

3er. CONGRESO  
PARAGUAYO  
**Vialidad  
y Tránsito**  
EXPO VIAL 2018



**APC**  
ASOCIACIÓN PARAGUAYA DE CARRITERAS



# **MÉTODOS EMPÍRICOS MECANÍSTICOS. LEYES DE FATIGA, SU APLICACIÓN EN PARAGUAY**

Ing. Fabián Schvartzer

Colaboradores: Ing. Rodrigo Munilla, Ing. Nicolás Mordegliá, Ing. Fernanda Pucciarello

# CONTENIDO

- Métodos de Diseño: Pavimentos Flexibles
  - Empíricos
  - Mecanicistas
  - Empíricos-Mecanicistas
    - Leyes de Fatiga
- Situación en Paraguay
  - Empleos de Curvas de Fatiga (estructuras típicas)
- Conclusiones y Recomendaciones

# METODOS DE DISEÑO PAVIMENTOS FLEXIBLES

- **Empíricos (de correlación):** Basados en caminos experimentales .
- **Mecanicistas:** Basados en cálculos de tensiones y deformaciones con verificaciones experimentales.
- **Empíricos-Mecanicista:** Combina aspectos mecanísticos y empíricos.



# METODOS DE DISEÑO PAVIMENTOS FLEXIBLES

## Diseño Empírico

- Basado en resultados de la experiencia y/o ensayos
- Requiere muchas observaciones para establecer relaciones entre las variables de diseño y la performance del pavimento.
- No necesariamente se establecen bases científicas para establecer relaciones

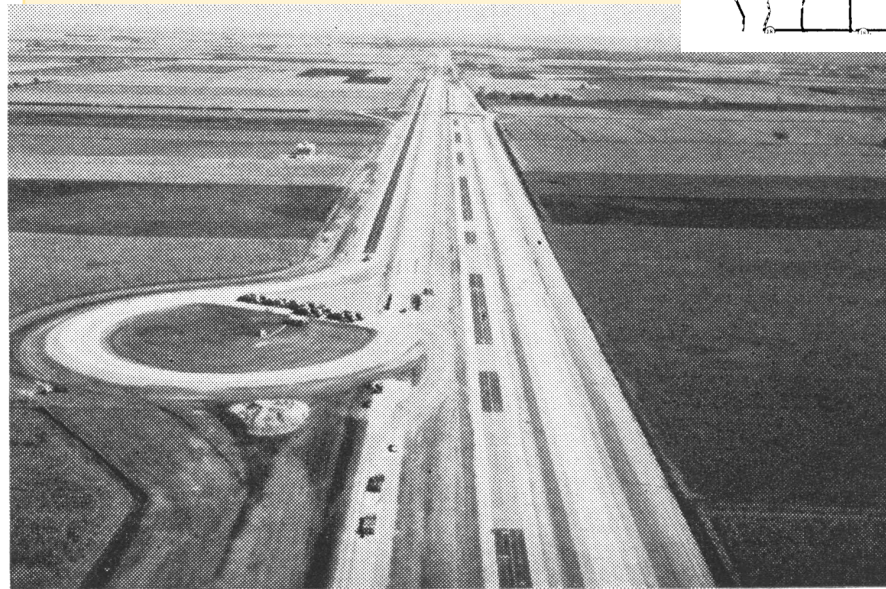
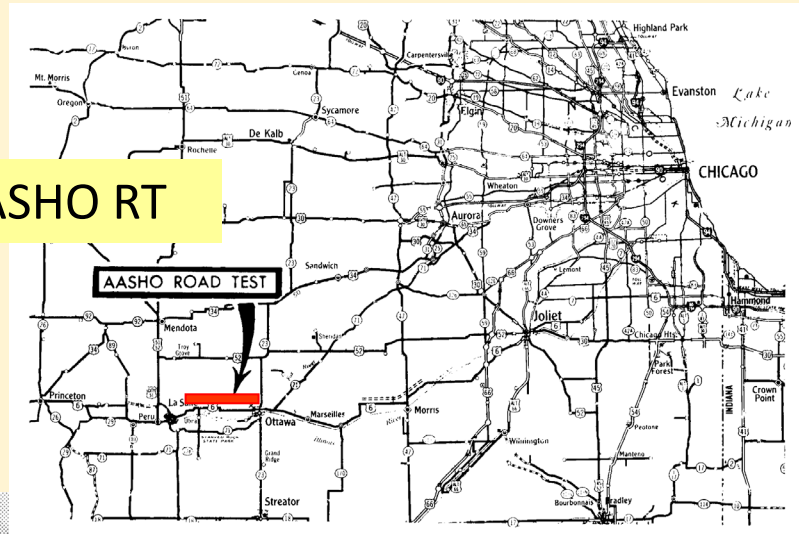
Ejemplos : AASHTO, CBR, R-veem



# METODOS DE DISEÑO PAVIMENTOS FLEXIBLES

## Diseño Empírico

AASHO RT

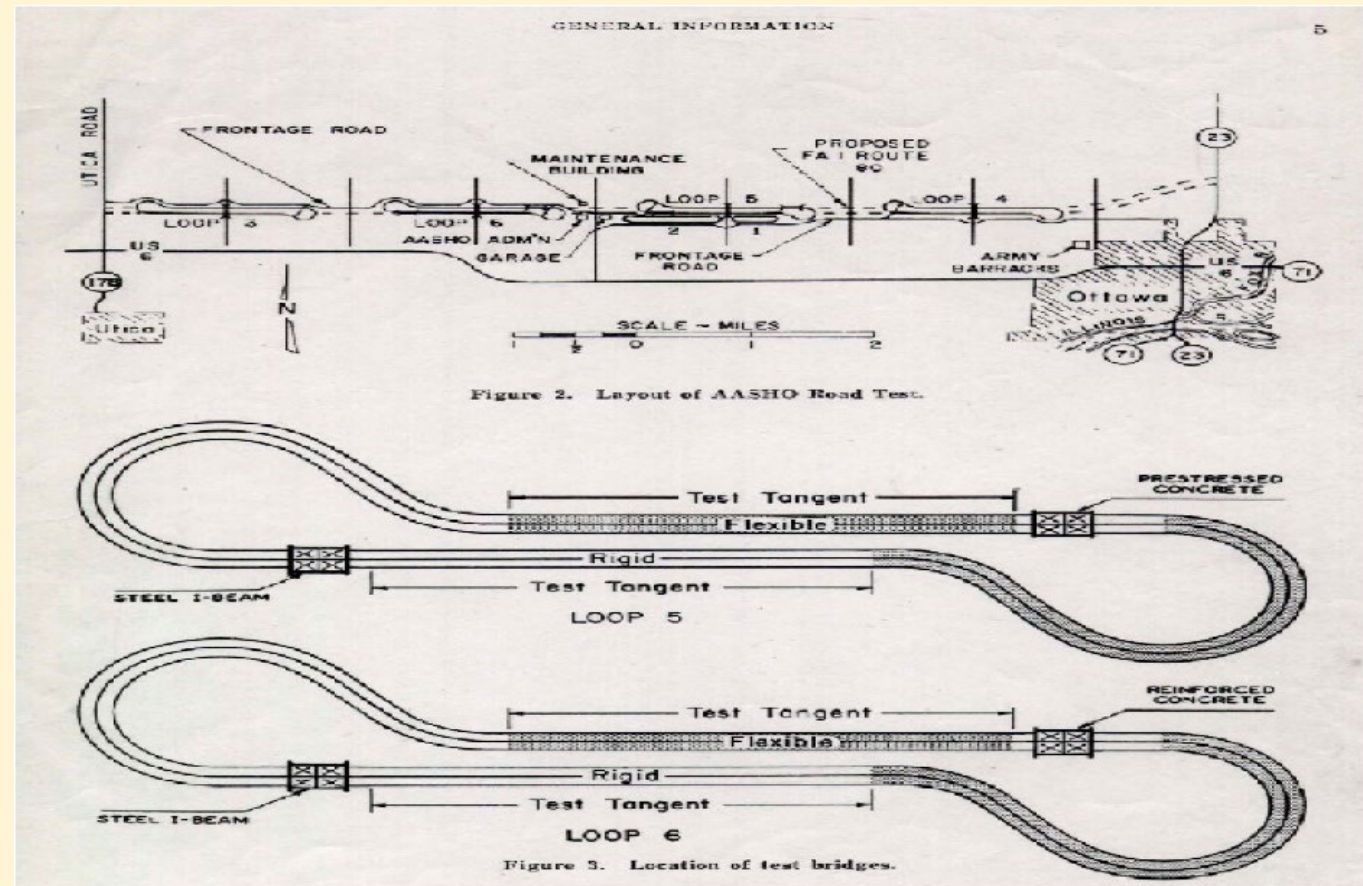


(AASHO, 1961)



# METODOS DE DISEÑO PAVIMENTOS FLEXIBLES

## Diseño Empírico

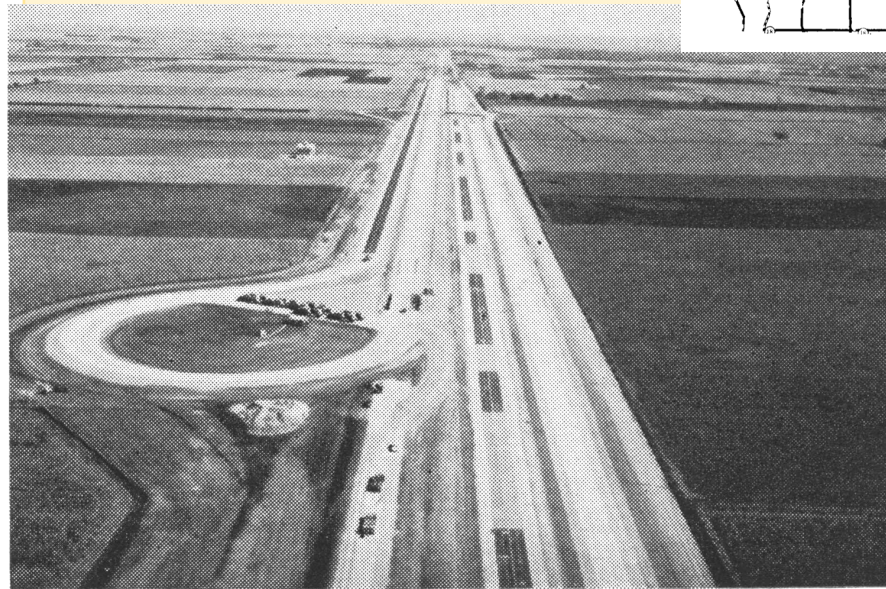
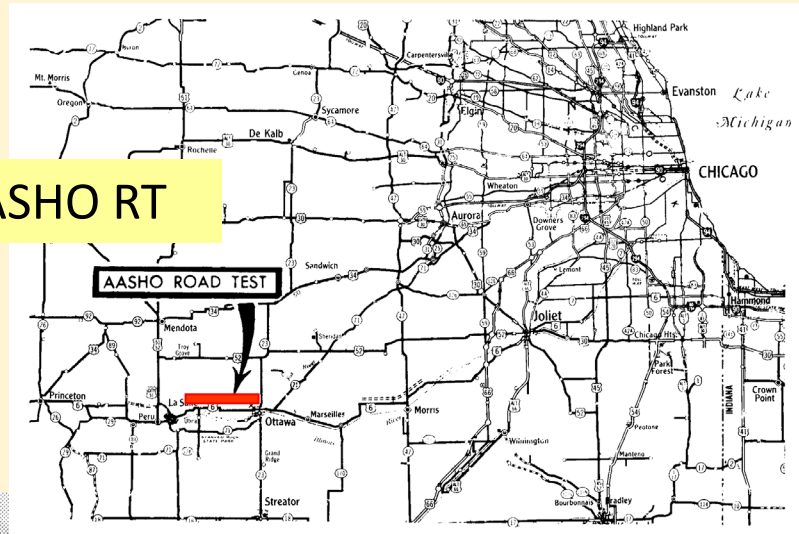




# METODOS DE DISEÑO PAVIMENTOS FLEXIBLES

## Diseño Empírico

AASHO RT

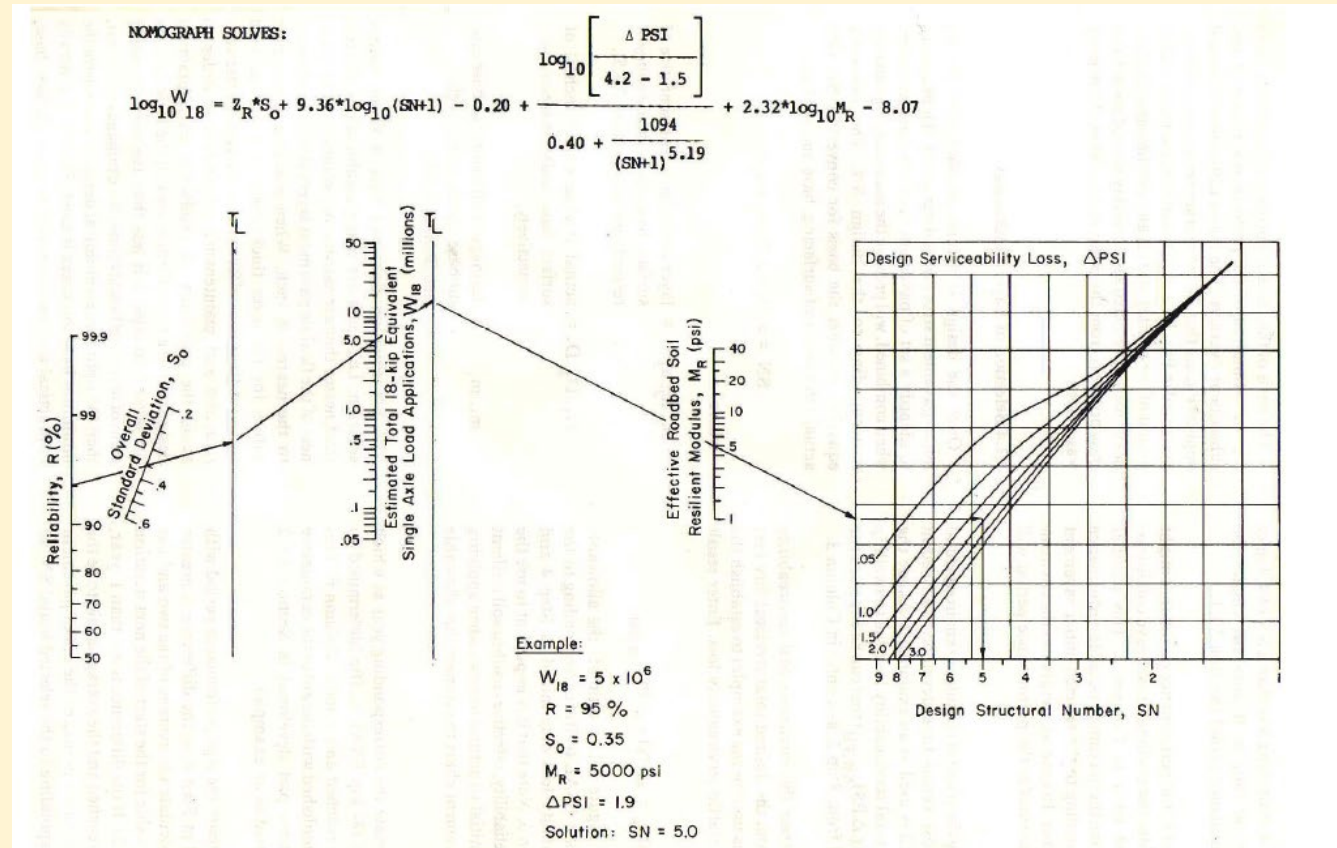
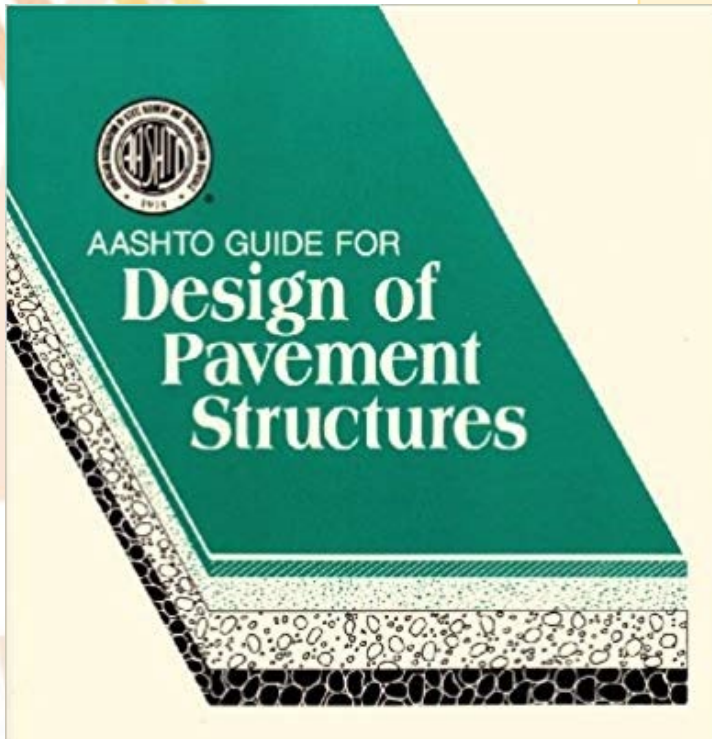


(AASHO, 1961)



# METODOS DE DISEÑO PAVIMENTOS FLEXIBLES

## Diseño Empírico



AASHTO GUIDE 1993



# METODOS DE DISEÑO PAVIMENTOS FLEXIBLES

## Diseño Empírico

### Fortalezas/ Debilidades / Limitaciones

- Método simple. Basado en investigaciones y experiencias
- Guía para evaluación estructural y para caracterización de materiales
- Guía específica para cada tema clave
- Verificación parcial con datos de campo
- Basado en modelos de comportamiento empírico
- Datos del LTPP indican diferencias importantes en tránsito elevados
- Limitaciones asociadas con el procedimiento AASHTO

# METODOS DE DISEÑO PAVIMENTOS FLEXIBLES

## Diseño Empírico

### Fortalezas/ Debilidades / Limitaciones

- Una zona climática
- Un tipo de base
- Sin drenes
- Calidad de la construcción superior a la normal
- Baja performance medida y modelada
- Limitada incorporación de confiabilidad



# METODOS DE DISEÑO PAVIMENTOS FLEXIBLES

## Diseño Empírico

### Fortalezas/ Debilidades / Limitaciones



- *El avance del desarrollo en el diseño de pavimentos deja atrás los métodos empíricos y se direcciona hacia métodos mecanísticos*

# METODOS DE DISEÑO PAVIMENTOS FLEXIBLES

## Diseño Mecánico

- Puramente científico
- Enfatiza el comportamiento mecánico de la estructura producido por las cargas
- Las propiedades geométricas de la estructura, materiales y las cargas deben ser conocidas con precisión
- Ejemplos : No existen diseños puramente mecánicos.



# METODOS DE DISEÑO PAVIMENTOS FLEXIBLES

## Diseño Empírico-Mecanístico

- Combina aspectos mecanísticos y empíricos
- Componente mecanístico determina las respuestas del pavimento a través de modelos matemáticos
- Componente empírico relaciona las respuestas del pavimento con su performance
- Cada tipo de falla está asociada con una respuesta crítica del pavimento

# METODOS DE DISEÑO PAVIMENTOS FLEXIBLES

## Diseño Empírico-Mecanístico

### Fortalezas/ Debilidades / Limitaciones

- Método basado en teorías racionales
- Permite evaluar diferentes factores y sus respuestas correspondientes, en términos ingenieriles
- Limitaciones asociadas con el cumplimiento de las hipótesis asumidas
- Leyes de fatiga.

# MÉTODOS DE DISEÑO PAVIMENTOS FLEXIBLES

## Diseño Empírico-Mecanístico

- Diseños mecanísticos
- Método Shell (1977)
- Asphalt Institute (1982)
- NCHRP Project 1-26 (1992)
- Diseño Sudafricano M-E (1992)
- Illinois, Kentucky, Washington, Minnesota
- MEPDG

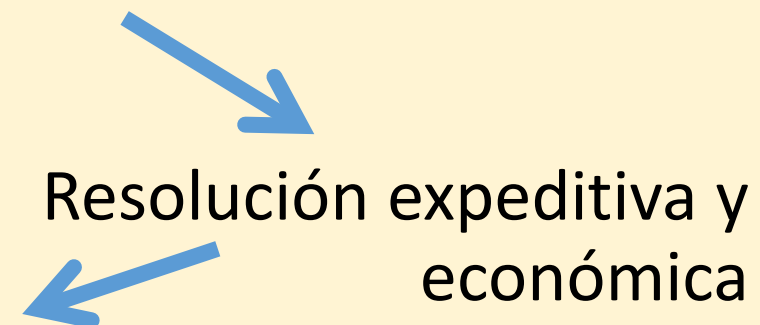
# METODOS DE DISEÑO PAVIMENTOS FLEXIBLES

## Diseño Empírico-Mecanístico

### Leyes de Fatiga

La disponibilidad actual de equipos y softwares hace atractivo el Diseño Racional de pavimentos en base al uso de sistemas multicapas resueltos con la teoría de elasticidad.

Expresiones analíticas



Estimar vida útil, dimensionar  $E^o$  nuevas y evaluar  $E^o$  existentes





# METODOS DE DISEÑO PAVIMENTOS FLEXIBLES

## Diseño Empírico-Mecanístico

- La Teoría de capas elásticas implica necesariamente adoptar una relación lineal entre esfuerzos y deformaciones, con un modulo que caracterice cada material.
- Controlar los esfuerzos de deformaciones y deflexiones críticos para evitar la falla.

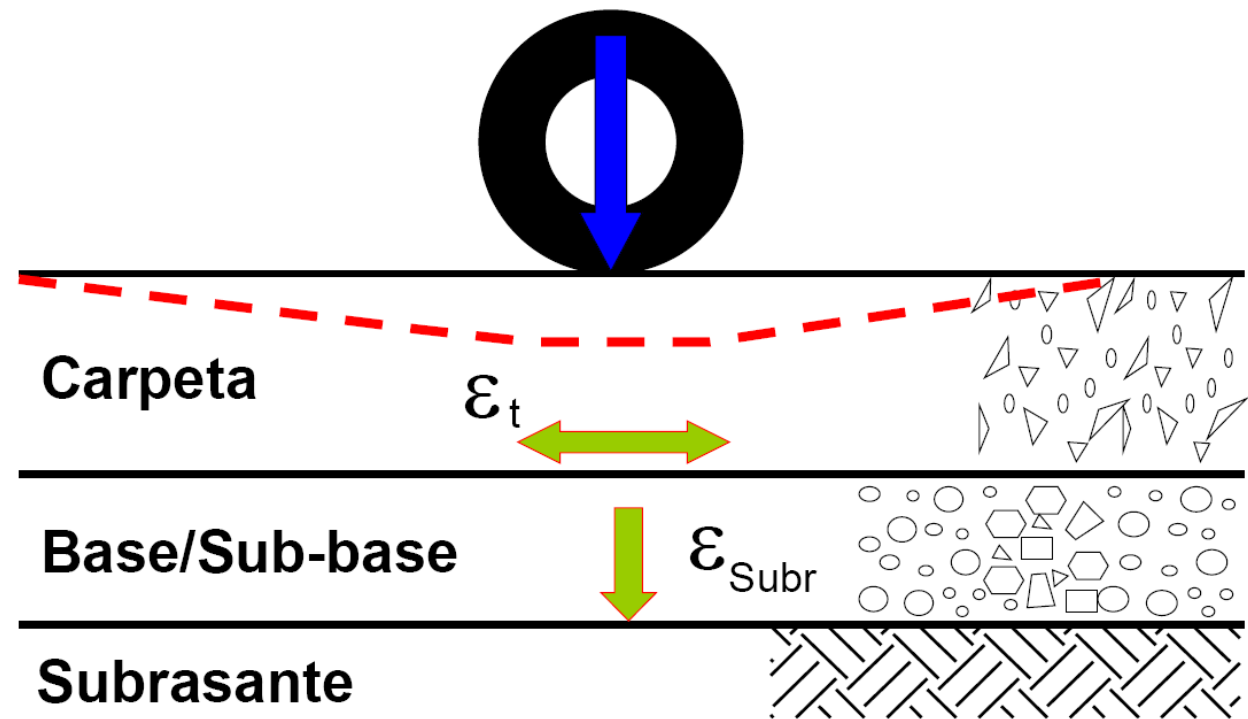
# METODOS DE DISEÑO PAVIMENTOS FLEXIBLES

## Condiciones críticas

a) **tensión de tracción** en la cara inferior de la capa ligada con asfalto. En caso de que la misma exceda las tensiones admisibles se produce la fisuración por la acción repetida de las cargas de tránsito (fatiga).

b) **Tensión de compresión vertical** en la superficie de la subrasante; si es excesiva se producen deformaciones permanentes que se reflejan en la superficie.

## Respuesta bajo cargas





# METODOS DE DISEÑO PAVIMENTOS FLEXIBLES

## Hipótesis

- Carga circular uniformemente distribuida (vertical)
- Materiales homogéneos e isótropos
- Comportamiento lineal y elásticos de los materiales
- Tensiones proporcionales a las deformaciones ( $E$ ,  $\mu$ )
- Capas del pavimento de extensión horizontal infinita
- Subrasante de extensión vertical semi-infinita

# METODOS DE DISEÑO PAVIMENTOS FLEXIBLES

## Principios

- Comportamiento elástico de los materiales
- Falla por fatiga (repetición de cargas)
- Materiales caracterizados por su módulo y poisson
- Los factores ambientales (clima, lluvia, temp., NF, heladas, etc.) inciden en las relaciones Esfuerzo-Deformación-Desplazamiento.



# METODOS DE DISEÑO PAVIMENTOS FLEXIBLES

## Problema

Selección de un modelo de análisis que se ajuste a la realidad

- CHEV 5L (Chevrón)
- ELSYM5 (California)
- Bistro
- Bisar (Shell)
- ALIZE
- mePADS

Deben utilizarse módulos apropiados en función de: El clima, humedad, esfuerzos, caracterización de materiales, valoración de capas fisuradas, etc.



# METODOS DE DISEÑO PAVIMENTOS FLEXIBLES

## Leyes de Fatiga

Evaluar los daños causados al pavimento debido a los esfuerzos y las deformaciones críticas mediante ecuaciones empíricas, en el enfoque de sistemas multicapa elástica.

Para el agrietamiento se tiene:

$$N_f = f_1(\epsilon_t)^{-f_2}(E_1)^{-f_3}$$

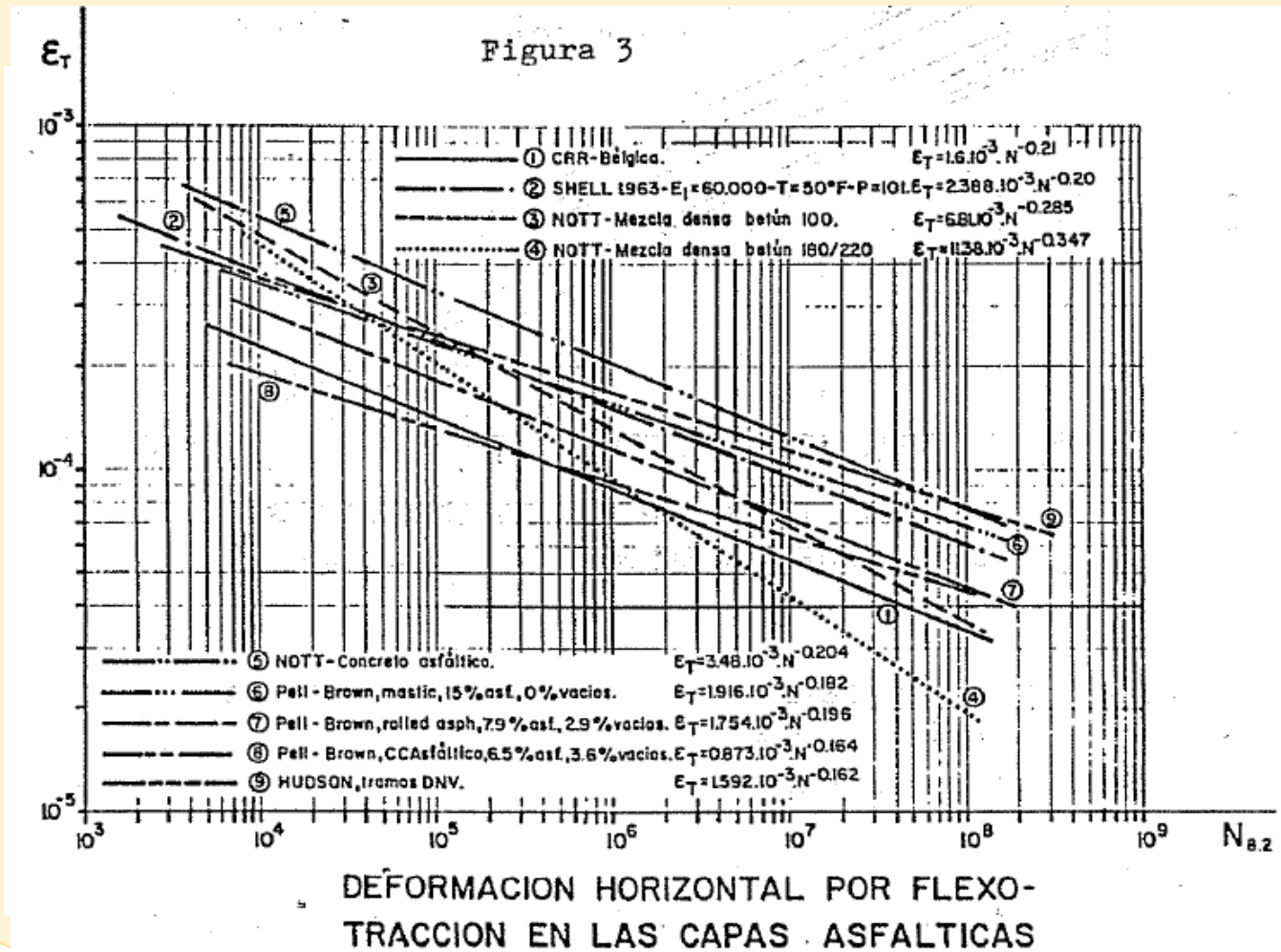
Para el ahuellamiento se tiene:

$$N_d = f_4(\epsilon_c)^{-f_5}$$

# METODOS DE DISEÑO PAVIMENTOS FLEXIBLES

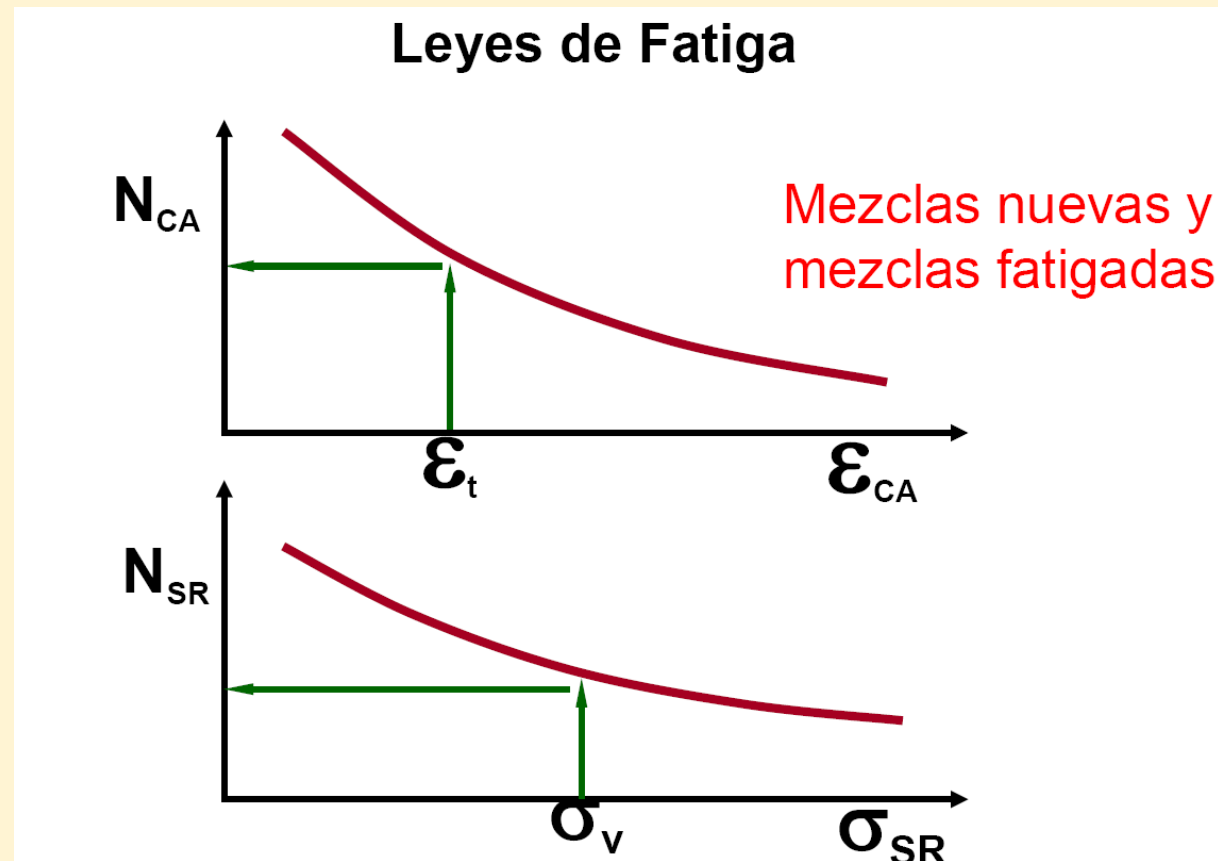
## Leyes de Fatiga

Los valores de las constantes son función



# METODOS DE DISEÑO PAVIMENTOS FLEXIBLES

## Leyes de Fatiga

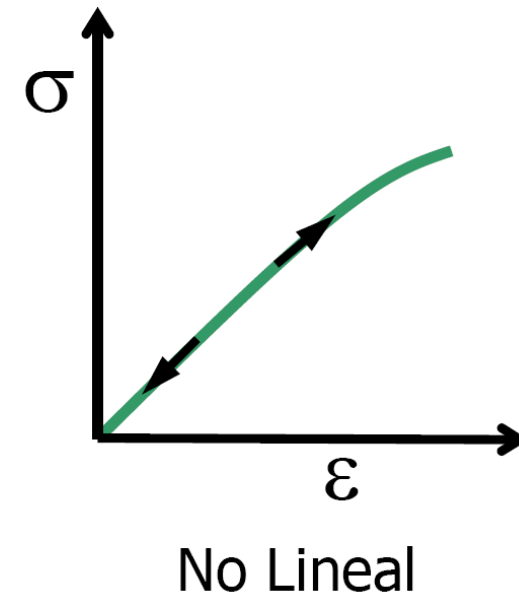
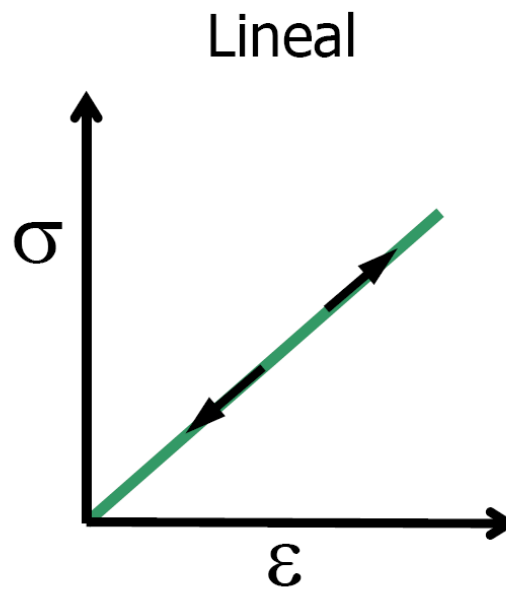




# METODOS DE DISEÑO PAVIMENTOS FLEXIBLES

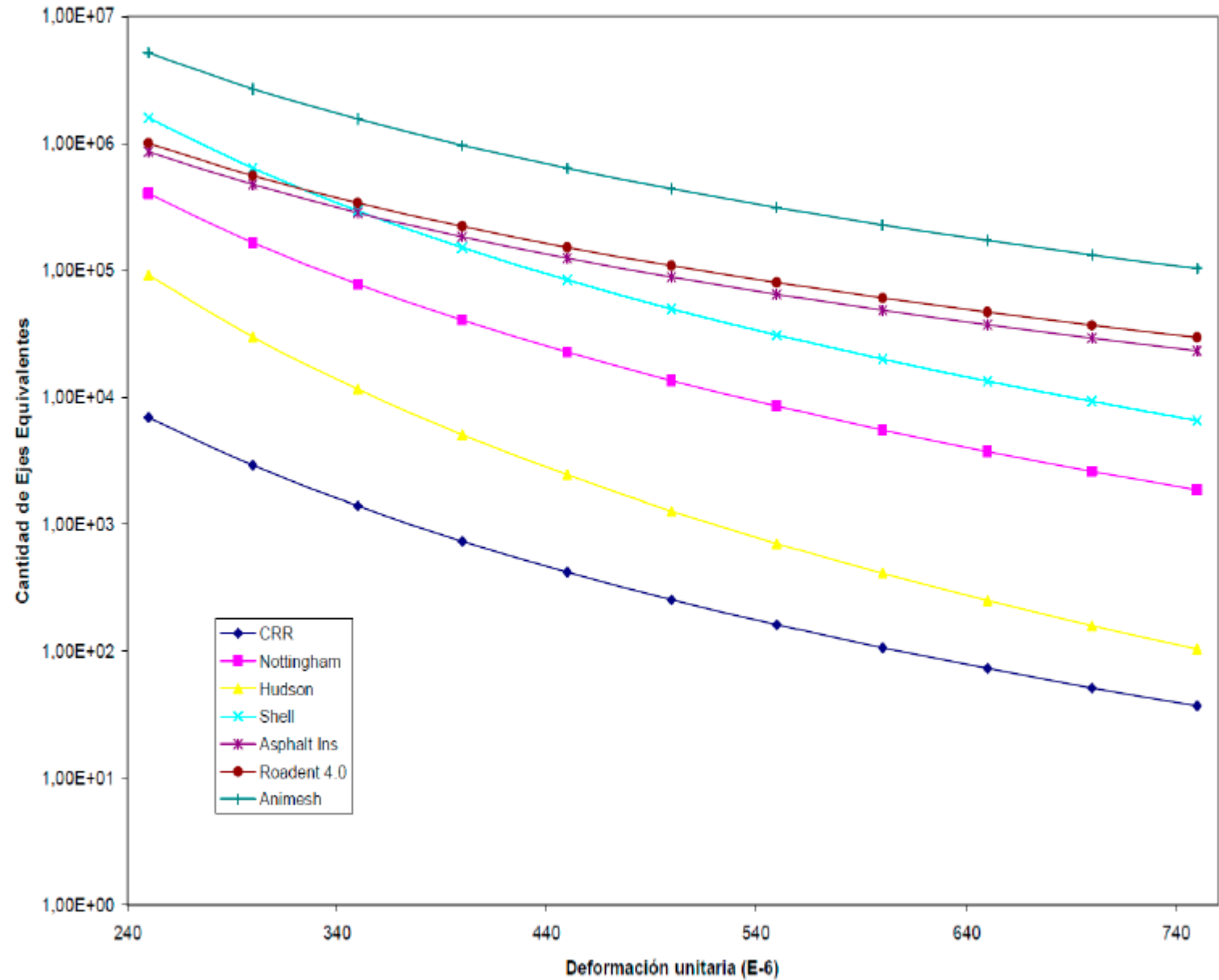
## Leyes de Fatiga

### Análisis Elástico Multicapa



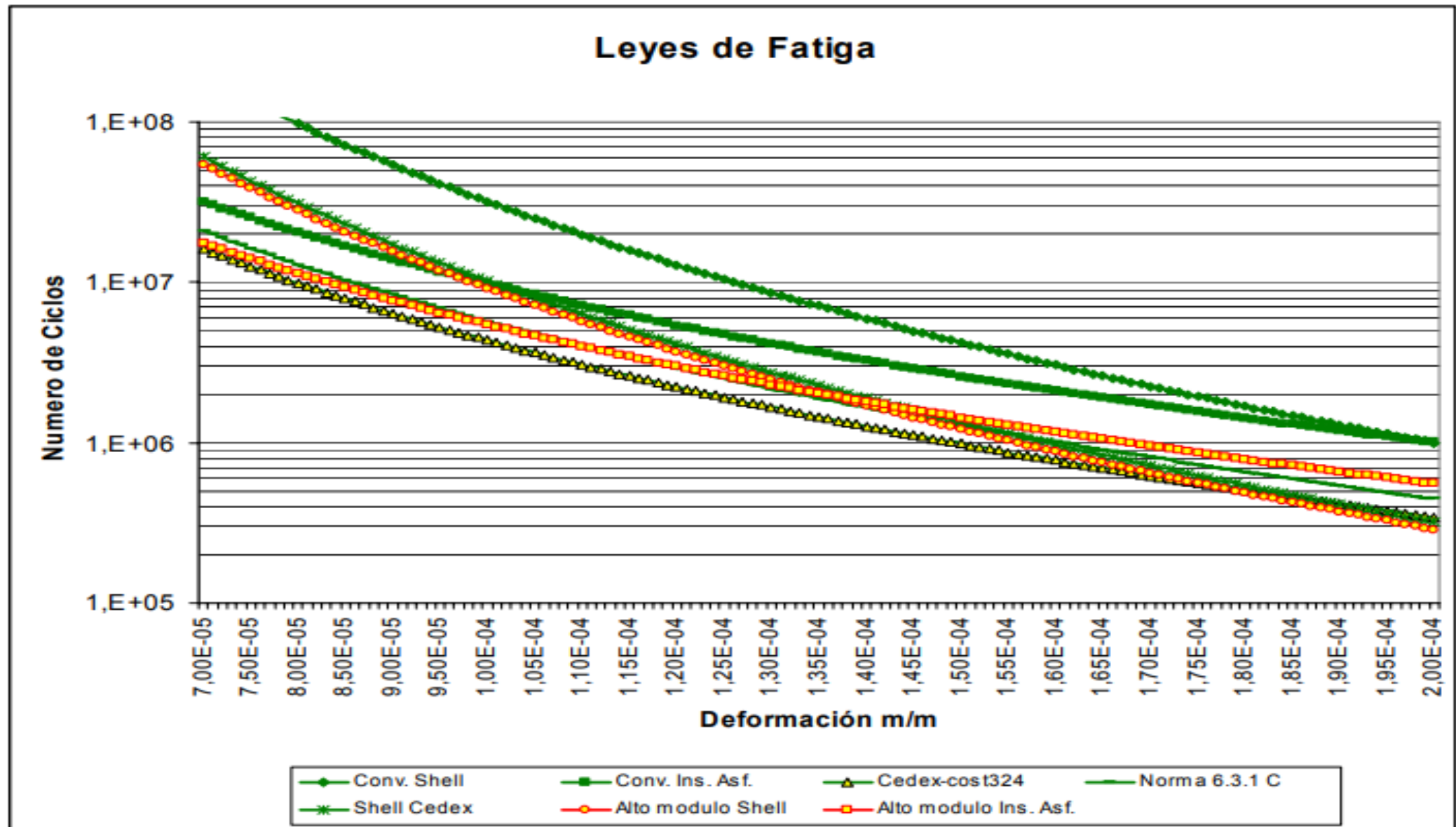


# METODOS DE DISEÑO PAVIMENTOS FLEXIBLES



# METODOS DE DISEÑO PAVIMENTOS FLEXIBLES

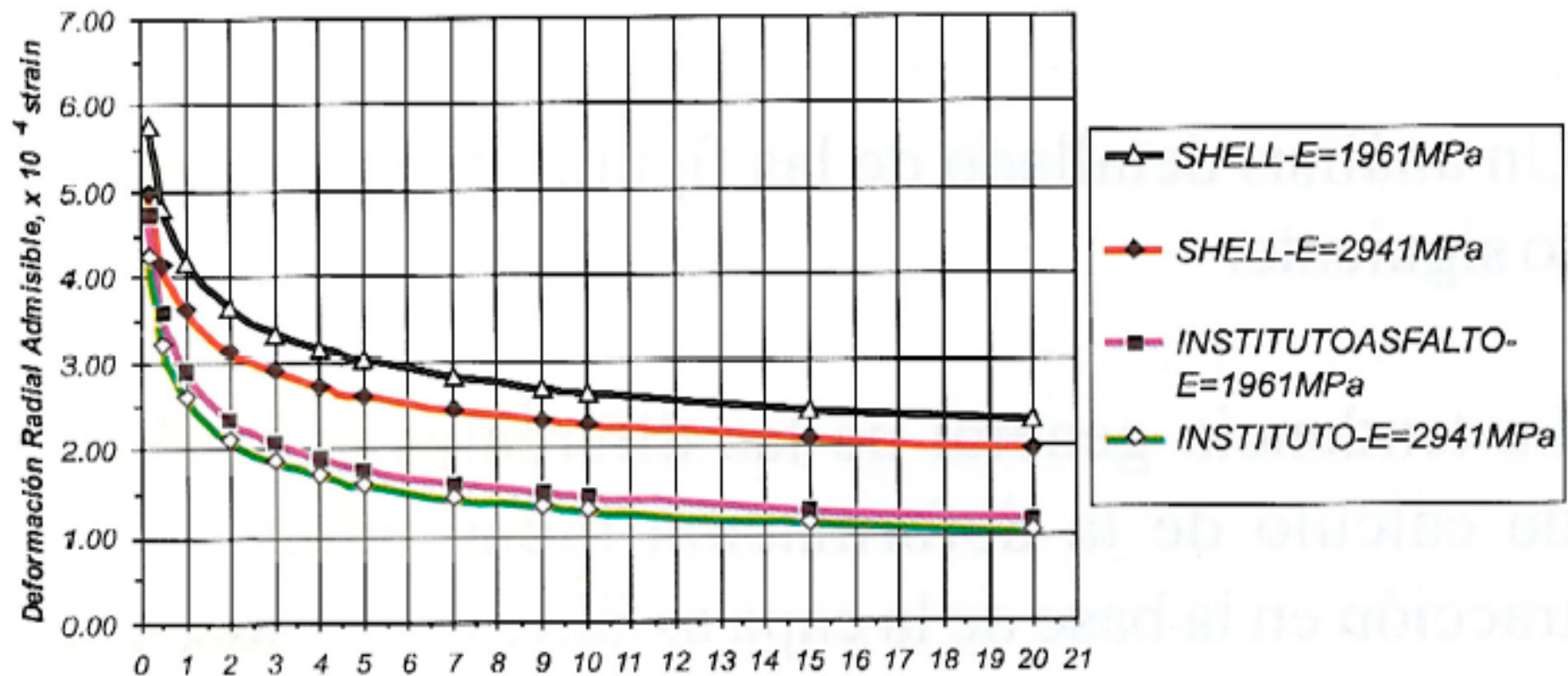
## Otros ejemplos



# METODOS DE DISEÑO PAVIMENTOS FLEXIBLES

## Otros ejemplos

**FIGURA 5. LEY DE DEFORMACION RADIAL ADMISIBLE DE TRACCION EN LA BASE DE LA CAPA ASFALTICAS, SHELL - INSTITUTO DEL ASFALTO**  
 $V_b = 10\%$ ,  $V_a = 4\%$ ,  $M = 0.117543$ ,  $C = 1.31082$ ,  $K = 8.25$

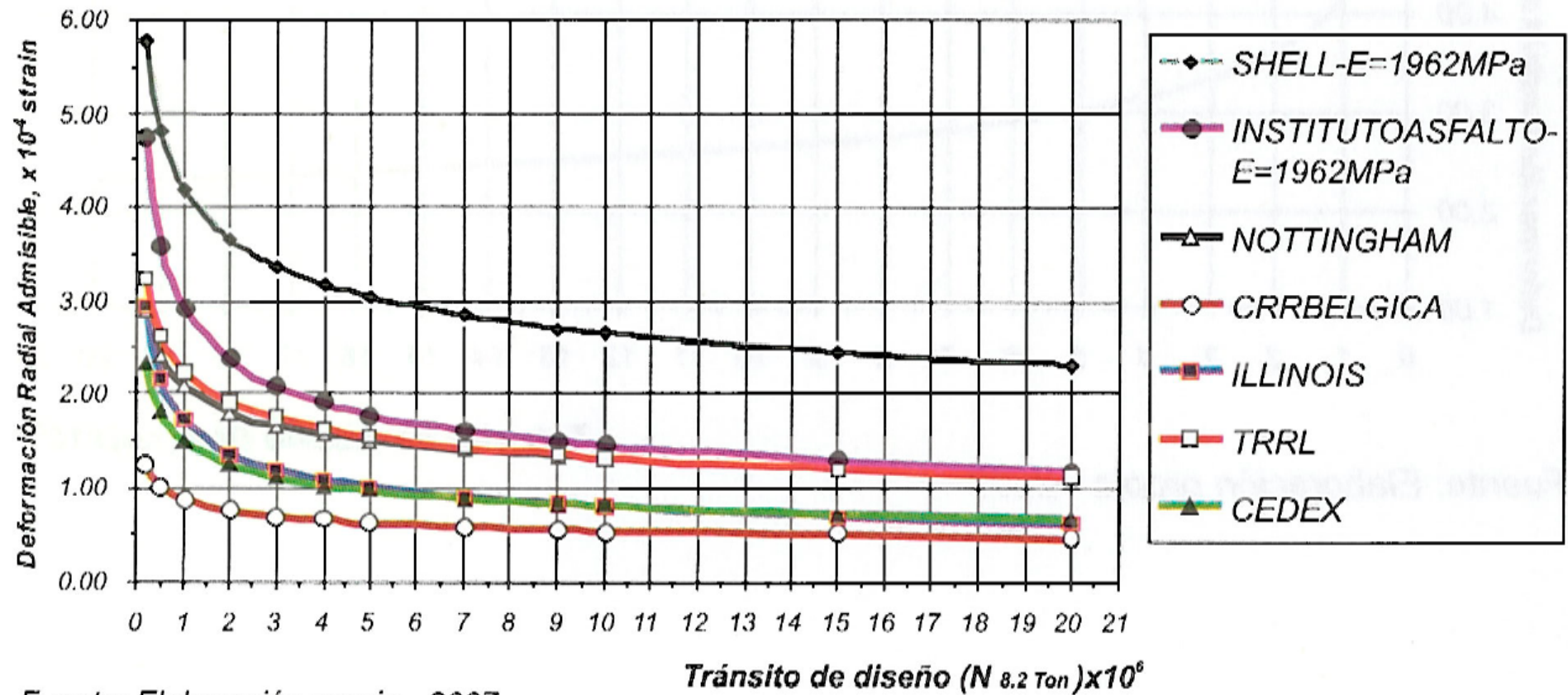


Fuente: Elaboración propia - Tránsito de diseño ( $N_{8.2 \text{ Ton}} \times 10^6$ )

# METODOS DE DISEÑO PAVIMENTOS FLEXIBLES

## Otros ejemplos

FIGURA 11. LEYES DE DEFORMACION RADIAL ADMISIBLE DE TRACCION EN LA BASE DE LA CAPA ASFALTICA



Fuente: Elaboración propia - 2007

## SITUACIÓN EN PARAGUAY

- Mayoritariamente: Pavimentos de tipo flexible
- Uso del AASHTO 1993, no calibrado.
- Comienzo incipiente del uso de métodos mecanicistas
- Los coeficientes de aporte estructural no se encuentran calibrados a las condiciones locales.
- Temperaturas **muy elevadas**
- **Altos** porcentajes de humedad

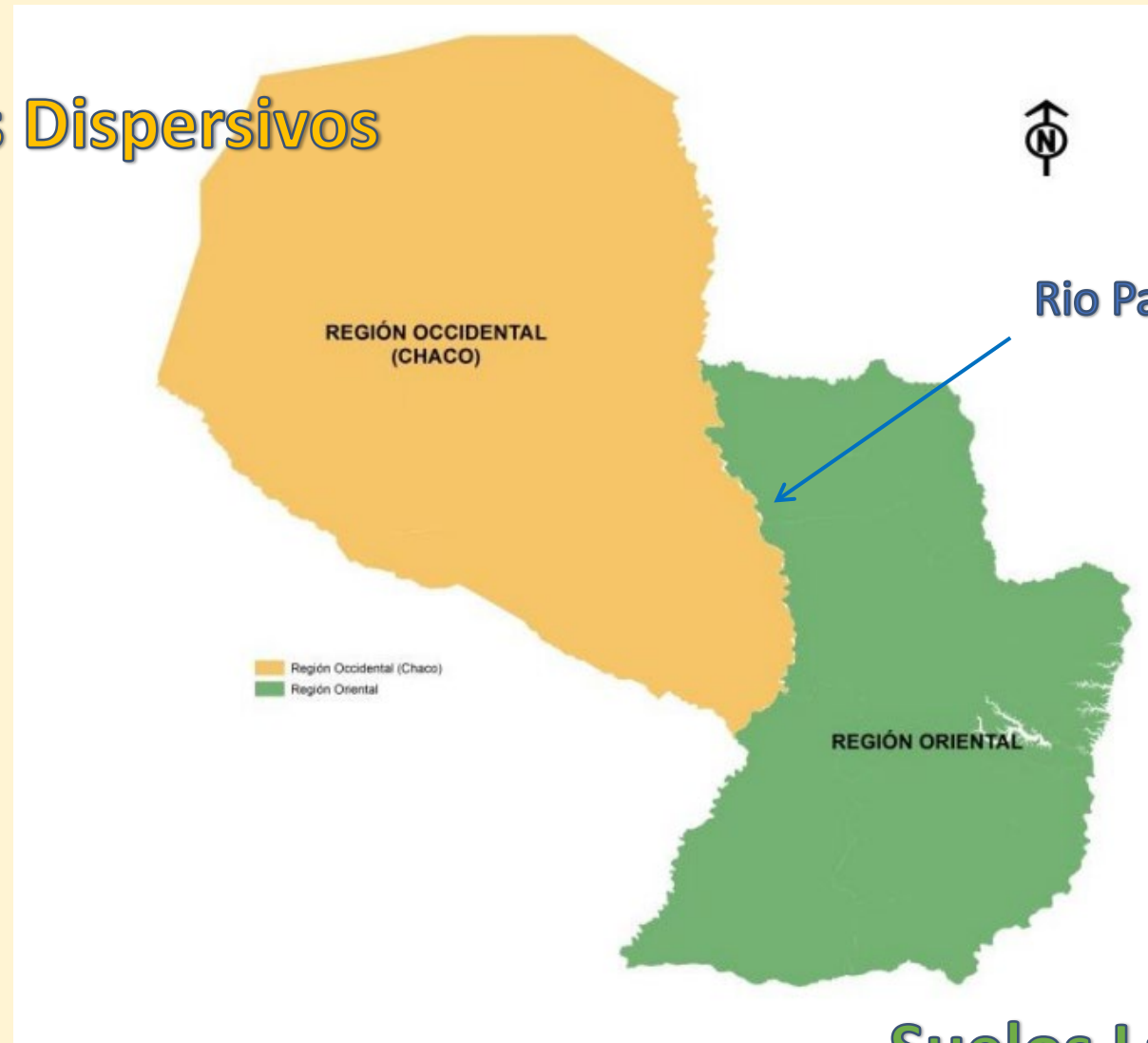
# SITUACIÓN EN PARAGUAY

- Diferentes formas de explotación de materiales a las utilizadas en EEUU
- Materiales particulares de la región, por ejemplo:
  - Región Oriental -> suelos lateríticos
  - Región Occidental -> suelos dispersivos



# SITUACIÓN EN PARAGUAY

Suelos Dispersivos



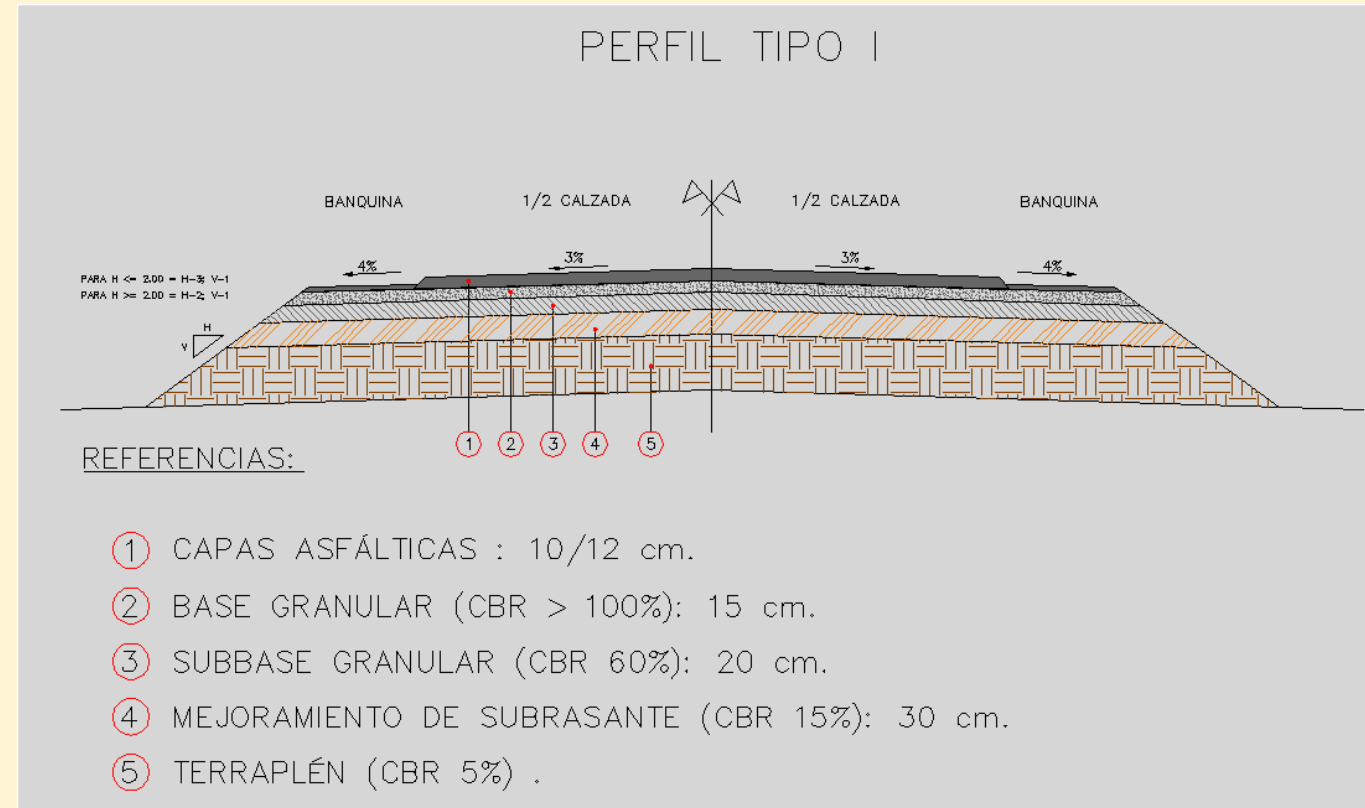
Suelos Lateríticos



# SITUACIÓN EN PARAGUAY

## Análisis de estructuras típicas

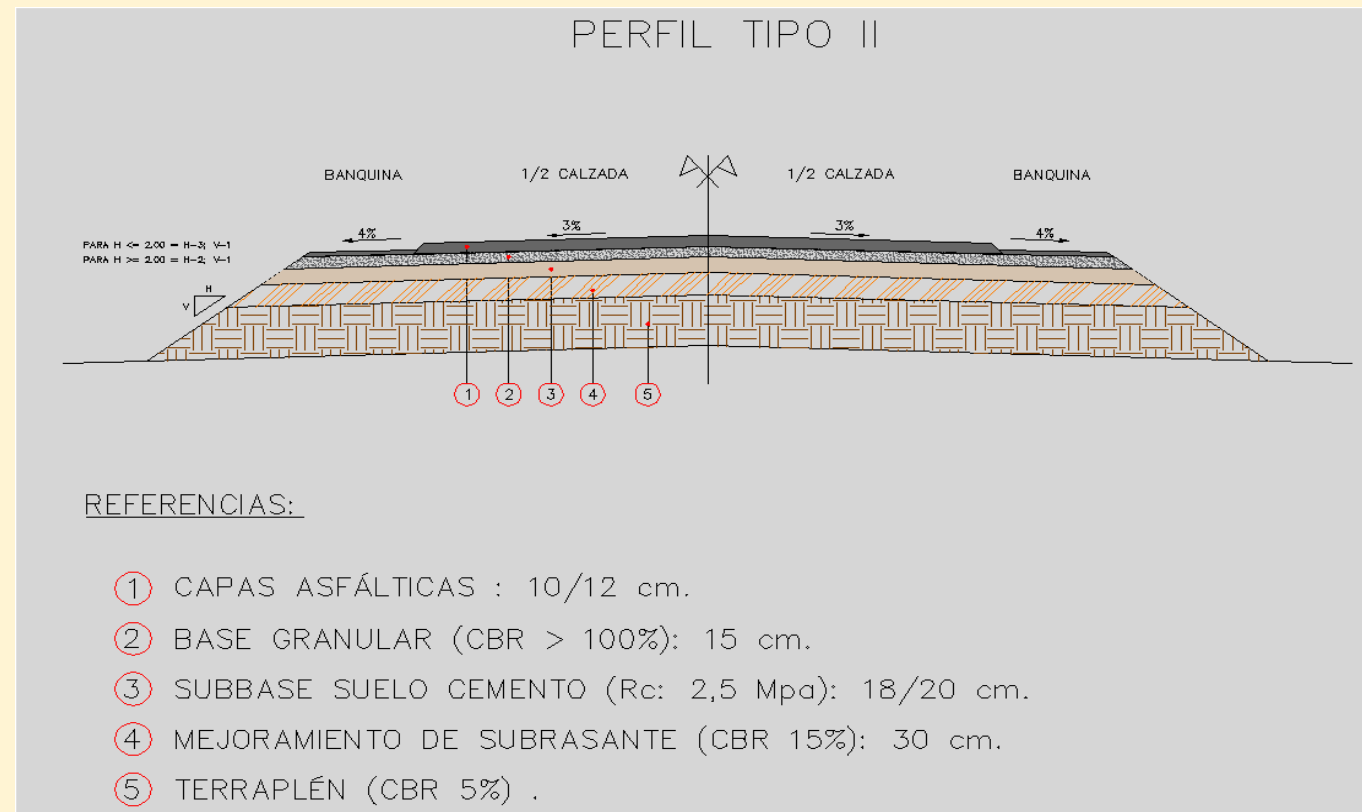
- Estructuras típica de Pavimentos flexible en Paraguay:



# SITUACIÓN EN PARAGUAY

## Análisis de estructuras típicas

- Estructuras típica de Pavimentos flexible en Paraguay:



# SITUACIÓN EN PARAGUAY

## Evaluación de estructuras típicas

- a) Flexible -> Subbase granular
- b) Semi-rígida -> Subbase Cementada

Determinación:

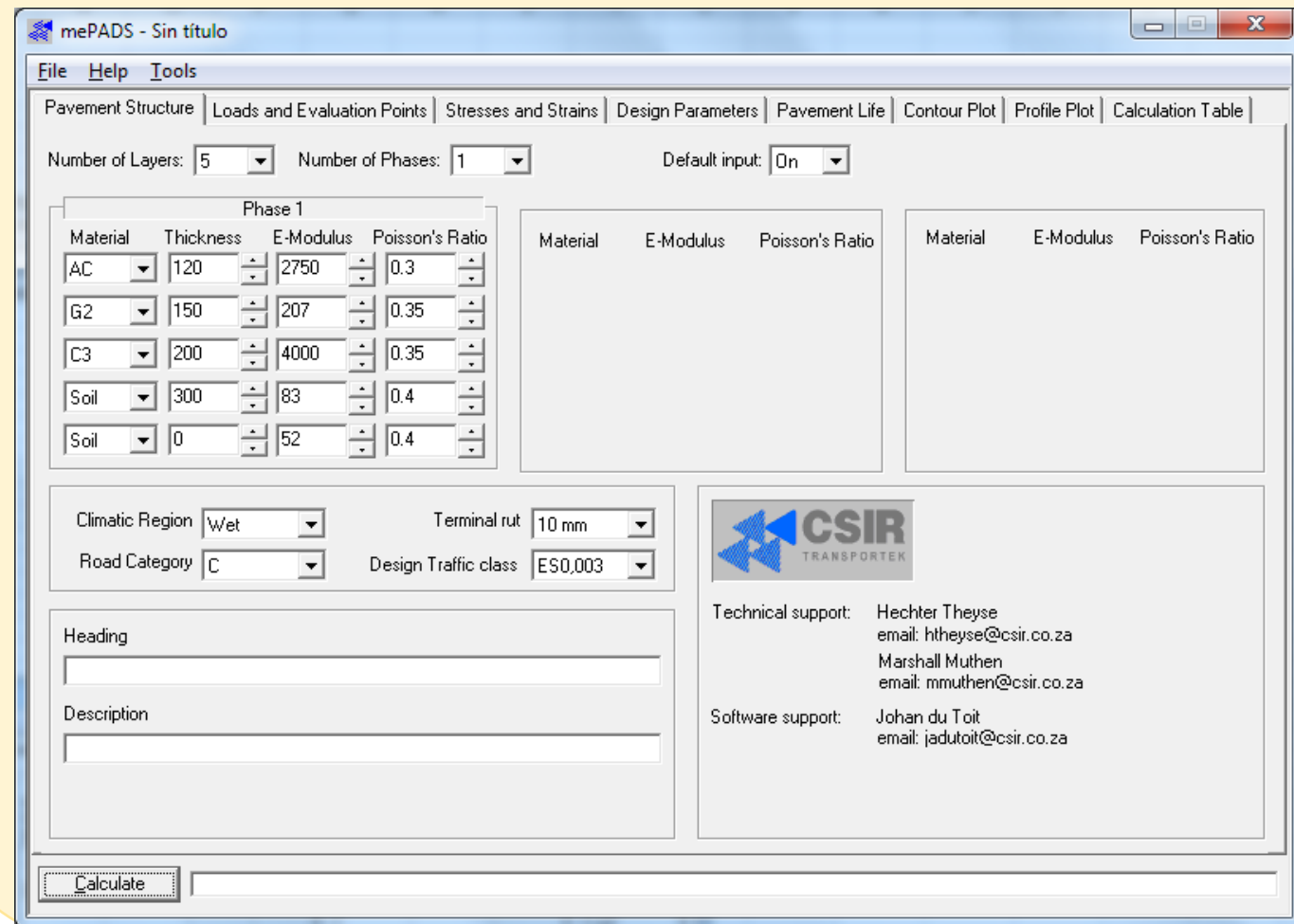
Tensiones y Deformaciones -> Pasadas Permitidas

## Software empleados

- mePADS del método de diseño sudafricano
- ELSYM 5

# SITUACIÓN EN PARAGUAY

## ➤ mePADS del método de diseño sudafricano



mePADS - Sin título

File Help Tools

Pavement Structure | Loads and Evaluation Points | Stresses and Strains | Design Parameters | Pavement Life | Contour Plot | Profile Plot | Calculation Table

Number of Layers: 5 | Number of Phases: 1 | Default input: On

Phase 1

Material	Thickness	E-Modulus	Poisson's Ratio	Material	E-Modulus	Poisson's Ratio	Material	E-Modulus	Poisson's Ratio
AC	120	2750	0.3						
G2	150	207	0.35						
C3	200	4000	0.35						
Soil	300	83	0.4						
Soil	0	52	0.4						

Climatic Region: Wet | Terminal rut: 10 mm  
 Road Category: C | Design Traffic class: ES0.003

Heading: \_\_\_\_\_  
 Description: \_\_\_\_\_

**CSIR**  
 TRANSPORTEK

Technical support: Hechter Theyse  
 email: htheyse@csir.co.za  
 Marshall Muthen  
 email: mmuthen@csir.co.za

Software support: Johan du Toit  
 email: jadutoit@csir.co.za

Calculate



# SITUACIÓN EN PARAGUAY

## ➤ Elsym5

```
-ELSYM5-  
Interactive Input Processor  
Version 1.0, Released 10/85  
Developed by  
SRA Technologies, Inc.
```

```
Under contract to  
Federal Highway Administration
```

### MAIN MENU

1. Instructions
2. Create a New Data File
3. Modify an Existing Data File
4. Perform Analysis
5. Exit - Return to DOS

Selection:

# SITUACIÓN EN PARAGUAY

## Resultados: Deformaciones

Leyes de Fatiga	mePADS		ELSYM5	
	ESTRUCTURA		ESTRUCTURA	
	Flexible	Semirigida	Flexible	Semirigida
	Def. tracción		Def. tracción	
Def. de tracción Capas asf.	2.56E-04	2.08E-04	2.52E-04	2.03E-04
Def. compresion Subrasante	-3.85E-04	-1.62E-04	-2.75E-04	-6.18E-05

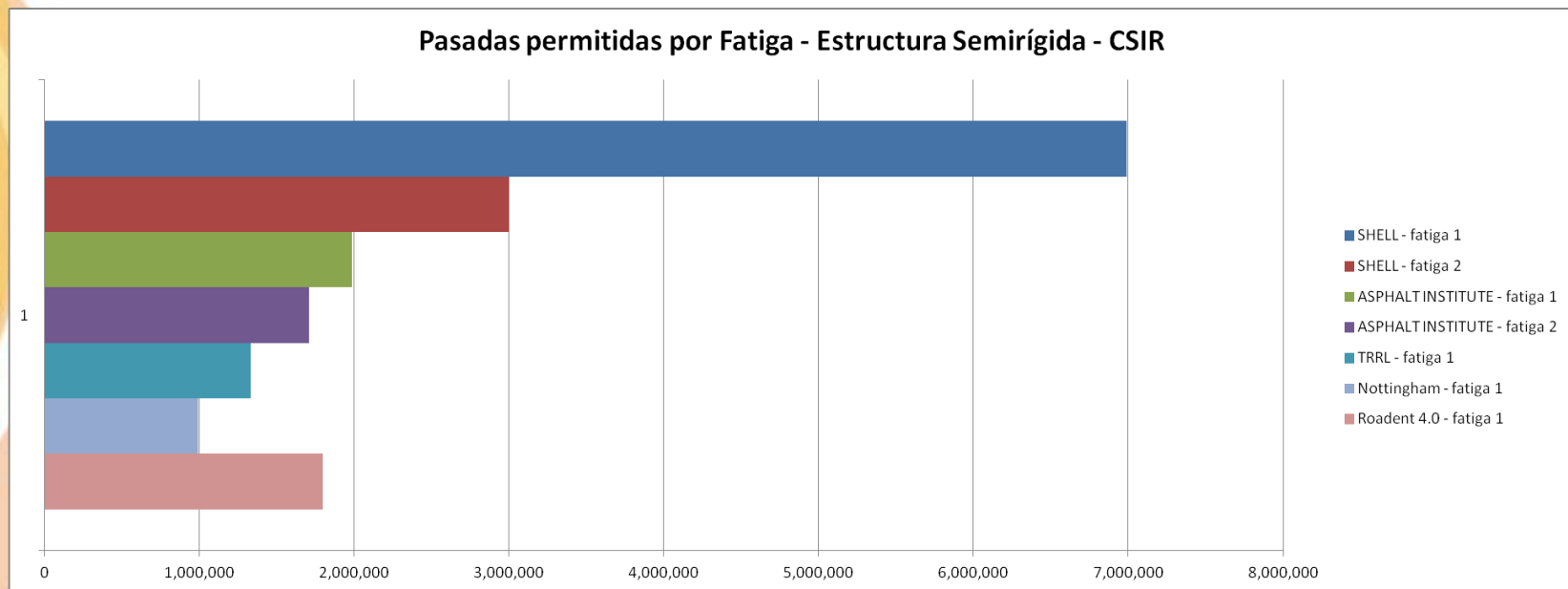
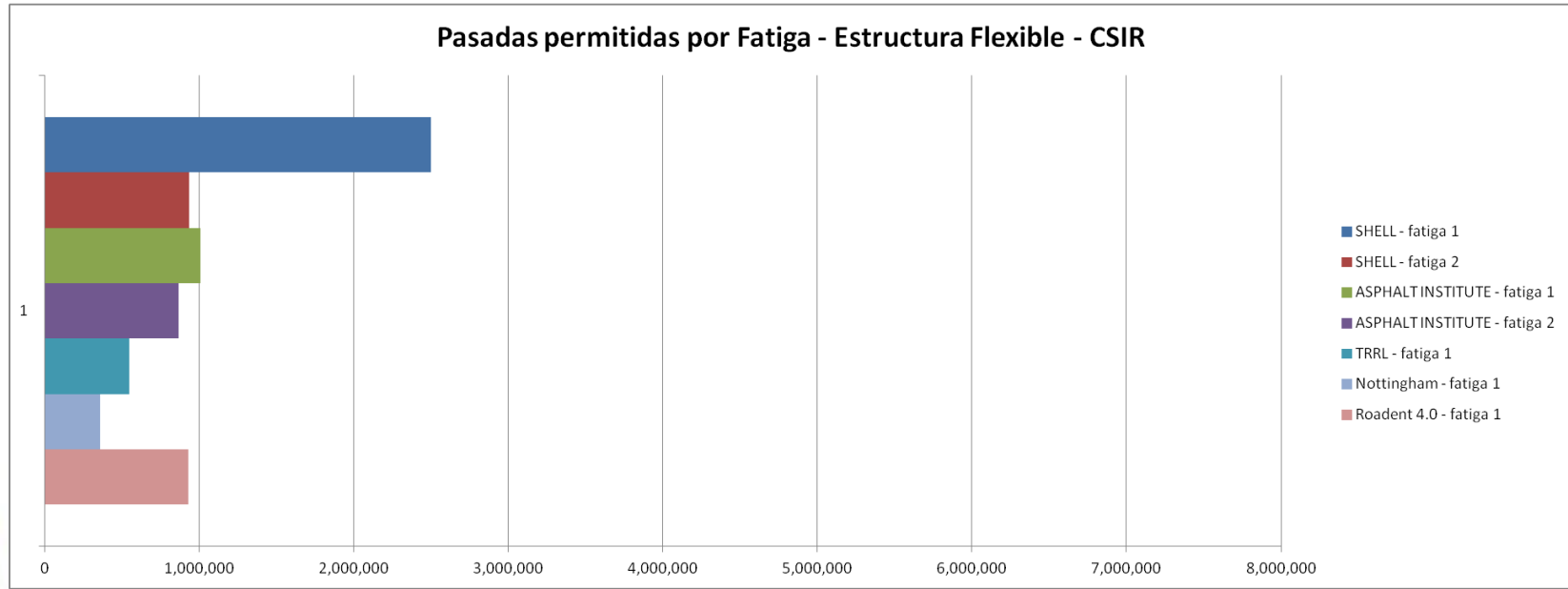
# SITUACIÓN EN PARAGUAY

## Resultados: Pasadas permitidas

Leyes de Fatiga		mePADS		ELSYM5	
		ESTRUCTURA		ESTRUCTURA	
		Flexible	Semirigida	Flexible	Semirigida
		Pasadas Permitidas		Pasadas Permitidas	
SHELL - fatiga 1	$N_f := 3.981 \cdot 10^{-6} \cdot (0.856 \cdot V_b + 1.8)^5 \cdot e_t^{-5} \cdot E^{-1.8}$	2,498,280	6,990,269	2,662,903	7,873,785
SHELL - fatiga 2	$N_f := 0.0685 \cdot e_t^{-5.671} \cdot E^{-2.363}$	933,986	3,000,275	1,004,093	3,433,899
ASPHALT INSTITUTE - fatiga 1	$N_f := 0.414 \cdot 10^{4.84 \cdot \left[ \frac{V_b}{(V_v + V_b)} - 0.69 \right]} \cdot e_t^{-3.291} \cdot E^{-0.854}$	1,010,677	1,989,440	1,054,032	2,151,558
ASPHALT INSTITUTE - fatiga 2	$N_f := 0.0796 \cdot e_t^{-3.291} \cdot E^{-0.854}$	869,433	1,711,413	906,730	1,850,874
TRRL - fatiga 1	$N_f := 1.66 \cdot 10^{-10} \cdot e_t^{-4.32}$	548,450	1,334,190	579,538	1,478,692
Nottingham - fatiga 1	$N_f := 8.888 \cdot 10^{-13} \cdot e_t^{-4.902}$	361,902	992,397	385,267	1,115,224
Roadent 4.0 - fatiga 1	$N_f := 2.83 \cdot 10^{-6} \cdot e_t^{-3.20596}$	930,623	1,800,082	969,492	1,942,832

# SITUACIÓN EN PARAGUAY

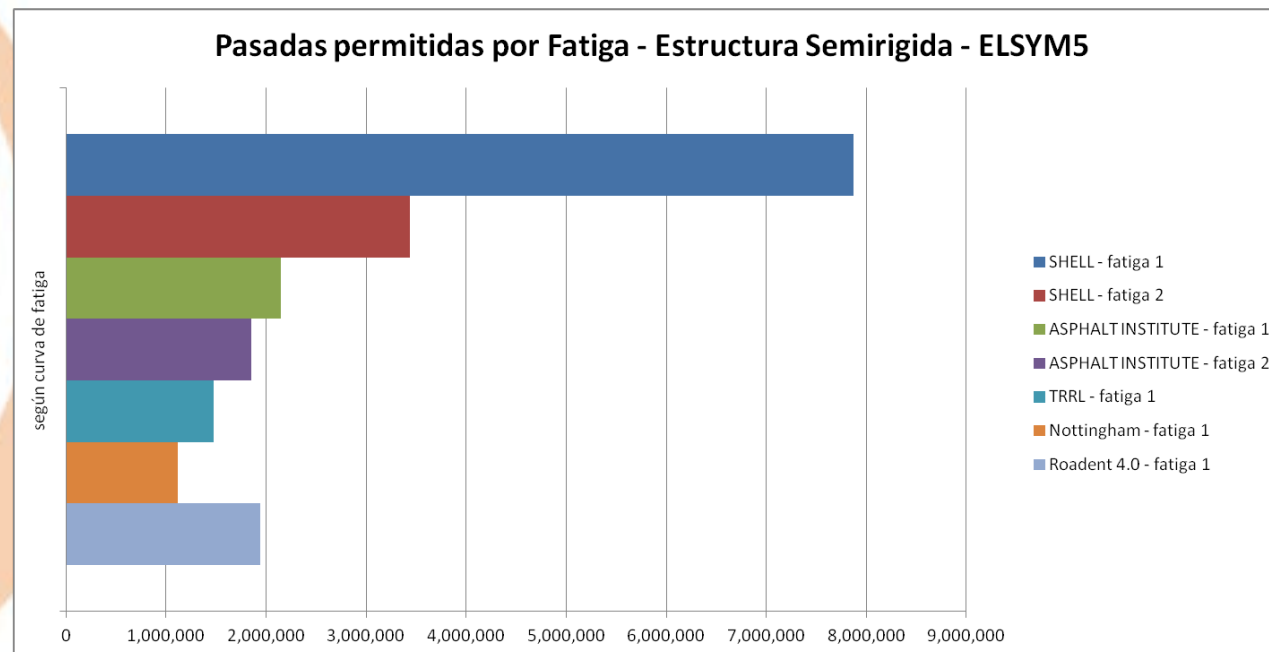
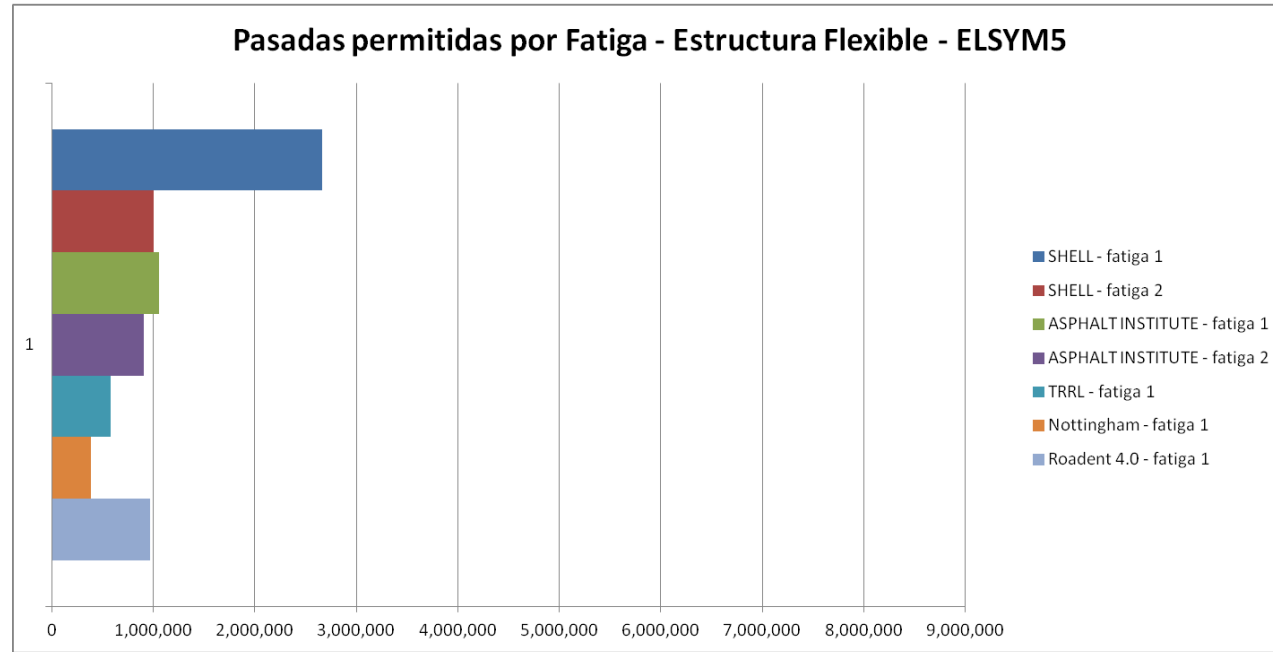
## Resultados: mePADS





# SITUACIÓN EN PARAGUAY

## Resultados: ELSYM5



## Diferencias en los resultados

- **Nf:** número de repeticiones de carga hasta alcanzar un límite de superficie fisurada (10 a 20% de la superficie del pavimento)
- **Factores de regresión:** Varían de acuerdo al tipo de material, el ambiente, el tráfico y las condiciones de fallas adoptadas
- **Ajuste de campo:** 1 (defecto) o se ajustan a los factores de regresión
- **La fatiga:** Se determina mediante ensayos de flexión, tracción directa o compresión diametral, para diferentes niveles de carga o deformación.



## Método Shell

- A partir de ensayos de flexión sobre diversas mezclas y en diferentes condiciones de temperatura.
- 2 Modelos: tensión y deformación controlada
- No incorpora Factor de ajuste campo
- Las ecuaciones que propone contemplan: Índice de penetración, % de asfalto y Módulo de la mezcla.
- Confiabilidad: 50%, 85% y 95%.
- En 1980 Shell propone nuevas ecuaciones para capas asfálticas delgadas (<2") y gruesas (de 6" y 8")



## Asphalt Institute

- A partir de ensayos de flexión (beam fatigue test) para una mezcla de 11% de asfalto y 7% de vacíos, la formula permite poner los que se deseen.
- Modelo de tensión controlada
- Incorpora un Factor de Campo
- Permite hasta un 20% de la superficie fisurada
- Permite una profundidad de ahuellamiento de hasta 0,5"

## SHRP

- La fórmula utiliza: el módulo dinámico del ensayo de flexión y los vacíos de la mezcla
- Modelo de deformación controlada



## TRRL UK

- Confiabilidad del 85%
- Permite una profundidad de ahuellamiento de hasta 0,4"



# CONCLUSIONES

## Comparativa Shell-Asphalt Institute

- **Tendencia general:** A mayor magnitud de tránsito de diseño menor es la magnitud de la deformación radial admisible
- Los valores de deformación radial admisibles de tracción: (Shell > Asphalt Institute)
- A Mayor modulo dinámico de la mezcla asfáltica, menor es la magnitud de la deformación radial admisible (Shell mas sensible)



# CONCLUSIONES

## Comparativa Shell-Asphalt Institute

- Shell y Asphalt Institute tienen en cuenta las características de las mezclas y el tránsito de diseño, el resto solo el tránsito.
- Para tránsito menores a  $2 \times 10^6$  Ejes, las expresiones de calculo son más sensibles en la determinación de la deformación radial admisible de tracción.
- Para Esals  $> 2 \times 10^6$  son menos sensibles.





# CONCLUSIONES

¿Qué ley de Fatiga  
aplicar en  
Paraguay?



# RECOMENDACIONES

Para definir las leyes de fatiga que mejor se ajusten al País es necesario:

***“Investigaciones que permitan arriban a expresiones de calculo ajustadas y derivadas para las condiciones propias del País, a través del análisis de tramos de prueba, evaluando su comportamiento en el tiempo y según lo proyectado”.***

*Para ello, El MOPC deberá encarar las tareas necesarias que permitan ajustar los diseños.*



# RECOMENDACIONES

## Controles y Verificaciones

### Verificación en campo

- Relacionar la teoría con el comportamiento práctico para mejorar la Confiabilidad.
- Comparación de esfuerzos, deformaciones y desplazamientos previstos y medidos realmente .
- Comparación de comportamientos globales (modelo de falla asumido)

# RECOMENDACIONES

## Limitaciones/Incertidumbres

- Incertidumbre sobre el tránsito futuro previsto.
- Efectos de las condiciones ambientales
- Comportamiento estocásticos de los materiales
- Diferencias entre los valores proyectados y los realmente construidos (espesores, densidad, etc)
- La naturaleza simplista de los modelos utilizados

# RECOMENDACIONES

Para ello se debe contar:

- Decisión política
- Recursos humanos
- Recursos de equipamiento
- Infraestructura
- Fuentes de Financiamiento asegurada
- Apoyo de expertos con experiencia en este tema.
- Seguimiento de estas tareas a muy largo plazo.



# RECOMENDACIONES

**Muchas Gracias**