

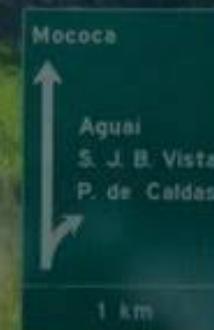


# AULA 12 – DIMENSIONAMENTO MECANÍSTICO-EMPÍRICO DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS

PTR 3322 - Pavimentação Rodoviária

Profa. Kamilla Vasconcelos

Profa. Liedi Bernucci



UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

ESCOLA POLITÉCNICA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE

TRANSPORTES



# Introdução





# Projeto de Pavimentos

No final da década de 20 – Estado da California fez um grande trabalho de campo para identificar os problemas que levavam à rupturas ou a danos dos pavimentos.

Foram detectados 3 problemas principais:

## 1. RUPTURA DO SUBLEITO

Excesso de tensão vertical do subleito (concepção do ensaio CBR).

Mais tarde do projeto de dimensionamento do CBR

## 2. FALTA DE DENSIFICAÇÃO DOS MATERIAIS

Necessidade de desenvolver equipamentos eficientes e de ter controle tecnológico

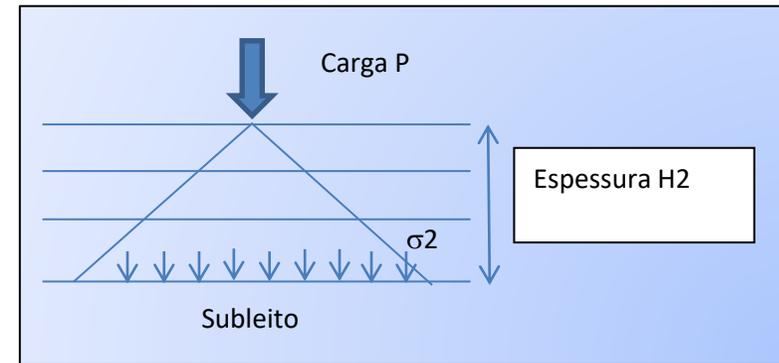
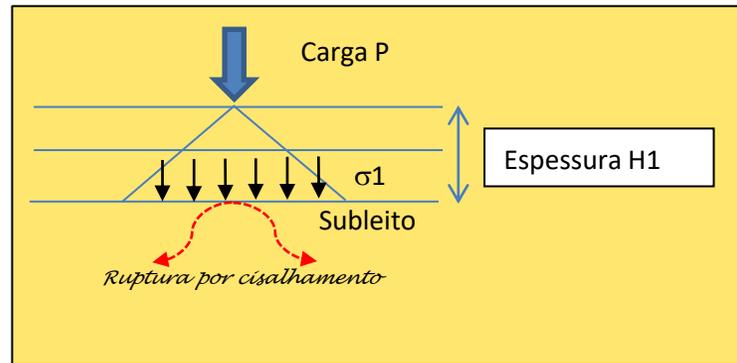
## 3. FADIGA

Era ainda 1928... Imaginem o que seria deste problema com o aumento da carga dos caminhões e ônibus, com o aumento do volume de tráfego...



# Projeto de Pavimentos

Os **métodos de dimensionamento** empregados no Brasil eram até 2018 empíricos e usavam a capacidade de suporte dos pavimentos retratada através do **CBR** das subcamadas.



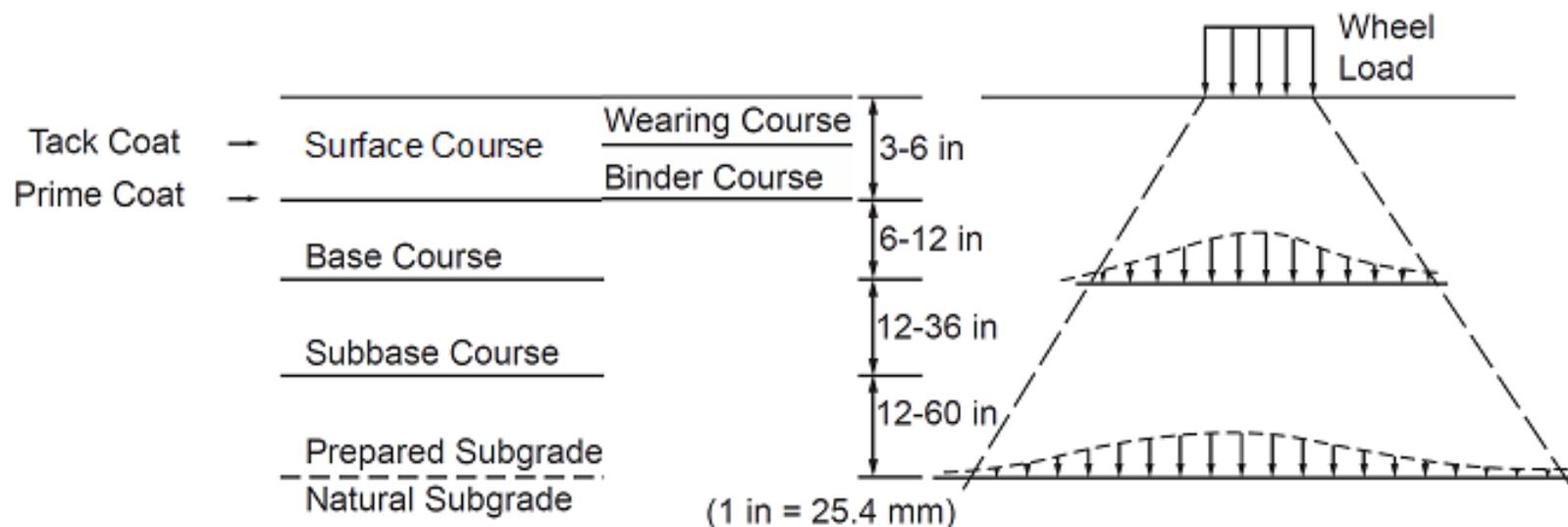
$$H2 > H1, \text{ e } s2 \lll s1$$

Portanto, Espessura Total em função da  
Capacidade de Suporte do Subleito, dada pelo CBR



# Projeto de Pavimentos

## Tensões verticais nas camadas dos pavimentos



Observe:

- 1) Redução das tensões com profundidade – não é linear
- 2) Distribuição da tensão a uma certa profundidade



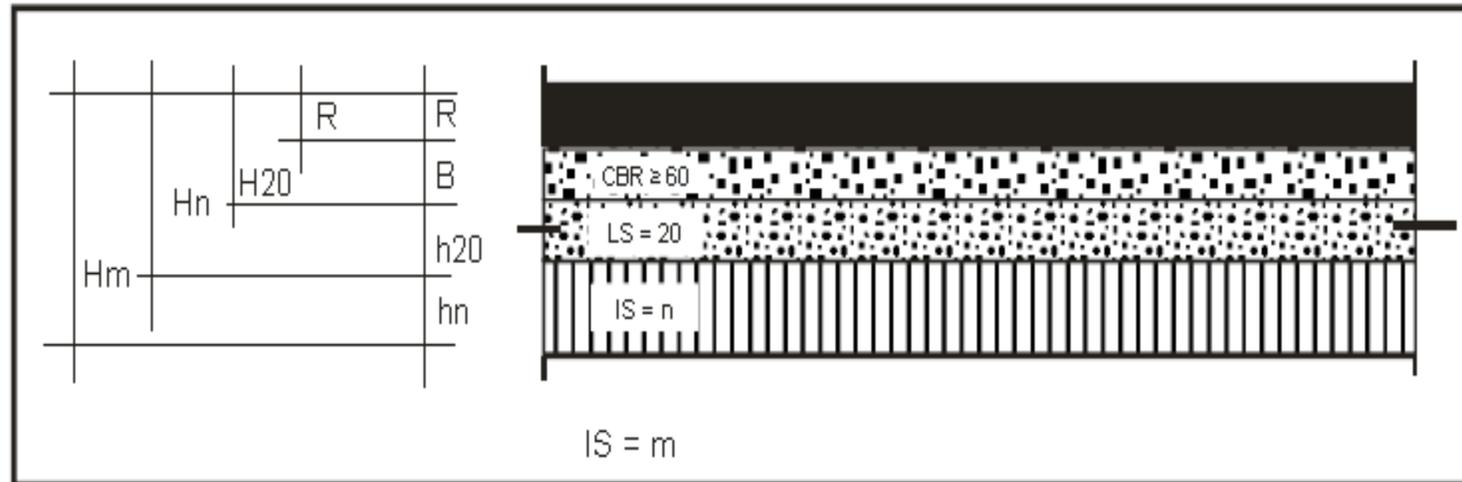
# Dimensionamento – Método do CBR (DNIT)





# Dimensionamento – Método do CBR (DNIT)

Figura 44 - Dimensionamento do pavimento



$$RK_R + BK_B \geq H_{20}$$

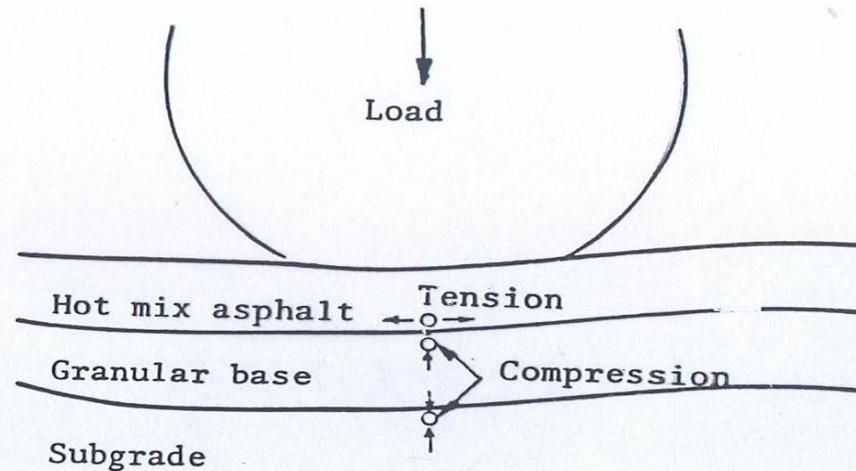
$$RK_R + BK_B + h_{20} K_S \geq H_n$$

$$RK_R + BK_B + h_{20} K_S + h_n K_{Ref} \geq H_m,$$



# Projeto de Pavimentos

Já na década de 60, o **Prof. Then de Barros** e o **Eng. Andreatini** calculavam os pavimentos como estruturas de múltiplas camadas e calculavam tensões e deformações usando a **Teoria da Elasticidade**. Mas sem computadores, era complicado calcular analiticamente.



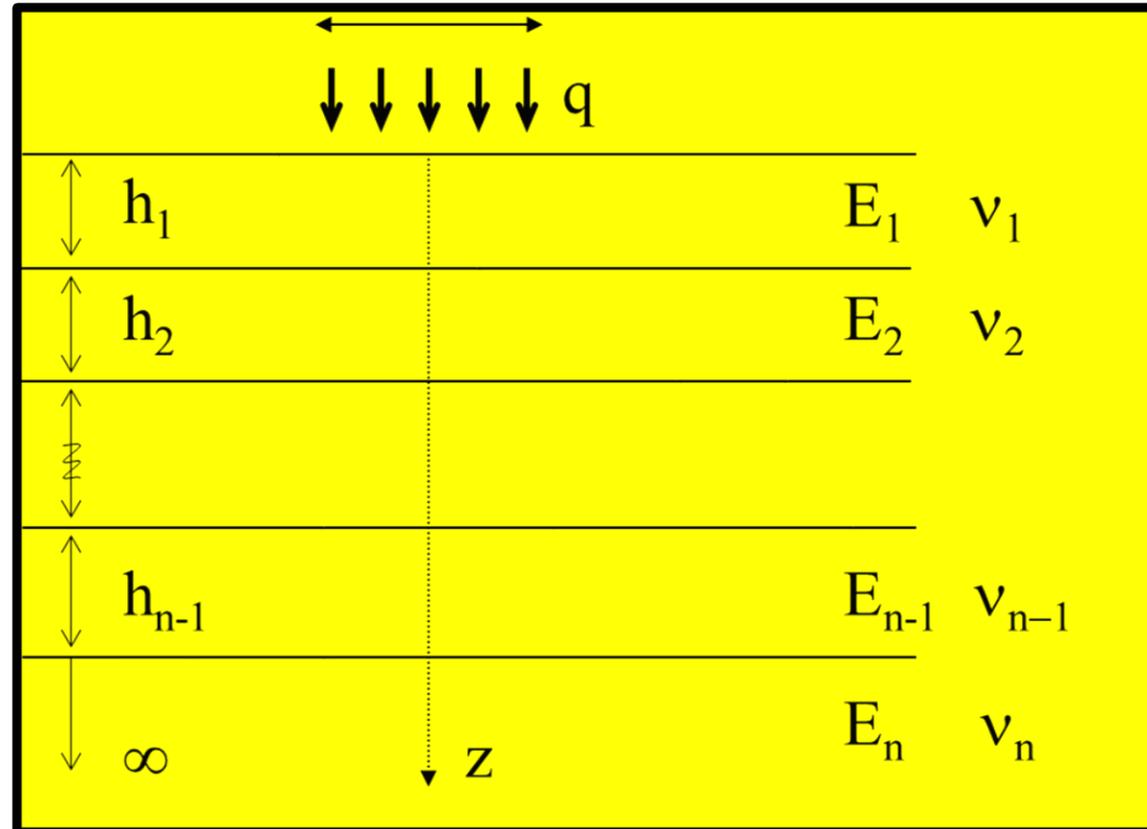
**Figure 1.1** Tensile and compressive strains in flexible pavements.

Apud: Huang, 2003



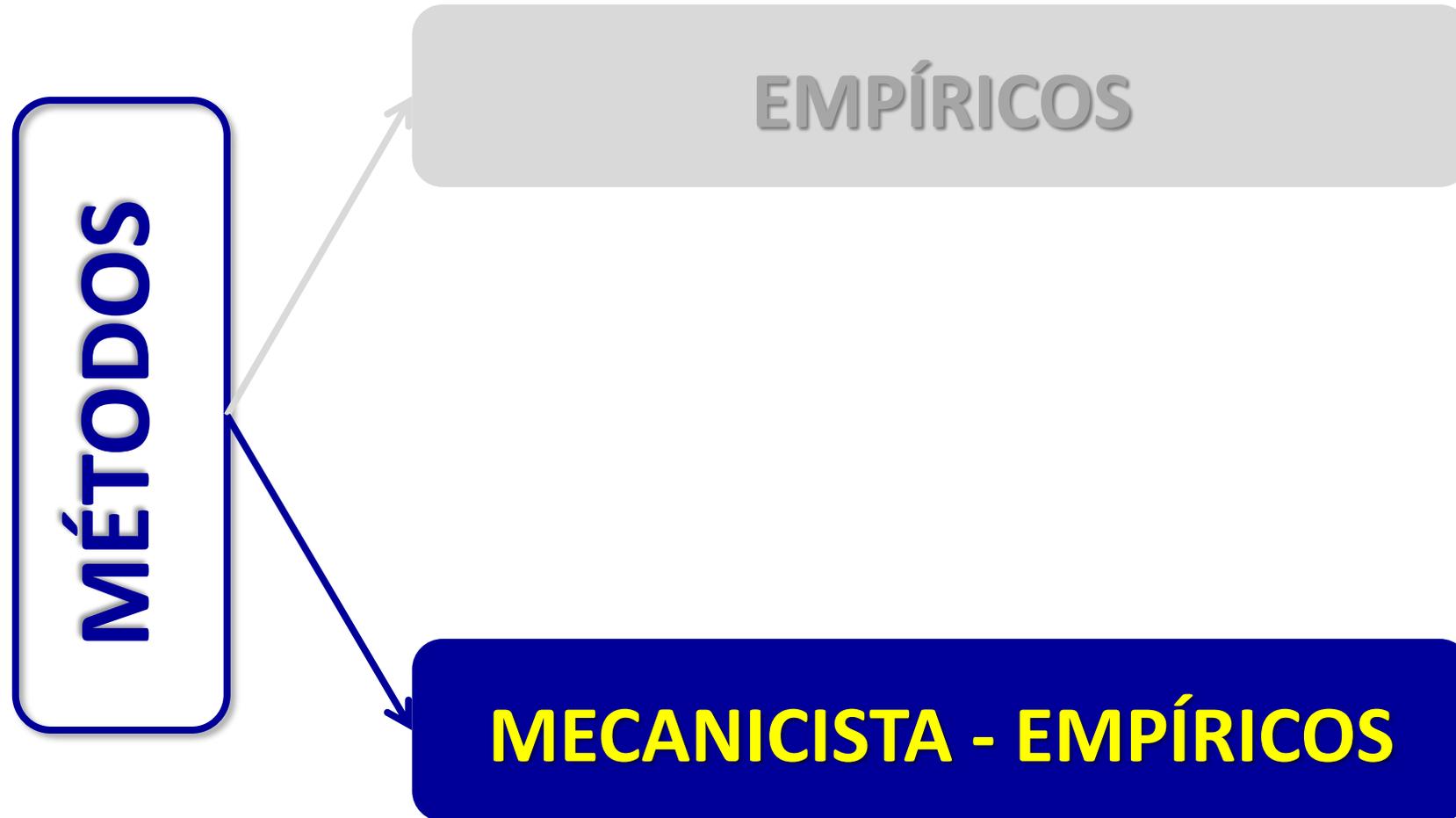
# Projeto de Pavimentos

Na década de 70, foi introduzido no país o estudo da **resiliência** dos materiais de pavimentação, permitindo analisar **o comportamento estrutural**.



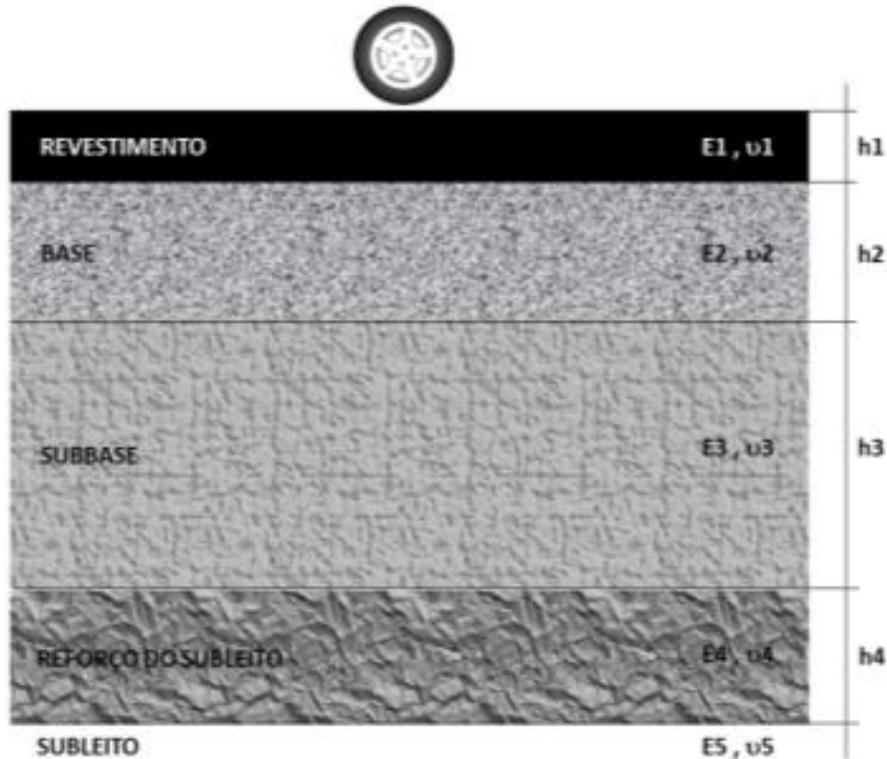


# Projeto de Pavimentos





# Método Mecanístico-empírico



## ANÁLISE ESTRUTURAL

TENSÃO ( $\sigma$ )

DEFORMAÇÃO ( $\epsilon$ )

DESLOCAMENTO ( $\delta$ )

**MECANÍSTICO ou MECANICISTA**

## MODELOS DE PREVISÃO

FADIGA

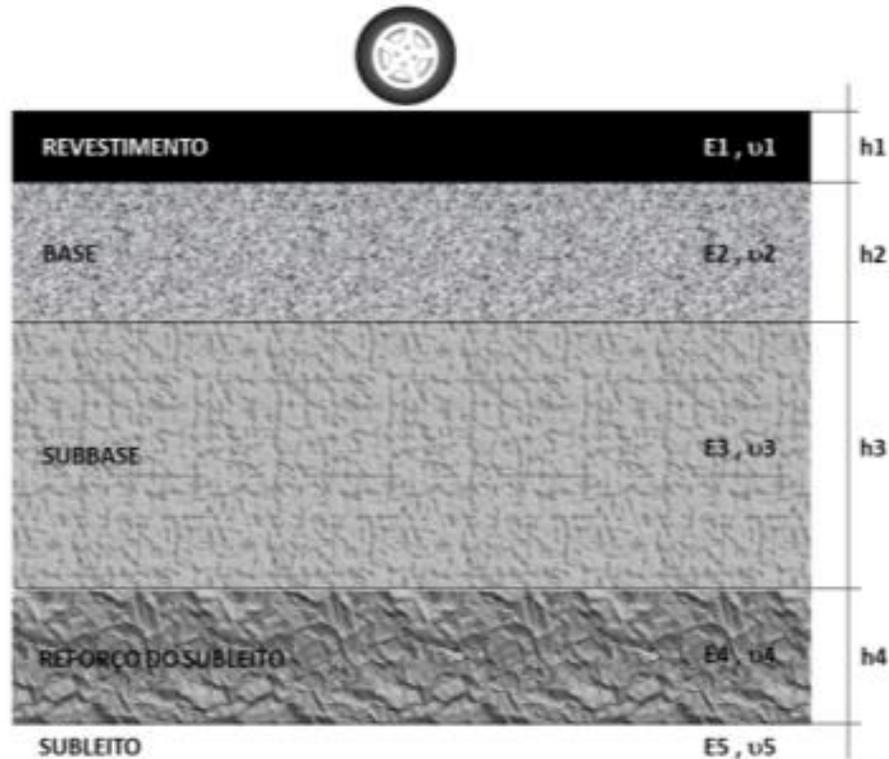
DEFORMAÇÃO PERMANENTE

**EMPÍRICO**



# Análise Estrutural

## O QUE É UMA ANÁLISE ESTRUTURAL DE PAVIMENTOS?



**PAVIMENTO:** estrutura ou sistema composto por camadas de espessuras finitas sobre o subleito (que por sua vez, pode ser considerado um semi-espaço infinito).

A análise estrutural é uma **FERRAMENTA ANALÍTICA** ou **NUMÉRICA** para cálculo de **tensões, deformações e deslocamentos** na estrutura do pavimento.



## FUNDAMENTOS PARA A ANÁLISE ESTRUTURAL DE PAVIMENTOS

- **TEÓRICO:** Teoria da Elasticidade
- **EMPÍRICO:** Experimentos e observações de laboratório e/ou campo  
Banco de dados - materiais e pavimentos



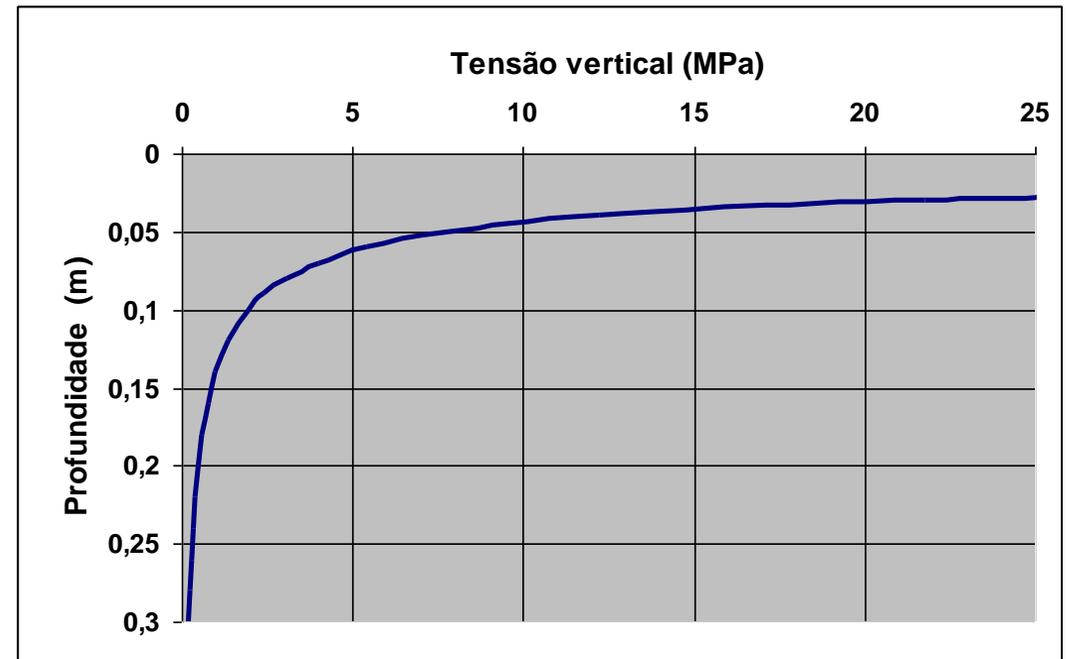
## SOLUÇÕES ANALÍTICAS – SÉCULO XIX

- **BOUSSINESQ (1885)**: aplica Teoria da Elasticidade para **CARGA VERTICAL CONCENTRADA** sobre semi-espaco infinito, isotrópico e homogêneo.

$$\sigma_v = \frac{3Q}{2\pi z^2} \frac{1}{\left[1 + \left(\frac{r}{z}\right)^2\right]^{5/2}}$$

Para :  $Q = 40 \text{ kN}$

$r = 0$





# Exercício 1

## Exemplo de cálculo de tensões, deformações e deslocamentos

15 cm	250 MPa
15 cm	150 MPa
subleito	100 MPa

**Revestimento asfáltico**

**Solo arenoso fino laterítico**

**Solo arenoso fino laterítico**

**Solo arenoso fino laterítico**



# Exercício 1.1

Segundo Boussinesq:

Solo arenoso fino laterítico

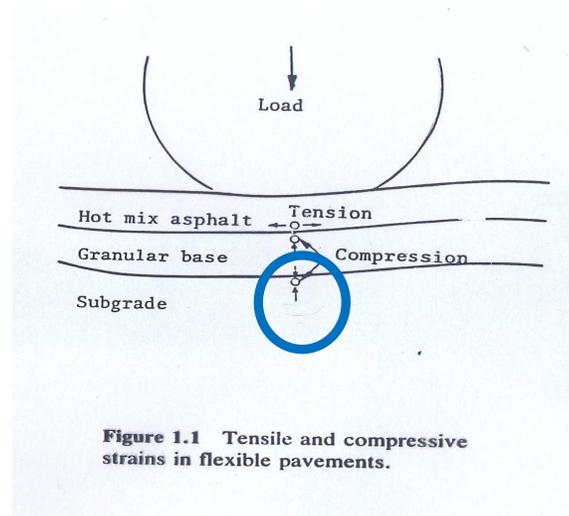
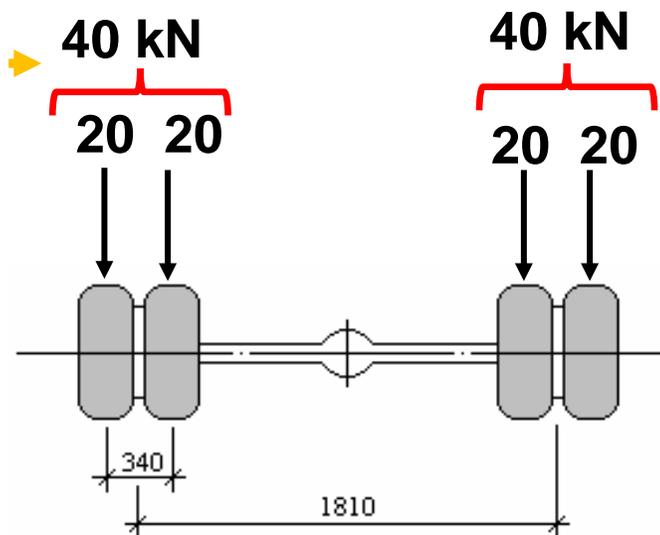


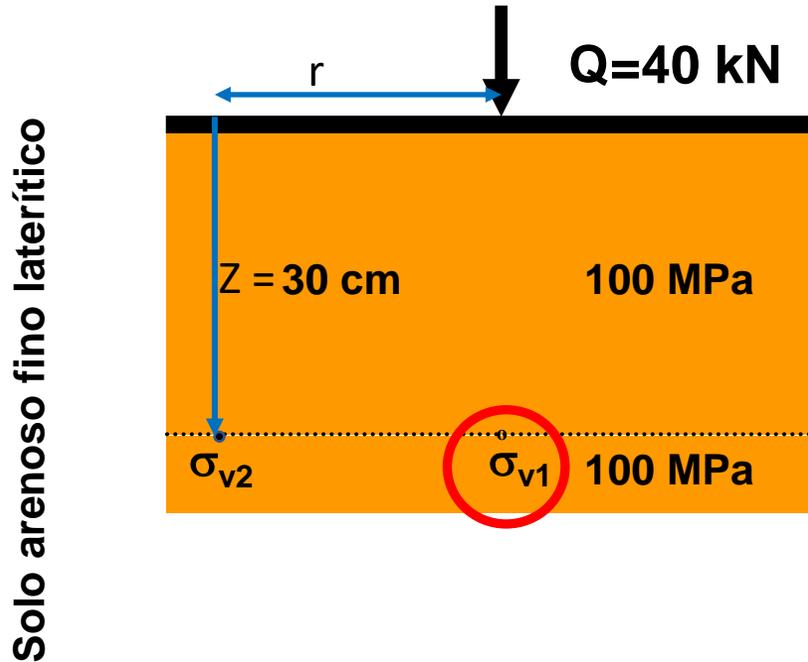
Figure 1.1 Tensile and compressive strains in flexible pavements.

$$\sigma_v = ???$$



# Exercício 1.1

## Segundo Boussinesq:



$$\sigma_v = \frac{3Q}{2\pi z^2} \frac{1}{\left[1 + \left(\frac{r}{z}\right)^2\right]^{5/2}}$$

Para :  $Q = 40 \text{ kN}$

$r = 0$

$$\sigma_{v1} = 0,212 \text{ MPa}$$



### CARREGAMENTO DISTRIBUÍDO

#### semi-espaço infinito

- NEWARK: área retangular
- LOVE: área circular
- FOSTER e AHLVIN: ábacos para carregamento circular,  $n=0,5$
- AHLVIN e ULERY: equação e ábacos para carregamento circular para diversos valores de  $n$

#### sistema de camadas

**BURMISTER:** 2 camadas (1943), 3 camadas (1945)

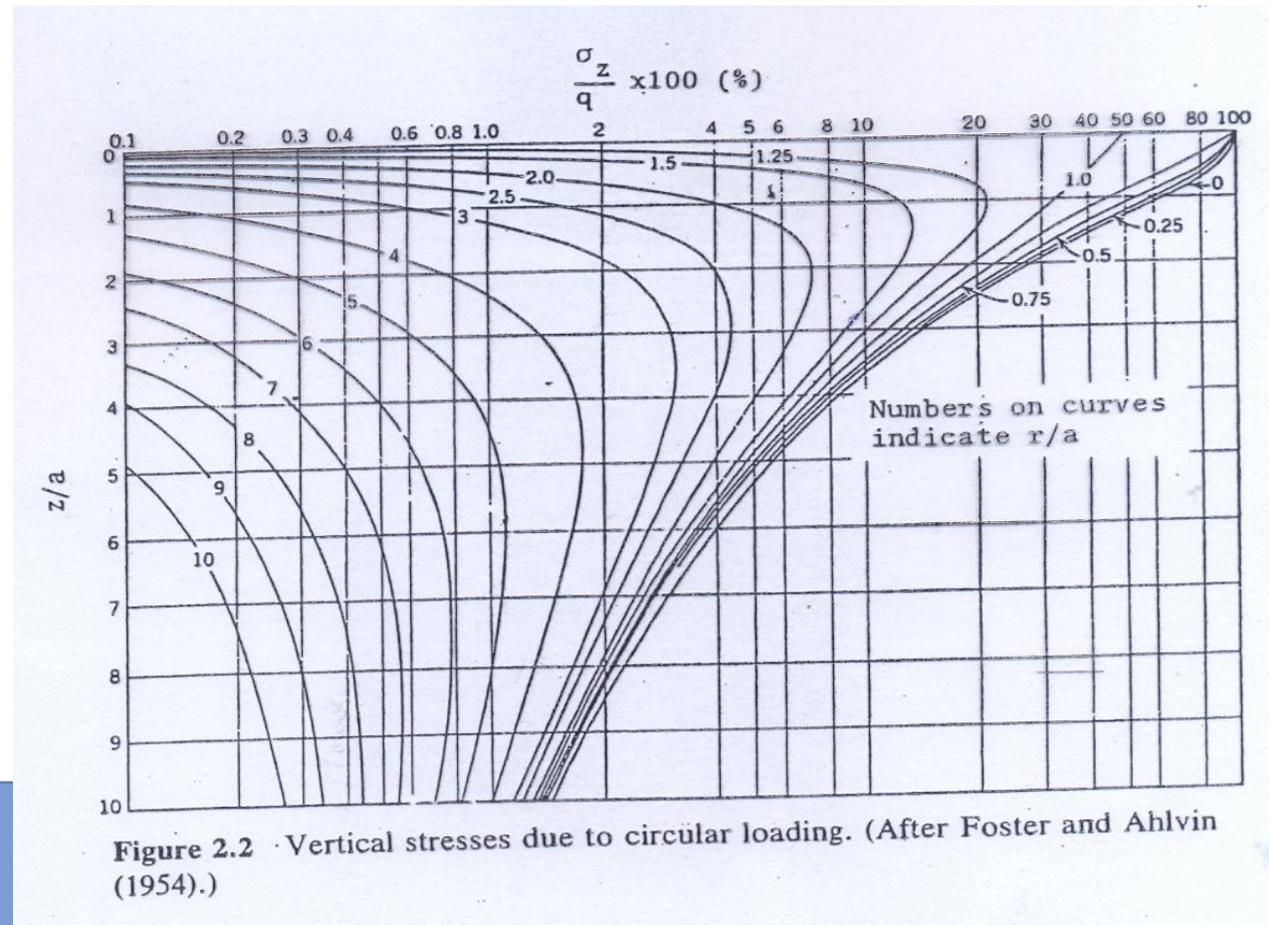
Sérgio Then de Barros (anos 60)



# Análise Estrutural

## SOLUÇÕES ANALÍTICAS – SÉCULO XX

### ÁBACOS DE FOSTER E AHLVIN

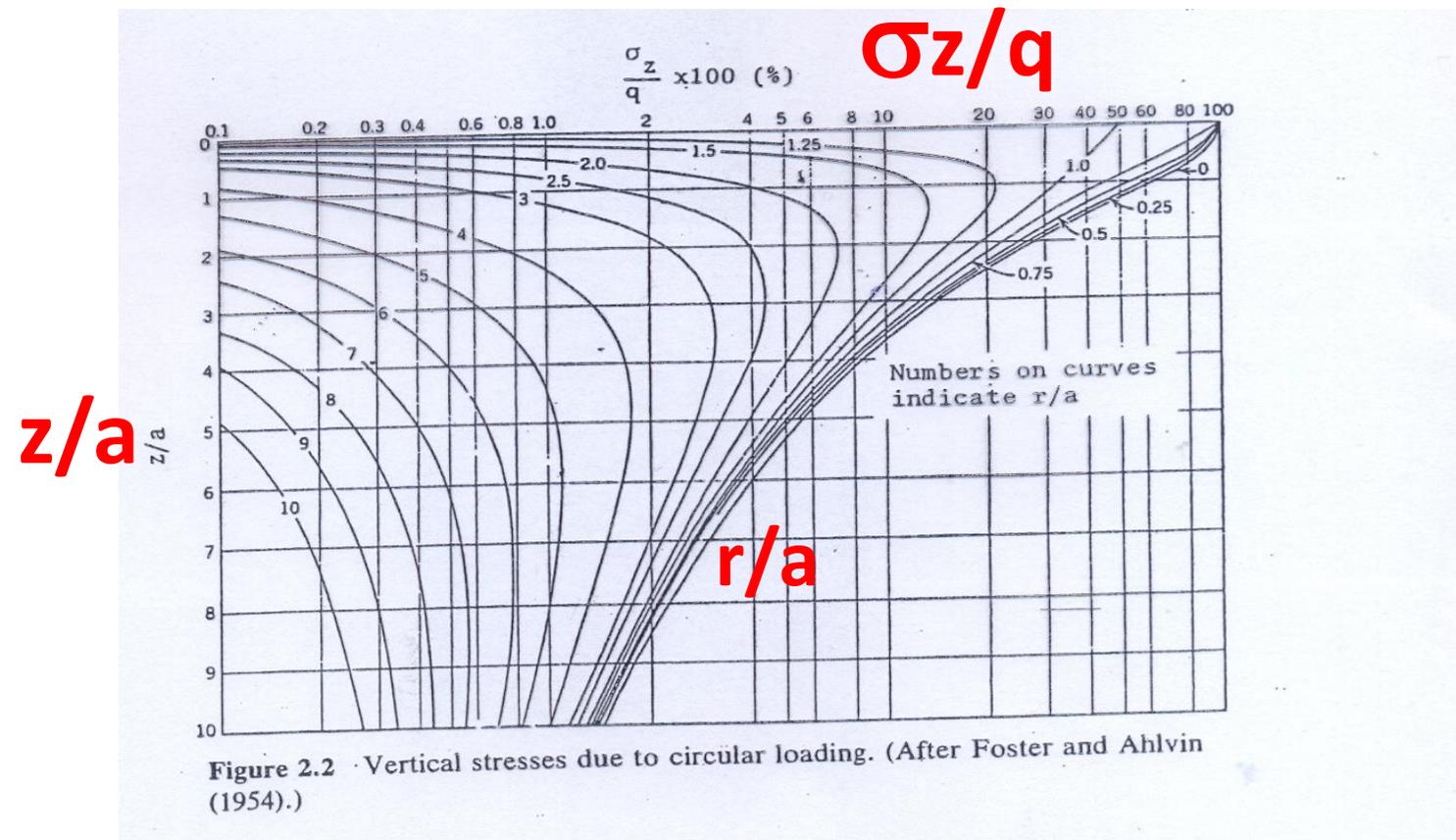




# Análise Estrutural

## ÁBACOS DE FOSTER E AHLVIN

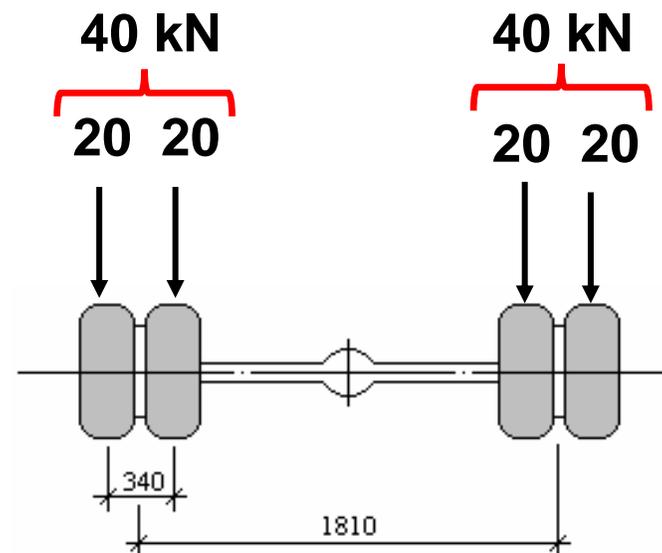
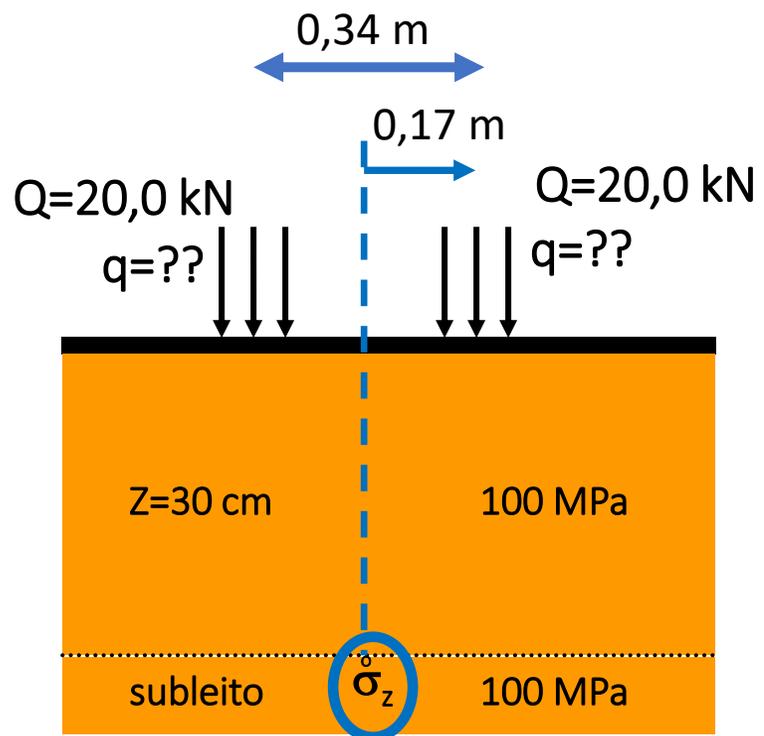
- 1) Pode usar para cargas **DISTRIBUÍDAS  $q$**  circulares na superfície com raio de  **$a$**
- 2) Calcula  **$\sigma_z$**  vertical na profundidade  **$z$**  e distantes do centro de carga distribuída  **$r$**





# Exercício 3.1

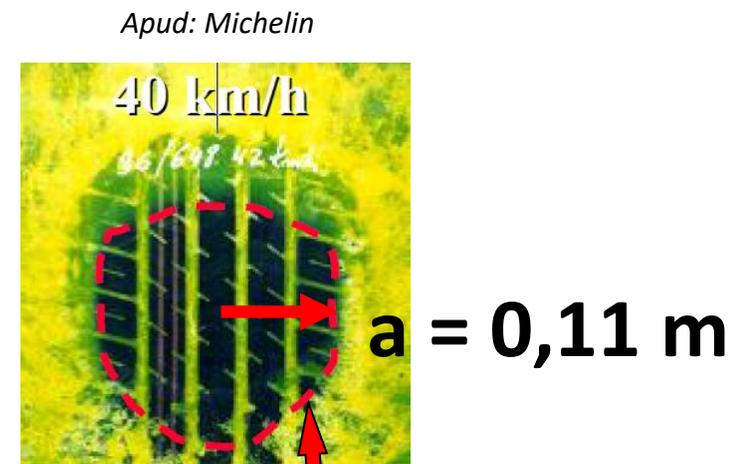
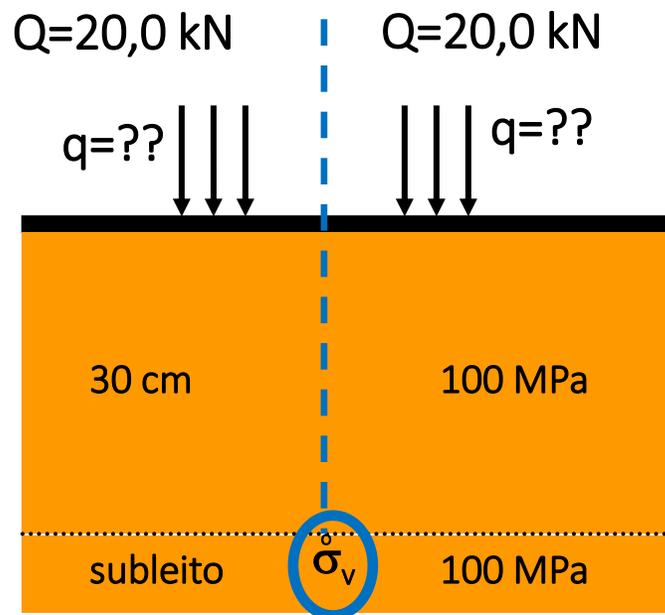
Segundo Foster e Ahlvin:





# Exercício 3.1

## Segundo Foster e Ahlvin:



$a = 0,11 \text{ m}$  (raio da área de contato do pneu com pavimento)

$r = 0,17 \text{ m}$

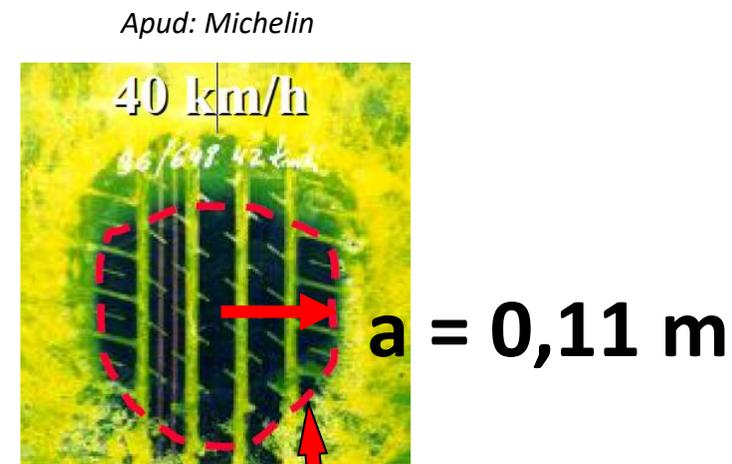
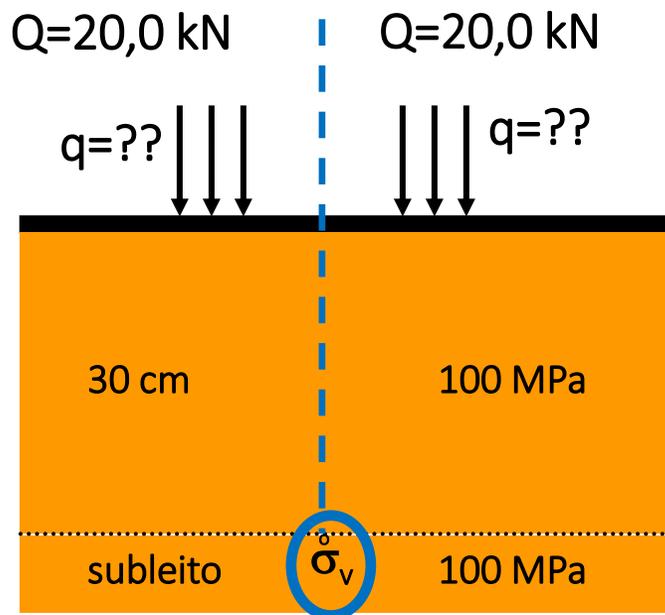
$a = 0,11 \text{ m}$  (raio da área de contato do pneu com pavimento)

$q=Q/(\text{área de contato pneu e pavimento})$



# Exercício 3.1

## Segundo Foster e Ahlvin:



$a = 0,11 \text{ m}$  (raio da área de contato do pneu com pavimento)

$r = 0,17 \text{ m}$

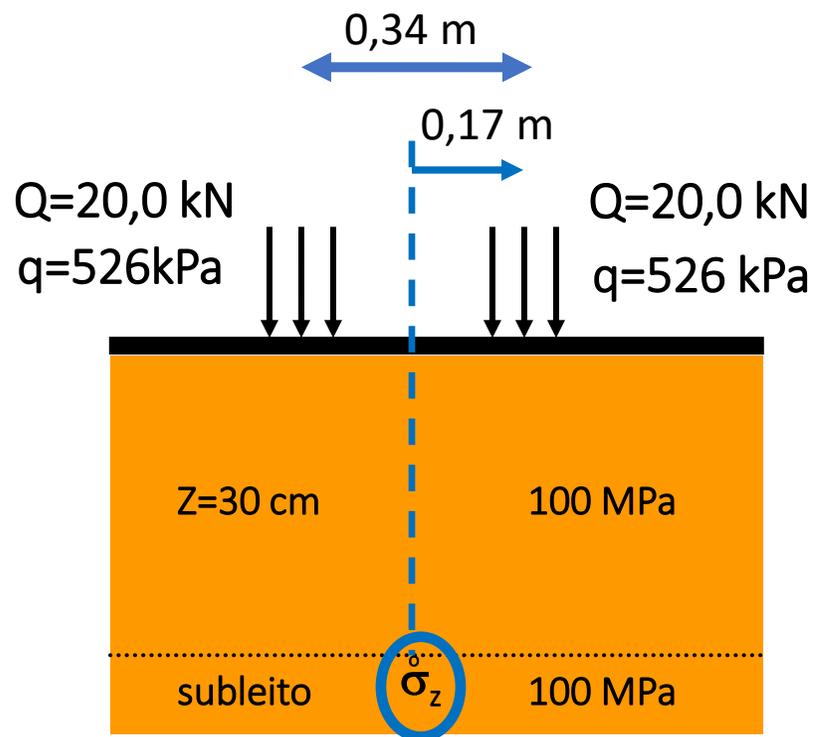
$a = 0,11 \text{ m}$  (raio da área de contato do pneu com pavimento)

$q = 20 / (\pi a^2) = 526 \text{ kPa}$



# Exercício 3.1

## Segundo Foster e Ahlvin:



$a = 0,11 \text{ m}$  (raio)

$r = 0,17 \text{ m}$  (distância entre carregamentos)

$$r/a = 0,17/0,11 = 1,5$$

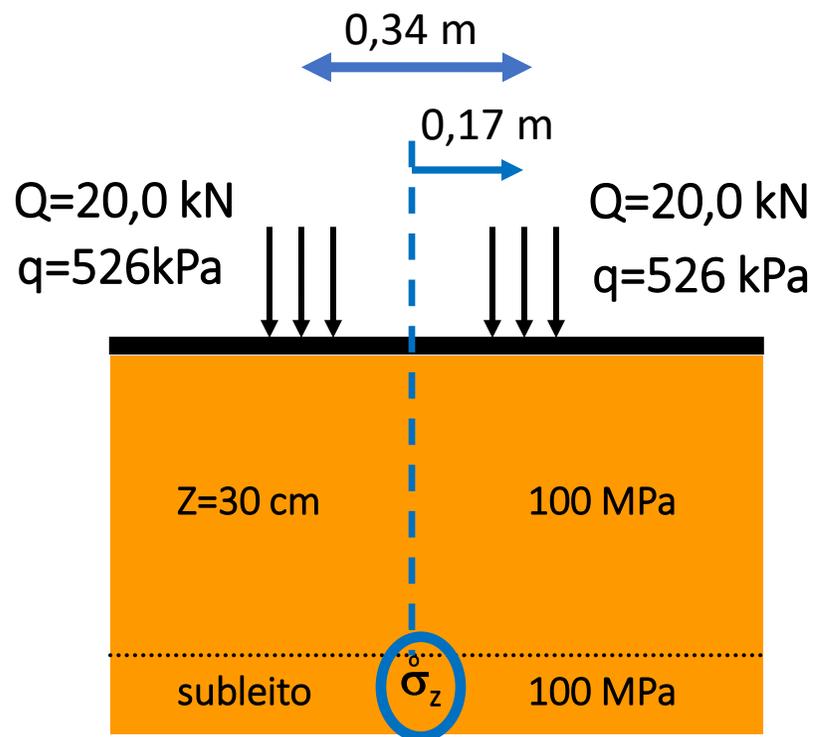
$$z/a = 0,30/0,11 = 2,7$$

$$\sigma_z/q = ???$$



# Exercício 3.1

## Segundo Foster e Ahlvin:



$a = 0,11 \text{ m}$  (raio)

$r = 0,17 \text{ m}$  (distância entre carregamentos)

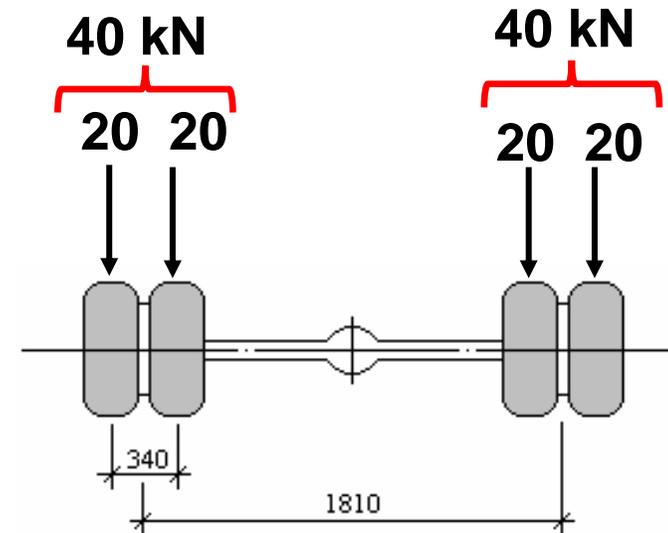
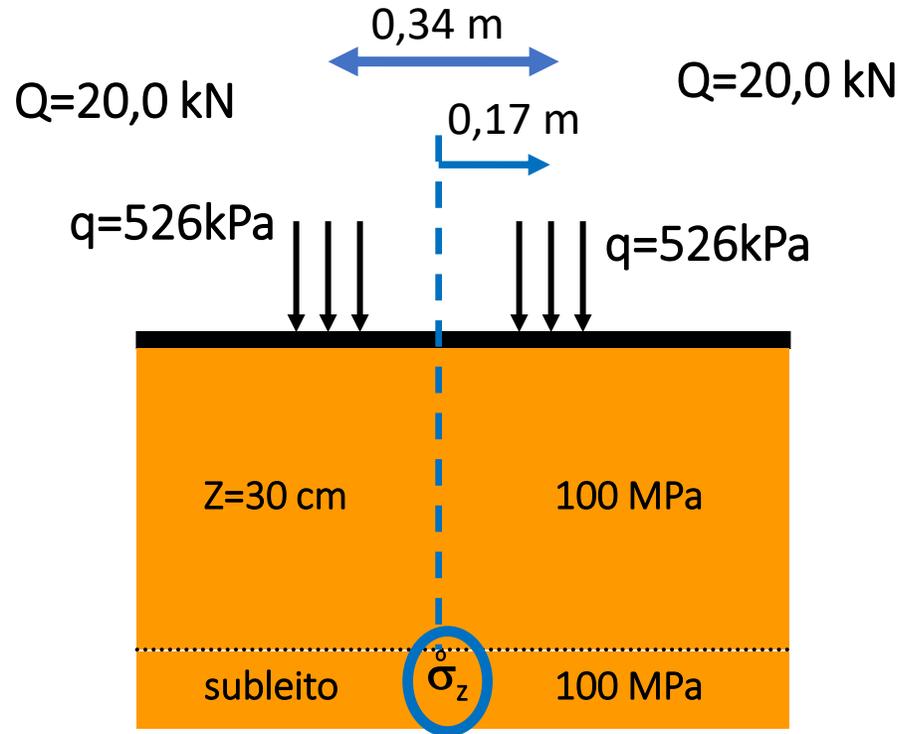
$$r/a = 0,17/0,11 = 1,5$$

$$z/a = 0,30/0,11 = 2,7$$

$$\sigma_z/q = 10\%$$



# Exercício 3.1



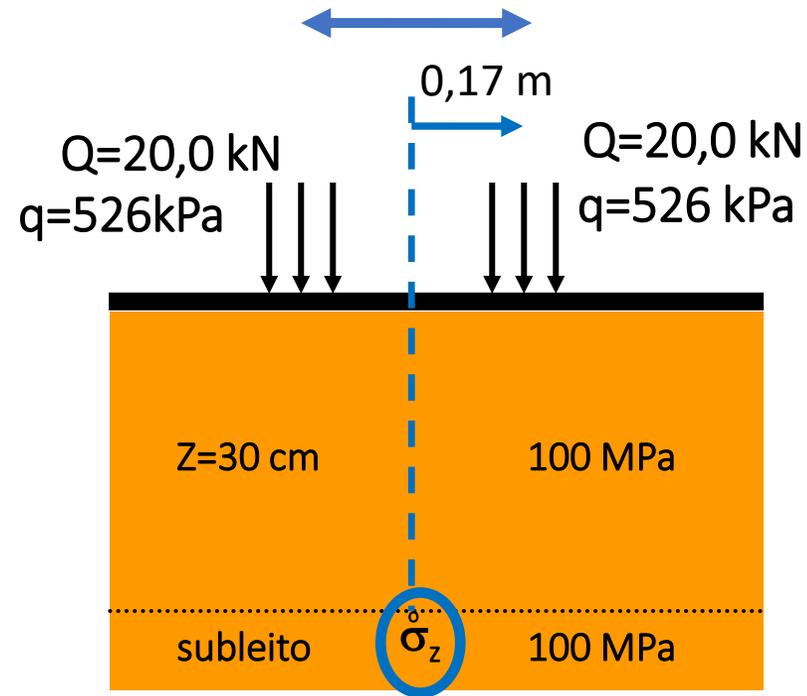
$$\sigma_v = \sigma_z$$

Responda também: a) Porque entre rodas?

b) Quando calcular abaixo de uma das rodas?



# Exercício 3.1



$$\sigma_z/q=10\%$$

$$\sigma_v = \sigma_z = 0,0526 + 0,0526 = 0,1052 \text{ MPa}$$

(duas rodas, cada uma com  $\sigma_z/q=10\%$ )



## SOLUÇÕES NUMÉRICAS

Aplicação da TEORIA DA ELASTICIDADE linear

### DIFERENÇAS FINITAS

CHEV

BISAR

DAMA

ELSYM 5



## SOLUÇÕES NUMÉRICAS

### Aplicação da TEORIA DA ELASTICIDADE linear e não linear

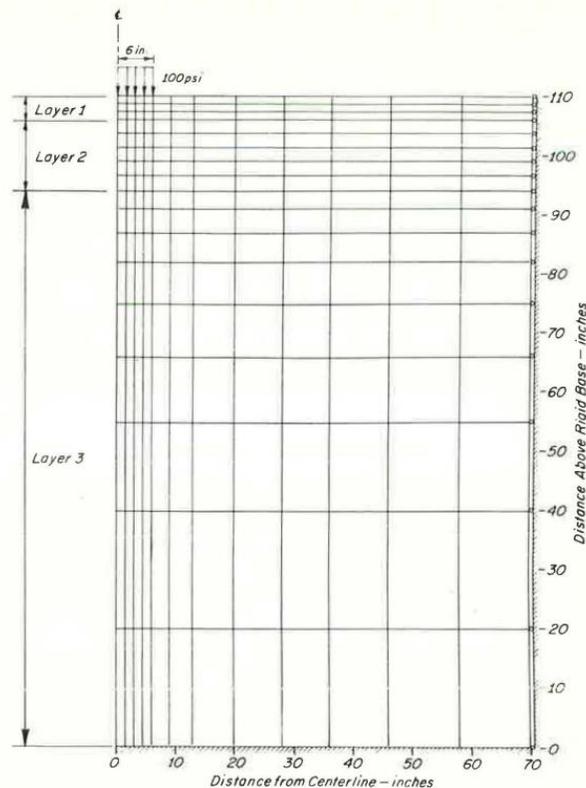


Figure 2. Finite element configuration used for analysis of homogeneous and layered systems.

## ELEMENTOS FINITOS

FEPAVE

ILLI-PAVE

MICHPAVE

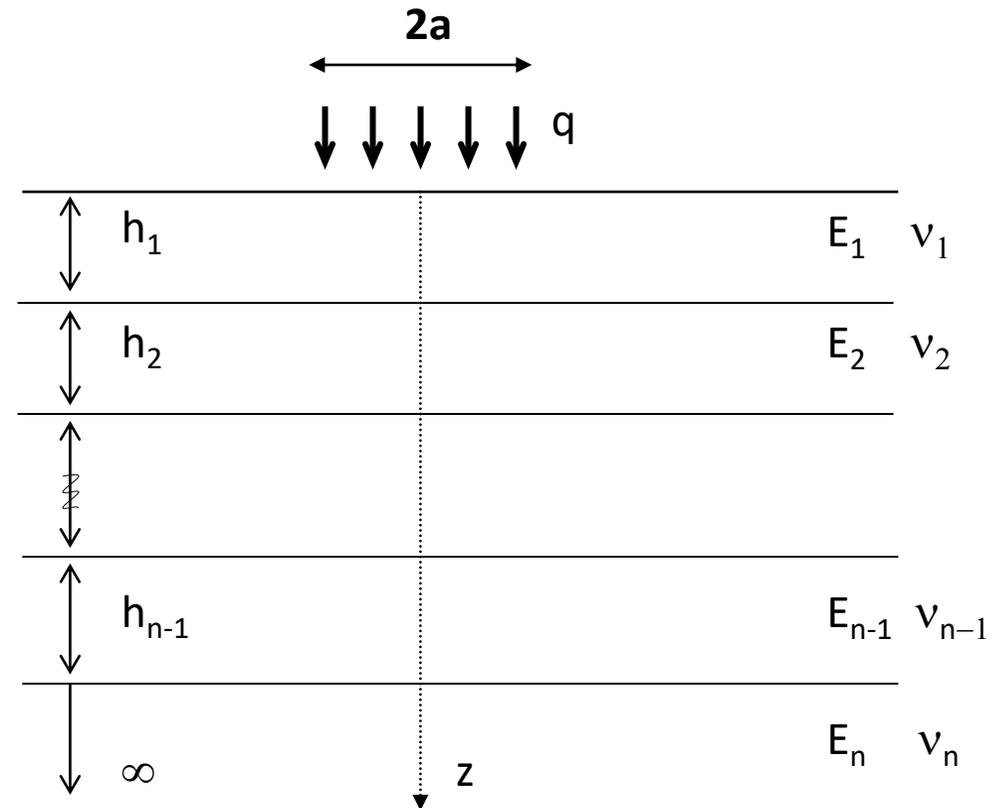
KENLAYER

ABAQUS



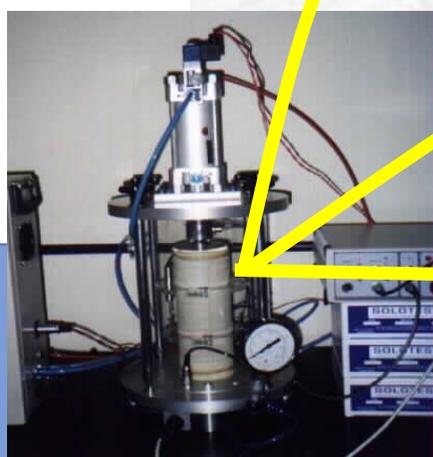
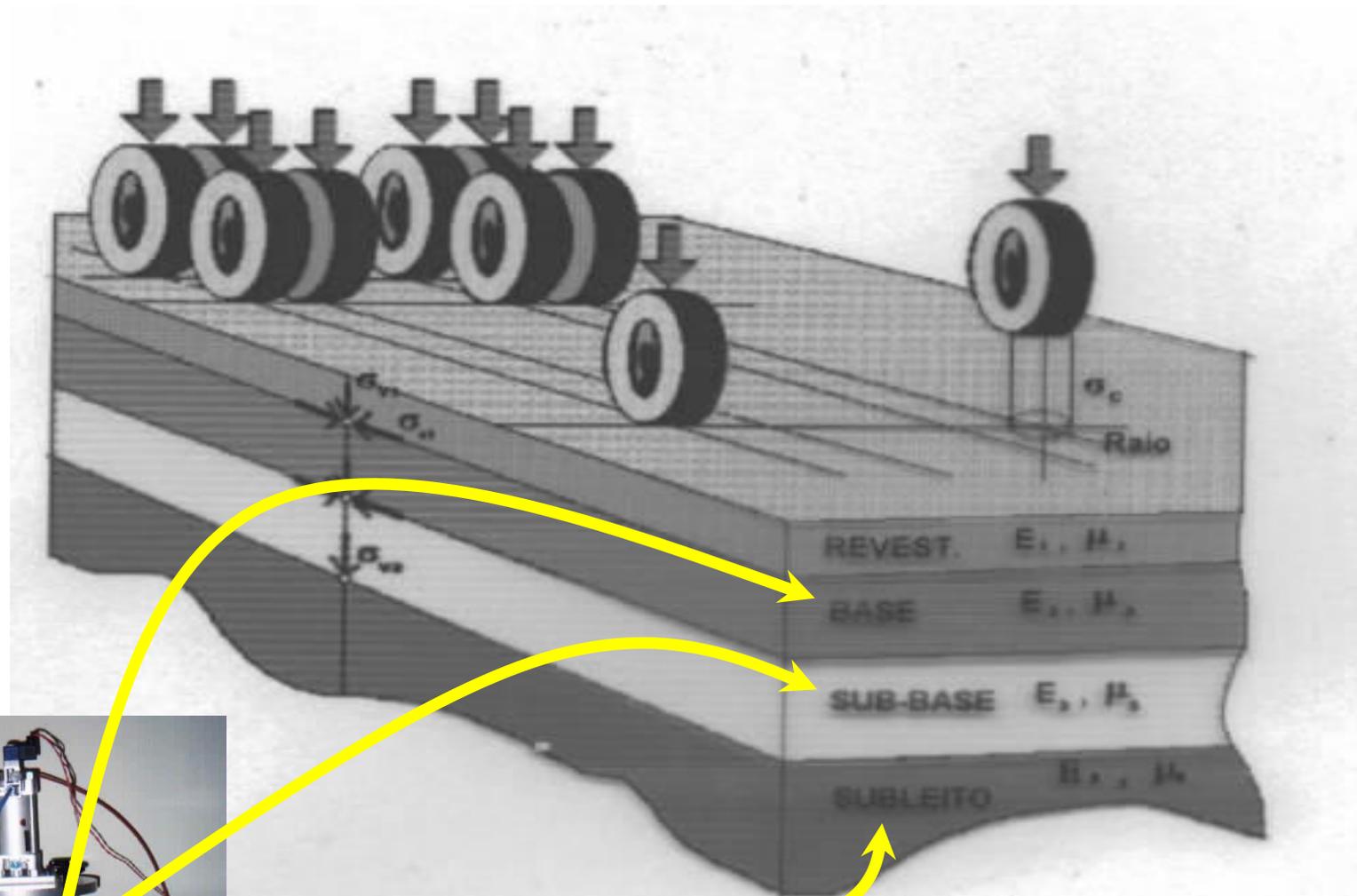
# Análise Estrutural

Os métodos mecanísticos englobam além dos **ensaios dos materiais**, os métodos de **cálculo de tensões e deformações** nas diversas camadas, fatores ambientais, tráfego e desempenho





# Análise Estrutural





# Modelos de previsão

## CRITÉRIOS DE RUPTURA

FADIGA COM TRINCAMENTO NO REVESTIMENTO  
ASFÁLTICO, OU EM CAMADAS CIMENTADAS:

$$N_f = f_1 (\varepsilon_t)^{-f_2} \times (E)^{-f_3}$$

Fundo do  
revestimento

DEFORMAÇÃO PERMANENTE:

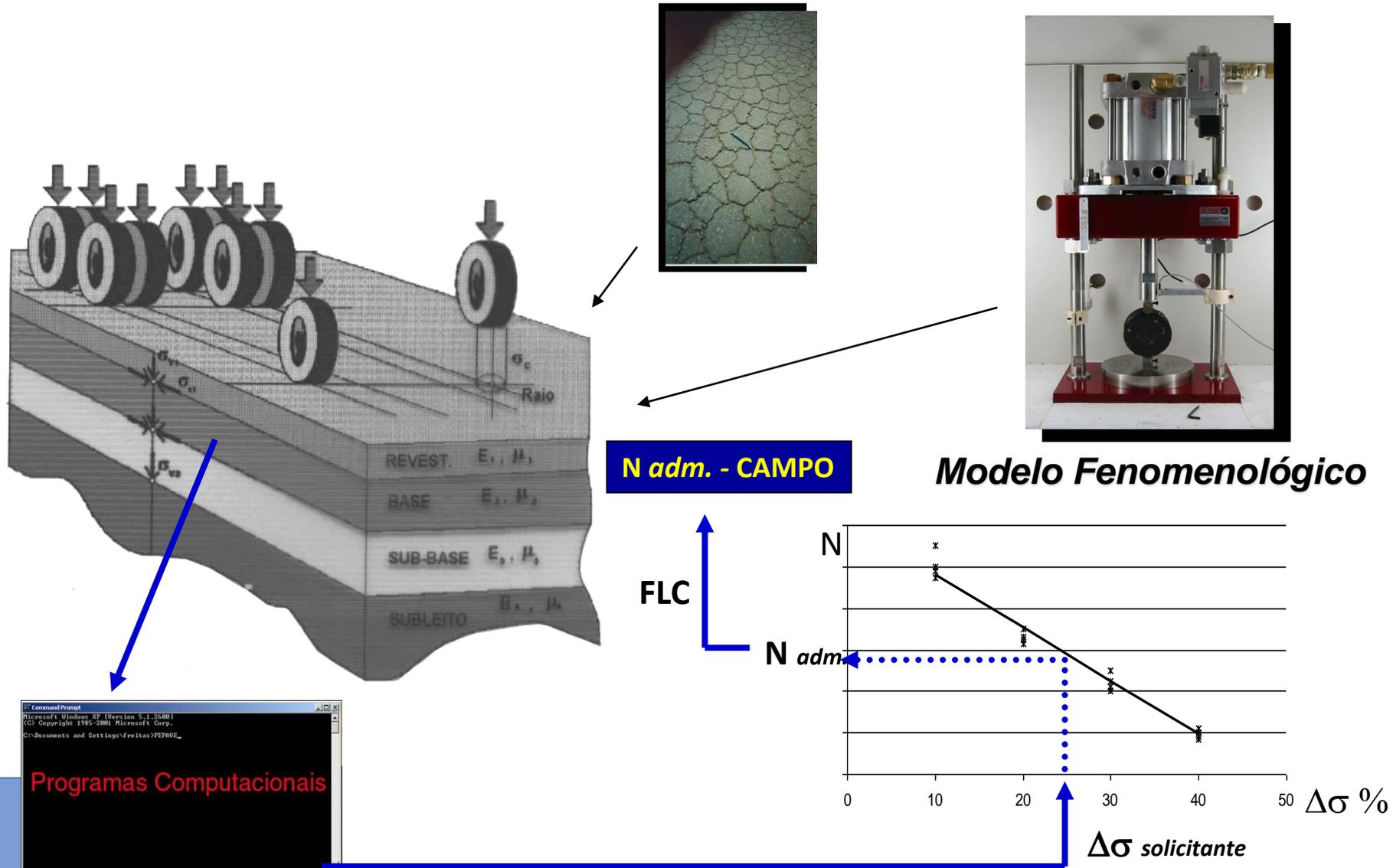
$$N_d = f_4 (\varepsilon_c)^{-f_5}$$

Topo do subleito

**E quando a estrutura do pavimento possui  
uma base ou subbase cimentada???**



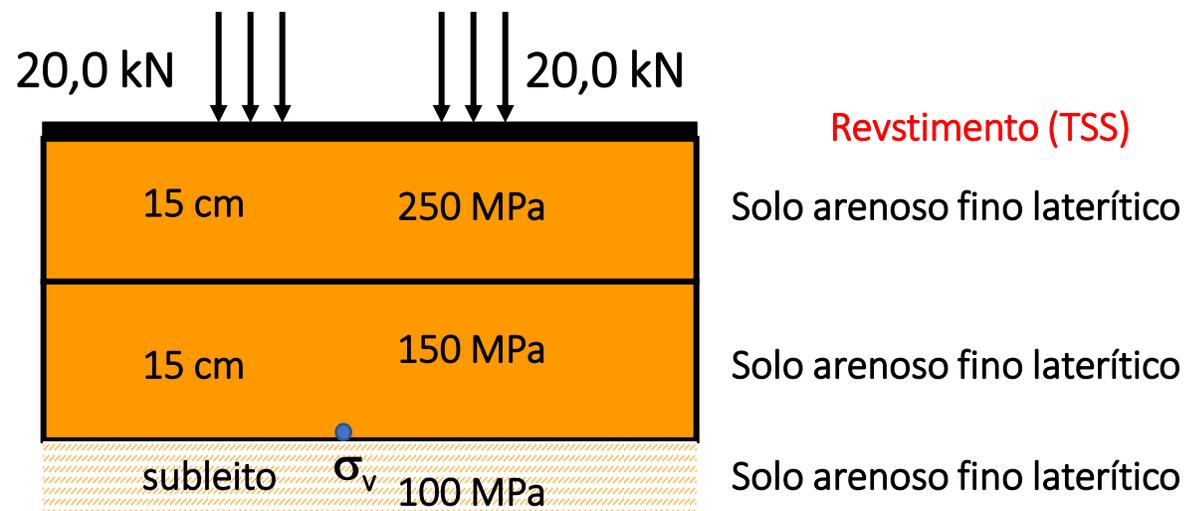
# Método Mecanístico-empírico





# Exercício 3.1

Por meio do Elsym5:



$$\sigma_v = 0,091 \text{ MPa (topo do subleito)}$$

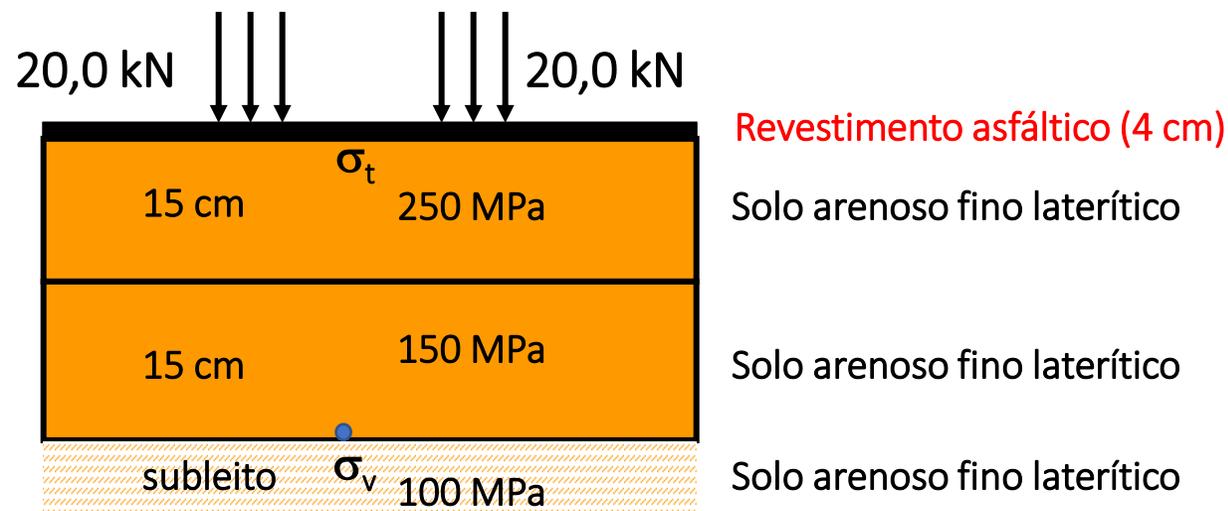
$$D_{\text{sup}} = 64 \times 10^{-2} \text{ mm (deflexão entre rodas: deslocamento)}$$

Revestimento: Tratamento superficial muito delgado:  
trabalha à compressão



# Exercício 3.1

Por meio do Elsym5:



$$\sigma_v = 0,068 \text{ MPa (topo do subleito)}$$

$$D_{\text{sup}} = 59 \times 10^{-2} \text{ mm (deflexão entre rodas: deslocamento)}$$

$$\sigma_{t,\text{asf}} = 0,76 \text{ MPa (fibra inferior do revestimento)}$$

$$\varepsilon_t = 4,76 \times 10^{-4} \text{ (fibra inferior do revestimento)}$$



## Exercício 3.1

**Verificação do critério de ruptura por deformação permanente no subleito:**

Boussinesq:  $\sigma_v = 0,212$  MPa      N =

Foster e Ahlvin:  $\sigma_v = 0,105$  MPa      N =

Elsym 5:  $\sigma_v = 0,091$  MPa      N =

Elsym 5 (rev. asf):  $\sigma_v = 0,068$  MPa      N =



$$\sigma_v = \frac{0,007 \times E}{1 + 0,7 \log N}$$

Segundo Kerhoven e Dormon



## Exercício 3.1

**Verificação do critério de ruptura por deformação permanente no subleito:**

Boussinesq:	$\sigma_v = 0,212 \text{ MPa}$	$N = 1,9 \times 10^3$
Foster e Ahlvin:	$\sigma_v = 0,104 \text{ MPa}$	$N = 1,2 \times 10^8$
Elsym 5:	$\sigma_v = 0,091 \text{ MPa}$	$N = 3,6 \times 10^9$
Elsym 5 (rev. asf):	$\sigma_v = 0,068 \text{ MPa}$	$N = 1,9 \times 10^{13}$

$$\sigma_v = \frac{0,007 \times E}{1 + 0,7 \log N}$$

Segundo Kerhoven e Dormon



## Exercício 3.2

### Verificação do critério de ruptura por fadiga na camada de revestimento asfáltico:

Segundo Salomão Pinto (1991):

$$N_{DC} = 6,64 \times 10^{-7} \times \left( \frac{1}{\varepsilon_t} \right)^{2,93}$$

$$\varepsilon_t = 4,76 \times 10^{-4}$$

$$N_{DC} = \text{????}$$

Fator campo/laboratório:  $N_{\text{campo}} = \text{Fator} \times N_{DC}$

Fator varia entre  $10^3$  e  $10^5$ !!!!



## Exercício 3.2

**Verificação do critério de ruptura por fadiga na camada de revestimento asfáltico:**

Segundo Salomão Pinto (1991):

$$N_{DC} = 6,64 \times 10^{-7} \times \left( \frac{1}{\varepsilon_t} \right)^{2,93}$$

$$\varepsilon_t = 4,76 \times 10^{-4}$$

$N_{DC} = 3,6 \times 10^3$  repetições de carga do eixo padrão

$N_{campo} = 3,6 \times 10^7$  repetições de carga do eixo padrão  
para Fator campo/laboratório de  $10^4$

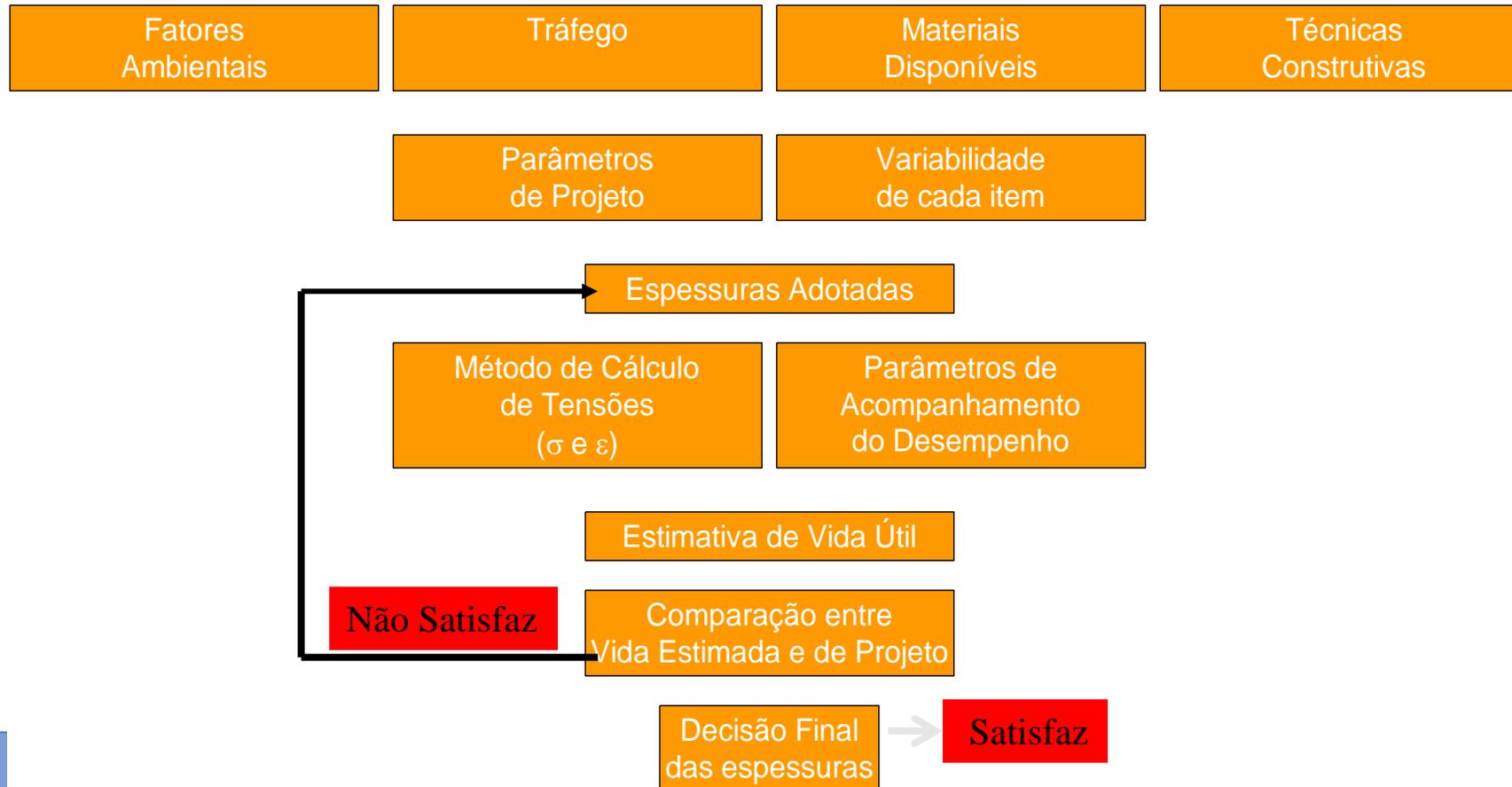
**Fator campo/laboratório:  $N_{campo} = \text{Fator} \times N_{DC}$**

**CUIDADO!!!!!! Fator varia!!!!**



# Dimensionamento Mecânico-empírico

## Fluxograma – Motta, 1991





# Dimensionamento Mecanístico-empírico

- Todos os métodos de dimensionamento mecanístico-empíricos apresentam ajuste deste tipo, estabelecidos levando em conta todos os aspectos do método.
- **Portanto: não é possível simplesmente “pegar” modelos de desempenho de um método para uso em outro.**

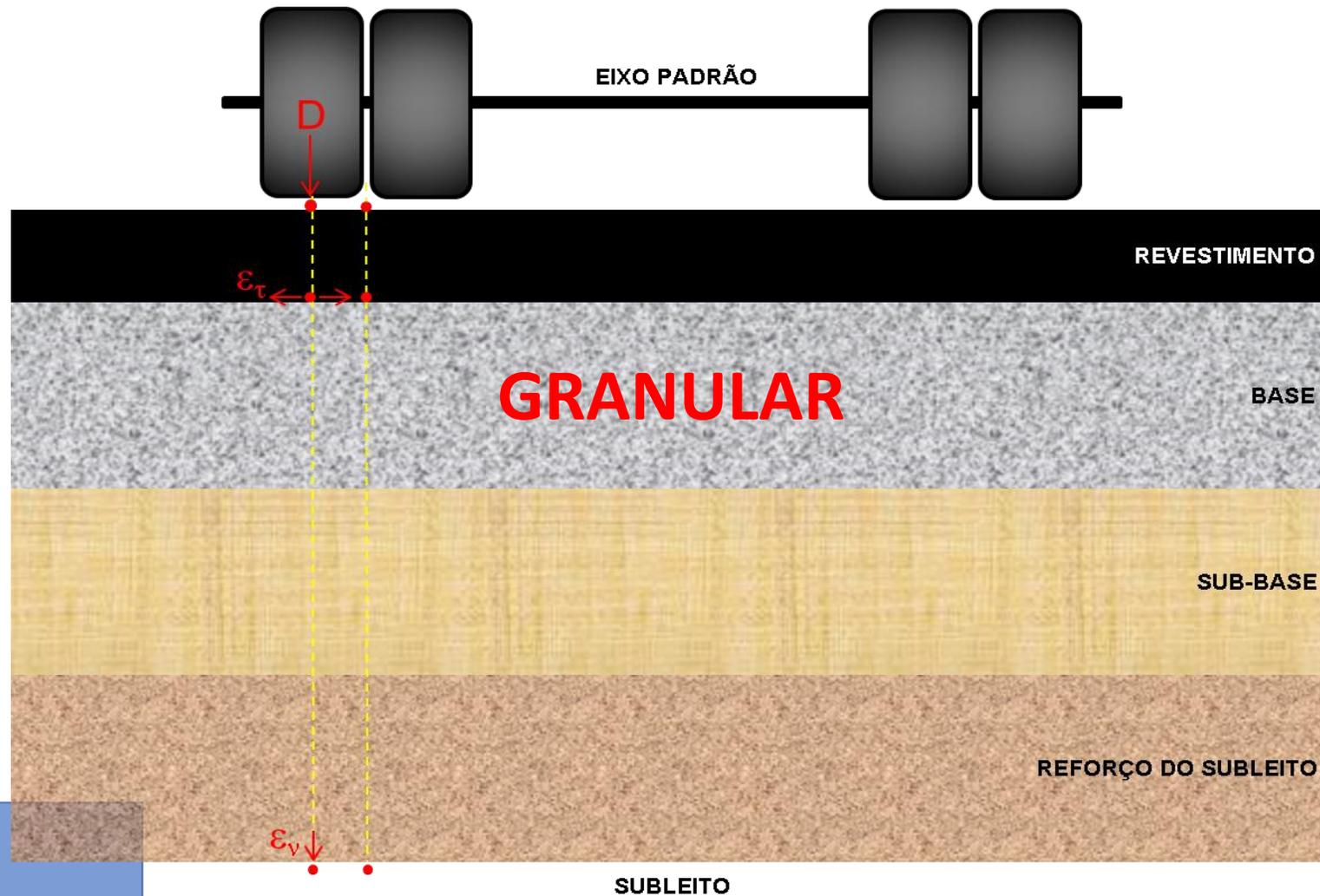


# Dimensionamento Mecânico-empírico

- **Defeitos estruturais que definem os critérios:**
  - **Trincamento por fadiga**
    - **Da camada asfáltica (“flexível”)**
    - **Da camada tratada com cimento portland (BGTC)**
  - **ATR (afundamento em trilha de roda)**
    - **Contribuição de todas as camadas “geotécnicas” e subleito**

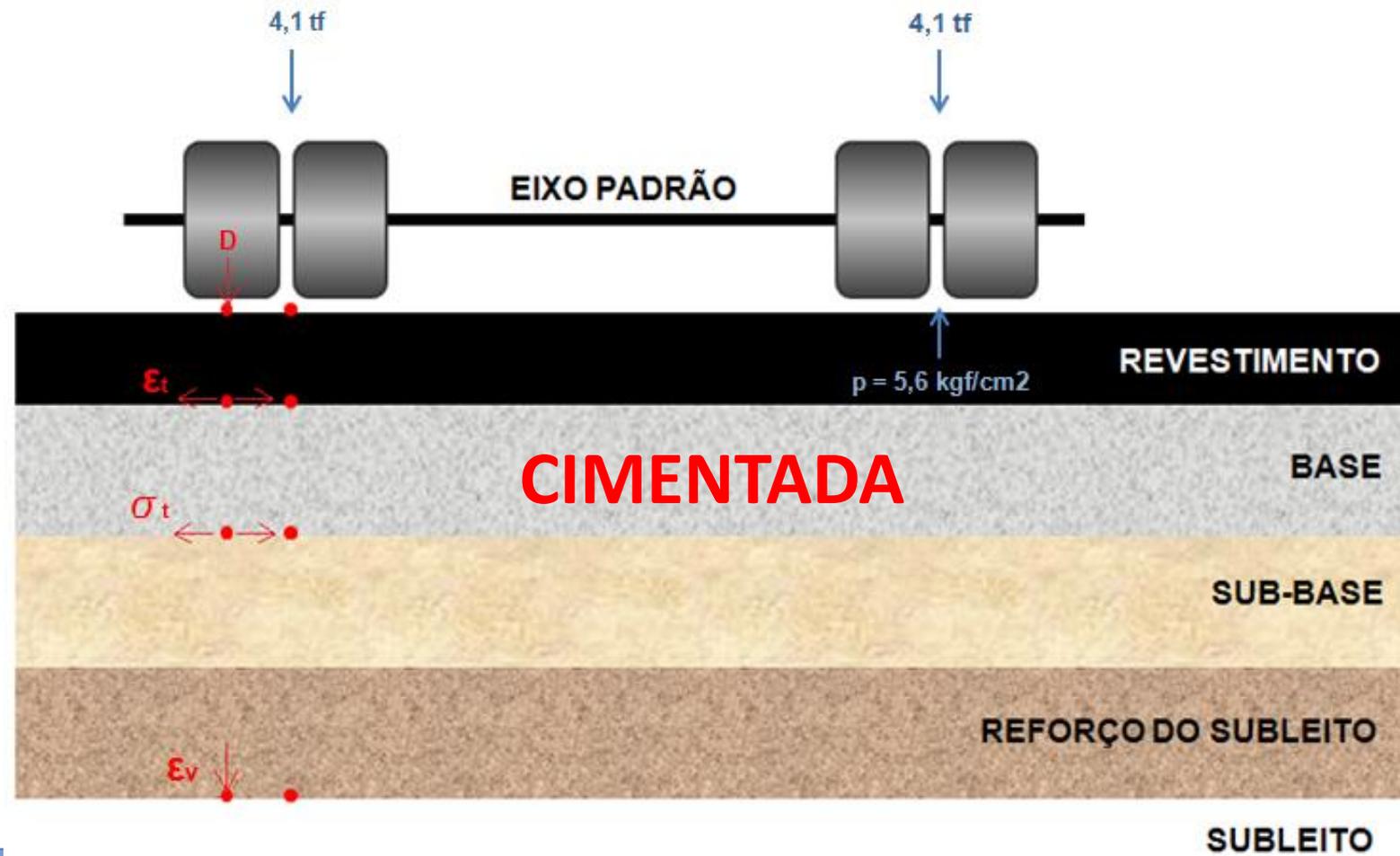


# Análise Estrutural de Pavimentos Flexíveis





# Análise Estrutural de Pavimentos Flexíveis





# Novo método de dimensionamento (DNIT)



DOWNLOAD GRATUITO



# Novo método de dimensionamento (DNIT)

MeDiNa - v.1.1.5.0 - dezembro/2020

Projeto Editar Análise Ajuda

ESTRUTURA MODELAGEM RESULTADOS

RESPONSÁVEL: Kamilla Vasconcelos EMPRESA: Universidade de São Paulo

PROJETO: Identificação da via, rodovia, trecho, km, estaca, etc MODO: Pavimento Novo (Nível A)

Alterar Estrutura >>

CAMADA	DESCRIÇÃO DO MATERIAL	TIPO	ESPESSURA (cm)	MÓDULO (MPa)	COEFICIENTE DE POISSON
>> 1 <<	CONCRETO ASFÁLTICO	RJ CAP 30/45 #12,5mm Sepetiba	10,0	9000	0,30
2	MATERIAL GRANULAR	Brita Graduada - Gnaisse C5	20,0	381	0,35
3	SOLO FINO, SILTOSO OU ARGILOSO	Solo Argiloso LG'(1)	20,0	250	0,45
SL	SUBLEITO	Solo Siltoso NS'	0,0	189	0,45

**EIXO PADRÃO RODOVIÁRIO**

**DADOS DO TRÁFEGO**

Tipo de Via:	Sistema Arterial Primário
VMD (1º ano):	1370
FV:	1.000
N anual (1º ano):	5.00e+05
% Veículos na faixa de projeto:	100
N Anual da faixa:	5.00e+05
Taxa de crescimento (%):	0.0
Período de projeto (anos):	10
N Total:	5.00e+06

Projeto novo NÍVEL <A>



# Obrigada!

PTR 3322 - Pavimentação Rodoviária  
Prof. Kamilla Vasconcelos  
Prof. Dra. Liedi Bernucci

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
ESCOLA POLITÉCNICA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE  
TRANSPORTES

