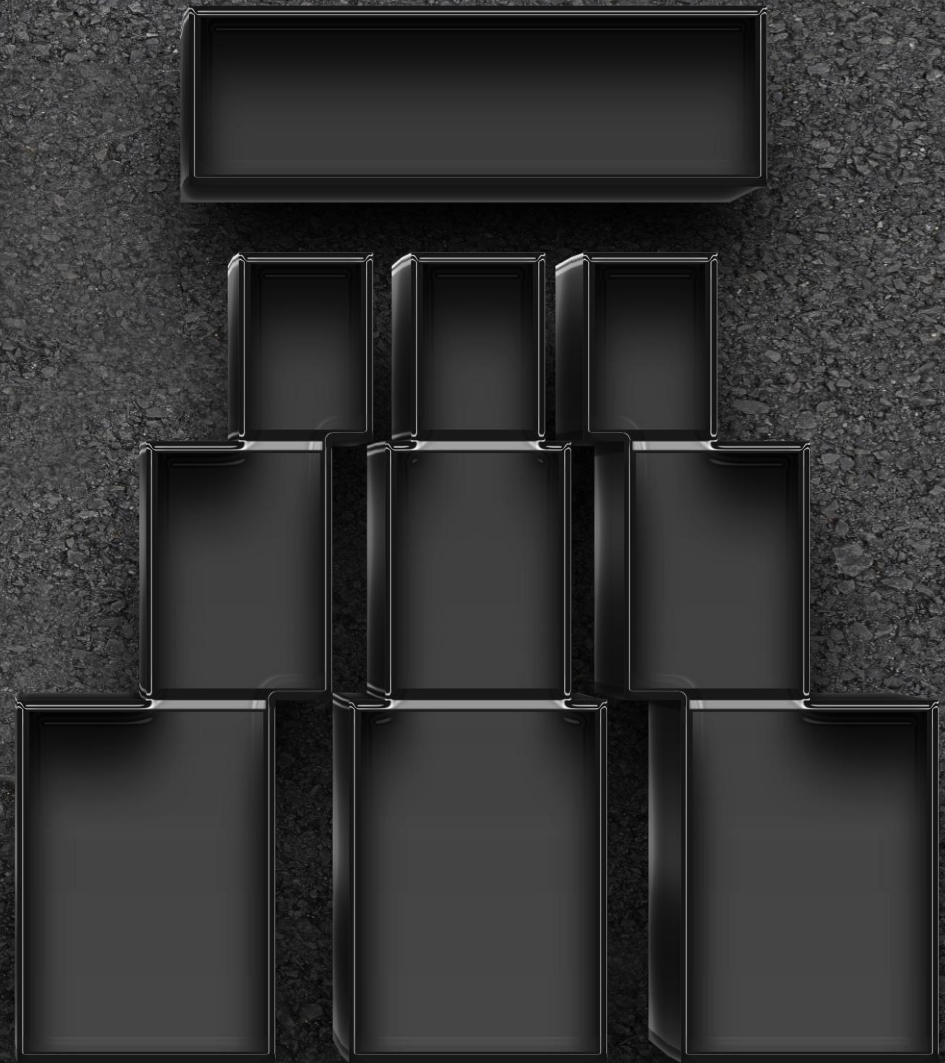




XIII Congreso Mexicano del Asfalto. 20, 21 y 22 de agosto de 2025, Cancún, Quintana Roo, México



# MEJORA DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE MEZCLAS ASFÁLTICAS EN FRÍO MEDIANTE LA INCORPORACIÓN DE PLÁSTICOS RECICLADOS

**M.I Leonardo Ochoa.**

**Kao**

XIII Congreso Mexicano del Asfalto. 20, 21y 22 de agosto de 2025, Cancún, Quintana Roo, México



# CONTENIDOS



01

INTRODUCCIÓN



02

PROBLEMÁTICA Y ALTERNATIVAS DE SOLUCIÓN



03

OBJETIVOS PLANTEADOS Y PLAN EXPERIMENTAL



04

RESULTADOS



05

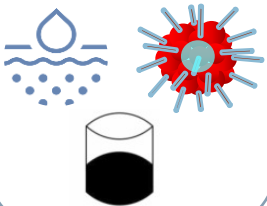
CONCLUSIONES



# Introducción

## Mezcla asfáltica en frío CMA

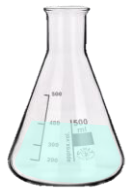
Emulsión  
asfáltica



Agregado  
mineral



Aditivos



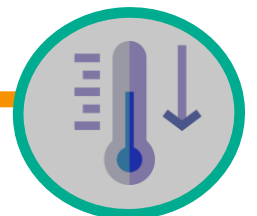
Tecnología  
ambientalmente  
amigable



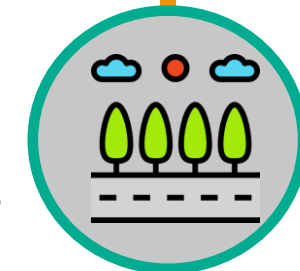
Menor costo  
de fabricación



Mejores  
condiciones de  
trabajo



Amplía la temporada de  
pavimentación y permite la  
aplicación en lugares remotos



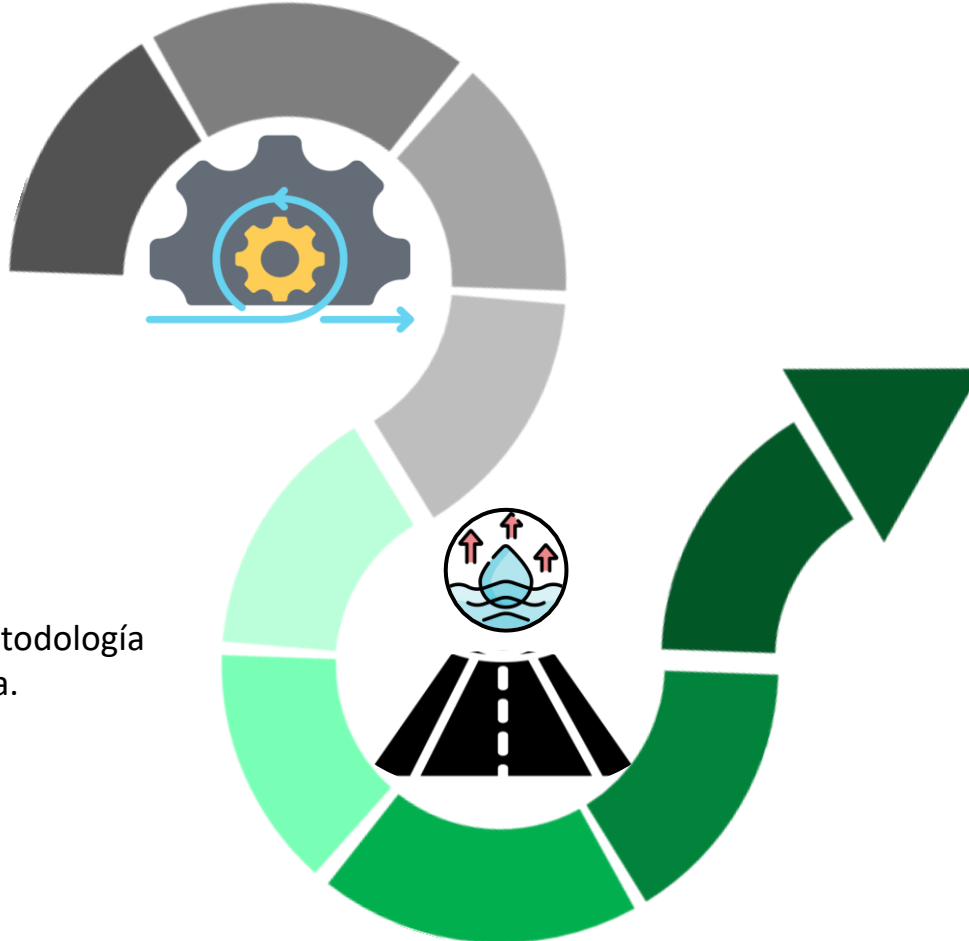
# Problemática



**Diferentes situaciones han limitado el uso de las CMA como capas estructurales en pavimentos flexibles:**

1

La falta de una metodología clara y bien definida.

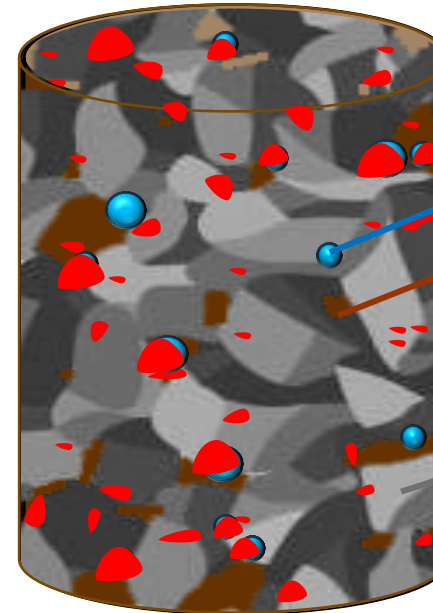


3

El asfalto emulsionado una vez que forma parte del pavimento tiene que soportar las solicitaciones que producen tanto el tránsito como el clima aún y cuando no ha sufrido suficientes cambios fisicoquímicos favorables en la modificación de sus propiedades mecánicas

2

Una vez que el agua de la emulsión se evapora, da como resultado elevados contenidos de huecos que propician el debilitamiento del sistema.



Incremento de vacíos de aire

Cemento asfáltico

Agregado mineral



# Alternativas de solución

**1.5% Cemento Portland Compuesto de Resistencia Rápida** el cual fue añadido como filler activo y dosificado respecto al peso del agregado mineral.

**3.0% elastómero Estireno-Butadieno de orientación aleatoria (SBR)** emulsionado en agua al 70% de sólidos el cual fue añadido directamente a la solución jabonosa y dosificado respecto al peso del asfalto en la emulsión.

**3.0% plastómero obtenido a partir de PET reciclado** emulsionado en agua al 40% de sólidos el cual fue añadido a la solución jabonosa y dosificado respecto al peso del asfalto en la emulsión.

# Objetivos



Aportar una mejor comprensión en el diseño, fabricación y evaluación en laboratorio de mezclas asfálticas en frío para emplearse como capas estructurales en pavimentos flexibles.

Adicionalmente, se buscó revalorizar un producto de deshecho como lo es el PET reciclado en un segundo ciclo de vida como un agente modificador que permita obtener una alternativa de pavimentación sustentable y durable.

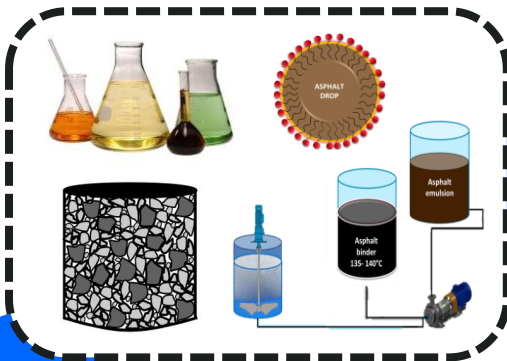


- ¿Puede la modificación de mezclas asfálticas en frío con plásticos reciclados ofrecer un desempeño superior al proporcionado por otras tecnologías comercialmente disponibles como el SBR o el cemento Portland?
- ¿Es posible obtener mezclas asfálticas en frío modificadas que puedan alcanzar los requisitos mínimos de calidad típicamente establecidos para mezclas asfálticas en caliente fabricadas con asfalto convencional?

# Plan experimental

## ETAPA 1

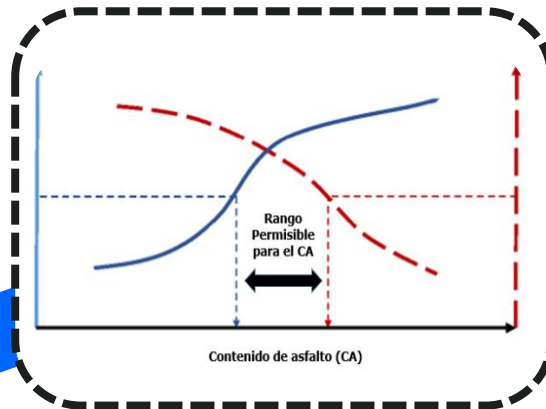
Formulación emulsiones asfálticas y selección de componentes.



- Fórmula de trabajo

## ETAPA 2

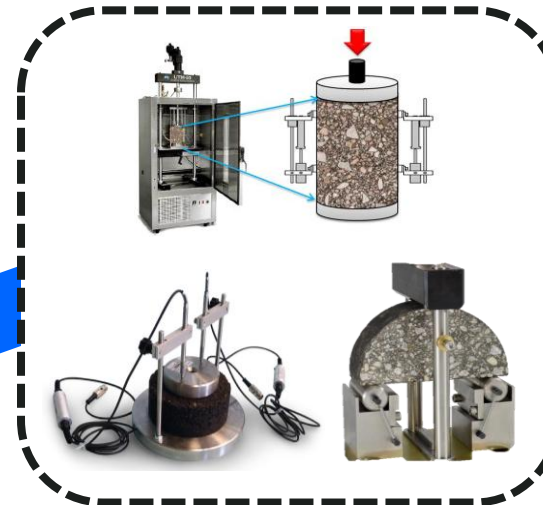
Optimización del contenido de asfalto residual empleando enfoque balanceado



- Tensión indirecta por compresión diametral.
- Módulo resiliente.

## ETAPA 3

Evaluación de propiedades mecánicas



- Energía de fractura.
- Compresión axial cíclica.
- Curva maestra módulo dinámico.

## ETAPA 4

Análisis de resultados

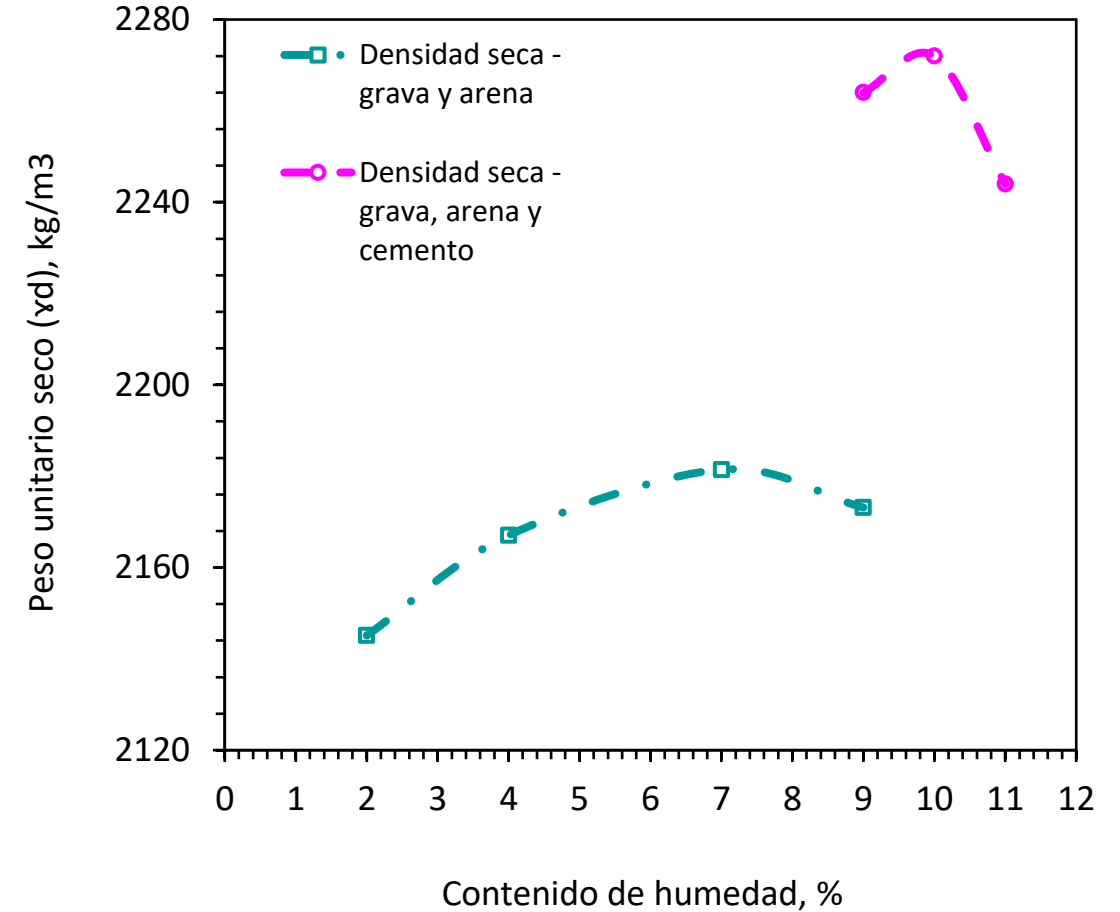
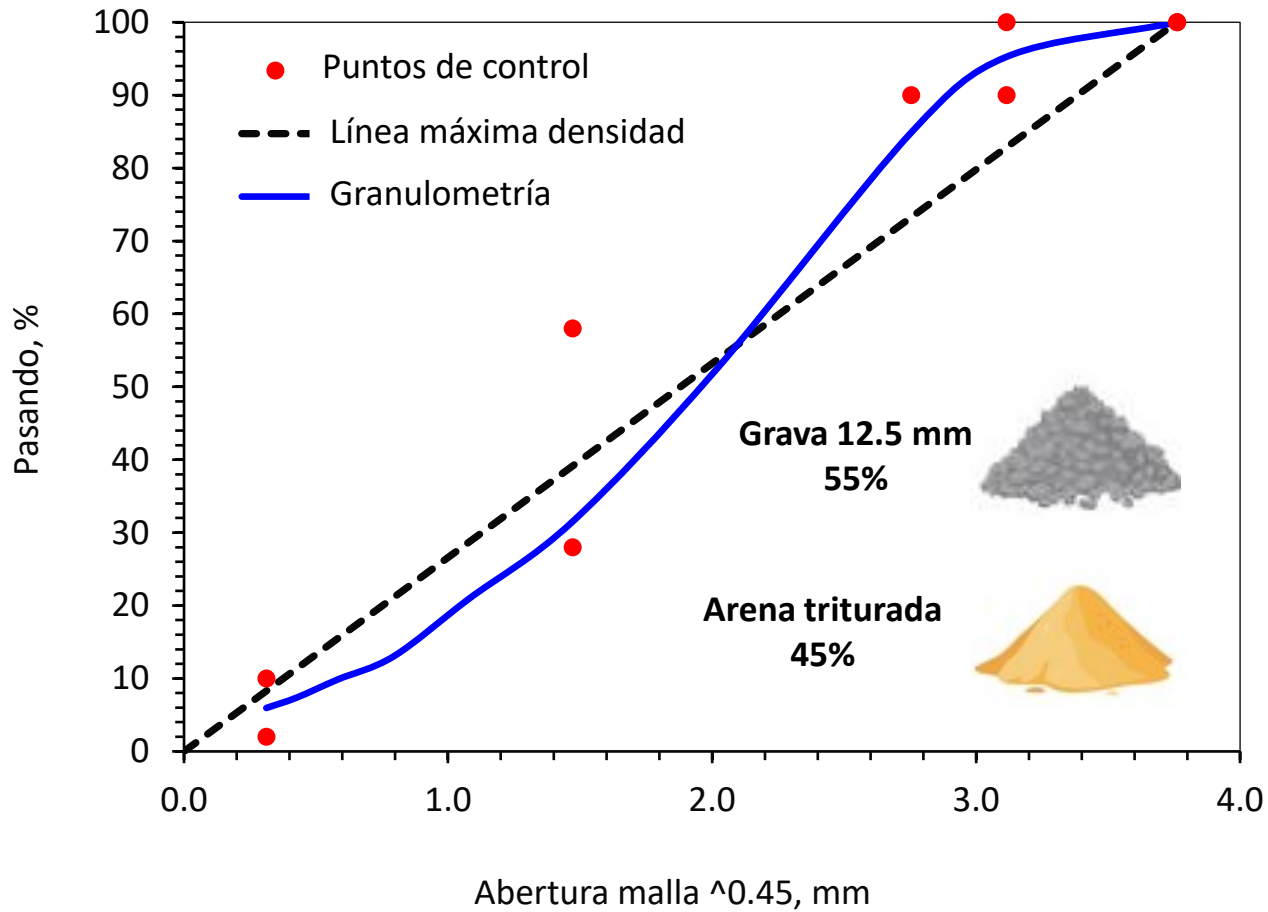


- Conclusiones
- Recomendaciones
- Trabajos futuros





# Selección de estructural granular y humedad de compactación



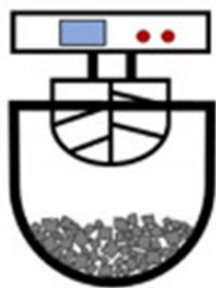
# Plan experimental

| Tecnología CMA:            | Sin Aditivo | Látex SBR                                         | PET reciclado                                            | Cemento Portland                                  |
|----------------------------|-------------|---------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|---------------------------------------------------|
| Asfalto base               | PG 64-22    |                                                   |                                                          |                                                   |
| Tipo emulsión              | EAL -65     |                                                   |                                                          |                                                   |
| Carga partícula            | Catiónica   |                                                   |                                                          |                                                   |
| Dosis emulsificante        | 16 kg / Ton |                                                   |                                                          |                                                   |
| Cemento Portland           | -           | -                                                 | -                                                        | 1.50%<br>respecto al peso del<br>agregado mineral |
| Látex SBR                  | -           | 3.0%<br>respecto al peso del<br>cemento asfáltico | -                                                        | .                                                 |
| PET reciclado emulsionado  | -           | -                                                 | 3.0%<br>respecto al peso del<br>cemento asfáltico        | -                                                 |
| Aditivo inversor polaridad | -           | -                                                 | 2.0%<br>respecto al peso<br>PET reciclado<br>emulsionado | -                                                 |

Adicionalmente, una **mezcla asfáltica en caliente (HMA) de referencia** que también formó parte de la batería de ensayos fue diseñada con la misma distribución granulométrica y el mismo tipo de agregado mineral. El contenido óptimo de asfalto que cubrió los requerimientos volumétricos fue de 6.3% respecto al peso total de la mezcla y se determinó a partir de cuatro porcentajes de prueba empleando una energía de compactación de 100 giros.

# Optimización metodología fabricación y curado CMA

Proceso  
de mezclado



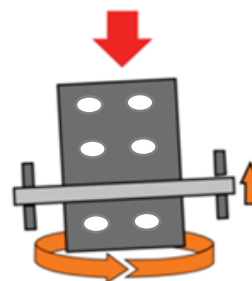
- Paso 1: agregado mineral + agua pre-envuelta
- Paso 2: agregado húmedo + emulsión asfáltica

Período de maduración de  
la mezcla suelta



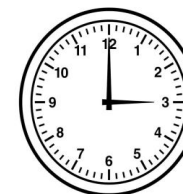
- 2 horas
- 40°C

Condiciones de  
compactación



- 100 giros.
- Moldes perforados.

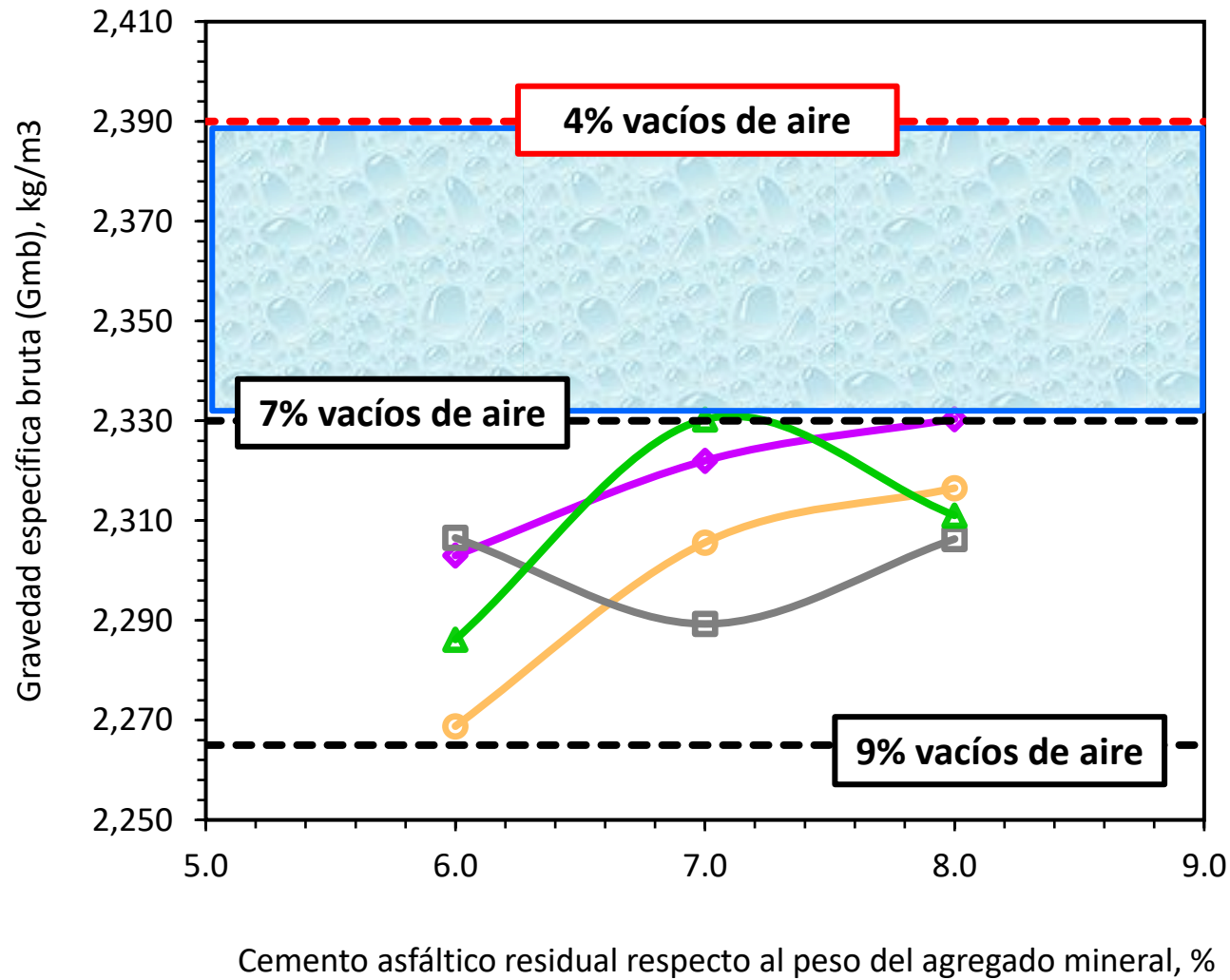
Período de curado probeta  
compacta



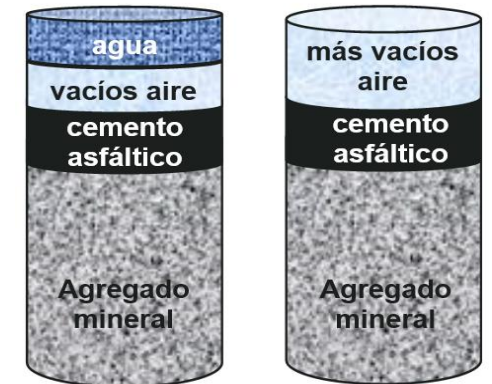
- 72 horas.
- 40°C.



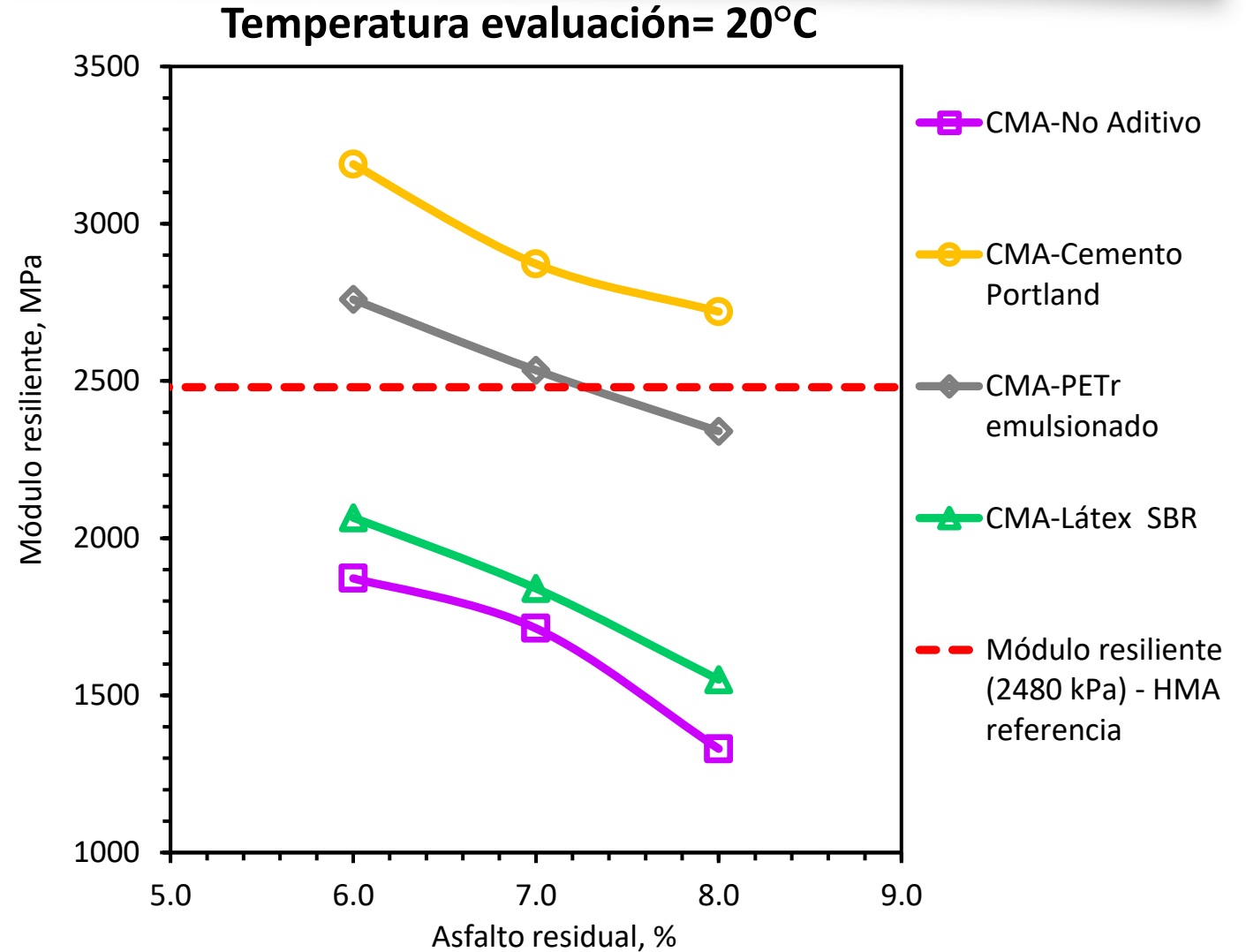
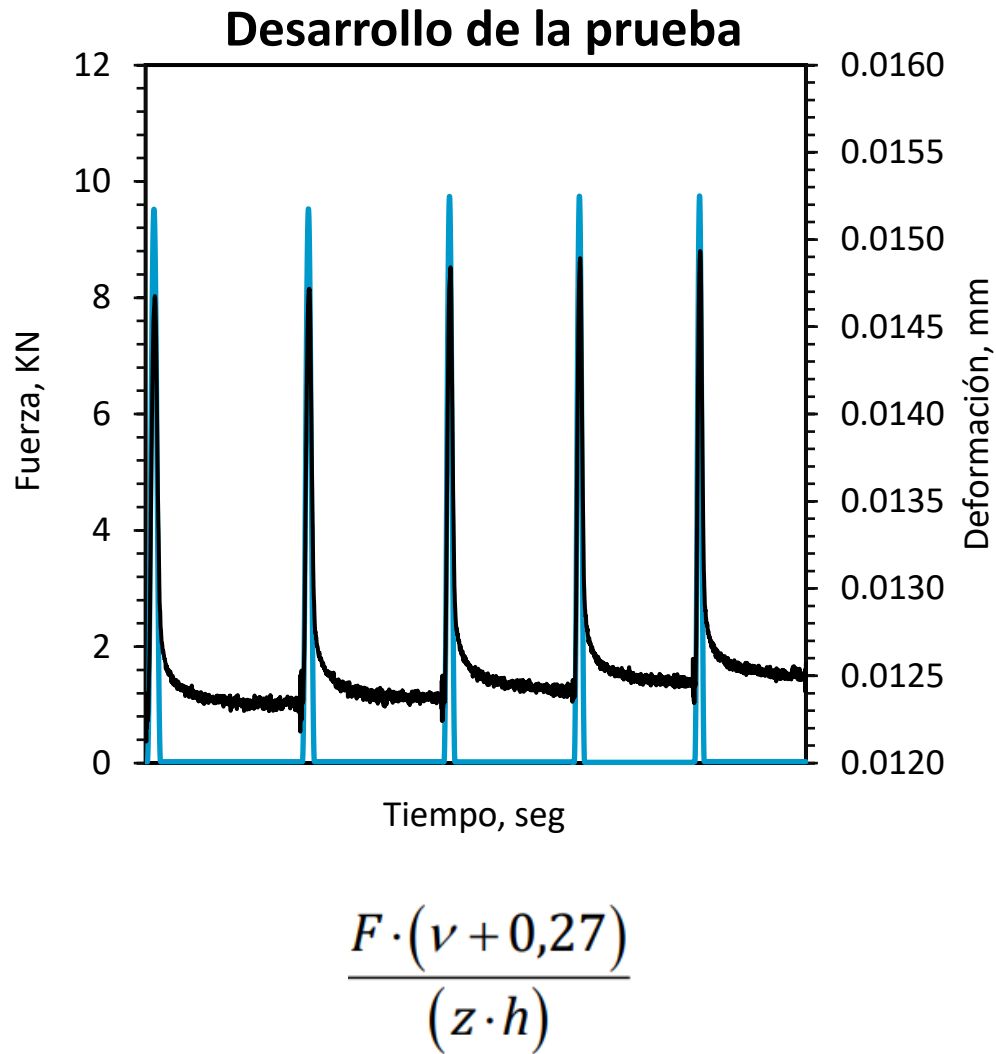
# Volumetría probetas CMA versus HMA



Humedad remanente  
40-60% agua atrapada en el sistema



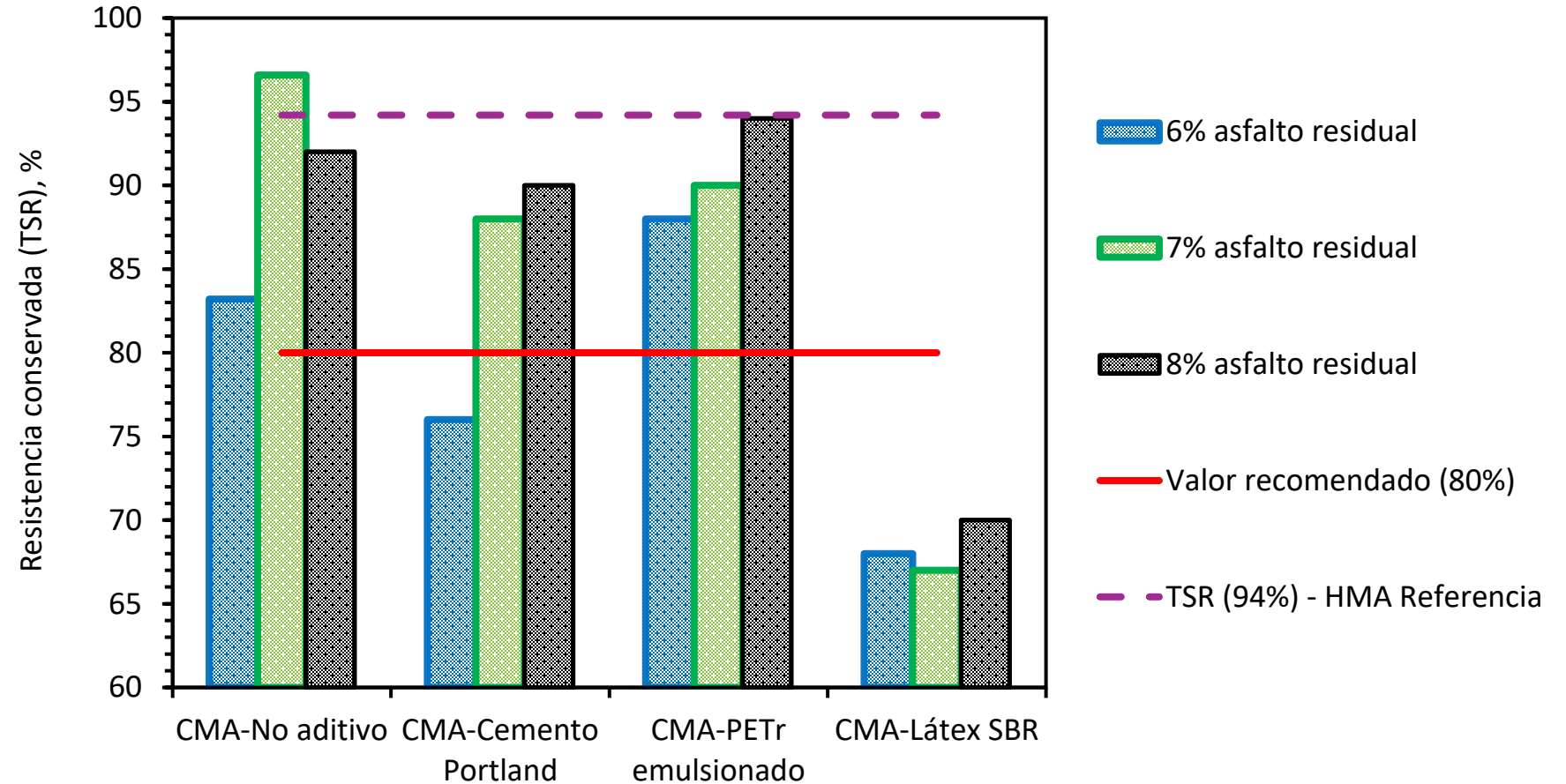
# Módulo rigidez a tracción indirecta – UNE EN 12697-26-ANEXO C.



# Resistencia al daño por humedad (TSR)-AASHTO T283.

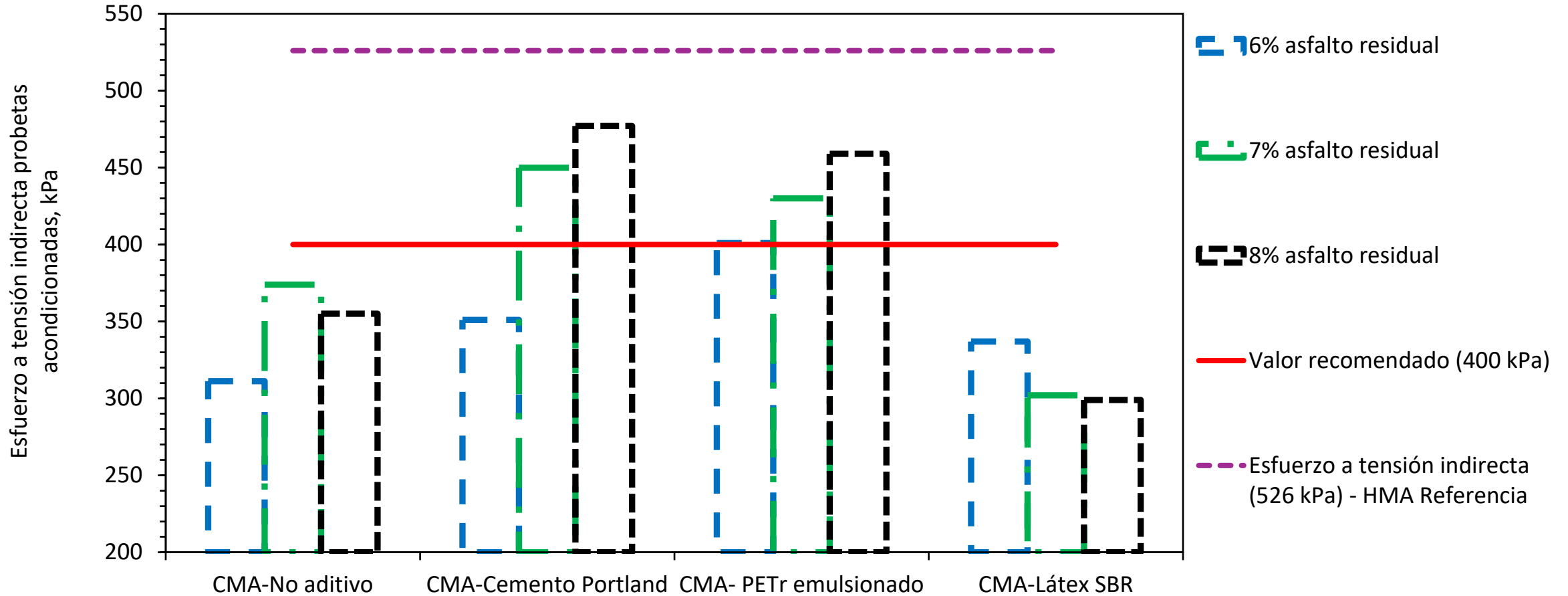


$$TSR = \frac{\text{Esfuerzo T.I acondicionado}}{\text{Esfuerzo T.I seco}} \times 100$$



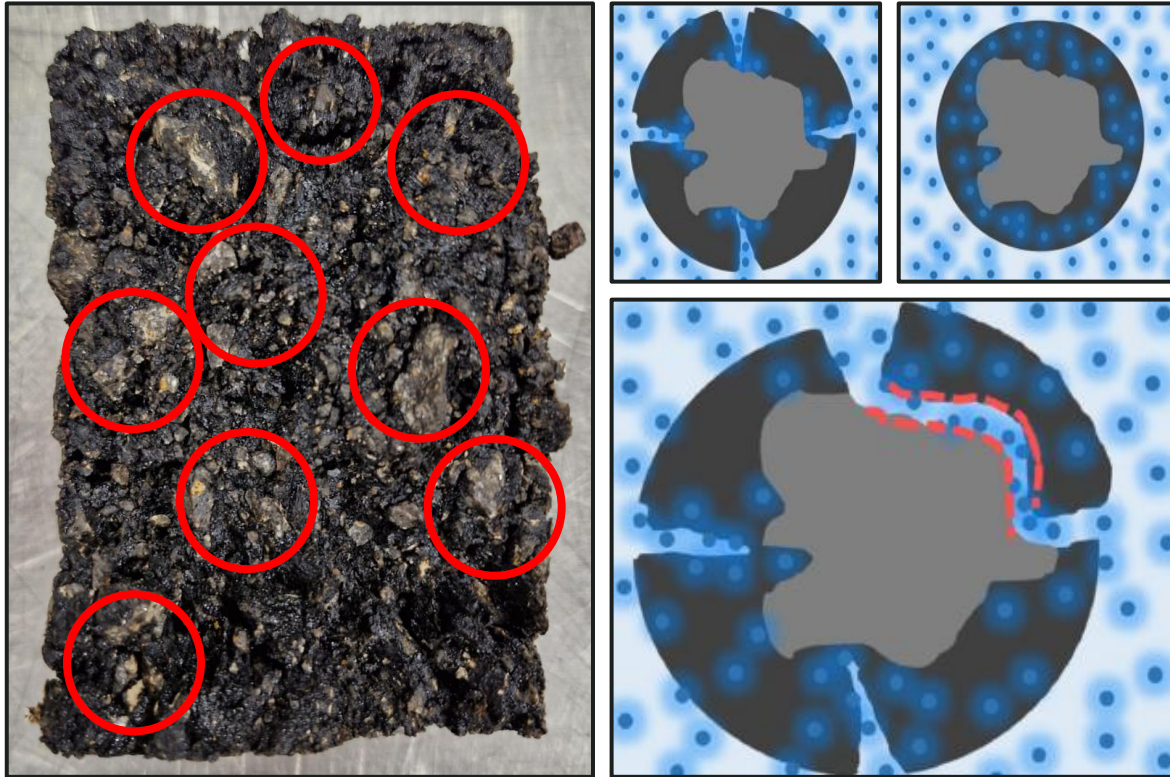


# Resistencia al daño por humedad (TSR)-AASHTO T283.

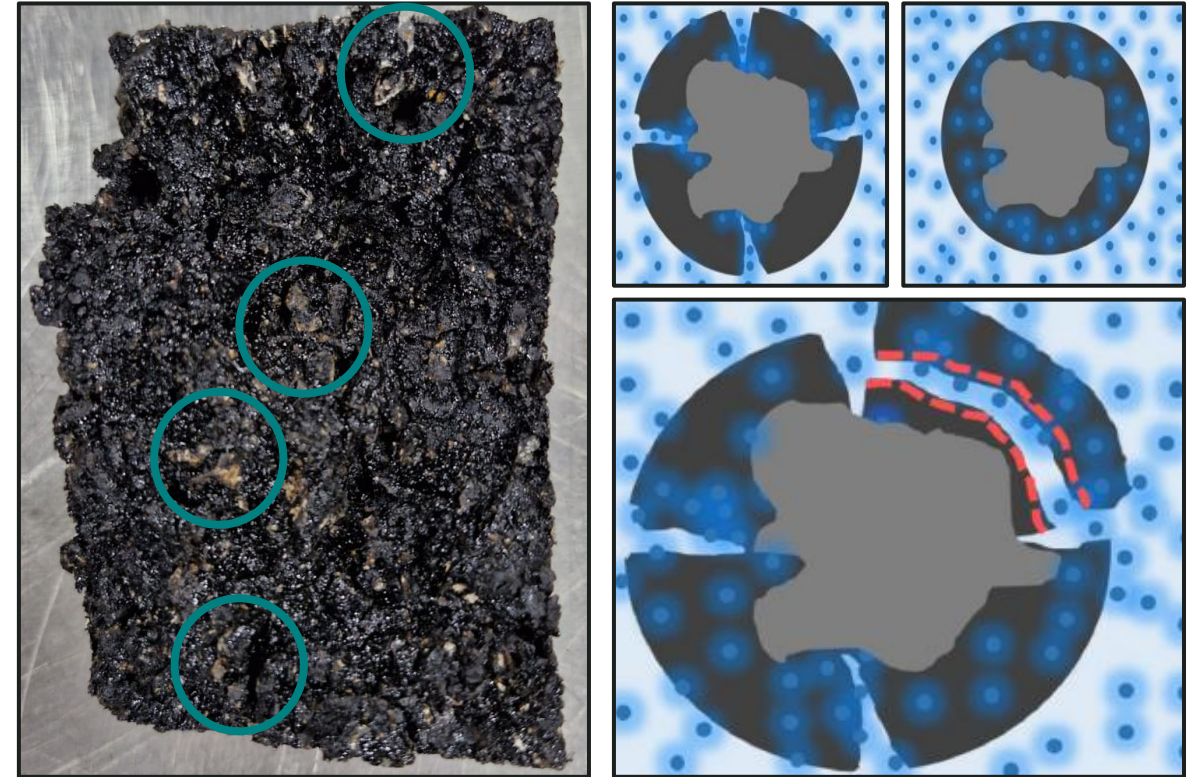


# Resistencia al daño por humedad (TSR)-AASHTO T283.

**Bajo contenido de asfalto residual - Falla adhesiva**  
**Cubrimiento deficiente**



**Alto contenido de asfalto residual - Falla cohesiva**  
**Cubrimiento adecuado**



Película de asfalto



Agregado mineral



Molécula de agua



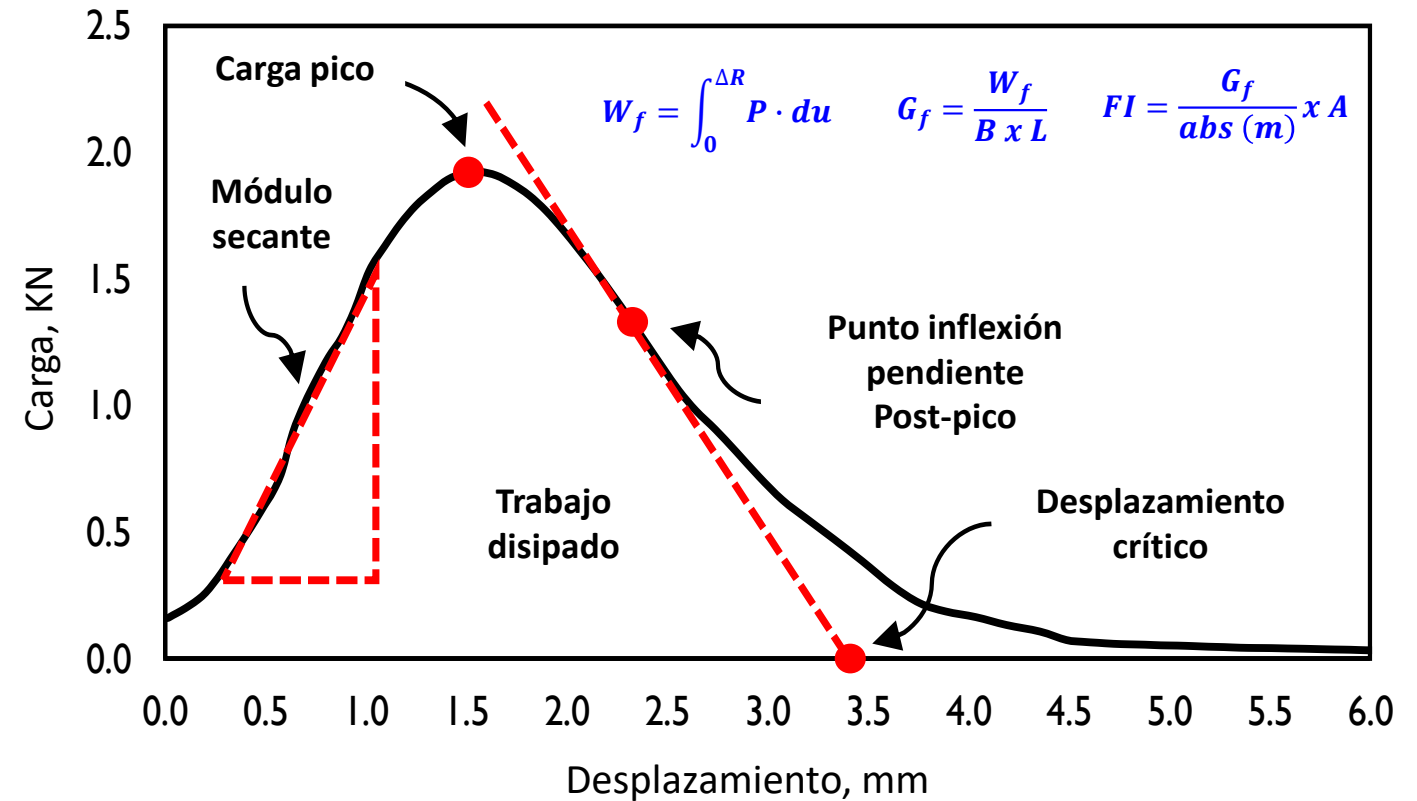
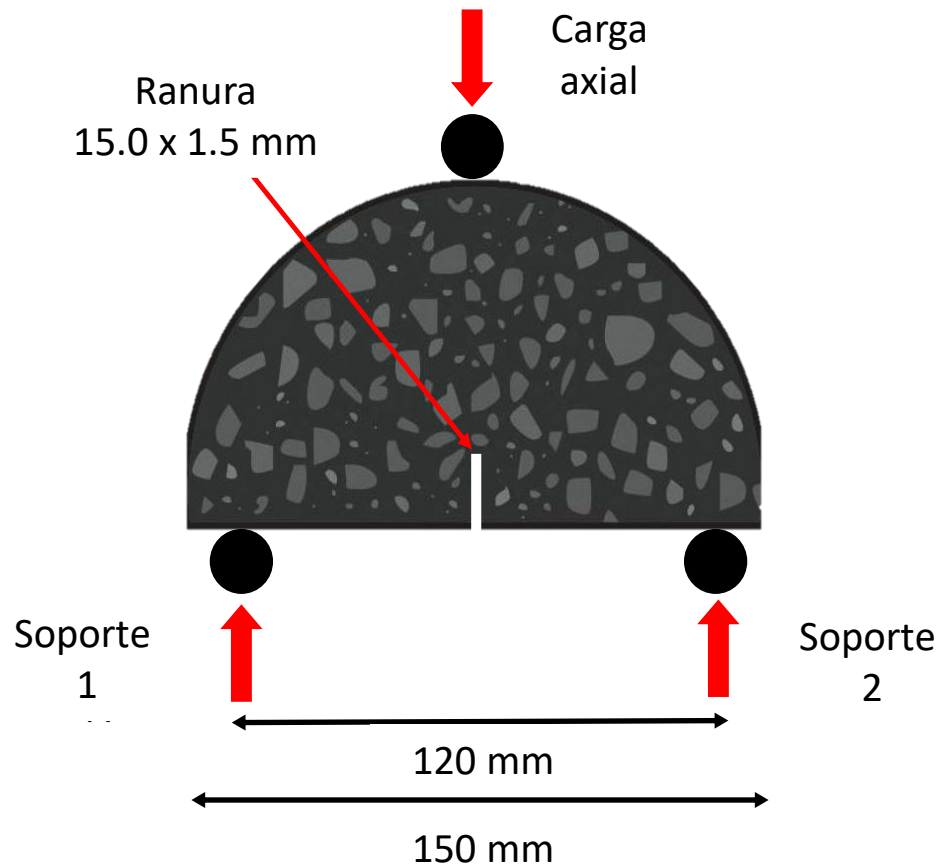
Asociación Mexicana  
del Asfalto, A. C.

@AMAACmx

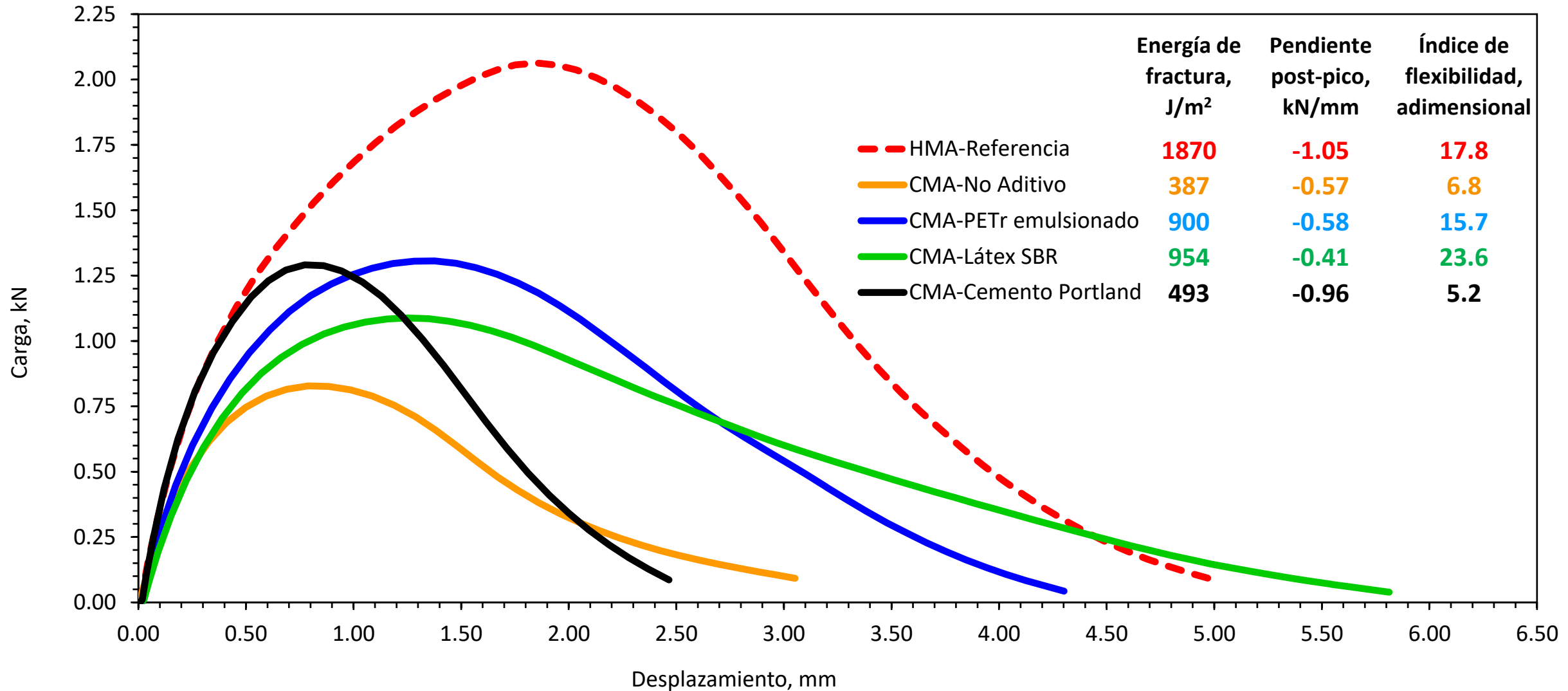
<http://www.amaac.org.mx>



# Potencial de agrietamiento viga semicircular – AASHTO TP 124.



# Potencial de agrietamiento viga semicircular – AASHTO TP 124.





# Resistencia a la deformación permanente – EN 12 697-25 Método A1

Duración aplicación de carga: 0.1 segundos

Periodo de relajación: 0.9 segundos

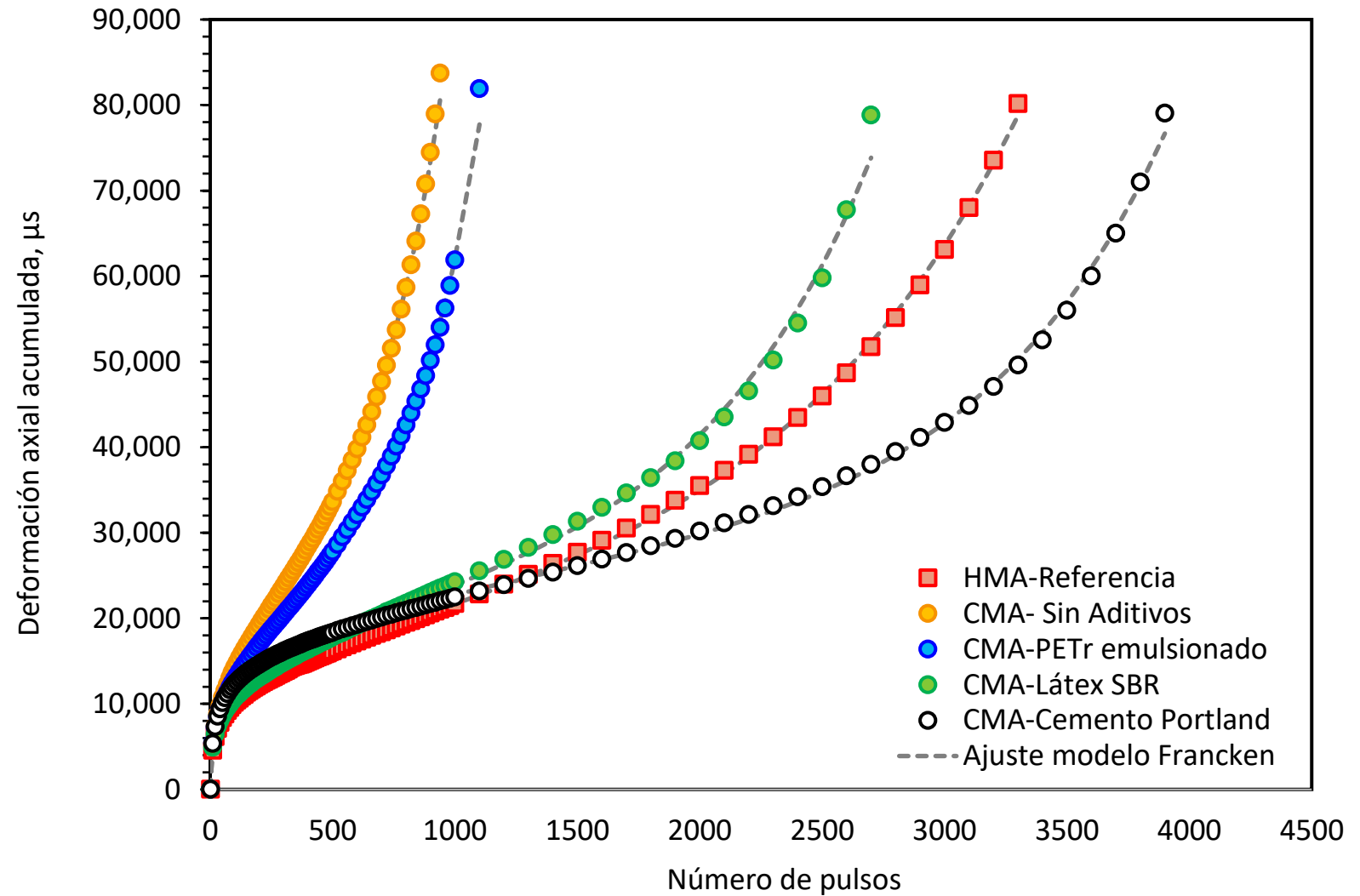
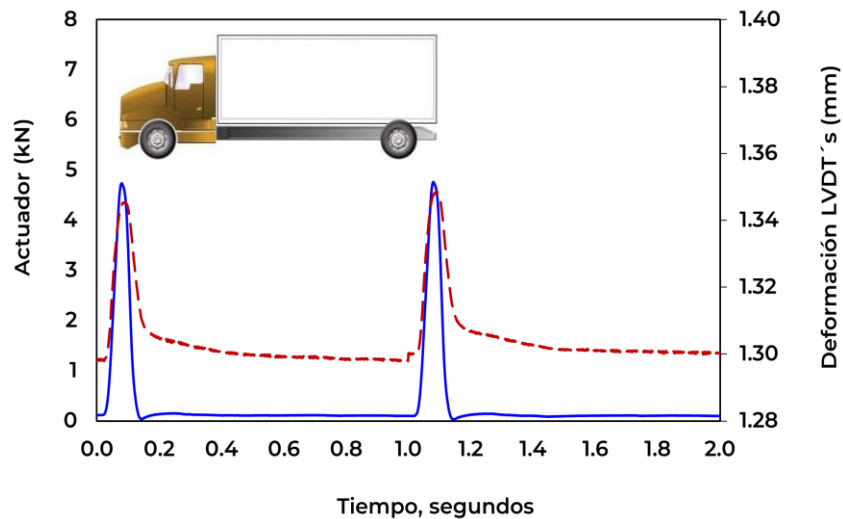
Esfuerzo axial: 580 kPa



10 Hz (60-80 km/h)

Eje. Sencillo. Equivalente 8,2 Ton

Presión de contacto 87 psi



# Resistencia a la deformación permanente – EN 12 697-25 Método A1

| Descripción del material | Coeficientes de ajuste-Modelo Francken |        |           |        | Error cuadrático, % |
|--------------------------|----------------------------------------|--------|-----------|--------|---------------------|
|                          | A                                      | B      | C         | D      |                     |
| HMA-Referencia           | 2740.9908                              | 0.2740 | 2003.3886 | 0.0010 | 0.62                |
| CMA- Sin Aditivos        | 2257.7120                              | 0.3853 | 1797.5518 | 0.0036 | 0.19                |
| CMA-PETr emulsionado     | 2342.3881                              | 0.3648 | 949.1154  | 0.0036 | 0.31                |
| CMA-Látex SBR            | 2522.2463                              | 0.3071 | 825.4155  | 0.0015 | 0.44                |
| CMA-Cemento Portland     | 3415.1829                              | 0.2702 | 232.6768  | 0.0014 | 0.99                |

## Modelo Francken

$$\varepsilon_P = An^B + C(e^{Dn}-1)$$

$\varepsilon_P$ = deformación axial permanente

n= número de ciclos

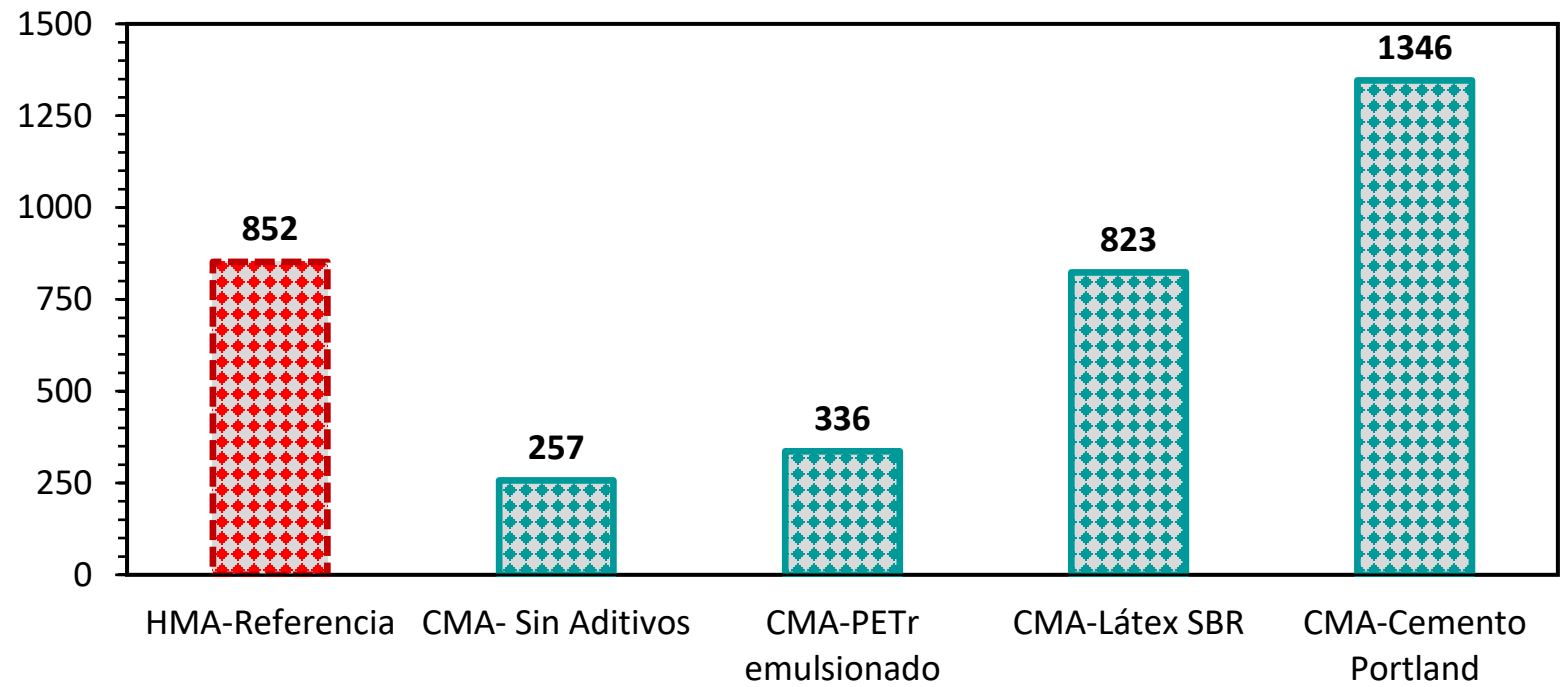
A,B,C y D= coeficientes de ajuste

## Primera derivada

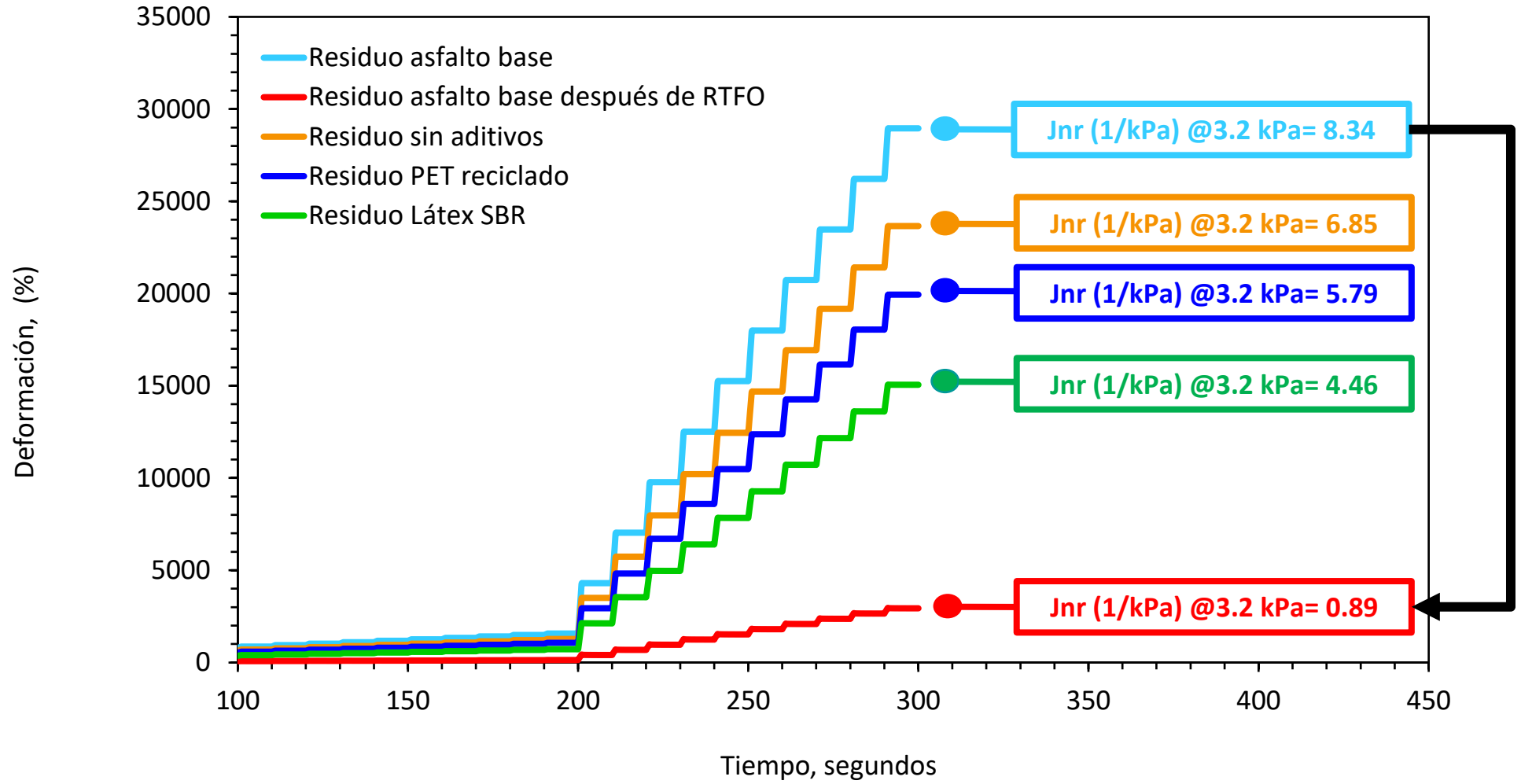
$$\varepsilon_P = ABn^{B-1} + CD(e^{Dn})$$

## Segunda derivada

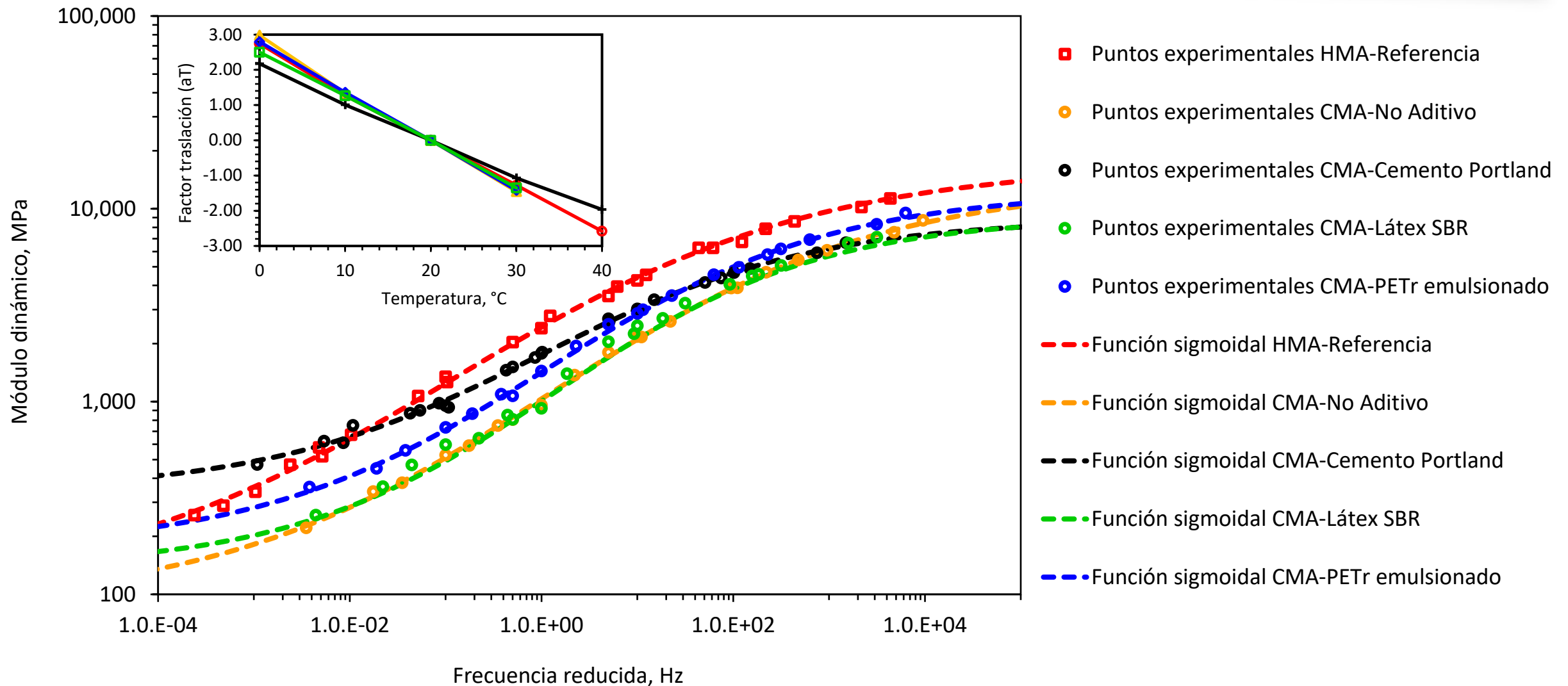
$$\varepsilon_P = AB(B-1)n^{B-2} + CD^2(e^{Dn})$$



# Creep Repetido Multi-Esfuerzo (MSCR) a 64°C / AASHTO MP19

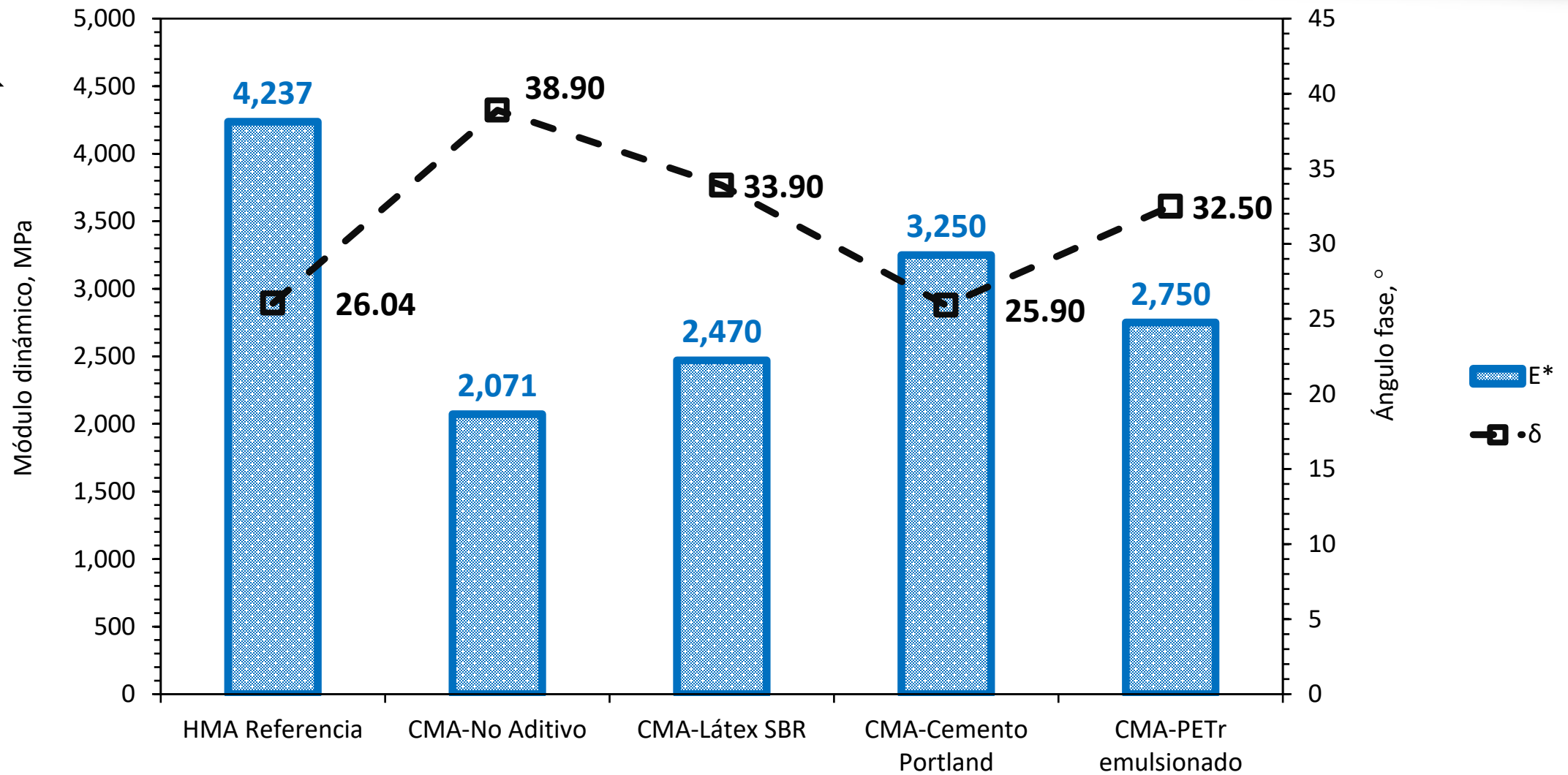


# Curva maestra de módulo dinámico- AASHTO T-342.

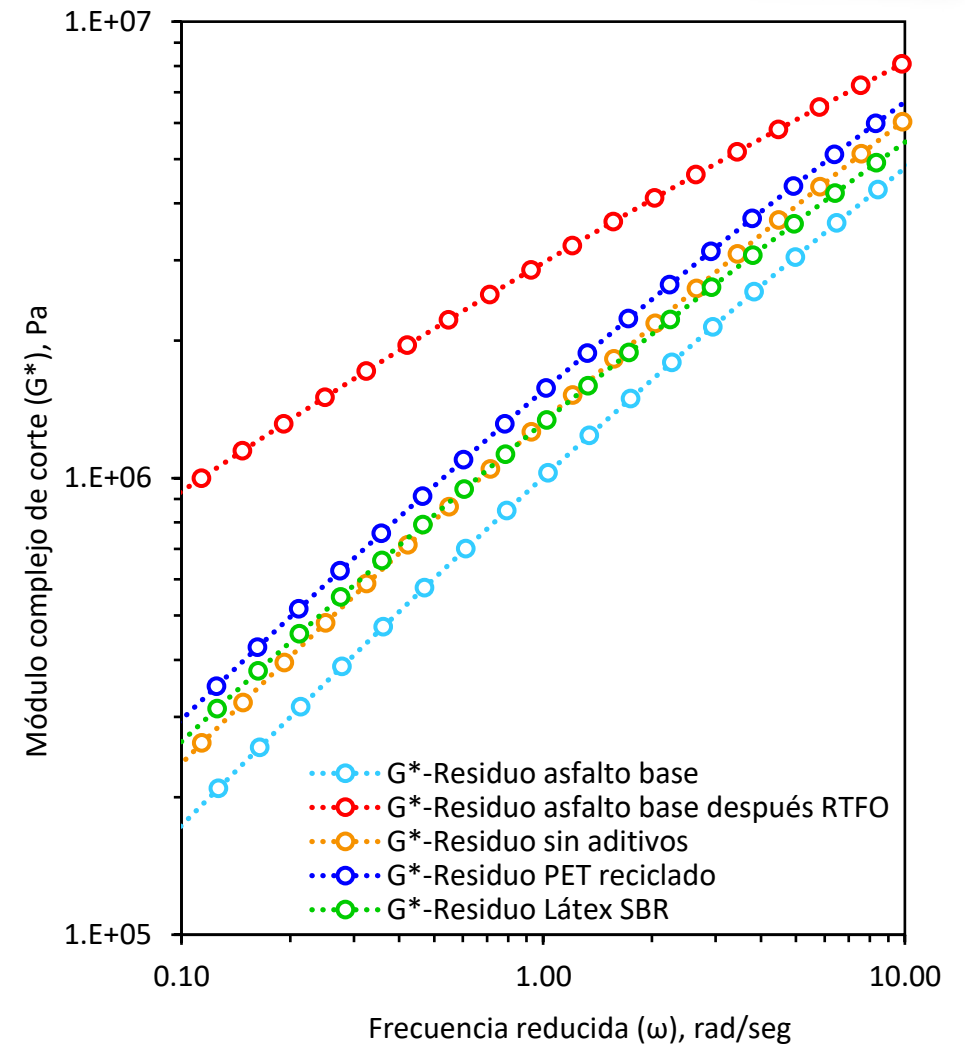
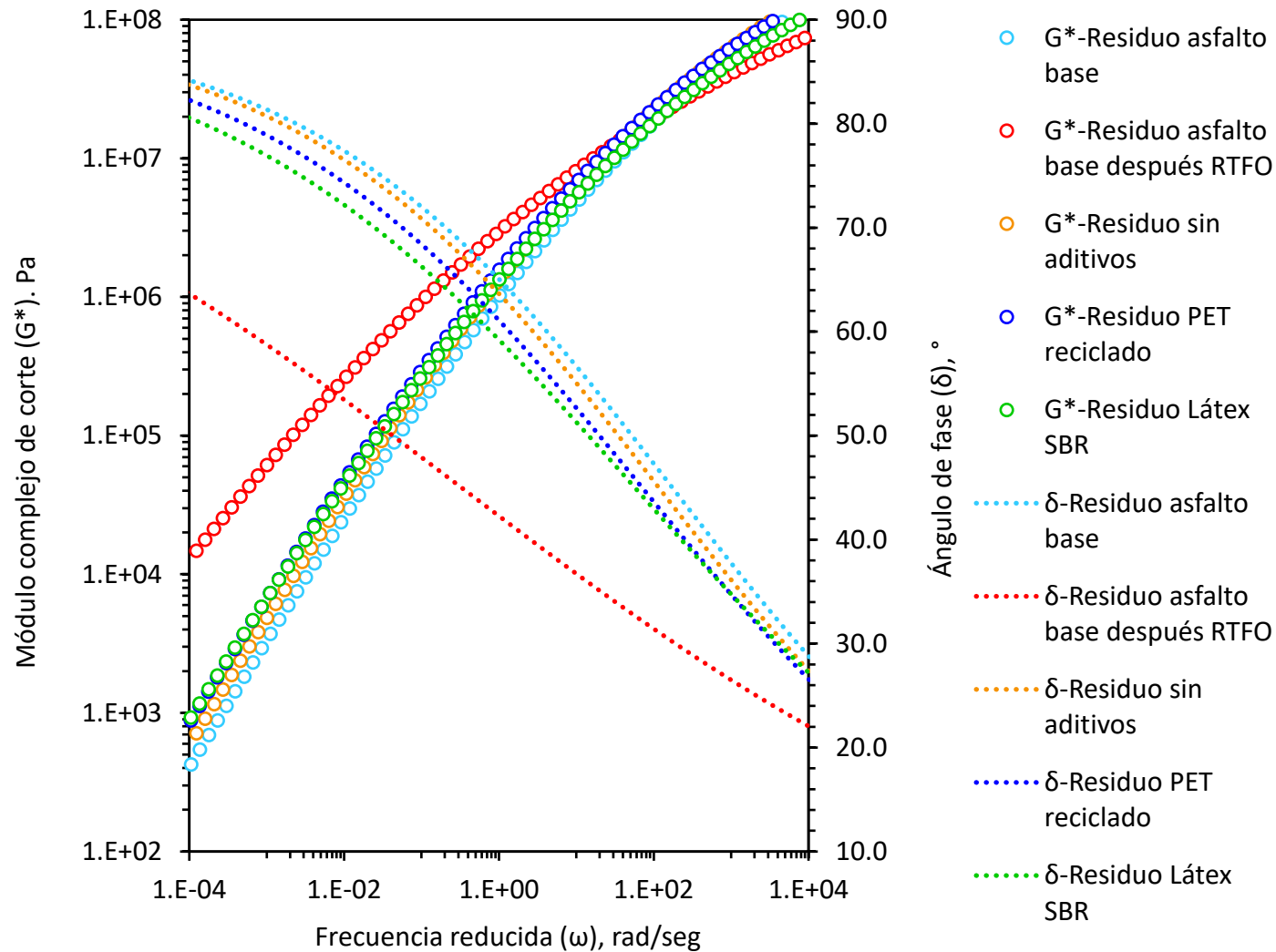




# Módulo dinámico y ángulo de fase a 20°C y 10 Hz.



# Curva maestra de módulo complejo de corte dinámico y ángulo de fase ajustado a temperatura de referencia=20°C



# Conclusiones

- El desempeño más equilibrado entre todas las tecnologías abordadas fue obtenido por la CMA en cuya formulación se añadió PET reciclado emulsionado ya que mejoró todos los parámetros de resistencia evaluados en los ensayos de desempeño; aumentó la rigidez del material, soportó más ciclos de carga antes de fluir, ofreció superiores propiedades adhesivas y cohesivas reduciendo así el daño por humedad. También, los resultados respaldan la suficiente capacidad de deformarse elásticamente bajo esfuerzos tensionales. De implementarse este tipo de tecnologías podría significar la reutilización de hasta 2.5 kg de PET reciclado por cada tonelada de CMA producida.
- La CMA modificada con Cemento Portland destaca su excelente desempeño en los ensayos de compresión axial cíclica y sensibilidad al daño por humedad. Asimismo, fue evidente la ganancia acelerada de rigidez ya que el valor de módulo dinámico y ángulo de fase a temperatura intermedia ambos parámetros presentaron gran similitud con la mezcla asfáltica en caliente de referencia. No obstante, se validó en la prueba de energía de fractura su enorme potencial para romperse de manera frágil dando lugar a un rápido inicio y acelerada propagación de fisuras, lo cual incrementa las probabilidades de sufrir el deterioro menos deseado en pavimentos asfálticos: el agrietamiento en sus diferentes modos y severidades.

# Conclusiones

- Para el caso de CMA con látex la fuerza de la red polimérica formada por el SBR ofreció grandes ventajas en la resistencia al ahuellamiento a alta temperatura ya que aplazó el número de ciclos de carga que causan el flujo plástico y, al mismo tiempo, mejoró enormemente la capacidad de relajación y disipación de tensiones del material asfáltico dando como resultado hasta 3.5 veces más resistencia al agrietamiento en comparación con la CMA sin aditivos. No obstante, este tipo de CMA modificada con SBR falló en todos los escenarios la prueba de daño por humedad, por tal motivo se concluye que, bajo las condiciones planteadas en este estudio, este material podría ser potencialmente susceptible a la formación de baches y desgranamientos.
- Los hallazgos reportados son bastante alentadores ya que las CMA modificadas se encuentran muy cerca de cumplir con los requisitos mínimos típicamente exigidos para HMA fabricadas con asfalto convencional y, además, no hay que perder de vista que los desempeños reportados en esta investigación corresponden a la etapa inicial del proceso de maduración y evaporación de volátiles del asfalto emulsionado, el cual continuará por semanas inclusive meses modificando a favor las propiedades mecánicas de las CMA.



*¡muchas gracias!*

Ponente: M.I Leonardo ochoa

Contacto: 4431859053  
lochoa@kao.com

Kao