



PRE-XVII CONGRESO ARGENTINO
de Vialidad y Tránsito

8º EXPOVIAL ARGENTINA

3 AL 6 DE NOVIEMBRE 2014

HOTEL PANAMERICANO - Buenos Aires, Argentina



Consideración de la deformación permanente en el diseño estructural

Juan M. Campana
Asociación Argentina de Carreteras
Comisión Permanente del Asfalto

X CONGRESO INTERNACIONAL ITS

X SIMPOSIO DEL ASFALTO

II SEMINARIO INTERNACIONAL DE PAVIMENTOS DE HORMIGÓN



www.congresodevialidad.org.ar

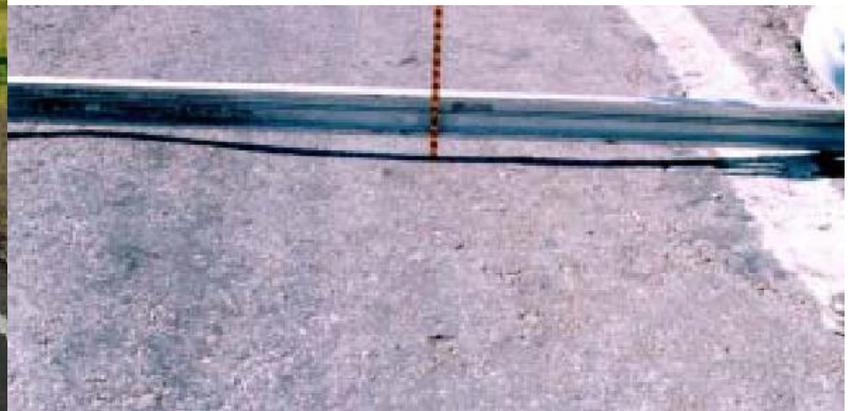
Consideración de la deformación permanente en el diseño estructural

Contenido

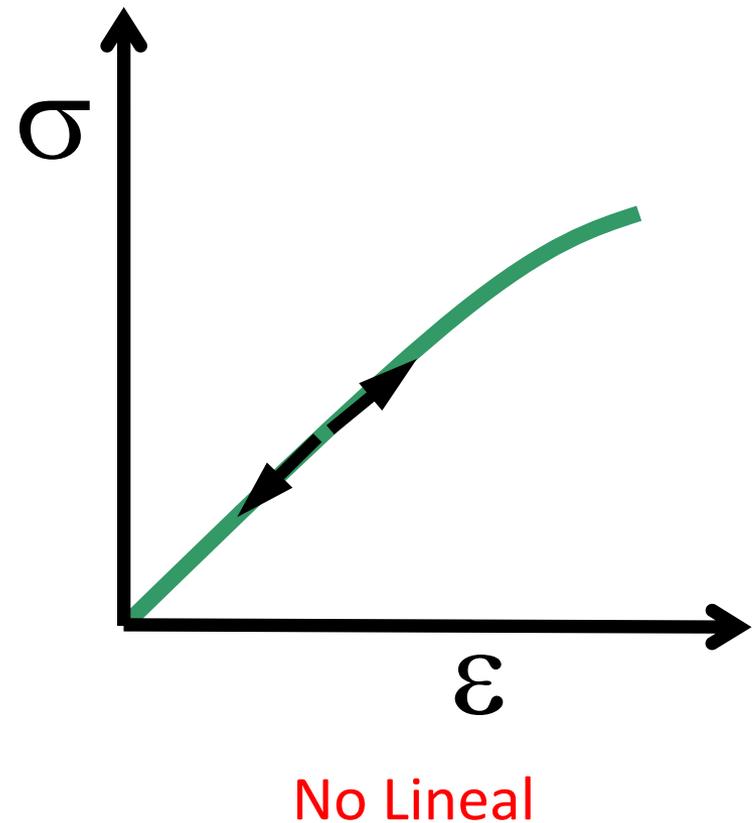
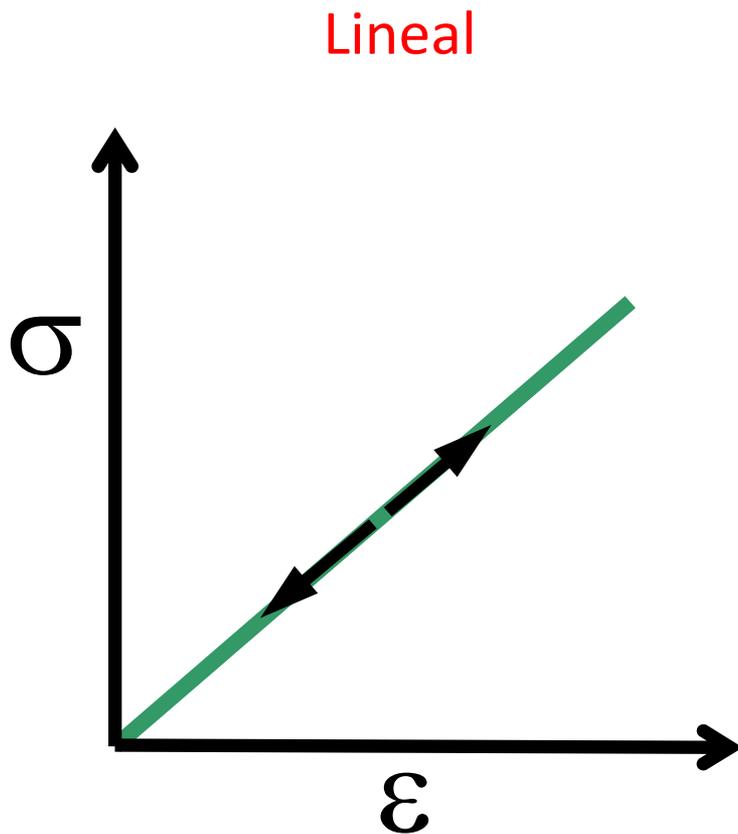
- 1. Introducción**
- 2. Enfoques metodológicos del diseño estructural**
- 3. Enfoques y limitaciones de los métodos oficialmente más utilizados en Argentina**
- 4. Algunas cuestiones en relación con las metodologías racionales**
- 5. Tendencia a metodologías de tipo racional-empírico**
- 6. Conclusiones**

Ahuellamiento

- Depresión superficial en huella
- Problemas de drenaje, seguridad, confort



Elasticidad – Linealidad de los materiales





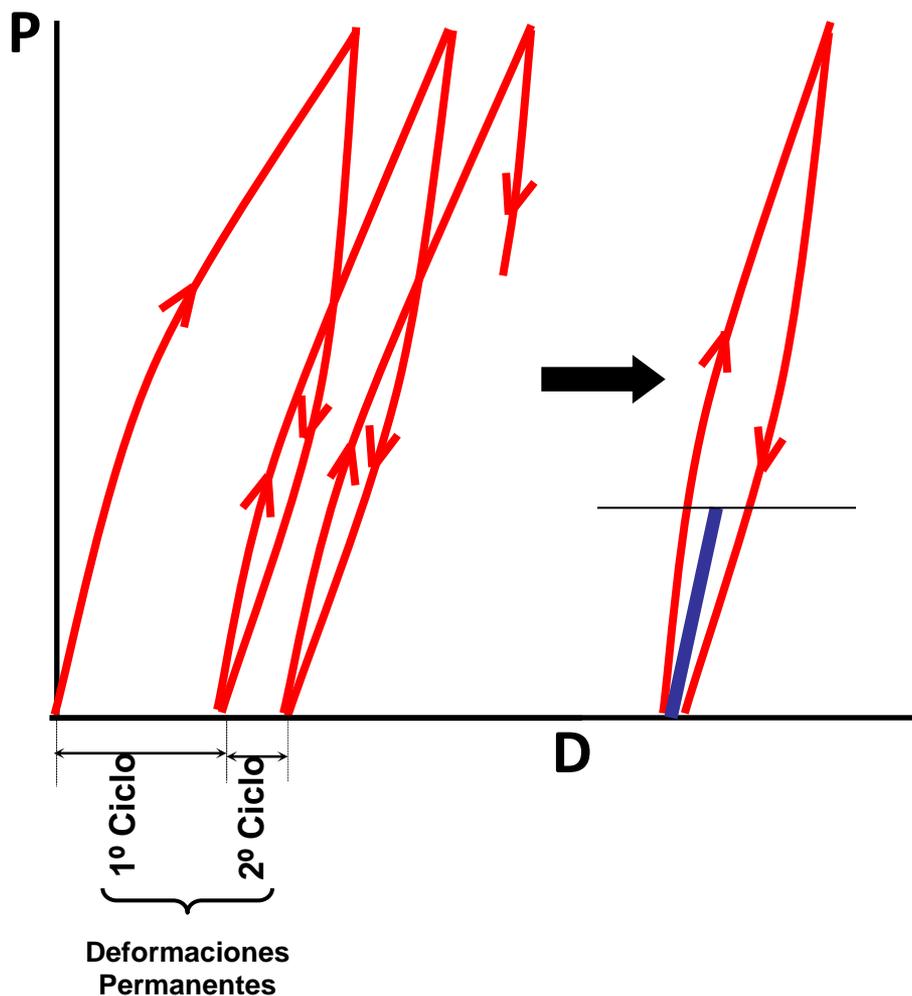
Introducción

Uno de los efectos positivos de la compactación en materiales viales

Tendencia a:

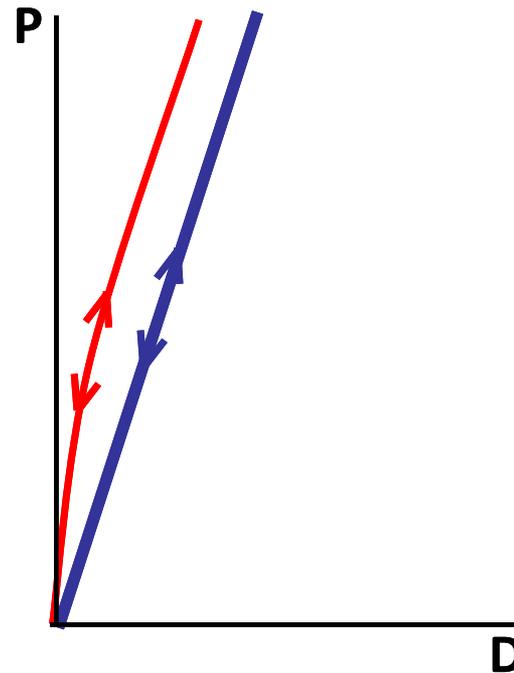
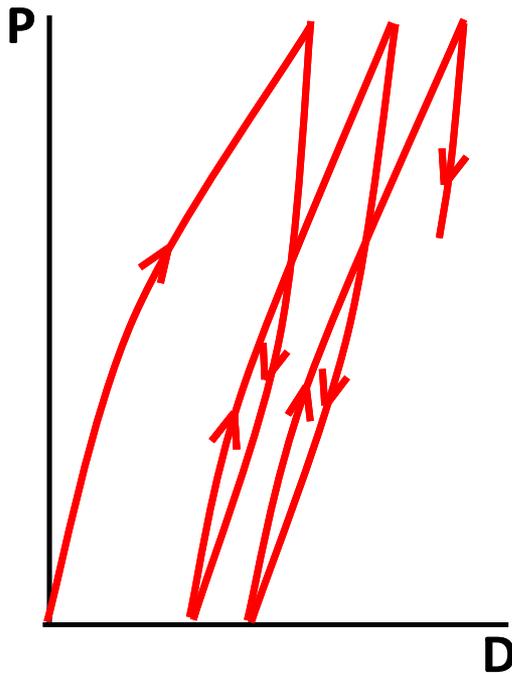
→ Elasticidad

→ Linealidad





Realidad vs. algunos Modelos



Aún las metodologías que utilizan modelos elástico-lineales reconocen de alguna forma la ocurrencia de acumulación de deformaciones permanentes en el pavimento



Ahuellamiento

- Causado por deformaciones inelásticas o plásticas
- Deformación permanente total en la superficie (ahuellamiento) es la acumulación de deformaciones permanentes
 - Capas estructurales del pavimento
 - Subrasante

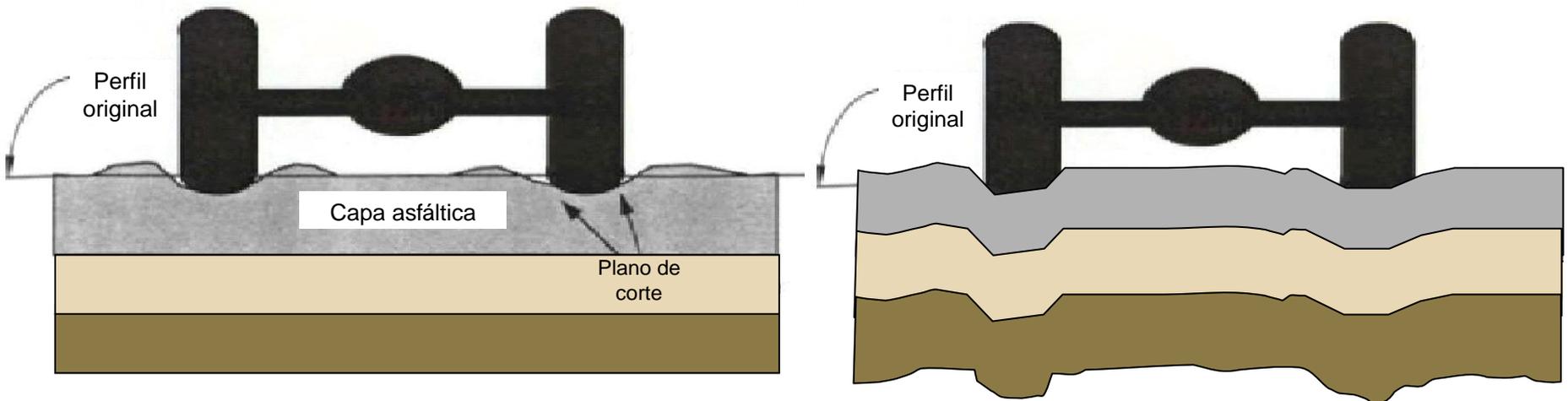


$$\Delta h = \sum_{i=1}^n \varepsilon_P^i \cdot h_i$$

ε_P^i depende de cada material

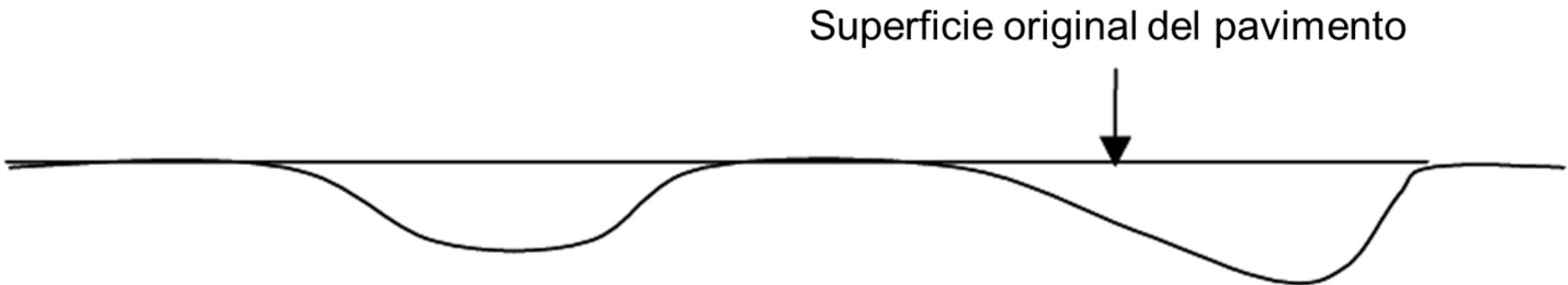
Ahuellamiento

- **Diferente tipo de deformación según las causas**
 - capas involucradas
 - superficial vs. estructural



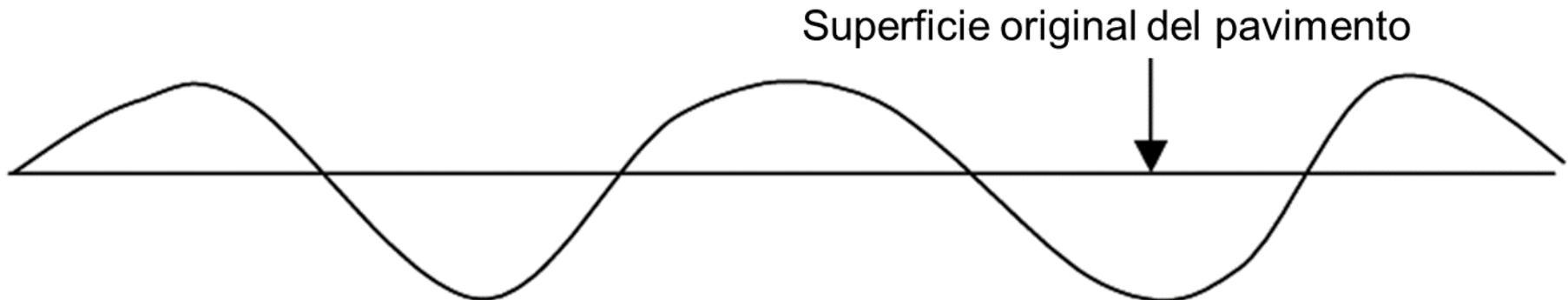
Tipos de Ahuellamiento

- **Densificación unidimensional o compresión vertical**
 - **excesivo %V o compactación inadecuada en cualquier capa**
 - **sobrecompactación de capas debido al tránsito**
 - **generalmente baja a moderada severidad**



Tipos de Ahuellamiento

- **Movimiento lateral o flujo plástico de los materiales desde las huellas**
 - con levantamientos laterales por corte
 - inadecuada resistencia al corte y/o elevadas sollicitaciones
 - generalmente moderada a elevada severidad
 - Más prematuro, más severo y más difícil de predecir y medir en laboratorio



Deformación Permanente

- **Uno de los daños asociados a las cargas actuantes**
- **Condiciona el comportamiento del pavimento**
- **Se manifiesta en superficie como ahuellamiento**
- **Ancho y profundidad dependiente de:**
 - **espesor de capas**
 - **propiedades de los materiales**
 - **tránsito**
 - **condiciones ambientales**

Deformación Permanente

- **Desarrollo gradual durante la vida útil del pavimento**
(**aún bien diseñado**, más rápido si no lo fue)
- **Daño incremental**
(acumulación de deformaciones permanentes)
- **Incremento función de**
 - **Stiffness**
 - **Resistencia a la deformación permanente**
 - **Tensiones inducidas en cada capa**

Deformación Permanente

- **Foco de gran cantidad de investigaciones durante los últimos 50 años**
- **Mayoría de modelos empíricos o semi-rationales**
- **Caracterización de materiales en general mediante propiedades elásticas o cuasi-elásticas**
- **Correlaciones pobres con el comportamiento en servicio**
- **Modelos empíricos sin la robustez necesaria, no resultan fácilmente extrapolables a otras condiciones**

Enfoques metodológicos del diseño

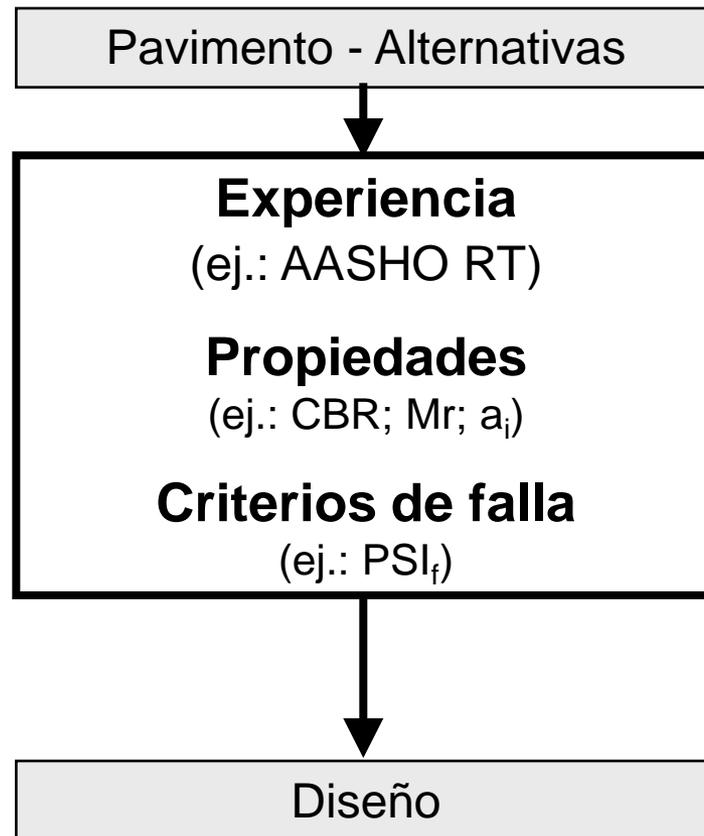
Enfoques clásicos del diseño estructural de pavimentos

- **Metodologías empíricas**
- **Metodologías racionales**

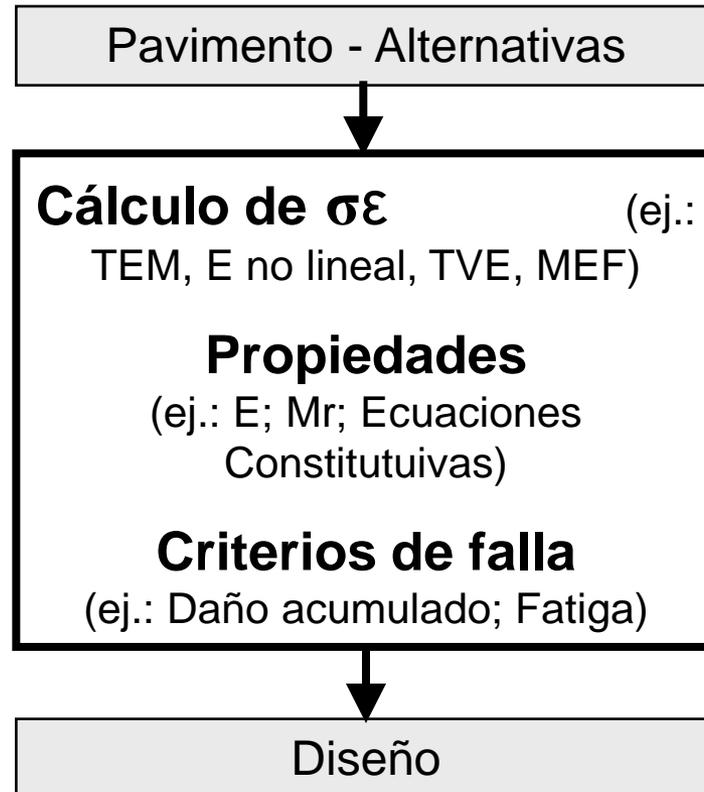
Tendencia actual

- **Metodología racional – empírica (M-E)**

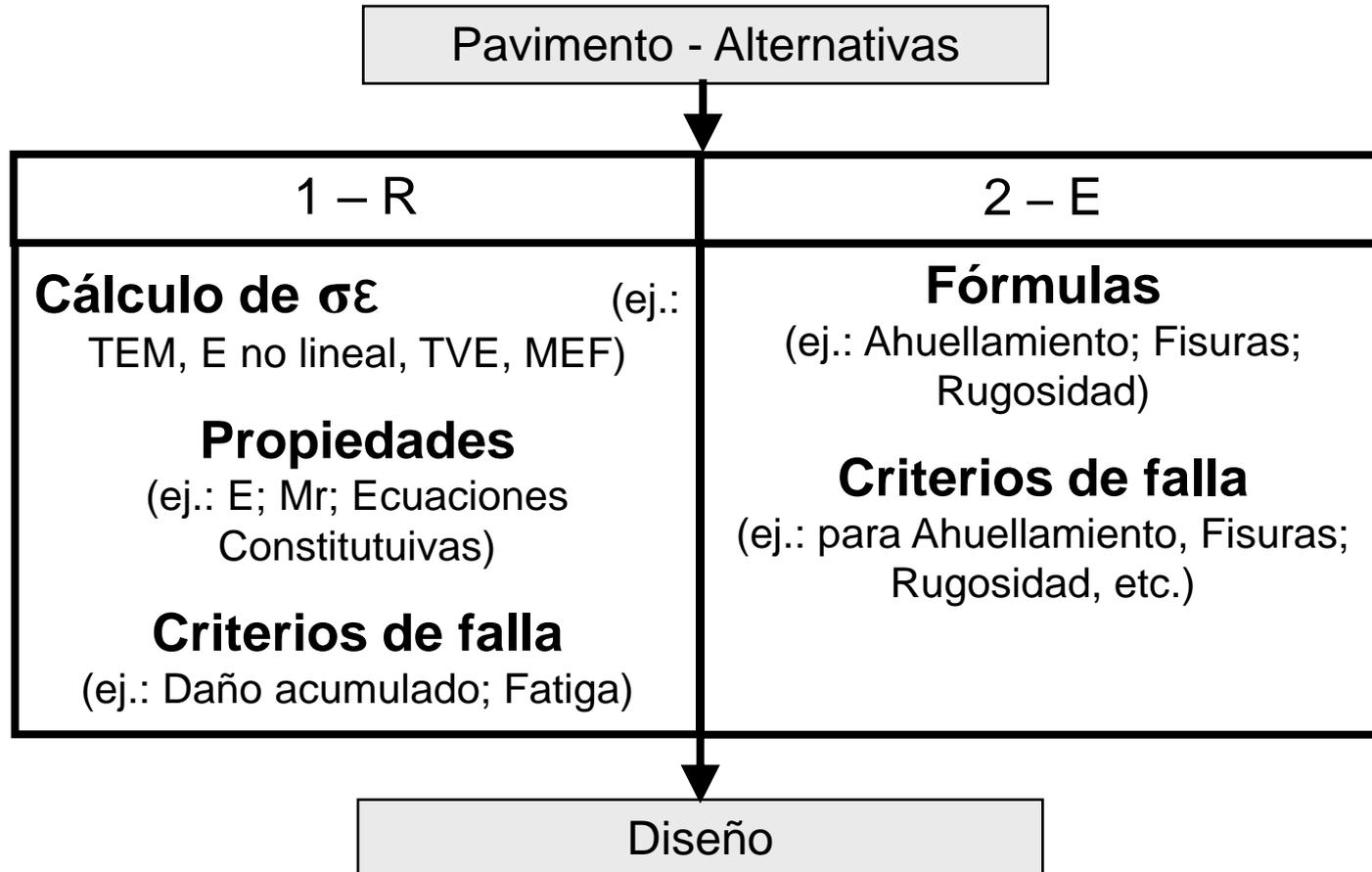
Enfoque Empírico



Enfoque Racional



Enfoque Racional – Empírico (M-E)



Enfoques metodológicos del diseño

Principales métodos de diseño estructural utilizados oficialmente en Argentina a nivel nacional

- **Empíricos (E):** **AASHTO**
- **Racionales (M):** **SHELL**

Sin carácter oficial, se utilizan diferentes softwares (consultores / universidades).

- **Mixtos (M-E):** **-----**

Sin carácter oficial, algunas experiencias en ámbitos académicos (desarrollos propios / AASHTO MEPDG).

Criterio de Falla

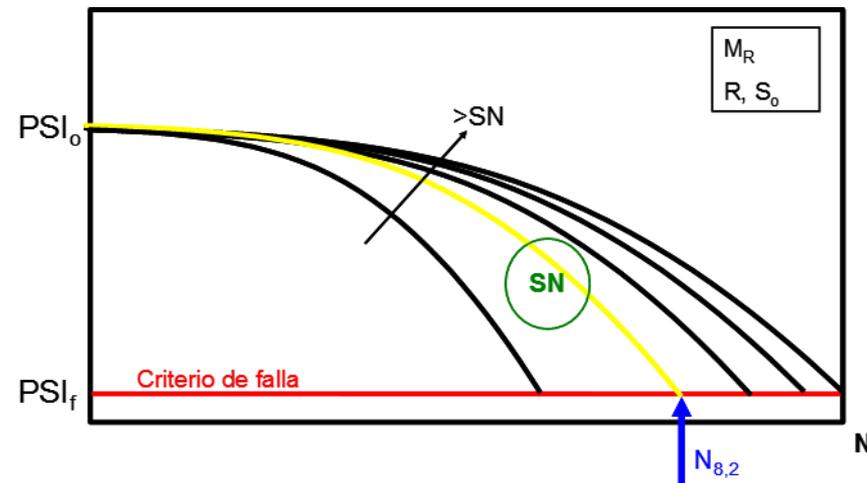
- **Basado en el USUARIO**
(percepción de confort y seguridad)

- **PSI_f**

$$PSI = 5.03 - 1.91 \text{ Log } (1+SV) - 1.38 (RD)^2 - 0.01 (C+P)^{0.5}$$

- Regularidad del perfil longitudinal (SV)
- **Ahuellamiento (RD)**
- Fisuras – Bacheos (C+P)

- **VIDA ÚTIL = f (SN, ΔPSI , Mr)**

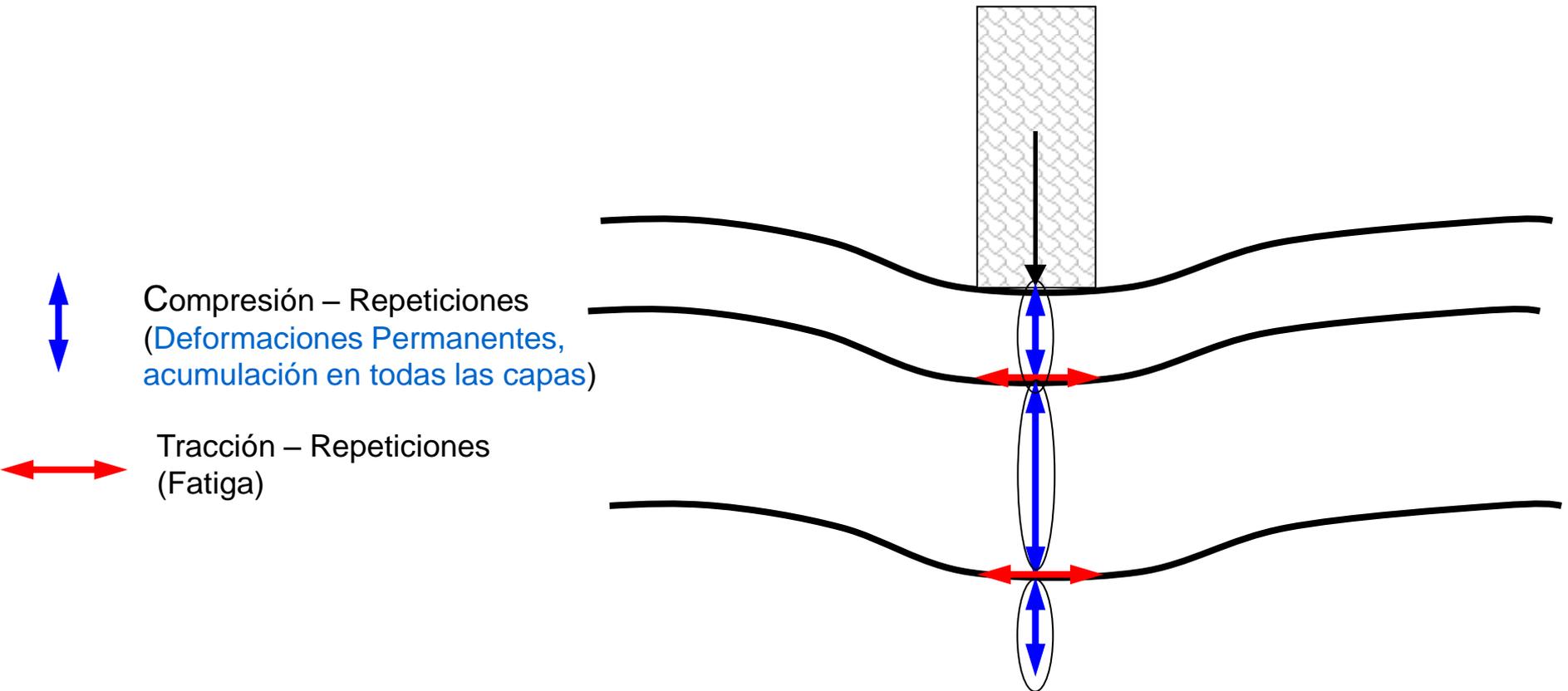


Limitaciones

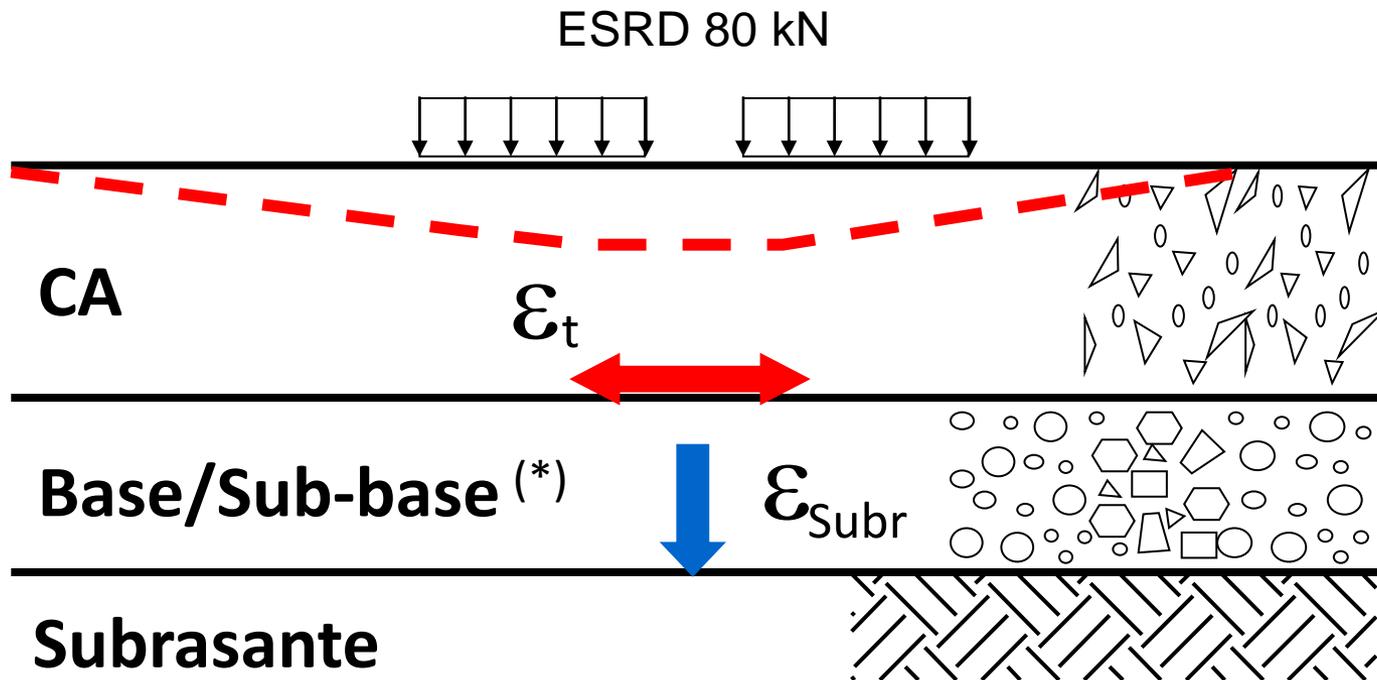
- Ahuellamiento inmerso en un índice de condición.
- Ahuellamiento medio (RD) puede ser más importante como criterio de falla que el (PSI) o la rugosidad (SV) en vías con tránsito muy pesado.
- ESALs para desarrollar determinados niveles de ahuellamiento pueden ser muy diferentes que los requeridos para desarrollar ciertos niveles de serviciabilidad (tabulados en el método AASHTO).
 - LEFs para ahuellamiento pueden ser MUY diferentes de los basados en las mediciones de serviciabilidad en el AASHO Road Test.
- Limitaciones propias de un procedimiento empírico

Cargas del Tránsito

- **Generan estados complejos de tensiones**



Criterios de Falla



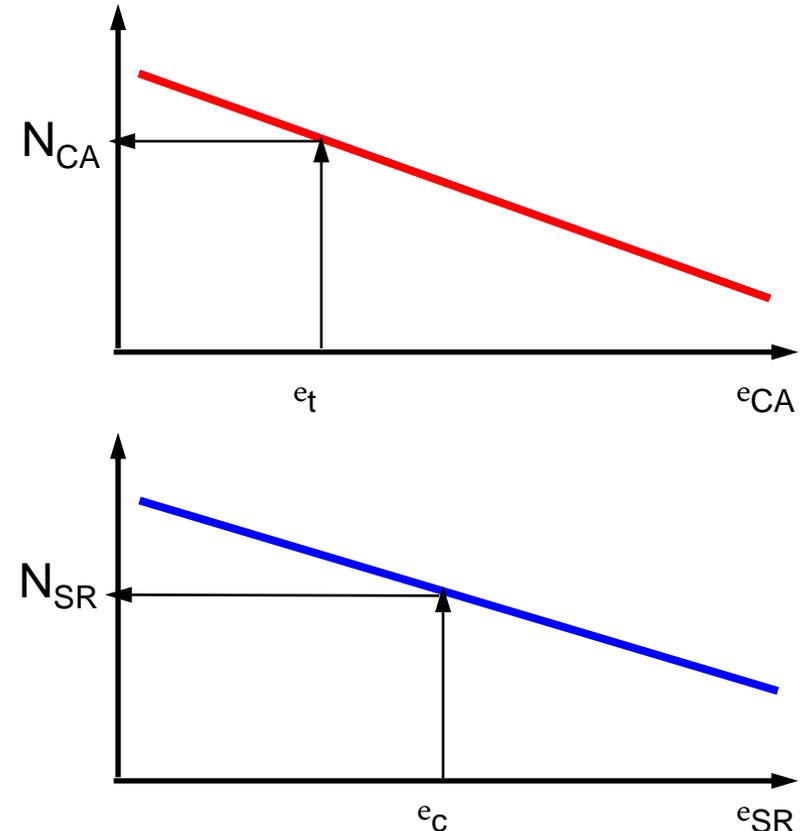
(*) ϵ_t para caso de capa cementada

Criterios de diseño

- Basado en la aplicación de la TEM
- Criterios de diseño principales
 - e_v **compresión sobre la superficie de la subrasante**
 - e_h tracción en la fibra inferior de la mezcla asfáltica
- Criterios de diseño secundarios
 - Tensiones admisibles en capas de base cementadas
 - **Deformación permanente en capa asfáltica**

Criterios de falla (aplicación mediante Ley de Miner)

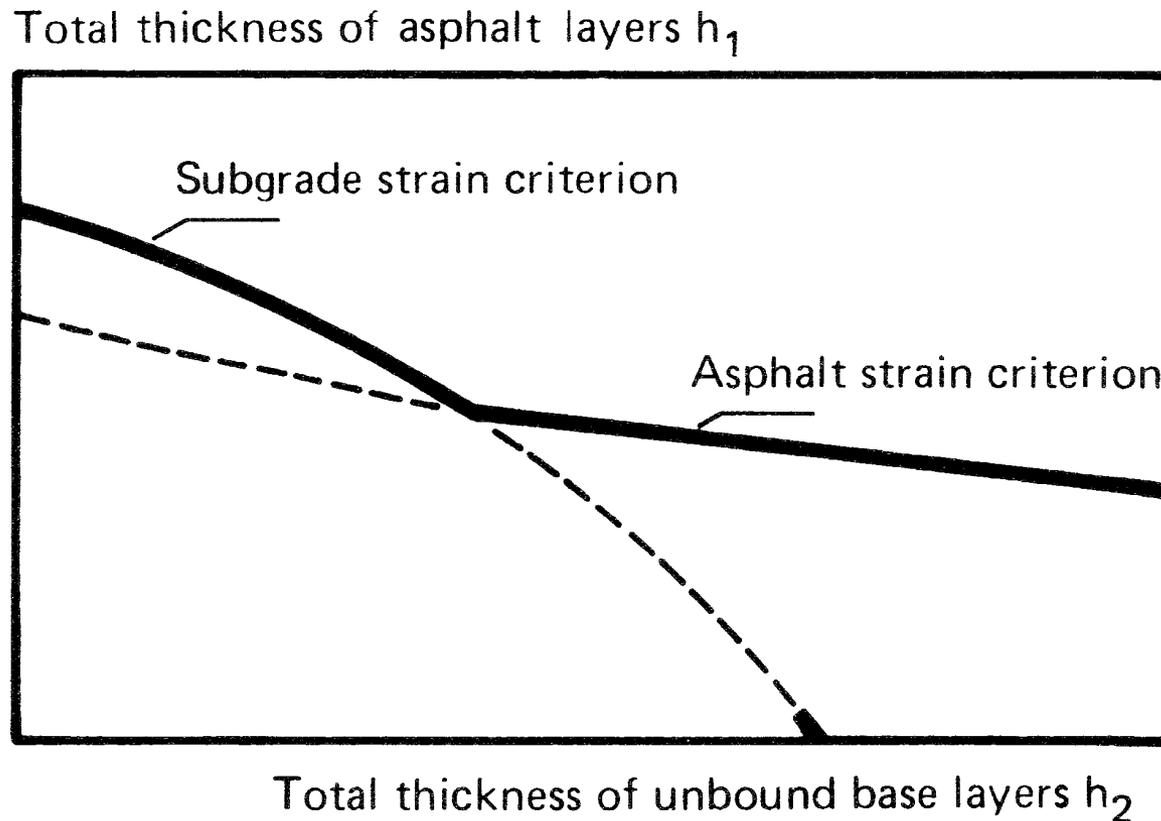
- **Falla por fatiga en MA**
 - Ensayos
- **Falla por SR**
 - Correlación AASHO RT (*)
 - Interpretación empírica
 - Máximas s_{SR} (TEM)
 - $PSI_f = 2.5$
 - $N_{SR} = f_1 \epsilon_c^{-f_2}$



(*) solo en el 9% de los casos el ahuellamiento se debió a deformaciones en la subrasante

Curvas de diseño

- **Envolventes de falla**



Enfoque racional – SHELL

Criterio de diseño secundario

- A pesar de que, en principio, la deformación unitaria admisible de compresión sobre la subrasante haya sido limitada a un nivel suficientemente bajo, la **integral de la deformación permanente en todas las capas puede implicar deformaciones superficiales inaceptables.**
- Procedimiento adicional para predecir la deformación permanente en las capas asfálticas (en base a ensayos de laboratorio disponibles).
- Se utiliza como chequeo final, para constatar que la deformación permanente en el pavimento que se ha diseñado (en base a criterios de deformación unitaria) no exceda cierto límite durante su vida útil.

Enfoque racional – SHELL

Deformación permanente en capas asfálticas

- **Hipótesis para el cálculo del ahuellamiento**
 - **Ahuellamiento = variación de espesor en la huella**
 - **Asume que la deformación permanente es función de la componente viscosa (no elástica) del stiffness del ligante**
 - **Basado en ensayos de creep estático (compresión axial constante; S_{mix} - S_{bit})**
 - **No existe gradiente de temperatura en la capa**
 - **Subcapas para considerar diferentes MA y gradientes de temperatura**

Deformación permanente en capas asfálticas

- Expresión para el ahuellamiento en el CA

$$\Delta h = h_0 \cdot \frac{\sigma}{E} \quad \Rightarrow \quad \Delta h = c_m \cdot h \cdot \frac{\bar{\sigma}}{S_{mix,visc}}$$

donde:

Δh : ahuellamiento

c_m : factor de corrección por efecto dinámico (1-2, según tipo de MA)

Tiene en cuenta diferencias entre creep estático y comportamiento dinámico.

$\bar{\sigma} = z \cdot \sigma_0$: tensión promedio de la capa asfáltica (TEM)

σ_0 : presión de contacto del neumático ($80 \text{ kN} - 6 \times 10^5 \text{ N/m}^2$)

z : coeficiente de distribución de presiones en la capa

$S_{mix,visc}$: componente viscosa del stiffness de la mezcla (S_{mix} para $S_{bit} = S_{bit,visc}$)

Deformación permanente en capas asfálticas

- **Para el cálculo de ahuellamiento:**
 - 3 subcapas (40mm + 40mm + variable)
 - 6 momentos (períodos) del día (1-5-9-13-17-21 hs)
 - MMATs (días iguales dentro de un mismo mes)
 - Temperatura ligante f (MMAT, momento, prof.)
 - Viscosidad efectiva anual
 - A través de la consideración de la componente viscosa del ligante y de la mezcla, pondera la influencia de la temperatura, gradientes, tránsito y propiedades del material

Deformación permanente en capas asfálticas

- Para el cálculo de ahuellamiento:
 - Asume que la deformación permanente es función de la componente viscosa (no elástica) del stiffness del ligante:

$$S_{bit,visc} = \frac{3 \cdot \eta_{ef.anual}}{B \cdot W_{eq} \cdot t}$$

$\eta_{ef.anual}$: viscosidad efectiva anual del ligante

W_{eq} : número de ruedas que pasan por la huella, considerando simples y duales.

(Diferente procedimiento de cálculo que para fatiga)

t : tiempo de carga

B : años de vida útil

Enfoque racional – SHELL

Deformación permanente en capas asfálticas

- Para el cálculo de ahuellamiento:
 - Considera que:

$$\frac{S_{bit}}{S_{mix}} = \frac{S_{bit,visc}}{S_{mix,visc}}$$

Conocido

Calculado con expresión anterior

Deformación permanente en capas asfálticas

- **Una vez calculado para cada subcapa**

$$\Delta h = c_m \cdot h \cdot \frac{\bar{\sigma}}{S_{mix,visc}}$$

el ahuellamiento será:

$$Ah = \sum_{i=1}^3 \Delta h_i$$

Resumen

- **Estimación en la capa asfáltica a partir del producto de:**
 - **Espesor de capa asfáltica**
 - **Tensión promedio en la capa**
 - **Stiffness de la capa**
 - **Factor de corrección por efectos dinámicos**
- **Estimación en capas no ligadas por otros métodos**
- **Despreciable en subrasante si se ha diseñado correctamente mediante el método**

Limitaciones

- Solo analiza las mezclas asfálticas.
- No estima la deformación permanente en la subrasante (si fue bien diseñado la considera despreciable).
Limitación de origen del procedimiento.
- No estima la deformación permanente en las capas estructurales no ligadas (deben ser estimadas por otros métodos y adicionadas al cálculo).
- Tipos de ensayos (creep estático; inadecuado para ciertos tipos de ligantes y mezclas → solicitaciones repetidas)
- MA consideradas (no incluye modificadas, etc.)
- Limitaciones propias de la aplicación de la TEM

Consideración del ahuellamiento

- **Las diferentes metodologías utilizan en general dos formas de controlarlo:**
 - **Limitar la deformación unitaria vertical por compresión en la superficie de la subrasante**
 - Sencillo de aplicar
 - Persigue valores tolerables de ahuellamiento
 - Requiere un criterio de falla basado en correlaciones
 - Shell (Claussen et al., 1977); Asphalt Institute (Shook et al., 1982)
 - **Calidad de las capas superficial y de base deben ser bien controladas**
 - **Limitar el ahuellamiento a cierto valor tolerable**
 - **Cálculo directo de la profundidad de huella**
 - Basados en correlaciones empíricas (PDMAP, MICH-PAVE)
 - Basados en cálculos teóricos (VESYS)

Históricamente

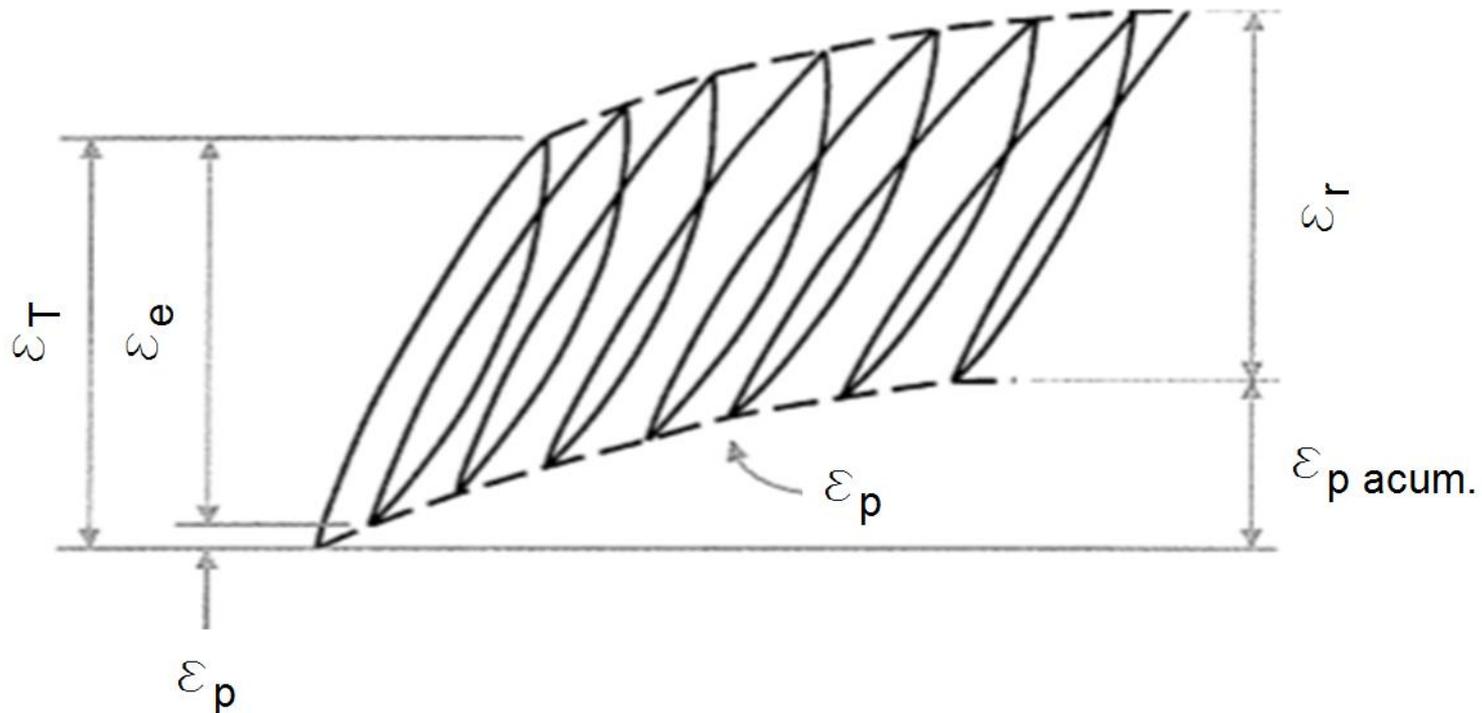
- Asociar la deformación permanente a la excesiva e_v en la superficie de la subrasante
- Asumir que si el pavimento bien diseñado y construido con buena calidad, el ahuellamiento puede reducirse a niveles tolerables limitando e_v en la subrasante
- Sin embargo, **la deformación permanente total es producto de la acumulación de deformaciones permanentes que pueden ocurrir en todas las capas del pavimento**

Consideración del ahuellamiento

- El **uso de la deformación específica vertical por compresión** para el control de las deformaciones permanentes, se basa en el hecho de que en los materiales que conforman las capas de los pavimentos, las **deformaciones unitarias plásticas son proporcionales a las deformaciones unitarias elásticas.**
- Limitando las deformaciones elásticas sobre la subrasante también **se limitan las que se producen en las demás capas.** Y así puede controlarse la magnitud de las deformaciones permanentes totales.
- A mayores **pesos** por eje y mayores **presiones** de inflado, la **mayor parte de las deformaciones permanentes se producen en las capas por encima de la subrasante,** por lo que la **determinación de deformaciones permanentes en cada capa individualmente resulta un mejor enfoque** que el de la deformación unitaria por compresión sobre la subrasante.

Condición Resiliente de los materiales

- Relación resiliente vs. plástica no es siempre constante
- M_r no es un buen indicador de deformación permanente, particularmente para estados de tensiones elevados.



Teoría Viscoelástica – Mezclas asfálticas

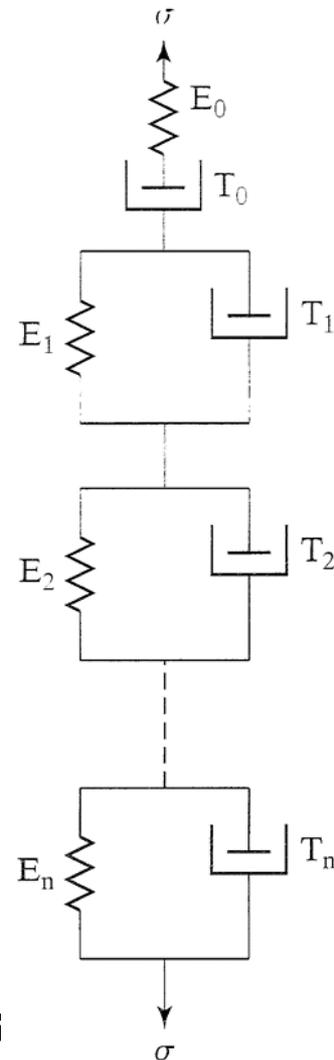
- Para el caso de una mezcla asfáltica considerada como un material viscoelástico – lineal, debe especificarse su Creep Compliance (recíproco del módulo para varios tiempos de aplicación de carga).
- **Dependencia de (t,T)**
- Requiere caracterizar los materiales:
 - **Modelo mecánico**
 - Conformados por combinación de resortes y amortiguadores
 - **Curva Creep-Compliance**
 - Más simple

Viscoelasticidad – Modelos Mecánicos

- Puede caracterizar un material viscoelástico
- Bajo σ constante:

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E_0} \left(1 + \frac{t}{T_0} \right) + \sum_{i=1}^n \frac{\sigma}{E_i} \left[1 - \exp \left(-\frac{t}{T_i} \right) \right]$$

- Explica el efecto de la duración de la carga
- Bajo única carga predominan la deformación instantánea y elástica retardada
- Bajo gran número de repeticiones, la acumulación de deformaciones unitarias viscosas causa deformaciones permanente

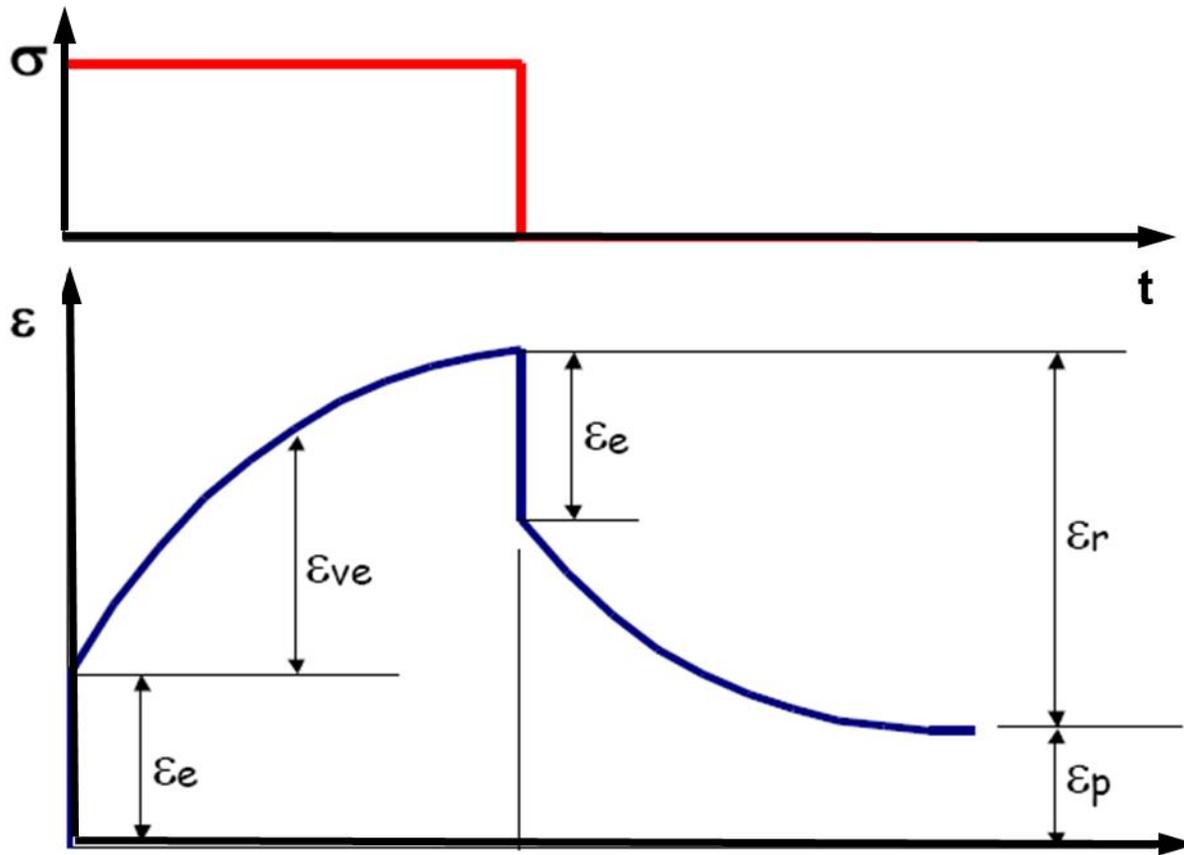




X SIMPOSIO
DEL ASFALTO

Enfoque racional

Viscoelasticidad



Viscoelasticidad – Creep Compliance

- **Caracteriza materiales viscoelásticos**

$$D(t) = \frac{\varepsilon(t)}{\sigma}$$

- $\varepsilon(t)$ es la deformación unitaria dependiente del tiempo bajo condiciones de tensión constante
- Para condición de tensión constante, D es el recíproco del módulo de Young.
- De manera general, puede expresarse como:

$$D(t) = \frac{1}{E_0} \left(1 + \frac{t}{T_0} \right) + \sum_{i=1}^n \frac{1}{E_i} \left[1 - \exp \left(-\frac{t}{T_i} \right) \right]$$

$E_0, T_0, E_i, T_i =$ **constantes viscoelásticas**

Si se conoce la curva, se pueden determinar las constantes viscoelásticas.

Deformación permanente en capas asfálticas

- **Combinación de:**
 - **Densificación (cambio de volumen)**
 - **Deformación por corte (distorsión de forma)**
- **Diversos estudios sugieren que la deformación por corte es la principal causa de la deformación permanente, en comparación con la densificación por cambios de volumen (principalmente para MA con $V > 9\%$)**
- **La simulación elástica subestima la contribución relativa de la distorsión de forma frente a la de cambio de volumen**

Enfoque M-E para predicción de ahuellamiento

- **Cálculos racionales + predicciones empíricas del ahuellamiento asociadas con dichos cálculos**
- **Frecuentemente, la disponibilidad de información de campo para la calibración resulta limitada**

Capas asfálticas

- Los modelos racional-emíricos suelen relacionar la ϵ_p vertical de compresión en la mitad del espesor de una subcapa, con el N, temperatura, nivel de tensión inducida y otros parámetros (ej. caract. de los materiales).
- Uno de los más antiguos: VESYS (Kenis et al.)

$$\Delta \epsilon_p (N) = \epsilon \mu N^{-\alpha}$$

$\Delta \epsilon_p (N)$ = deformación permanente incremental causada por el ciclo N

ϵ = deformación total calculada

μ, α = propiedades de los materiales (laboratorio cargas repetidas, dependen del tipo de mezcla, temperatura y estado de tensión)

Modelos del tipo “relación deformación permanente vs. resiliente”

- **Los principales parámetros que gobiernan la acumulación de deformaciones permanentes para una determinada MA son la temperatura y el nivel de tensiones**
- **Esos efectos pueden incorporarse en el modelo a través de los parámetros característicos del material (requiere ensayos que abarque rangos de temperatura y niveles de tensión)**
- **En realidad esos 2 parámetros influyen tanto la deformación permanente como la recuperable. Por lo tanto, normalizando las deformaciones permanentes con las elásticas debería capturar la mayor parte de los efectos de la temperatura y el nivel de tensión (NCHRP Project 1-37^a - MEPDG)**

$$\text{Log}(\epsilon_p/\epsilon_r) = f (N, T)$$

Conclusiones

- **La predicción de deformaciones permanentes debería abordarse mediante metodologías M-E**
- **La complejidad del problema dificulta la disponibilidad de modelos racionales relativamente puros**
- **Las metodologías clásicas, en general no abordan el problema con la confiabilidad suficiente, caracterizan a los materiales mediante propiedades elásticas o cuasi-elásticas, y presentan en general pobres correlaciones con el comportamiento en servicio**
- **Mientras la técnica avanza y la disponibilidad de información para calibración de modelos se torna accesible, se cree que la ejecución de ensayos y la selección de materiales que minimicen las deformaciones permanentes es la vía para el abordaje actual en el país.**



PRE-XVII CONGRESO ARGENTINO
de Vialidad y Tránsito

8º EXPOVIAL ARGENTINA

3 AL 6 DE NOVIEMBRE 2014

HOTEL PANAMERICANO - Buenos Aires, Argentina



MUCHAS GRACIAS POR LA ATENCIÓN

Juan M. Campana
Asociación Argentina de Carreteras
Comisión Permanente del Asfalto

X CONGRESO INTERNACIONAL ITS

X SIMPOSIO DEL ASFALTO

II SEMINARIO INTERNACIONAL DE PAVIMENTOS DE HORMIGÓN



www.congresodevialidad.org.ar