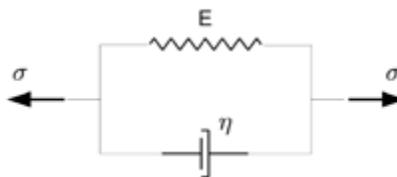


Figura 7. Modelo de Kelvin-Voigt con elemento elástico y viscoso en paralelo (Loría, 2013).

Cuando se aplica la carga al material, la forma en que el modelo disipa energía es porque parte de ella es almacenada por el resorte, la otra parte de la energía se disipa progresivamente en función del tiempo por el émbolo. Al quitar la carga, el resorte recupera producto de la energía que tenía almacenada, lo cual no sucede en el émbolo. La forma en que el material soporta carga está dada por la suma de la tensión en el resorte ( $\sigma_1$ ) y la tensión en el émbolo ( $\sigma_2$ ).

Si se aplica el modelo a fluencia, el cual es un fenómeno a largo plazo ( $\sigma = \sigma_0 = \text{cte.}$ ), donde no se anula ningún término, se obtiene una ecuación diferencial, donde  $\xi$  es la constante del resorte de Kelvin-Voigt,  $\eta$  constante del émbolo o amortiguador de Kelvin-Voigt, con solución:

$$\sigma = \sigma_0 / \xi (1 - e^{-\xi / \eta \cdot t})$$

Cuando la carga es constante el material está en fluencia creciente y de forma exponencial con el paso del tiempo. Este modelo es inconsistente, ya que la deformación en  $t = 0$  es nula, puesto que los fenómenos de fluencia presentan deformación constante inicial y por otro lado experimentan deformación de forma exponencial (Costanzi, 2006.).

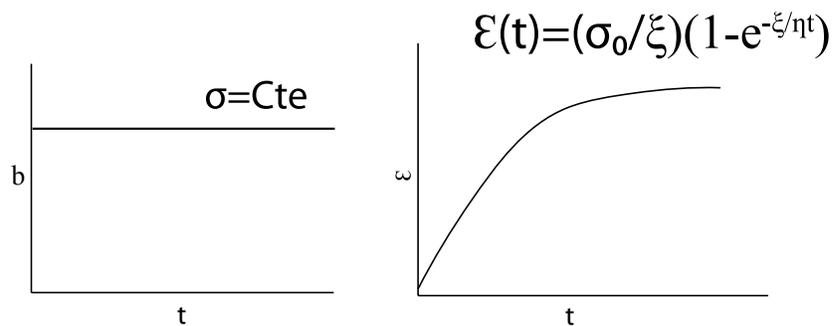


Figura 8. Deformación con respecto al tiempo a esfuerzo constante modelo de Kelvin-Voigt

Ciertamente el Modelo de Maxwell explica muy bien la deformación elástica inicial, pero no resuelve el problema del comportamiento a fluencia del material por considerarlo lineal, siendo este exponencial. Por otro lado Kelvin-Voigt aunque explica bien el comportamiento a fluencia, no determina cabalmente la deformación inicial.

### Modelo de Burgers

El modelo de Burgers ofrece una mejor aproximación del comportamiento viscoelástico del material. Este modelo combina en serie los modelos de Maxwell y Kelvin-Voigt:

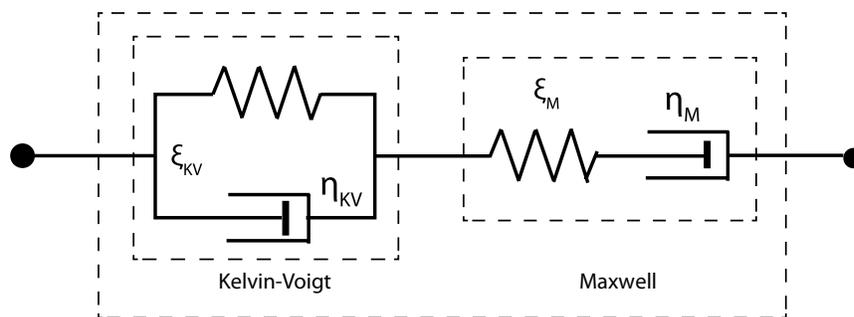


Figura 9. Modelo Viscoelástico de Burgers

Al resolver el modelo de Burgers a partir de las deformaciones en el tiempo de los modelos de Maxwell y de Kelvin-Voigt, se obtiene:

$$\varepsilon = \varepsilon_M + \varepsilon_{KV}$$

$$\varepsilon = \sigma_0 / \xi_M + \sigma_0 / \eta_M t + \sigma_0 / \xi_{KV} (1 - e^{-\xi_{KV} / \eta_{KV} \cdot t})$$

$\xi_M$  = Constante elástica de Maxwell

$\eta_M$  = Constante viscosa de Maxwell

$\xi_{KV}$  = Constante elástica de Kelvin - Voigt

$\eta_{KV}$  = Constante viscosa de Kelvin - Voigt

Se considera que el modelo de Burgers resuelve el comportamiento viscoelástico del material, combinando en serie el aporte del modelo de Maxwell y el del modelo de Kelvin-Voigt, sin embargo, dicho modelo puede ser mejorado añadiendo componentes adicionales al sistema en serie o en paralelo. En el modelo, la deformación total ( $\varepsilon$ ) será la suma de la deformación correspondiente al modelo de Maxwell ( $\varepsilon_M$ ) y la resultante del modelo de Kelvin-Voigt ( $\varepsilon_{KV}$ ).

El Modelo de Burgers es uno de los modelos más usados para describir el comportamiento viscoelástico del asfalto, autores como Di Benedetto y Hirsch, utilizan este modelo como punto de partida para construir los suyos.

En futuros boletines, se mostrará cómo se ven afectados tanto los amortiguadores como los émbolos, por variaciones en la temperatura de ensayo y por un cambio en la composición química del asfalto producto de la oxidación.

Por último, es importante el estudio de estos modelos, para comprender como responde el asfalto en desempeño y poder predecir si es óptimo a las condiciones de trabajo a las cuales se verá sometido. El estudio de los modelos unido al análisis químico de la muestra, podrán dar proyecciones consistentes del comportamiento mecánico del asfalto, siendo una herramienta potente que incida en la toma de decisiones en el control de calidad de proyectos de infraestructura vial.

## REFERENCIAS

- Bryan, H. (1999). Engineering composite materials. Cambridge: IOM Communications.
- Costanzi, M. V. (2006). Effects of tyre contact pressure distribution on the deformation rates of pavements. 19-th Symposium of the International Association for Vehicle System Dynamics , Vol. 44.
- Ferry, J. D. (1980). Viscoelastic properties of polymers. John Wiley & Sons. , 7-10.
- Fombuena, V. e. (2017). Utilidad de los modelos de viscoelasticidad en el aprendizaje de la ingeniería de materiales poliméricos. Modelling in Science Education and Learning 10.1 , 137-148.
- Georgiopoulos, P. K. (2015). Short-term creep behavior of a biodegradable polymer reinforced with wood-fibers. Composites Part B: Engineering,80 , 134-144.
- Holdsworth, S. D. (1971). Applicability of rheological models to the interpretation of flow and processing behaviour of fluid food products. Journal of Texture Studies , 393-418.
- Loría, L. G. (2013). Notas de clase de Materiales Avanzados. Estudios de Postgrado. Universidad de Costa Rica. , pdf.
- Villegas Villegas, R. E., Aguiar Moya, J. P., Loría Salazar, L. G., & Navas Carro, A. (2012). DE LA CONSISTENCIA AL DESEMPEÑO. Nueva tendencia en la compra, control de calidad y diseño de los asfaltos en Latinoamérica. Asfaltos y Pavimentos, 25, 4-11.



LanammeUCR

## LABORATORIO NACIONAL DE MATERIALES Y MODELOS ESTRUCTURALES

# PITRA

Programa de  
**Infraestructura del Transporte**

Ing. Luis Guillermo Loría-Salazar, Ph.D.

*Coordinador General*

Ing. Fabián Elizondo-Arrieta, MBA

*Subcoordinador*

### UNIDADES

#### **Unidad de Auditoría Técnica (UAT)**

Ing. Wendy Sequeira-Rojas, M.Sc

*Coordinadora*

#### **Unidad de Seguridad Vial y Transporte (USVT)**

Ing. Diana Jiménez-Romero, M.Sc, MBA

*Coordinadora*

#### **Unidad de Normativa y Actualización Técnica (UNAT)**

Ing. Raquel Arriola-Guzmán

*Coordinadora*

#### **Unidad de Materiales y Pavimentos (UMP)**

Ing. José Pablo Aguiar-Moya, Ph.D.

*Coordinador*

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

Ing. Roy Barrantes-Jiménez

*Coordinador*

#### **Unidad de Gestión Municipal (UGM)**

Lic. Carlos Campos-Cruz

*Coordinador*

CENTRO DE TRANSFERENCIA TECNOLÓGICA

Diagramación, diseño y control de calidad: Katherine Zúñiga Villaplana / Óscar Rodríguez Quintana

Boletín técnico: INTRODUCCIÓN A LOS MODELOS REOLÓGICOS DEL ASFALTO/ ABRIL, 2018