



Pavimentos

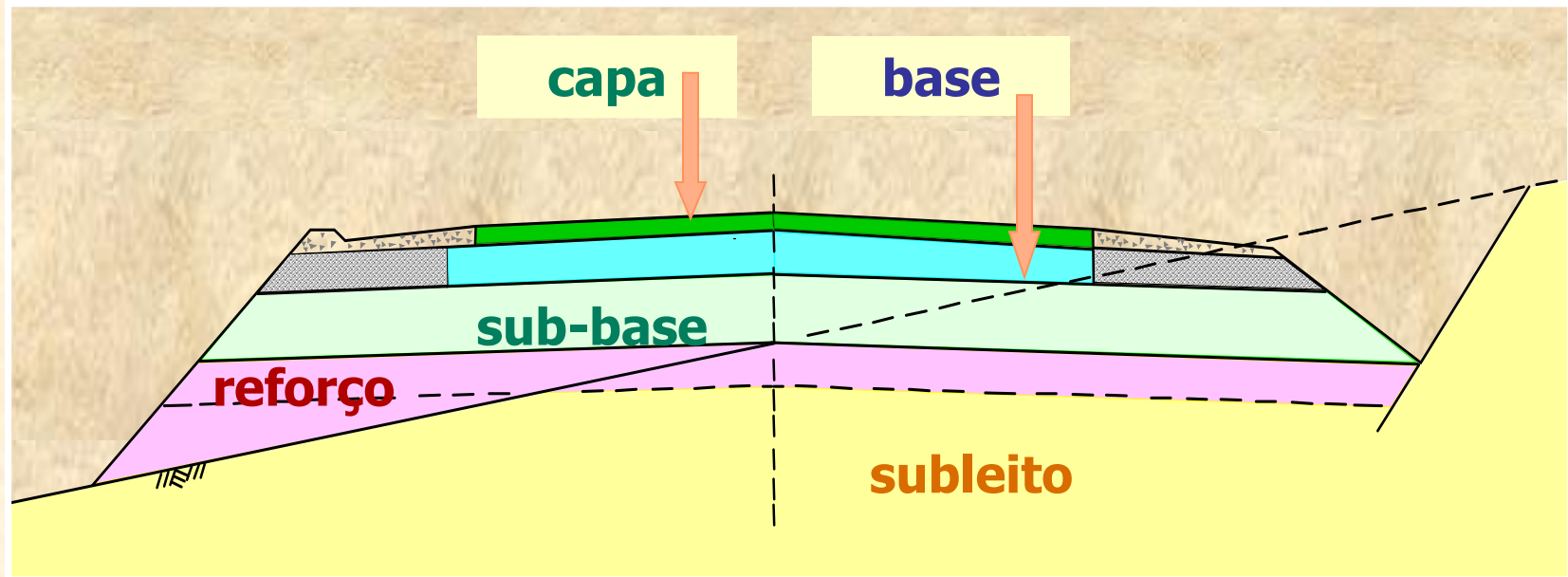
Dimensionamento e análise de pavimentos flexíveis



Dimensionamento - Sumário

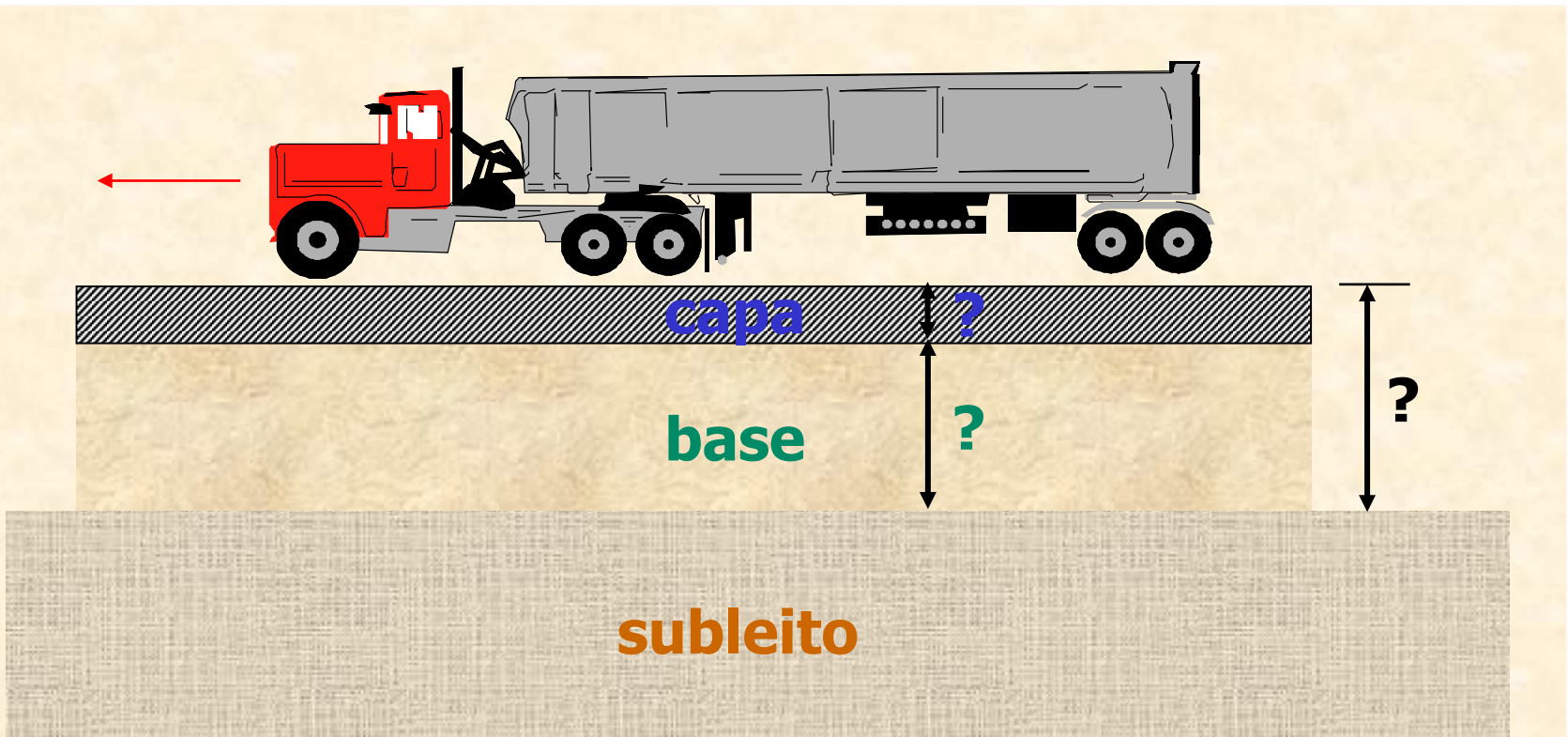
- Conceitos gerais
- Métodos de dimensionamento de pavimentos flexíveis e semi-rígidos
- Método mecanístico para o dimensionamento e análise de pavimentos flexíveis

Pavimentos – Conceitos gerais



O **pavimento** é uma estrutura destinada a resistir aos esforços gerados pelo tráfego, garantindo **durabilidade** à superfície de rolamento e proporcionando **conforto** e **segurança** ao usuário

Pavimentos – Dimensionamento



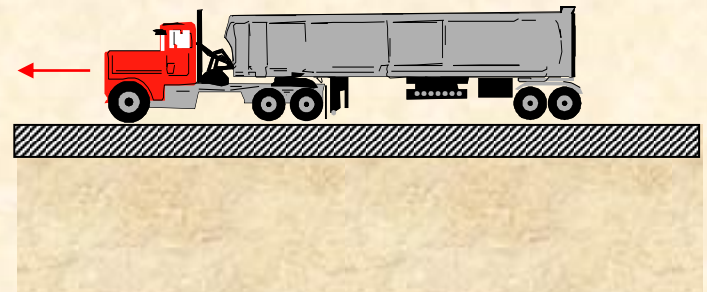
Dimensionamento = f (materiais do subleito e camadas, e tráfego)

Pavimentos – Dimensionamento

- Abordagens utilizadas no dimensionamento e análise de obras geotécnicas:

- equilíbrio limite (FS)**

← não utilizado p/
pavimentos



- empírica: CBR** (materiais granulares)
RCS (materiais cimentados)

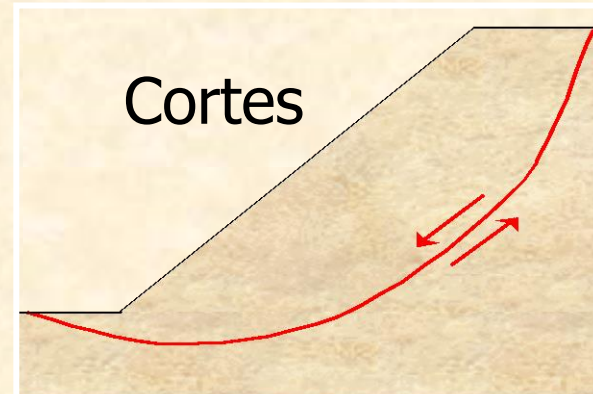
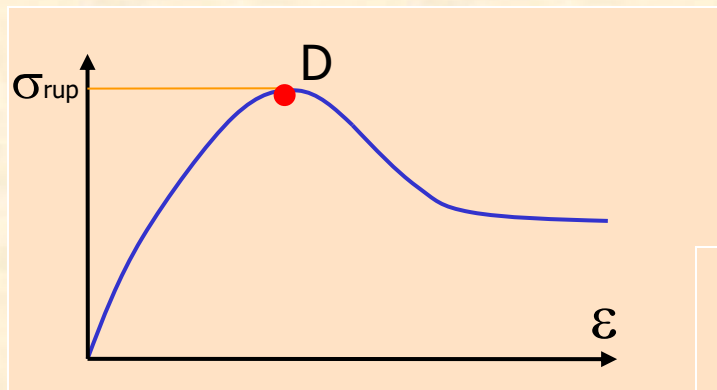
← (Método do
DNER)

- mecanística:** $\{\varepsilon\} = [D] \cdot \{\sigma\}$

← (cálculo de tensões e
deformações, análise
da fadiga por tração e
deform. permanentes)

Pavimentos – Dimensionamento

- A análise por **equilíbrio limite** envolve o cálculo de um fator de segurança (**FS**) e não é utilizada para pavimentos:



resistência
+
critério de
ruptura

→

Fator de
Segurança
(FS)



Pavimentos – Dimensionamento

Abordagens utilizadas em pavimentação:

- **empírica**

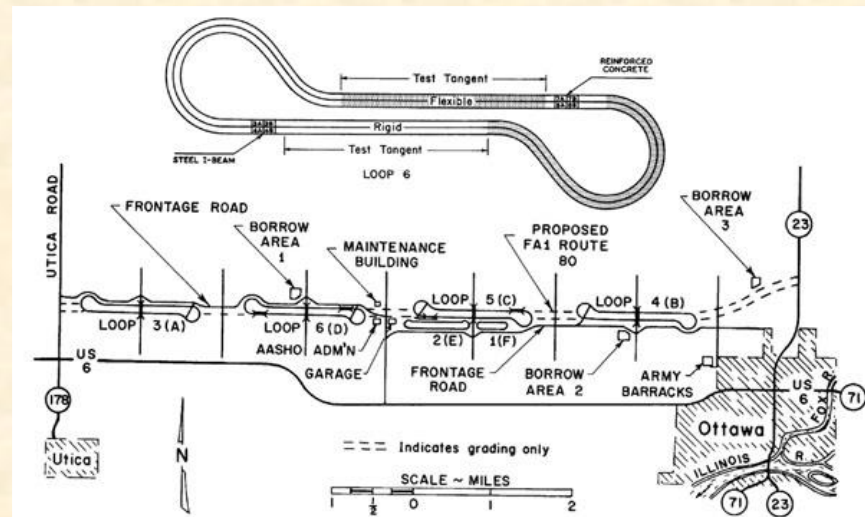
Os **métodos empíricos** são concebidos a partir de bases não teóricas, baseando-se na **experiência** e na **observação** do comportamento de trechos experimentais.

As suas aplicações limitam-se ao clima, materiais e condições de carregamento para as quais foram desenvolvidos.

Método AASHO

- Método de dimensionamento da AASHO

Experiência americana na pista experimental da American Association of State Highway Officials (AASHO Road Test) durante a década de 50



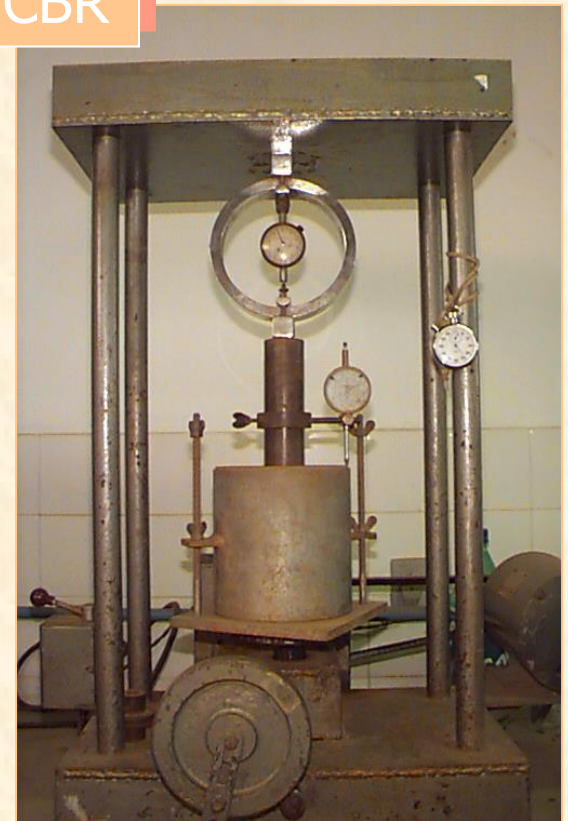
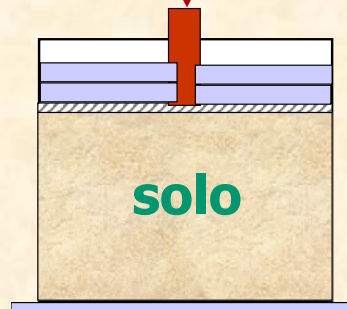
AASHO – American Association of State Highway Officials

Método AASHO

AASHO (American Association of State Highway Officials): O desempenho dos materiais que do subleito e das camadas granulares é fornecido pelo índice de suporte California (**CBR**), e o das bases cimentadas, pela resistência à compressão simples (**RCS**)

Ensaio CBR

Penetração de um cilindro padrão no solo compactado



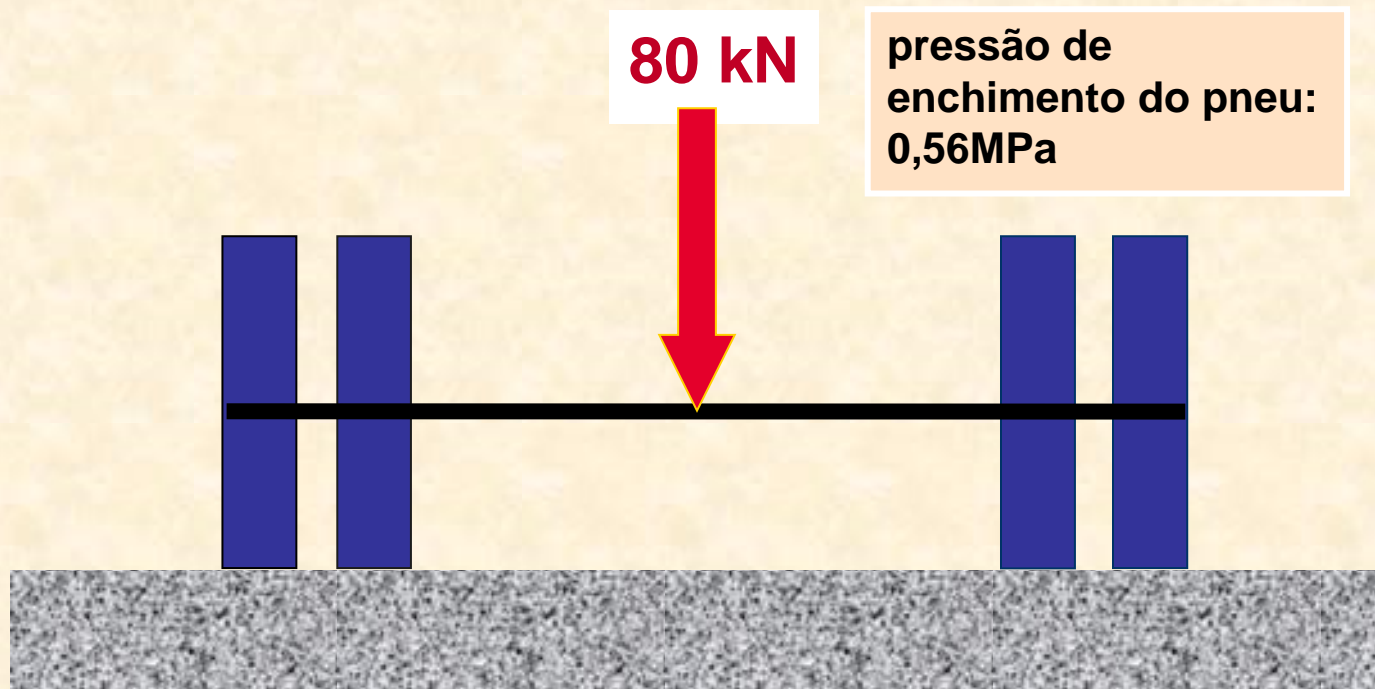


Método DNER

- O método de dimensionamento do **DNER** é uma adaptação do método da AASHO, conforme apresentado no trabalho de TURNBULL, FOSTER e AHLVIN (*Design of flexible pavements considering mixed loads and traffic volume*), apresentado na International Conference in the Structural Design of Asphalt Pavement, realizada na Universidade de Michigan em 1962.

Método DNER

Eixo padrão DNER – eixo simples de rodas duplas carregado com 80 kN





Método Mecanístico

Abordagens utilizadas em pavimentação:

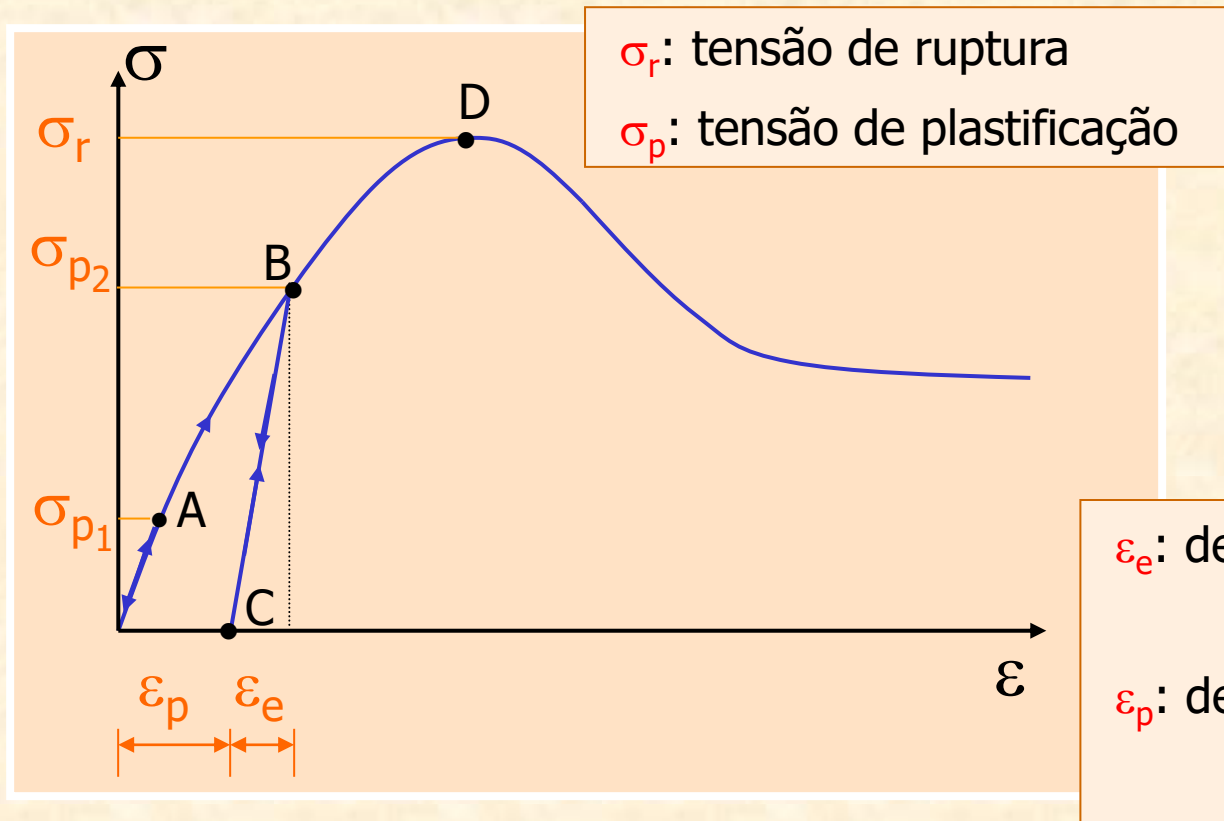
- **mecanística:** $\{\varepsilon\} = [D] \cdot \{\sigma\}$

Os **métodos mecanísticos** empregam a teoria da elasticidade. São mais gerais que os métodos empíricos, mas exigem que os **modelos constitutivos** (relação 'tensão x deformação') dos materiais sejam conhecidos.

Permitem a previsão do comportamento dos pavimentos, através do cálculo de tensões, deformações e deslocamentos.

Método Mecanístico

- Comportamento dos materiais geotécnicos compactados



ϵ_e : deformação elástica (recuperável)
 ϵ_p : deformação plástica (permanente)

Método Mecanístico

- Equação constitutiva ou modelo constitutivo

$$\{\sigma\} = [C] \cdot \{\varepsilon\}$$

↑ ↑
carregamento deformação

[C]: matriz constitutiva
: f(material)
: ensaios de laboratório

ou $\{\varepsilon\} = [D] \cdot \{\sigma\}$

onde, $[D] = [C]^{-1}$

- o modelo constitutivo é uma relação

causa/efeito

Método Mecanístico

- Elasticidade linear $\longrightarrow \{\varepsilon\} = [D] \cdot \{\sigma\}$

Lei de Hooke generalizada:

$$[D] = \frac{1}{E} \cdot \begin{bmatrix} 1 & -\nu & -\nu & 0 & 0 & 0 \\ -\nu & 1 & -\nu & 0 & 0 & 0 \\ -\nu & -\nu & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2 \cdot (1 + \nu) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2 \cdot (1 + \nu) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2 \cdot (1 + \nu) \end{bmatrix}$$

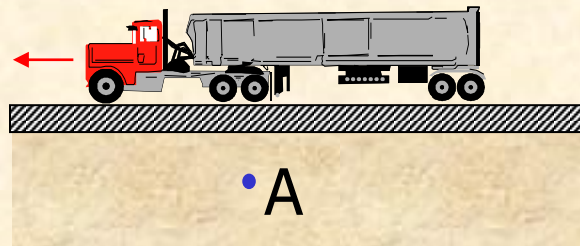
Parâmetros do modelo

E: módulo de elasticidade

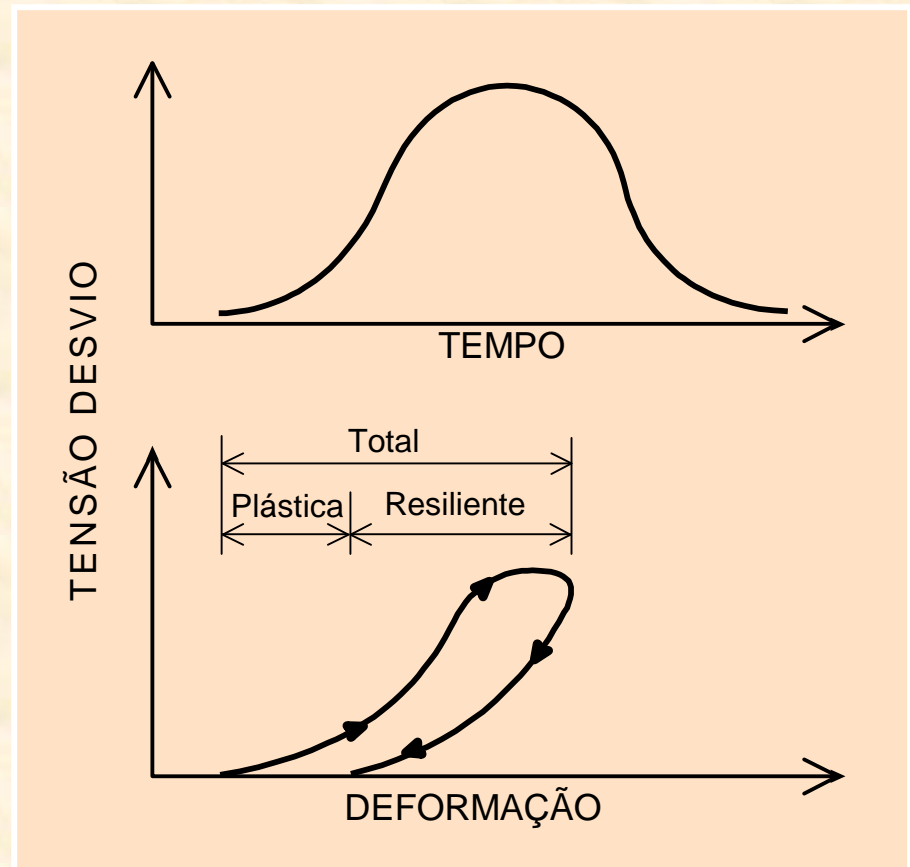
ν : coeficiente de Poisson

Método Mecanístico

- Resiliência e o comportamento *tensão x deformação*

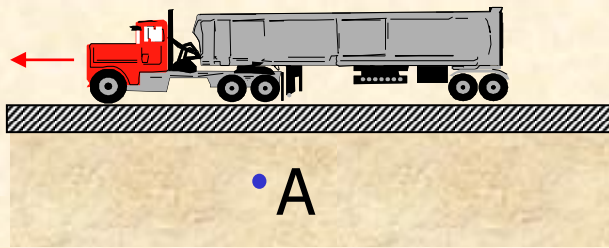


Hveem (1950) foi o 1^o a designar as deformações elásticas do pavimento com palavra **RESILIENTE**



Método Mecanístico

■ Módulo de resiliência



$$M_R = \frac{\sigma_d}{\epsilon_R}$$

MR é o módulo de elasticidade determinado sob condições de carregamento cíclico

onde:

M_R



módulo de resiliência

σ_d



tensão aplicada repetidamente

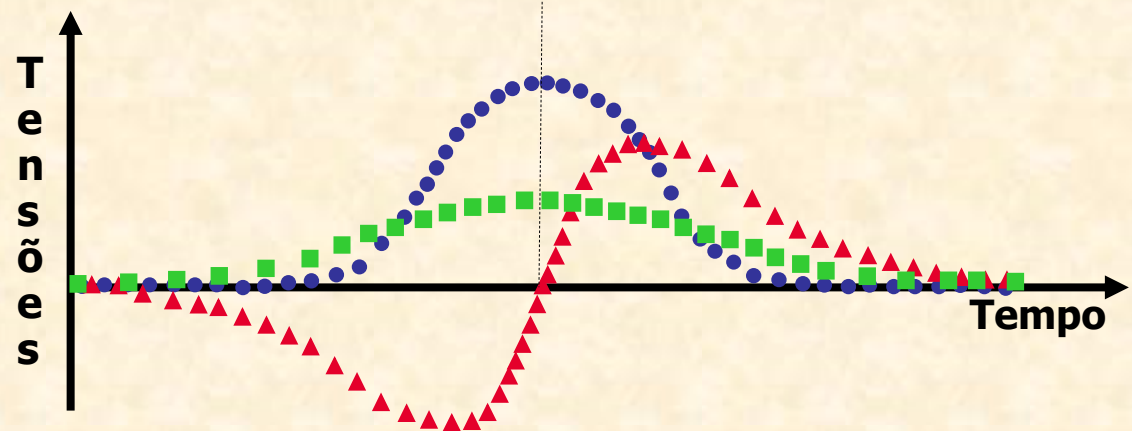
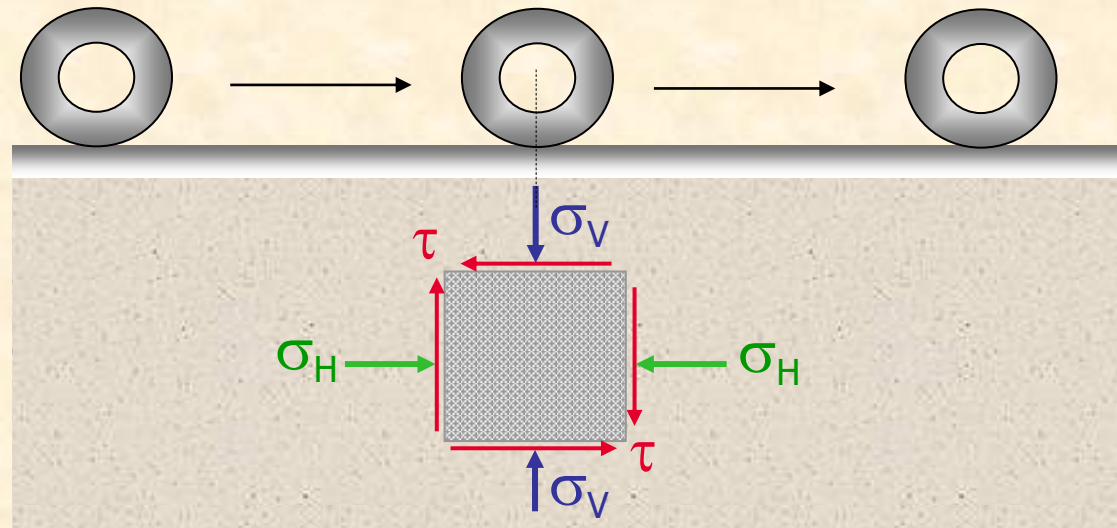
ϵ_R



deformação recuperável resultante do carregamento cíclico.

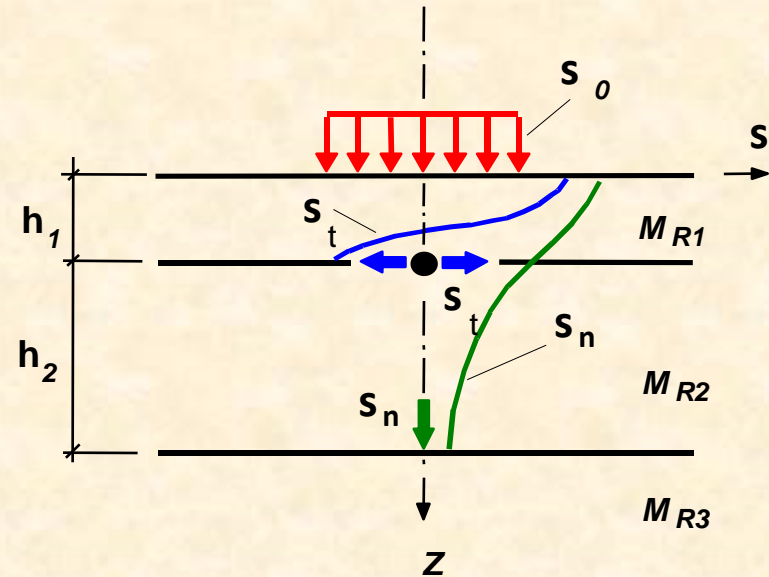
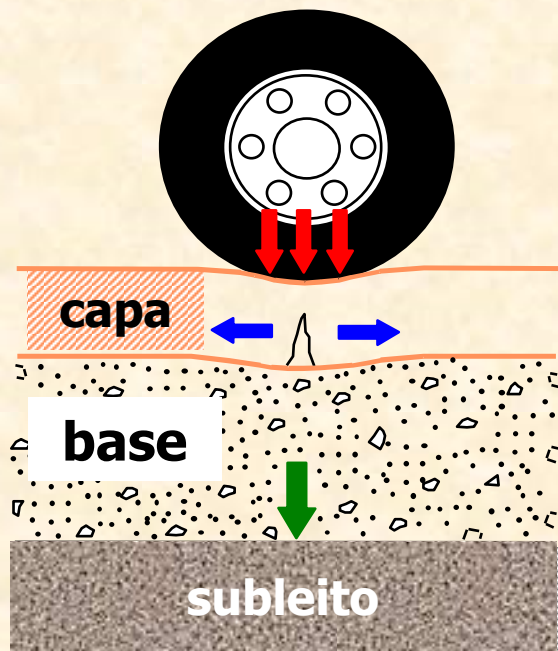
Método Mecanístico

Tensões
normais ($\sigma_V - \sigma_H$)
e
cisalhantes (τ)
atuantes
numa
região do
pavimento



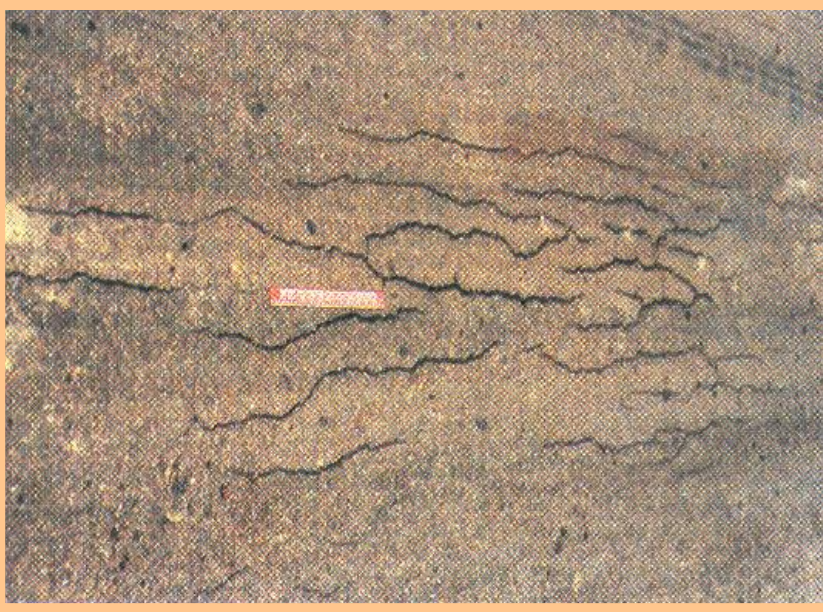
Método Mecanístico

- Ação da carga no pavimento e sub-leito

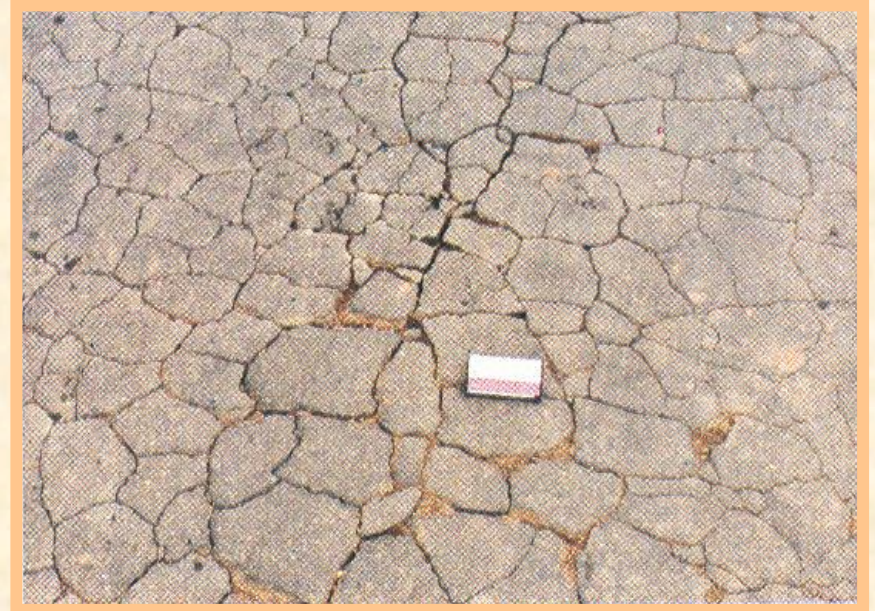


Método Mecanístico - Defeitos

- Trincamento por fadiga: defeito estrutural



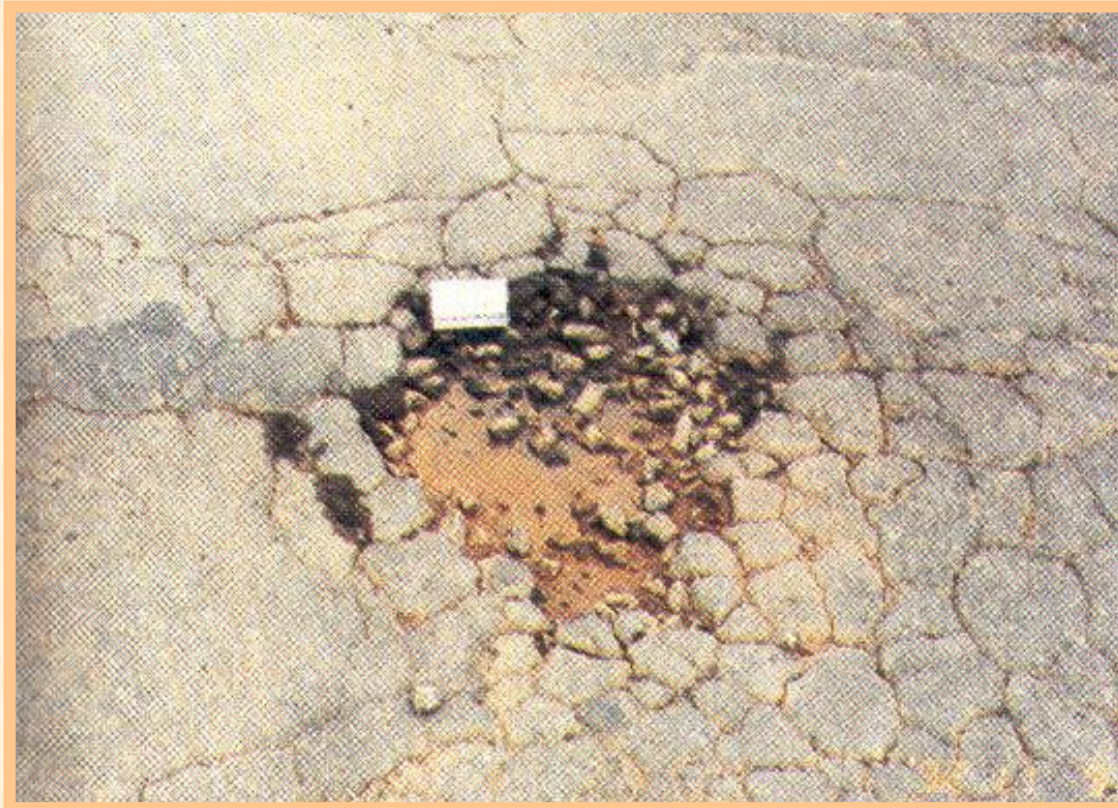
nível de severidade baixo



nível de severidade alto

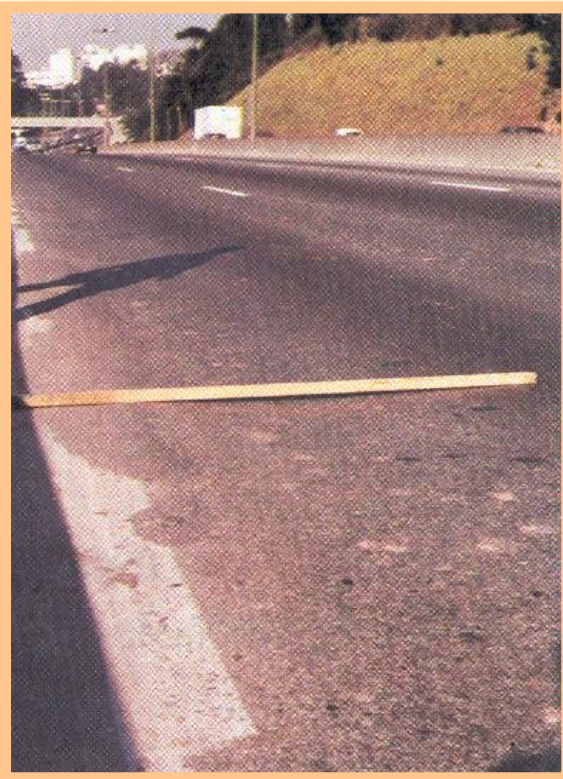
Método Mecânico - Defeitos

- Pannels devido trincamento por fadiga: defeito estrutural e funcional



Método Mecanístico - Defeitos

- Afundamento de trilha de roda: defeito estrutural e funcional



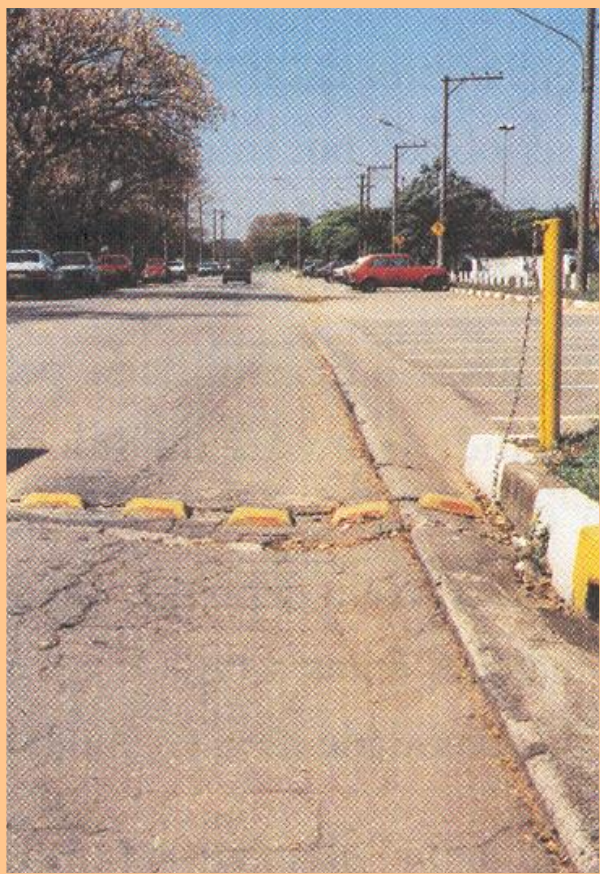
nível de severidade baixo



nível de severidade médio

Método Mecanístico - Defeitos

- Afundamento de trilha de roda: defeito estrutural e funcional



Problemas associados à trilha de rodas:

- água da chuva acumulada nas depressões reduz a resistência à derrapagem e facilita a aquaplanagem, diminuindo a dirigibilidade do veículo
- formação de *spray*, reduzindo a visibilidade

nível de severidade alto



Método Mecanístico

- **Critérios de projeto:**

O pavimento é projetado para apresentar, ao final da vida útil, um certo nível de trincamento e de deformação permanente nas trilhas de roda



Método Mecanístico

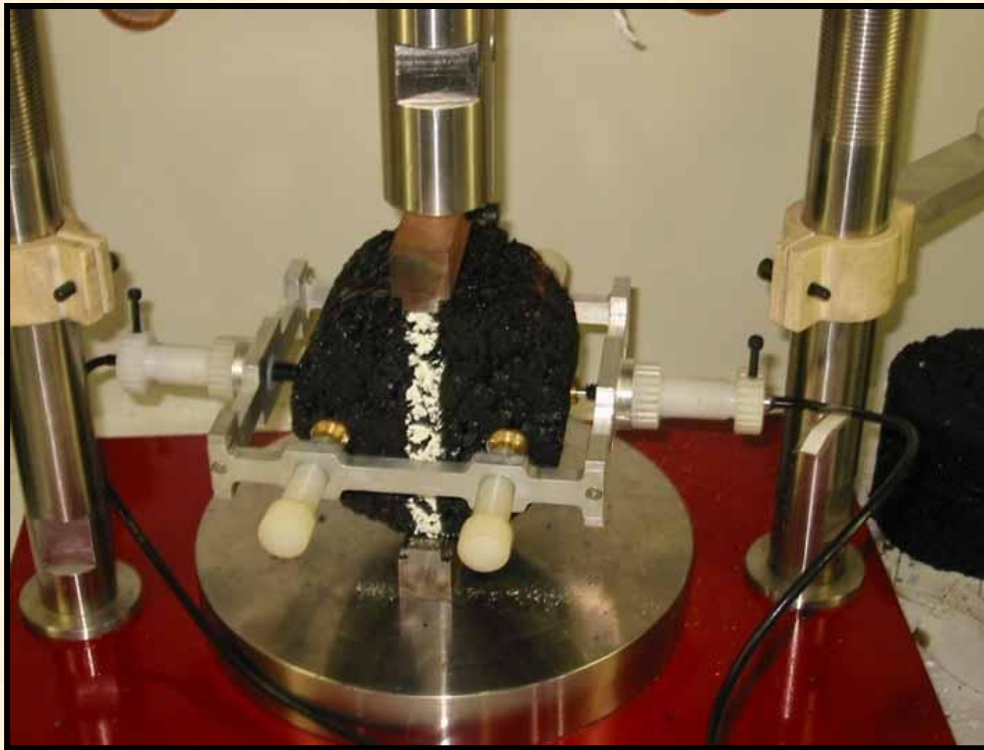
▪ **Controle do trincamento no revestimento:**

É feito através da limitação da tensão ou da deformação na fibra inferior do revestimento

Os modelos utilizados relacionam a tensão ou a deformação com o número de aplicações de carga necessárias ao trincamento (por fadiga) do material de revestimento

Método Mecanístico

▪ Controle do trincamento no revestimento:



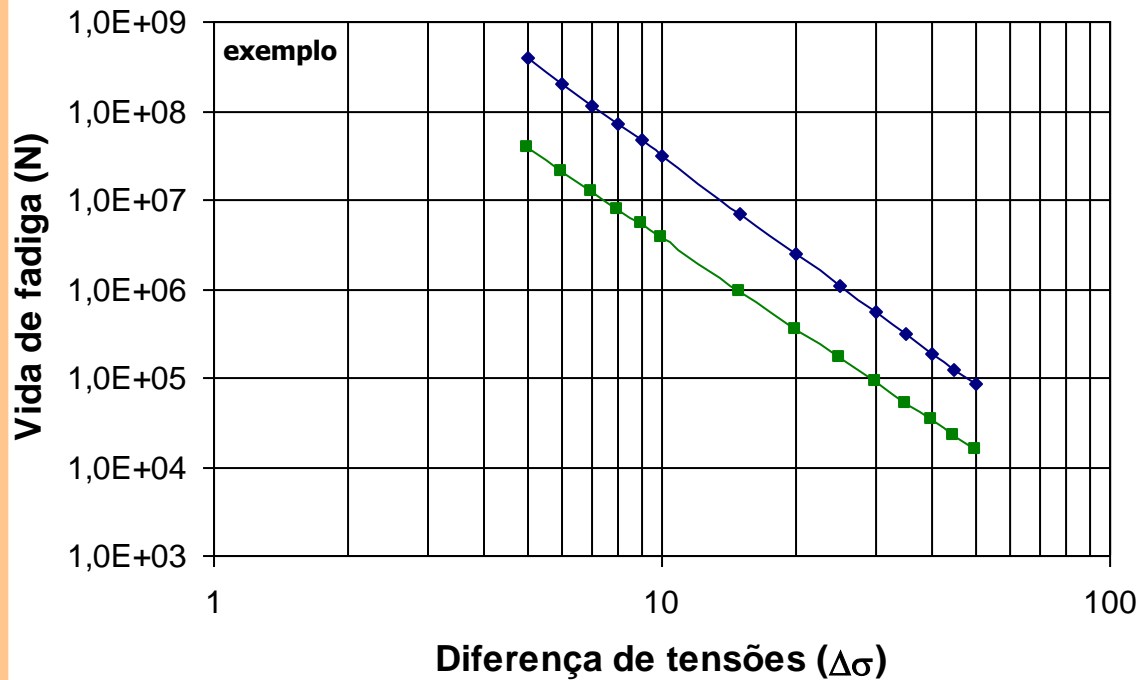
Ensaio para a determinação da curva de vida de fadiga

- são aplicadas tensões repetidas de 5%, 10%, 20% 50% da tensão de ruptura estática do material

→ N_{rupt} (Lab.)

Método Mecanístico

Curvas de vida de fadiga – ruptura pela repetição da aplicação da carga no laboratório ($N_{\text{laboratório}} \ll N_{\text{campo}}$)



tração

$$\Delta\sigma = |\sigma_{\text{vert}} - \sigma_{\text{horiz}}|$$

OU:

$$\Delta\sigma = |\sigma_1 - \sigma_3| = |\sigma_1| + |\sigma_3|$$

compressão



Método Mecanístico

- **Exemplos de modelos de vida de fadiga de misturas betuminosas:**

(já está considerada a relação campo/laboratório)

- Modelo para mistura convencional do tipo CBUQ usado como camada de rolamento:

$$N = 1,5 \times 10^{11} \times (\Delta\sigma)^{-3,68} \quad (\Delta\sigma \text{ em kgf})$$

- Modelo para mistura aberta de pré-misturado usado como camada de ligação:

$$N = 9,3 \times 10^9 \times (\Delta\sigma)^{-3,40} \quad (\Delta\sigma \text{ em kgf})$$

Método Mecanístico

- **Exemplos de modelos de vida de fadiga de misturas betuminosas:**
- Modelo desenvolvido no Instituto do Asfalto (EUA):

$$N = 18.4 \times 10^M \times 4.325 \times 10^{-3} \times (0.06894/E)^{0.854} \times (1/\varepsilon_t)^{3.291}$$

onde:

E = módulo de rigidez em MPa

ε_t = deformação de tração

V_b = Volume de betume (%)

V_v = volume de vazios (%)

$$M = 4.84 \times \left(\frac{V_b}{V_v + V_b} - 0,69 \right)$$

Obs.: já está considerada a relação campo/laboratório

Método Mecanístico

- **Exemplos de modelos de vida de fadiga de misturas betuminosas:**

- Modelos da norma do DER-SP (já está considerada a relação campo/laboratório):

$$N = K \times \left(\frac{1}{\varepsilon_t} \right)^n$$

ε_t = deformação de tração

Tabela 8 – Número “N” em Função da Deformação Específica de Tração ε_t da Fibra Inferior da Camada de Concreto Asfáltico

Equação	Autor	Ano	K	n
1	FHWA (<i>Federal Highway Administration</i>)	1976	$1,092 \times 10^{-6}$	3,512
2	<i>Asphalt Institute</i>	1976	$2,961 \times 10^{-5}$	3,291
3	Barker, Brabston & Chou	1977	$9,7 \times 10^{-10}$	4,03
4	Pinto & Preussler – CAP 50-70	1980	$2,85 \times 10^{-7}$	3,69



Método Mecanístico

- **Exemplo de modelo de vida de fadiga de misturas solo-cimento segundo Ceratti (1991):**

$$RF (\%) = A - B \times \log N$$

onde,

RF (%): relação entre a tensão de tração atuante e a tensão de tração resistente na fibra inferior da camada cimentada

Solo	A	B
NA	125,6	14,9
LA	64,0	0,8
LA'	94,8	2,5
LG'	67,6	1,0



Método Mecanístico

▪ Controle da deformação permanente:

A **deformação permanente** nas trilhas de roda é controlada de duas maneiras:

- limitando a tensão ou deformação vertical atuante no topo do subleito, considerada a camada mais deformável e de menor resistência (vide observação)
- ou limitando a deformação resultante do somatório das deformações permanentes do subleito e de cada camada, incluindo-se também a capa

Obs: No Brasil, devido à “boa qualidade” dos solos de subleito, a limitação da tensão vertical no topo do subleito não é usualmente o critério mais crítico no dimensionamento!



Método Mecanístico

- **Controle da deformação permanente**

- Tensão vertical admissível no topo do subleito:

- Modelo sugerido por Motta (1991)

$$\sigma_{vadm} = 0,006 M_R / (1 + 0,7 \log N) \quad (\text{kgf/cm}^2)$$

- Modelo proposto por Yoder e Witczack (1975)

$$\sigma_{vadm} = 0,553 \times \text{CBR}^{1,5} \times 0,07 \quad (\text{kgf/cm}^2)$$

Método Mecanístico

▪ Controle da deformação permanente

➤ Deformação vertical admissível no topo do subleito - DER/SP:

$$N = K \times \left(\frac{1}{\varepsilon_v} \right)^n$$

Tabela 9 – Número “N” em Função da Deformação Específica de Compressão ε_v do Topo da Camada do Subleito

Equação	Autor	Ano	K	n
1	Dornon & Metcalf	1965	$6,069 \times 10^{-10}$	4,762
2	Shell (Claessen, Edwards, Sommer, Uge)	Revisado em 1985	$6,15 \times 10^{-7}$	4,0
	50% de confiabilidade		$1,94 \times 10^{-7}$	4,0
	85% de confiabilidade		$1,05 \times 10^{-7}$	4,0
3	Asphalt Institute (Santucci)	1984	$1,338 \times 10^{-9}$	4,484



Método Mecanístico

- Estimativa da deformação permanente usando resultado dos ensaios do materiais:

A deformação permanente pode ser estimada considerando-se a contribuição de todos os elementos constituintes do pavimento:

$$\delta_p = \sum (\varepsilon_{pi} \times h_i)$$

onde:

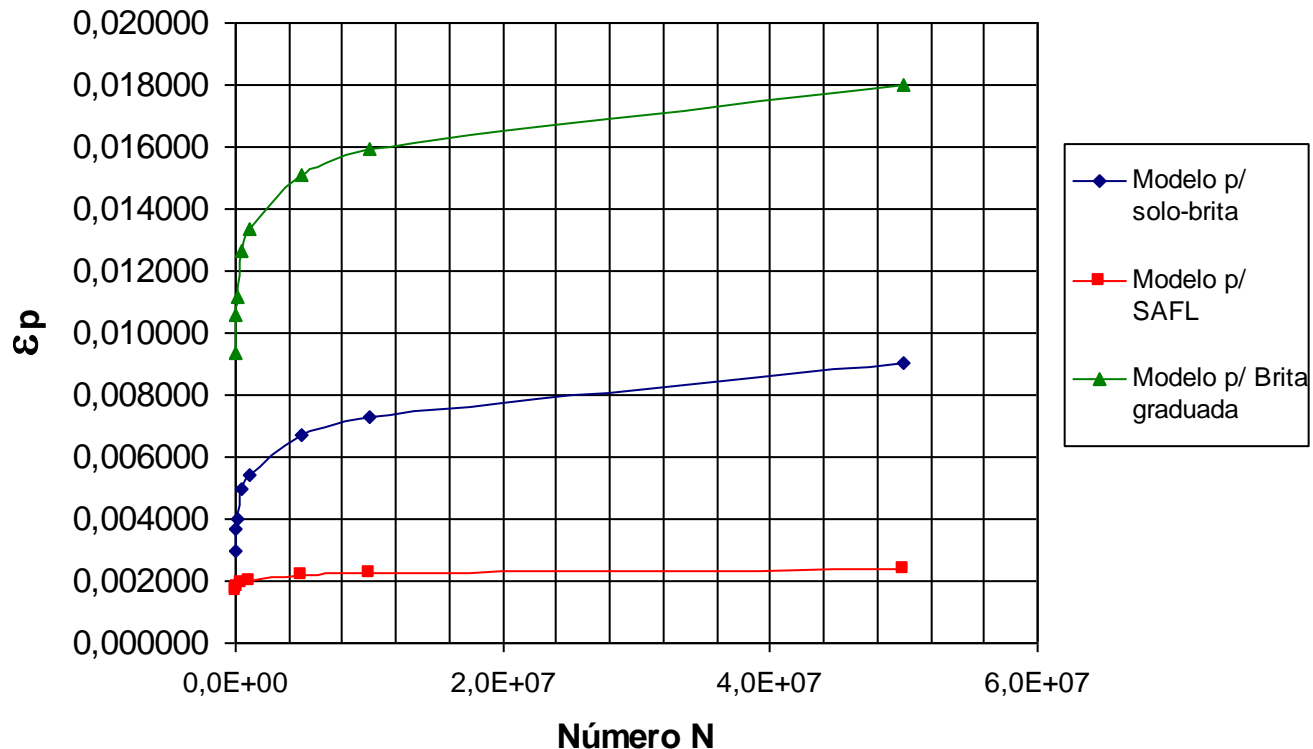
δ_p = profundidade total da trilha de roda

ε_{pi} = deformação específica permanente da i-ésima camada

h_i = espessura da i-ésima camada

Método Mecanístico

Curvas da variação da def. permanente com o n^o de aplicações de carga (N)





Método Mecanístico

▪ Exemplos de modelos (Monismith) para deformação permanente:

- Modelo para solos argilosos (Svenson-1980):

$$\varepsilon_p = 0,00599 \times N^{0,066}$$

- Modelo para solos arenosos (Santos-1995):

$$\varepsilon_p = 0,0050 \times N^{0,110}$$

- Modelo para solos pedregulhosos (Santos-1995):

$$\varepsilon_p = 0,0020 \times N^{0,130}$$



Método Mecanístico

- **Exemplos de modelos para deformação permanente:**

- Modelo para misturas do tipo solo-brita (Motta-1991):

$$\varepsilon_p = 0,0009 \times N^{0,130}$$

- Modelo para SAFL (Carvalho-1997):

$$\varepsilon_p = 0,0011 \times N^{0,044}$$

- Modelo para brita graduada (Motta-1994)

$$\varepsilon_p = 0,0046 \times N^{0,077}$$



Método Mecanístico

Atenção!

Para a aplicação do método mecanístico de maneira correta, exige-se que sejam realizados ensaios para a determinação do **M_R** e **deformação permanente** de todos os constituintes do pavimento e também da **vida de fadiga** da capa. Destaca-se ainda, que relações **laboratório-campo** ainda não estão bem estabelecidas para as condições brasileiras.