

Departamento de Eng. de Transportes da Escola Politécnica da USP
PTR3322 – Pavimentação Rodoviária
Exercício 8: Dimensionamento de Pavimentos Flexíveis – Método da
Resistência (CBR) e Método Mecanicista
Profa. Dra. Liedi Bernucci
Profa. Dra. Kamilla Vasconcelos Savasini

Parte I. Fixação de Conceitos (Para estudo fora da Sala de Aula)

1. Se você tivesse que conceber um método de dimensionamento, como procederia?
2. O que é um método de dimensionamento de pavimentos empírico (baseado em experiências, dados experimentais, medidas laboratoriais ou de campo)?
3. Seria possível estabelecer um método de dimensionamento de pavimentos teórico-empírico (mecanicista-empírico, denominado por alguns pesquisadores de mecânico-empírico)?

Parte II. Aplicação de Conceitos – MÉTODO DE DIMENSIONAMENTO EMPÍRICO

O método de dimensionamento de pavimentos flexíveis empírico do DNER (Departamento Nacional de Estradas de Rodagem), atualmente chamado de DNIT (Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes), é baseado no método do USACE (*US Army Corps of Engineers*). O critério de ruptura utilizado por este método leva em consideração a capacidade de suporte das camadas, protegendo-as da ruptura por cisalhamento e deformação permanente expressiva.

4. Dimensione uma estrutura de pavimento flexível pelo método do DNER-66 (revisto em 1981), para um tráfego de 2×10^7 repetições de carga do eixo padrão para um período de projeto de 15 anos. O CBR de projeto do subleito (calculado a partir de vários dados de CBR determinado com os materiais coletados na pista) é de 4% e a expansão é de 1,2%. Para valores de CBR de projeto inferior a 2%, ou para expansão superior a 2%, são feitas substituições de solo.

Tem-se para fazer os pavimentos os seguintes materiais e facilidades:

- Usina de asfalto para CBUQ (Concreto Betuminoso Usinado a Quente ou Concreto Asfáltico) e PMQ (Pré-misturado a Quente);
- Equipamentos para tratamento superficial;
- Usina de brita graduada simples (BGS) com material “A” com CBR 90% e material “B” com CBR de 64% (ensaios realizados na energia modificada);
- Jazida de cascalho natural com CBR de 28% na energia intermediária;
- Jazida de solo laterítico argiloso tipo LG’ (na classificação de solos tropicais desenvolvida por Nogami e Villibor em 1981) com CBR de 10% na energia intermediária.

Algumas regras:

- Para $N \geq 10^6$ repetições de carga do eixo padrão, o material de base deve apresentar $CBR \geq 80\%$; para $N < 10^6$, o material de base deve apresentar $CBR \geq 60\%$. A expansão de material de base deve ser menor ou igual a 0,5%.
- Para a subbase, obrigatoriamente o material deve apresentar $CBR \geq 20\%$.
- Para compactar uma camada de solo ou material granular, recomenda-se que a espessura seja de no mínimo 10 cm e no máximo de 20cm.
- As camadas de revestimento usinado a quente devem ser executadas com um mínimo de 2 cm (depende das dimensões do material gráudo utilizado) e no máximo de 8 cm.

Tabela 32 - Espessura mínima de revestimento betuminoso

N	Espessura Mínima de Revestimento Betuminoso
$N \leq 10^6$	Tratamentos superficiais betuminosos
$10^6 < N \leq 5 \times 10^6$	Revestimentos betuminosos com 5,0 cm de espessura
$5 \times 10^6 < N \leq 10^7$	Concreto betuminoso com 7,5 cm de espessura
$10^7 < N \leq 5 \times 10^7$	Concreto betuminoso com 10,0 cm de espessura
$N > 5 \times 10^7$	Concreto betuminoso com 12,5 cm de espessura

Tabela 31 - Coeficiente de equivalência estrutural

Componentes do pavimento	Coeficiente K
Base ou revestimento de concreto betuminoso	2,00
Base ou revestimento pré-misturado a quente, de graduação densa	1,70
Base ou revestimento pré-misturado a frio, de graduação densa	1,40
Base ou revestimento betuminoso por penetração	1,20
Camadas granulares	1,00
Solo cimento com resistência à compressão a 7 dias, superior a 45 kg/cm	1,70
Idem, com resistência à compressão a 7 dias, entre 45 kg/cm e 28 kg/cm	1,40
Idem, com resistência à compressão a 7 dias, entre 28 kg/cm e 21 kg/cm	1,20

ESPESSURA MÍNIMA EQUIVALENTE (SE FOSSE TUDO MATERIAL GRANULAR DE K=1 SOBRE O SUBLEITO)

No método, a seguinte equação poderá ser usada para calcular a espessura H mínima equivalente granular sobre uma determinada camada, de modo a protegê-la. Cuidado: somente usar até CBR 20%. SE for maior de 20%, use 20% na equação.

$$H = 77,67 * N^{0,0482} * CBR^{-0,598}$$

Se preferir, poderá utilizar o ábaco anexo. Assim poderá montar as seguintes equações:

$$R * K_{rev} + B * K_{base} + h_{20} * K_{subbase} + h_n * K_{refsub} \geq H_m$$

$$R * K_{rev} + B * K_{base} + h_{20} * K_{subbase} \geq H_n$$

$$R * K_{rev} + B * K_{base} \geq H_{20}$$

Onde:

R = espessura do revestimento asfáltico – concreto asfáltico, em cm (ver tabela 2 anexa)

K_{rev} = Coeficiente estrutural do rev. asfáltico – concreto asfáltico (ver tabela 1 anexa)

B = espessura da base, em cm

K_{base} = Coeficiente estrutural da base (ver tabela 1 anexa)

h_{20} = espessura da subbase, em cm

$K_{subbase}$ = Coeficiente estrutural da sub-base (ver tabela 1 anexa)

h_n = espessura do reforço do subleito, em cm

K_{refsub} = Coeficiente estrutural do reforço do subleito (ver tabela 1 anexa)

Faça um croqui do pavimento dimensionado com os materiais escolhidos e espessuras de cada camada.

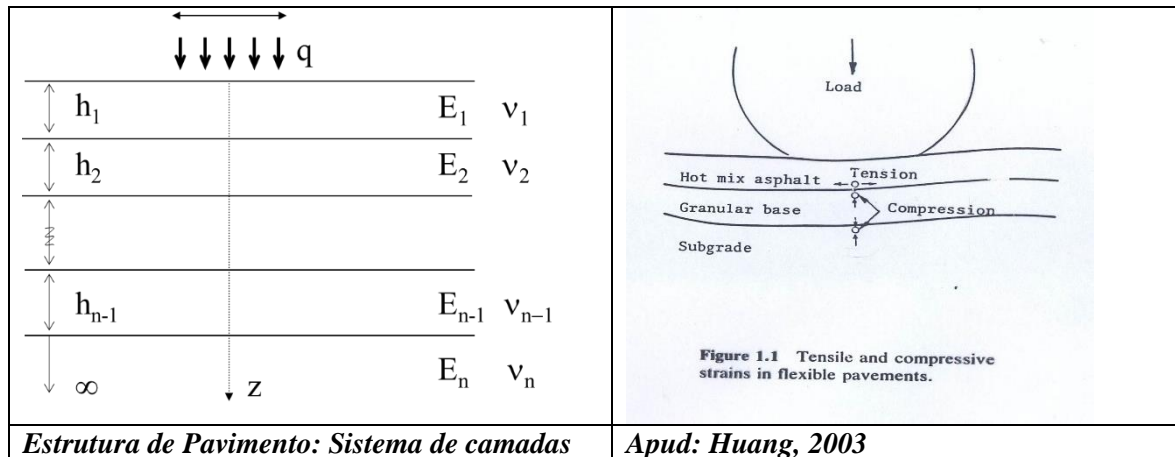
Material	Espessura
Revestimento Asfáltico	
Base	
Sub-Base	
Reforço do Subleito	
Subleito	

PARA FAZER FORA DA SALA DE AULA:

5. Comente as limitações do método de dimensionamento do DNER (DNIT) e proponha alternativas que você implementaria ao método que julgue necessárias ou importantes.

Parte Iii. Aplicação de Conceitos: MÉTODO DE DIMENSIONAMENTO MECANICISTA

Para analisar uma estrutura de pavimentos, a melhor forma é compreender o sistema como um conjunto de camadas de espessuras finitas, com um dado módulo elástico (módulo de resiliência) e um coeficiente de Poisson, apoiada sobre o subleito que consiste em um semi-espço infinito.



Em geral, analisam-se:

- as tensões horizontais de tração ou deformação de tração nas camadas cujos agregados ou partículas estão “ligadas” por asfalto (revestimentos e bases asfálticas) e as camadas cimentadas (bases, sub-bases, etc). Estas determinações são feitas para poder analisar a **fadiga** destas camadas e estimar o número de repetições admissíveis até considerar que entrou em fadiga.

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

- as tensões verticais de compressão nas camadas para calcular o acúmulo de deformação permanente por repetição de carga. Em geral se faz este cálculo para o subleito pois este contribui com a maior parte da deformação. Porém, para uma análise global seria aconselhável fazer de todas as camadas, incluindo os revestimentos asfálticos.

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

6. O seguinte pavimento para baixo volume de tráfego foi construído e houve uma solicitação para analisar se o projeto é adequado e se é possível fornecer estimativas de vida de projeto:

Revestimento asfáltico delgado (TSS) – espessura desprezível

Base: 15 cm de solo arenoso fino laterítico (250 MPa)

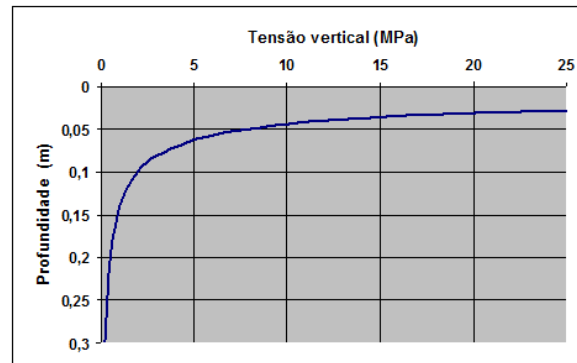
Reforço do subleito: 15 cm de solo arenoso fino laterítico (150 MPa)

Subleito: solo arenoso fino laterítico (100 MPa)

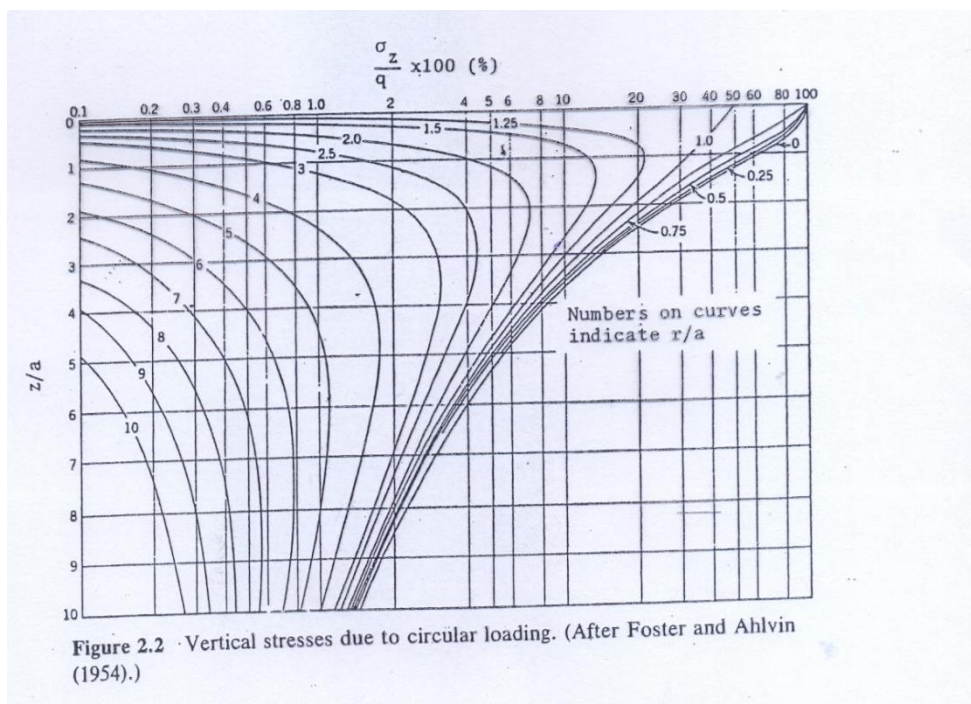
6.1) Calcule as tensões verticais atuantes no topo do subleito (abaixo do centro de cargas de um semi-eixo padrão de 40kN) de forma a analisar se está protegido da ruptura ou por acúmulo de deformações permanentes:

- Por **Boussinesq** (1885): aplica Teoria da Elasticidade para carga vertical concentrada sobre semi-espaço infinito, isotrópico e homogêneo. (carga Q de 40 kN – conjunto de 2 rodas do ESRD de 80 kN):

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



- **Pelos ábacos de Foster e Ahlvin** (duas cargas de roda de Q=20 kN cada, circular, com raio de **a=0,11m** e distância entre elas de **34 cm**, fazendo com que a meia distância seja **r=0,17m**). $\sigma_v = \sigma_z$



- Pelo **ELSYM5** (programa computacional para cálculo de tensões, deformações e deslocamentos, utiliza teoria da elasticidade linear e calcula por diferenças finitas). **$\sigma_v = 0,091 \text{ MPa}$**
- Executando-se um revestimento asfáltico de CBUQ (concreto asfáltico) de 4 cm de espessura, e utilizando o mesmo programa computacional, tem-se que: **$\sigma_v = 0,068 \text{ MPa}$**

- a) Explique as diferenças entre resultados de σ_v no topo do subleito.
 b) Verifique por **Kerhoven e Dormon**, o número de solicitações de carga N ao qual o subleito pode estar sujeito antes da “ruptura” ou dano acumulado por repetição de carga, para todos os valores calculados, com E o módulo de resiliência do subleito, sendo:

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

Método	σ_v (MPa)	N (repetições de carga do eixo padrão)
Boussinesq		
Foster e Ahlvin		
Elsym 5 (com TSS)		
Elsym 5 (com CBUQ de 4cm)		

6.2) Calcule as deformações horizontais no revestimento asfáltico: Executando-se um revestimento de CBUQ de 4 cm de espessura, e utilizando o mesmo programa computacional ELSYM5, tem-se que na fibra inferior do revestimento asfáltico:

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

Verifique com quantas repetições de carga N a camada de revestimento de CBUQ poderá entrar em fadiga, sabendo-se que segundo Salomão Pinto (1991) para deformação controlada:

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

O Prof. Salomão Pinto considera um **FATOR CAMPO x LABORATÓRIO** de 10.000, ou seja:

$$N_{campo} = 10.000 \times N_{laboratório}$$