

RECURSOS PARA DESENVOLVIMENTO TECNOLÓGICO

TREINAMENTO E
CAPACITAÇÃO TÉCNICA
EM PAVIMENTAÇÃO

BRASÍLIA D.F.
2017



MÓDULO II:

DIMENSIONAMENTO DE

PAVIMENTOS

Profa Sandra Oda

E-mail: sandraoda@poli.ufrj.br

Prof. Luis Alberto Herrmann do Nascimento

E-mail: lherrma@ncsu.edu



Universidade Federal
do Rio de Janeiro
Escola Politécnica

TREINAMENTO E CAPACITAÇÃO TÉCNICA EM PAVIMENTAÇÃO

CONTEÚDO – MÓDULO II

1. **Terminologias, funcionamento estrutural do pavimento, distribuição de tensões, mecanismos estruturais das camadas, vida útil, vida de projeto, mecânica de pavimentos. Principais elementos e variáveis para o dimensionamento.**
2. **Princípios do dimensionamento de pavimentos rodoviários.**
3. **Tráfego rodoviário.**
4. **Dimensionamento pelo método do antigo DNER.**
5. **Dimensionamento pelo método da AASHTO de 1993.**
6. **Análise mecanicista por meio de software baseado na teoria de sistema de camadas elásticas (TSCE).**
7. **Noções sobre o método de dimensionamento norte americano MEPDG È *Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide*;**
8. **Estágio atual de desenvolvimento do novo método de dimensionamento que vêm sendo proposto dentro da Í Rede Temática de Asfalto.**



DIMENSIONAMENTO DE PAVIMENTO

Prof. Sandra Oda sandraoda@poli.ufrj.br

Prof. Luis Alberto Herrmann do Nascimento lherma@ncsu.edu



Universidade Federal
do Rio de Janeiro
Escola Politécnica

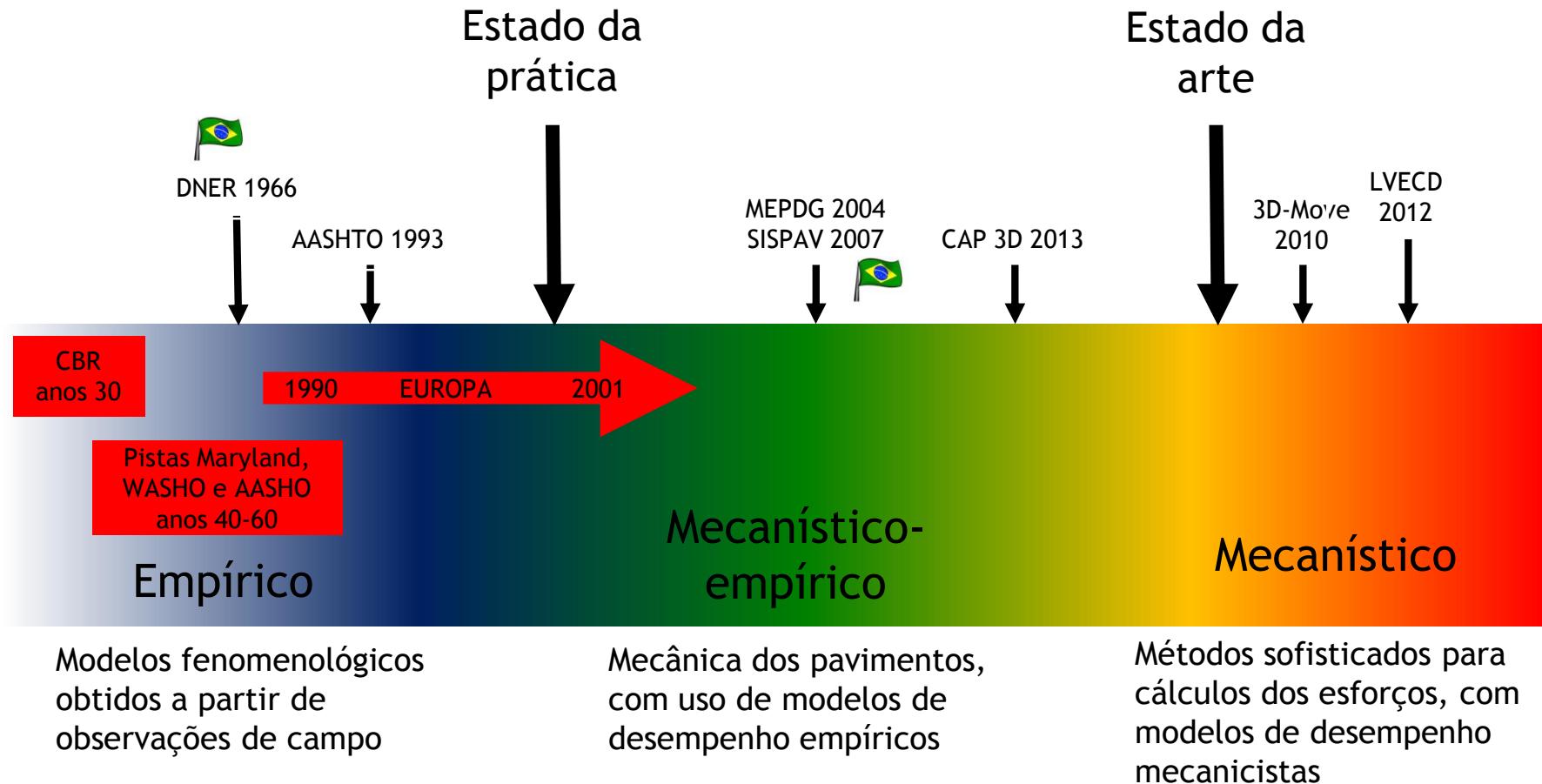
TREINAMENTO E CAPACITAÇÃO TÉCNICA EM PAVIMENTAÇÃO

Mecânica dos Pavimentos

- 1 . Introdução à Mecânica dos Pavimentos
- 2 . Tipos de Pavimentos e Terminologias
- 3 . Cargas nos Pavimentos: Tráfego de Veículos
- 4 . Fatores de Equivalência de Cargas
- 5 . Dimensionamento de Pavimentos pelo Método Antigo do DNER
- 6 . Mecânica dos Pavimentos e Análise Estrutural
- 7 . Comportamento Mecânico dos Materiais de Pavimentação
- 8 . Métodos de Dimensionamento AASHTO MEPDG / DarWin M-E
- 9 . Novo Método de Dimensionamento de Pavimentos M-E Brasileiro
(ora sendo implantado no DNIT)
- 10 . Atual Desenvolvimento do Novo Método Brasileiro: Próximos Avanços

Visão Geral

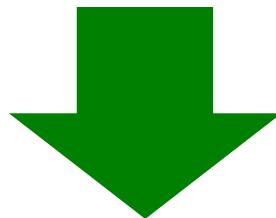
Evolução dos Métodos



Evolução dos Métodos de Dimensionamento

Benefícios Esperados

- Uso de relações constitutivas que melhor representam as respostas dos materiais/pavimentos
- Modelos de desempenho com base mecanicista → propriedades de dano dos materiais
- Consideração mais apropriada dos efeitos climáticos e das diferentes cargas do tráfego

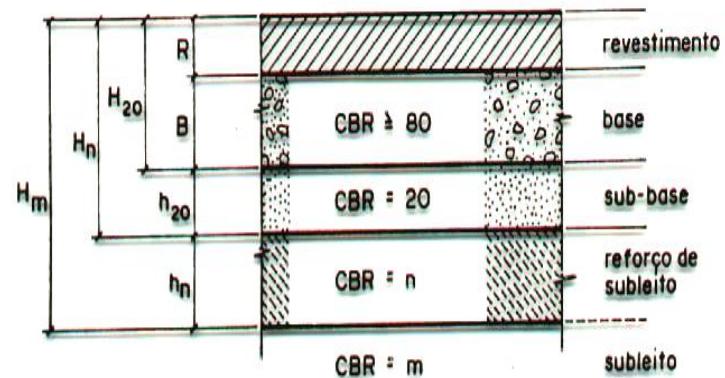
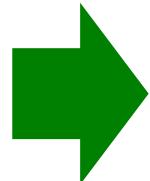
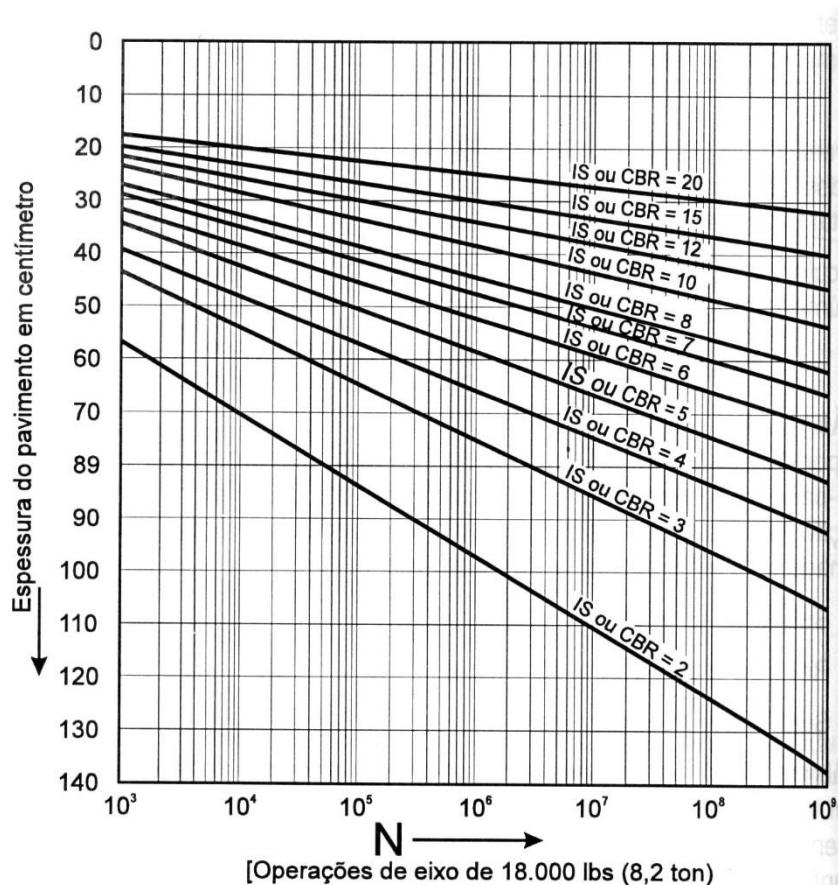


- Facilidade na utilização de novos materiais e materiais alternativos
 - Calibração local → calibração global
 - Cálculo do custos do ciclo de vida do pavimento
 - Aumento da capacidade preditiva das análises

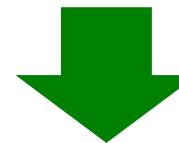
Método Empírico do DNIT

Proteção do Subleito

- A espessura total de pavimento é dada em função do número N e da capacidade de suporte das camadas \rightarrow CBR

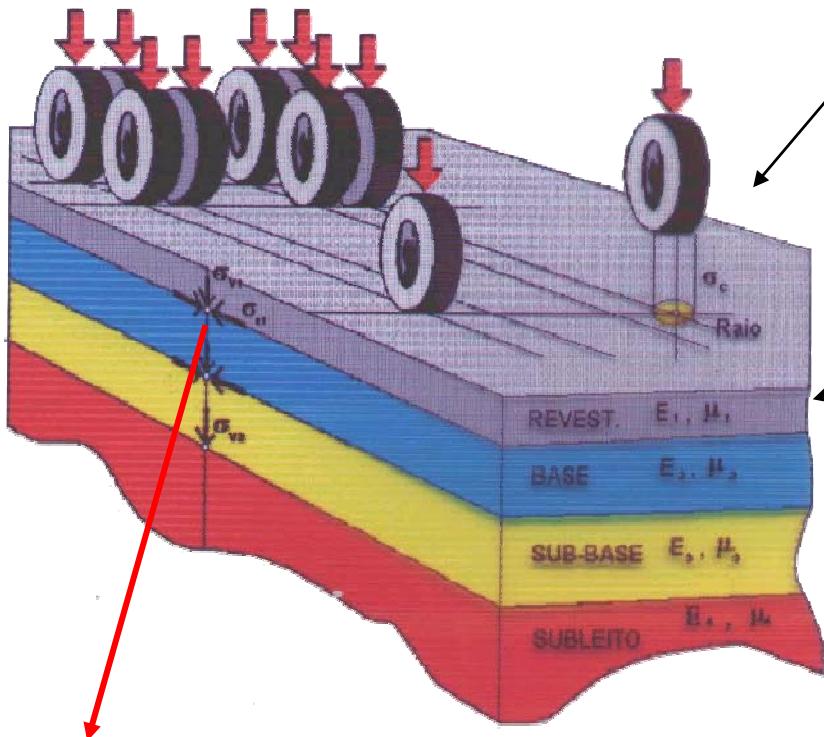


$$\begin{aligned} R K_R + B K_B &\geq H_{20} \\ R K_R + B K_B + h_{20} K_S &\geq H_n \\ R K_R + B K_B + h_{20} K_S + h_n K_{Ref} &\geq H_m \end{aligned}$$

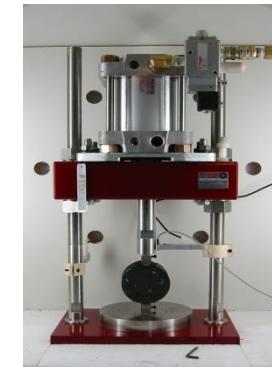
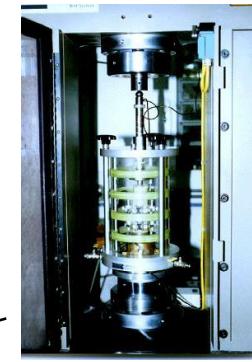


Métodos Mecanístico-Empíricos (M-E)

Mecânica dos Pavimentos

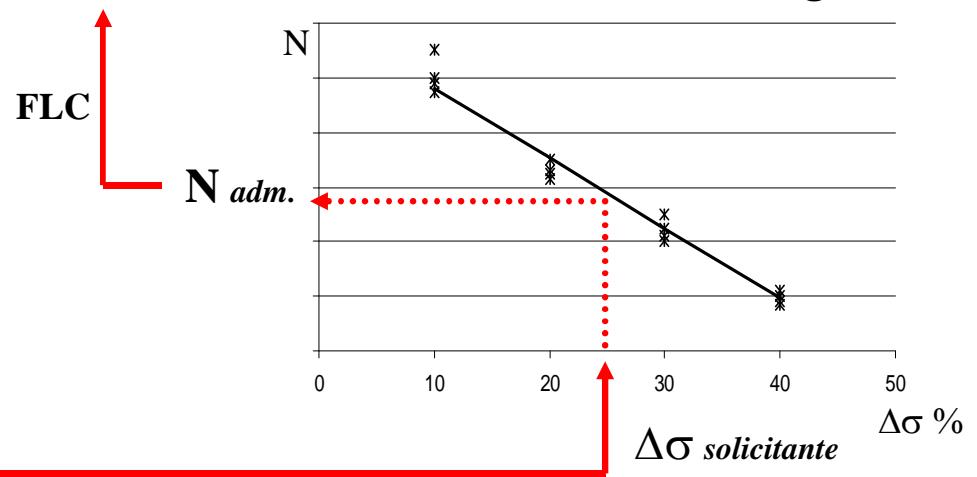


Propriedades dos materiais



$N_{adm.}$ - CAMPO

Modelo Fenomenológico



O pavimento

NBR 7207/82: Terminologia e classificação dos pavimentos:

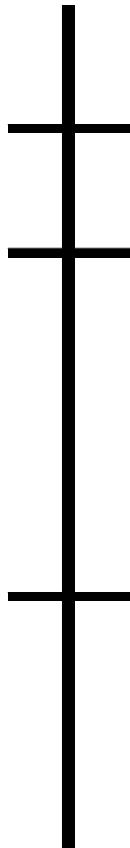
- “ O pavimento é uma **ESTRUTURA** construída após a terraplenagem e destinada, econômica e simultaneamente, em seu **CONJUNTO**, a:
- Resistir e distribuir ao subleito os esforços **verticais** produzidos pelo tráfego;
 - Melhorar as condições de rolamento quanto à comodidade e segurança;
 - Resistir aos esforços horizontais que nela atuam, tornando mais durável a superfície de rolamento.

O pavimento



O Pavimento



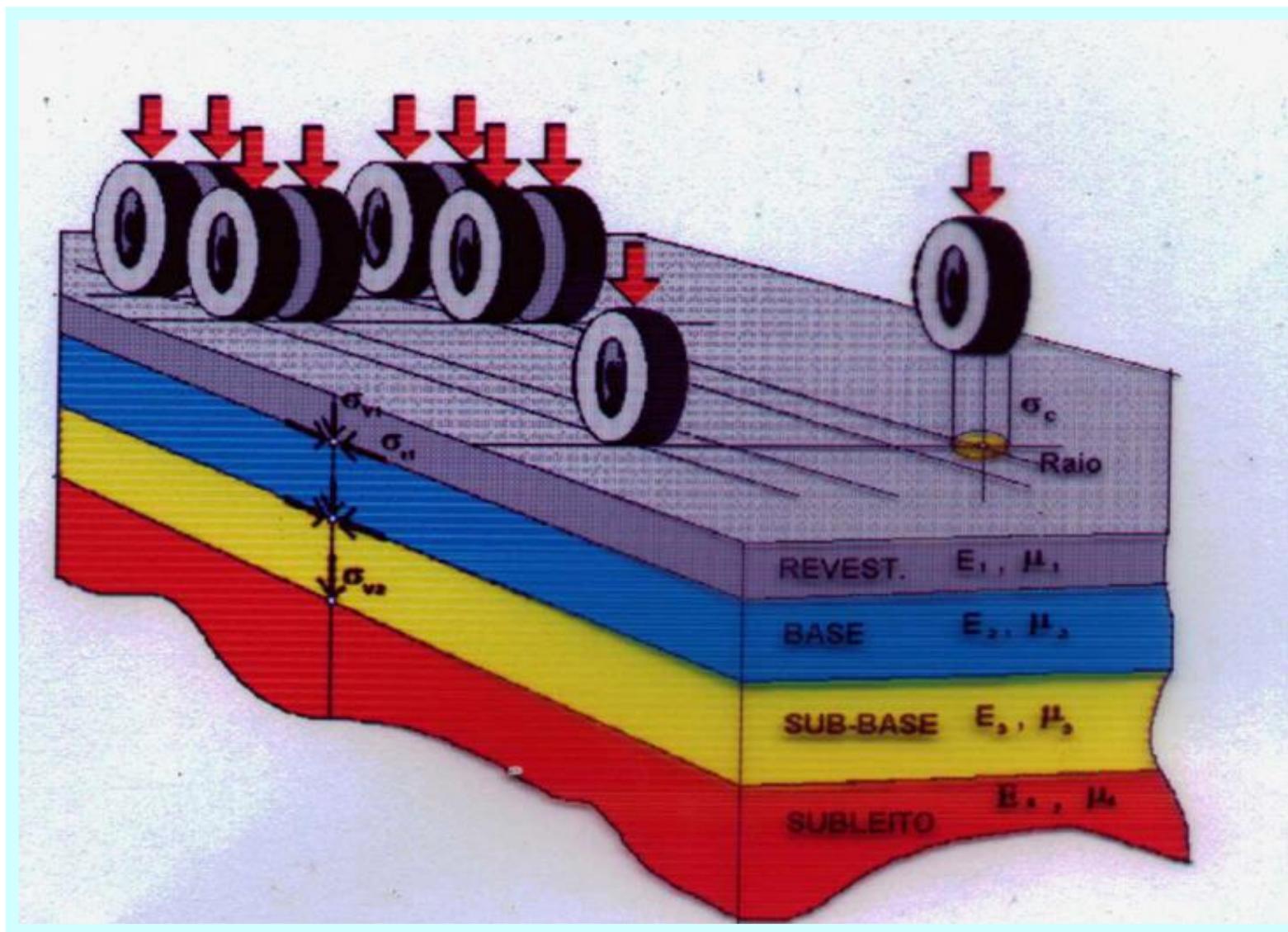


Revestimento $(M\mathbf{r}_1, \mu_1)$

Base $(M\mathbf{r}_2, \mu_2)$

Subleito $(M\mathbf{r}_3, \mu_3)$

O Pavimento como sistema em camadas



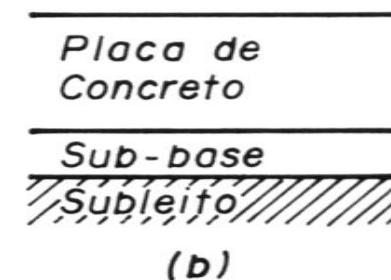
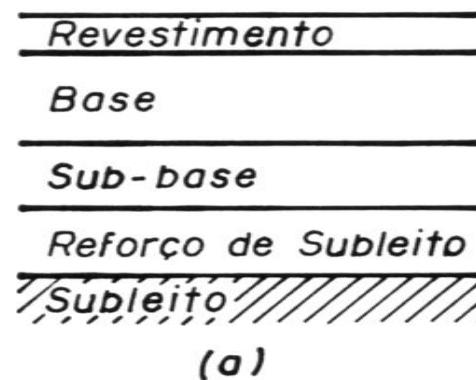
Pavimento

Estrutura de **múltiplas camadas** que tem finalidade de:

- É Resistir às cargas verticais do tráfego **
- É Dar conforto e segurança em qualquer condição climática
- É Resistir às cargas horizontais

Tipos de pavimentos

Rodoviário
Aeroportuário



Ferroviário

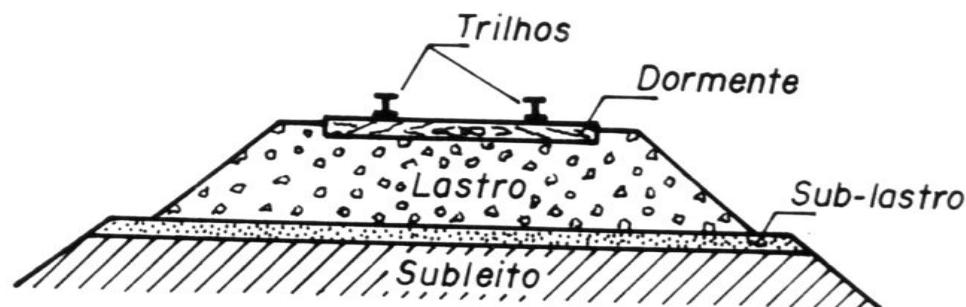


Fig. 1.4 - O "pavimento" ferroviário

FUNÇÃO ESTRUTURAL

= capacidade de carga \Rightarrow dimensionamento

Dimensionar é:

calcular espessuras de um conjunto de camadas que trabalham juntas

\therefore **compatibilizar materiais**

Escolha de materiais e espessuras em função de :

- ➔ tráfego esperado (período de projeto)
- ➔ clima
- ➔ condicionantes particulares: subleito, topografia, drenagem, técnicas construtivas, disponibilidade, etc
- ➔ critérios de ruptura (como definir a vida útil)

O pavimento como estrutura

- ” Análise de tensões e deformações
- ” Vida útil versus vida de projeto
 - ” Período de análise do pavimento: construção, manutenção e reabilitação
- ” Critérios de ruptura:
 - ” Deformabilidade elástica: fadiga
 - ” Deformabilidade plástica: afundamentos

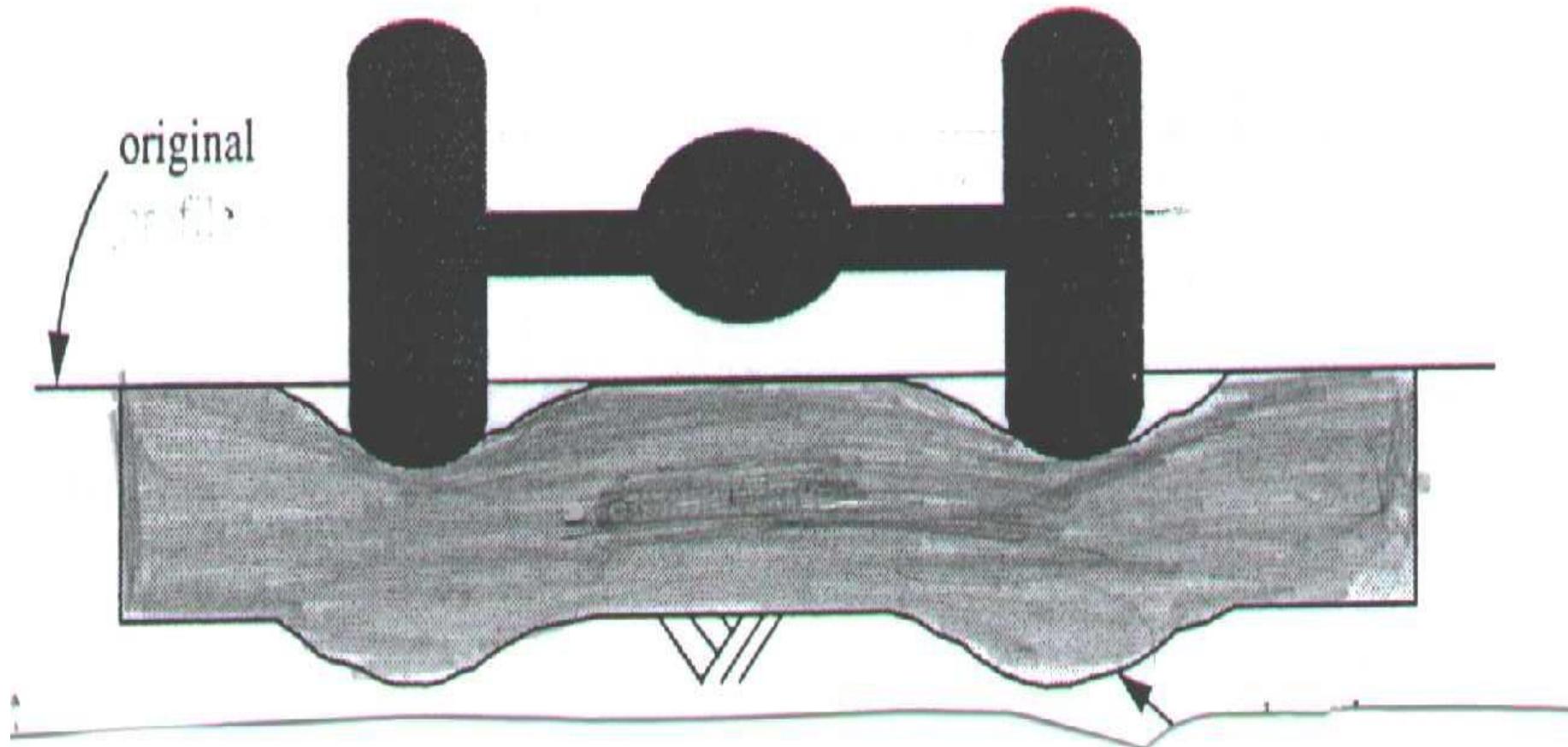
Fadiga:



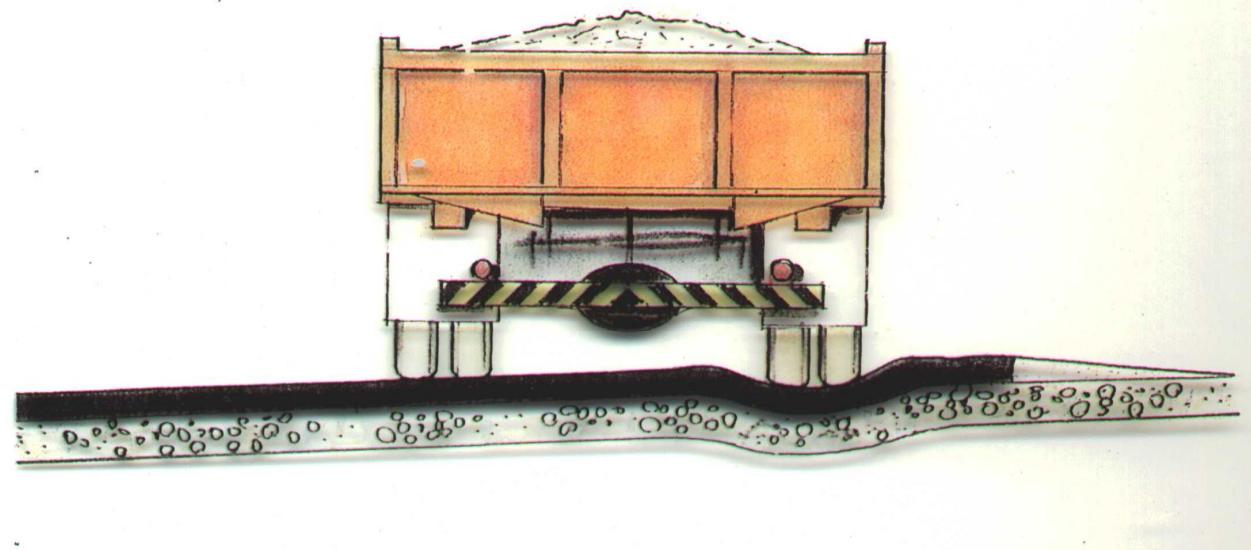
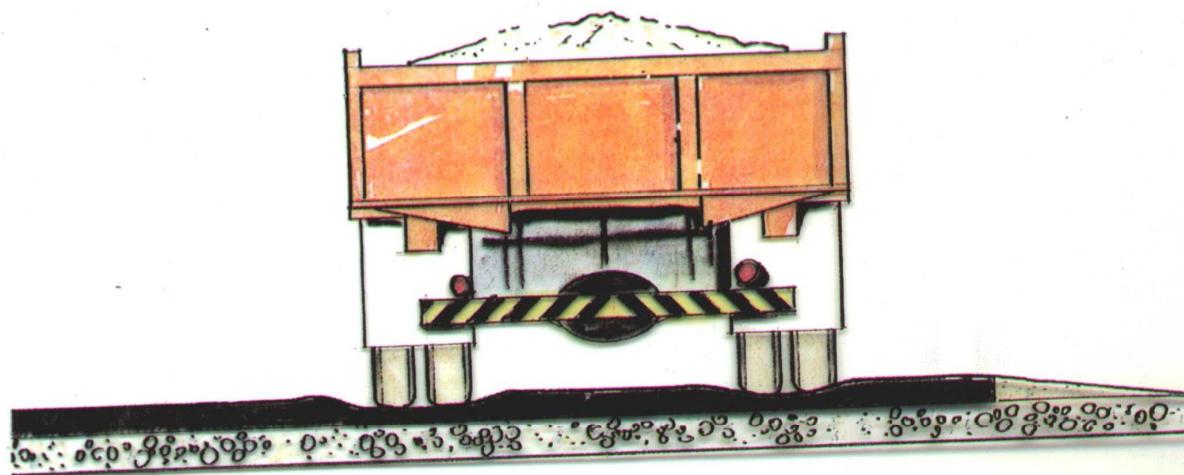
Afundamento de trilha de roda



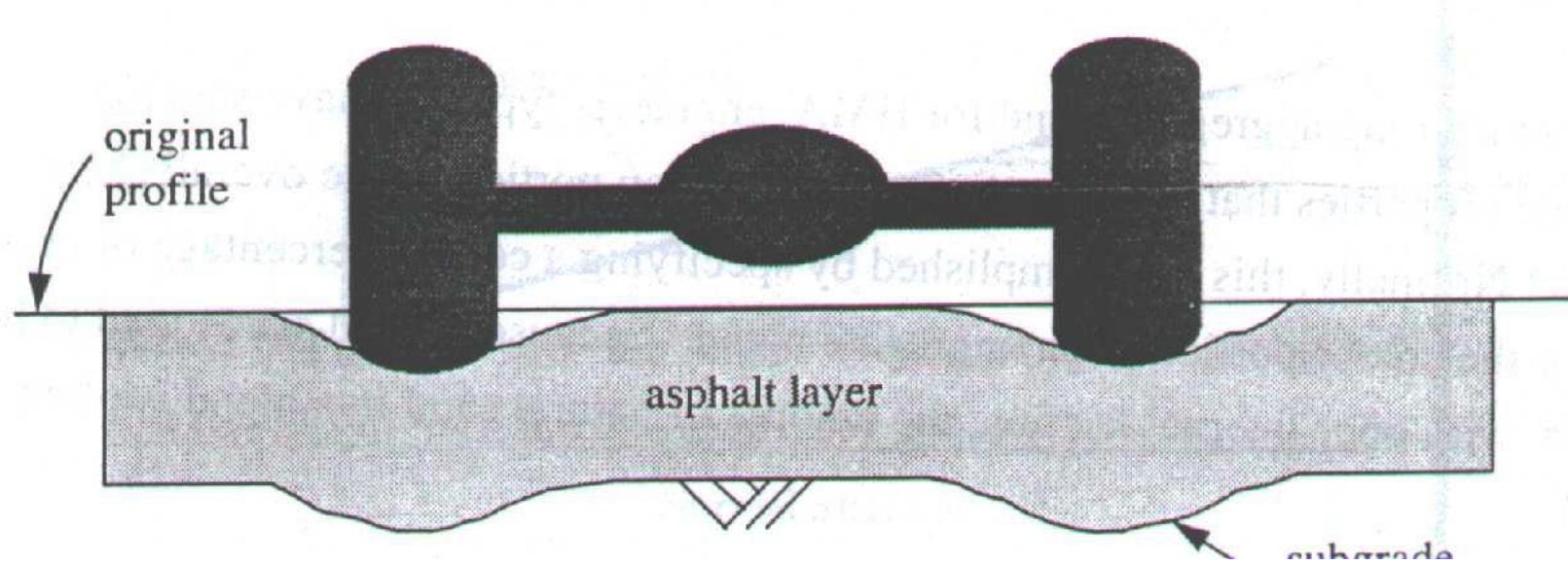
Deformação permanente ou afundamento (ATR)



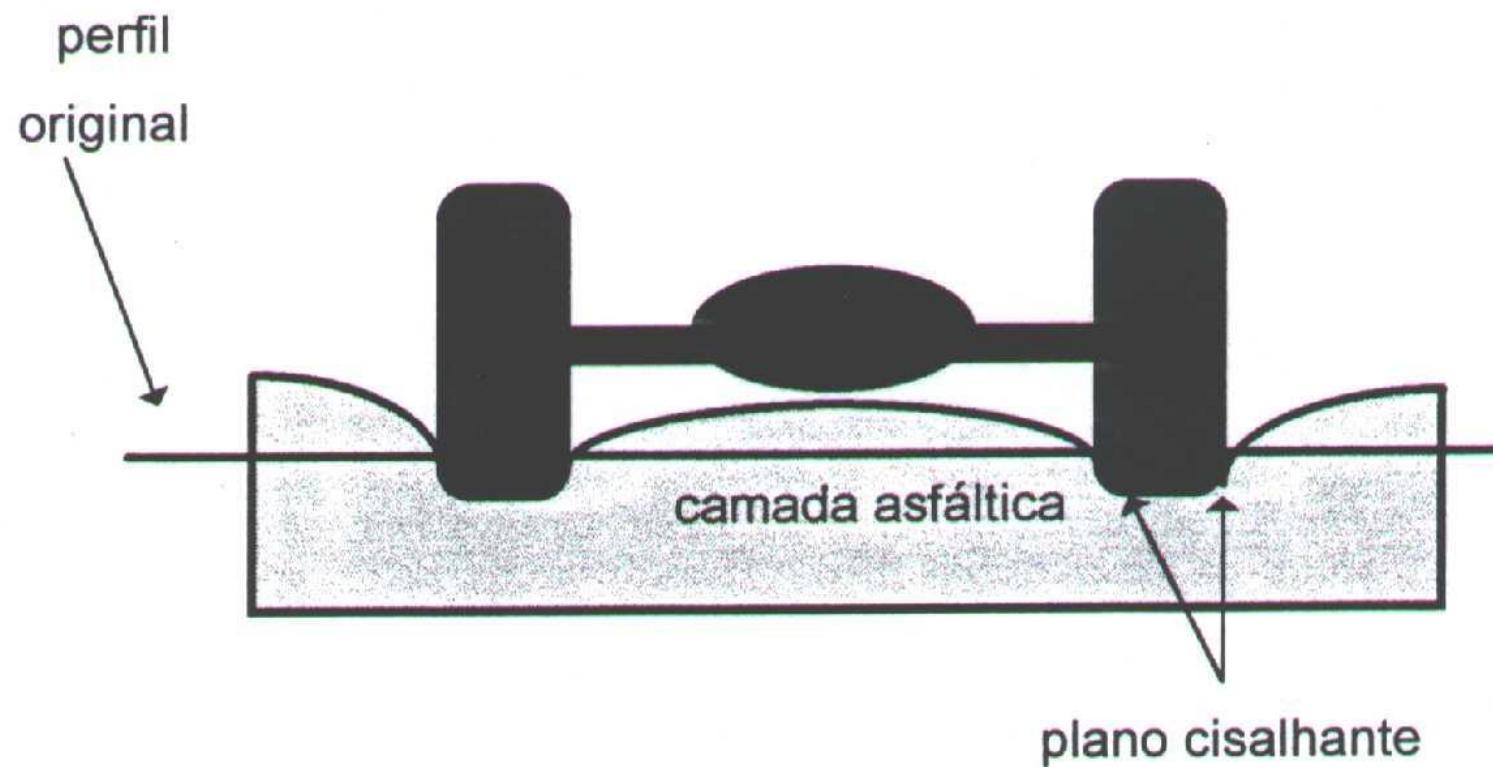
Dois tipos de afundamento:



Problema de dimensionamento:



Problema de dosagem / materiais:

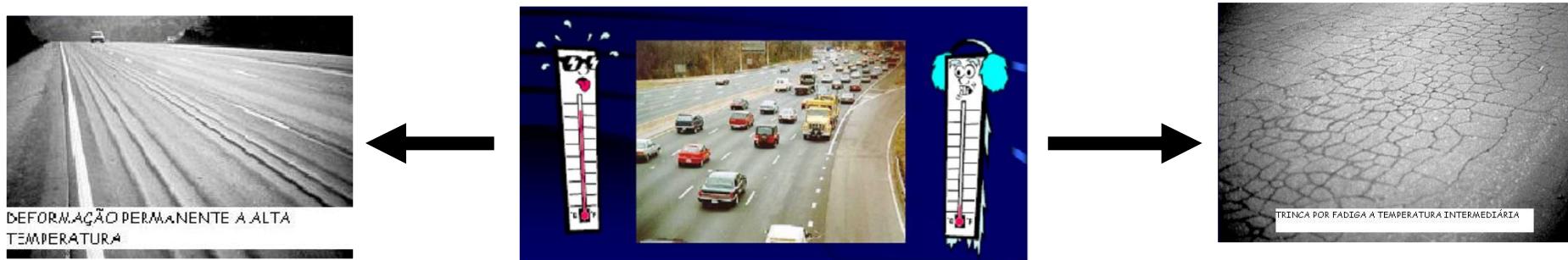


Problema de dosagem / materiais:



O clima e suas principais influências no pavimento:

- ✓ Temperatura no revestimento



- ✓ Umidade de equilíbrio nas camadas e no subleito

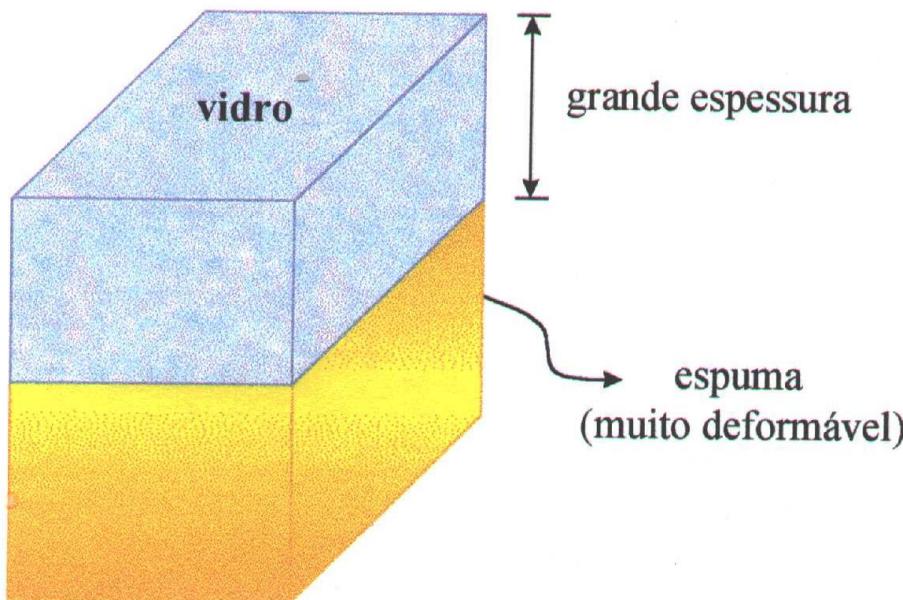
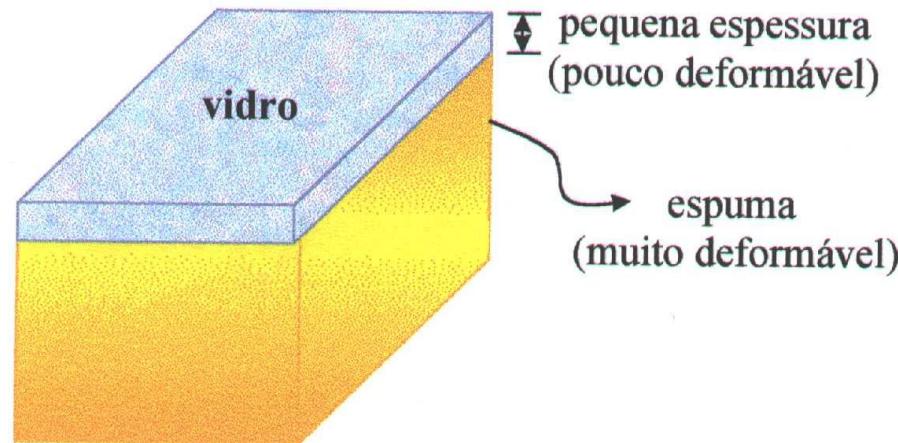
O TRÁFEGO

- Principal carregamento
- Carga transiente: freqüência, intensidade, duração e tipos de eixos altamente variáveis
- Não controlado em rodovias e ruas: aleatório, excessos de carga, velocidades variáveis, engarrafamentos, etc...
- %Calcanhar de Aquiles+

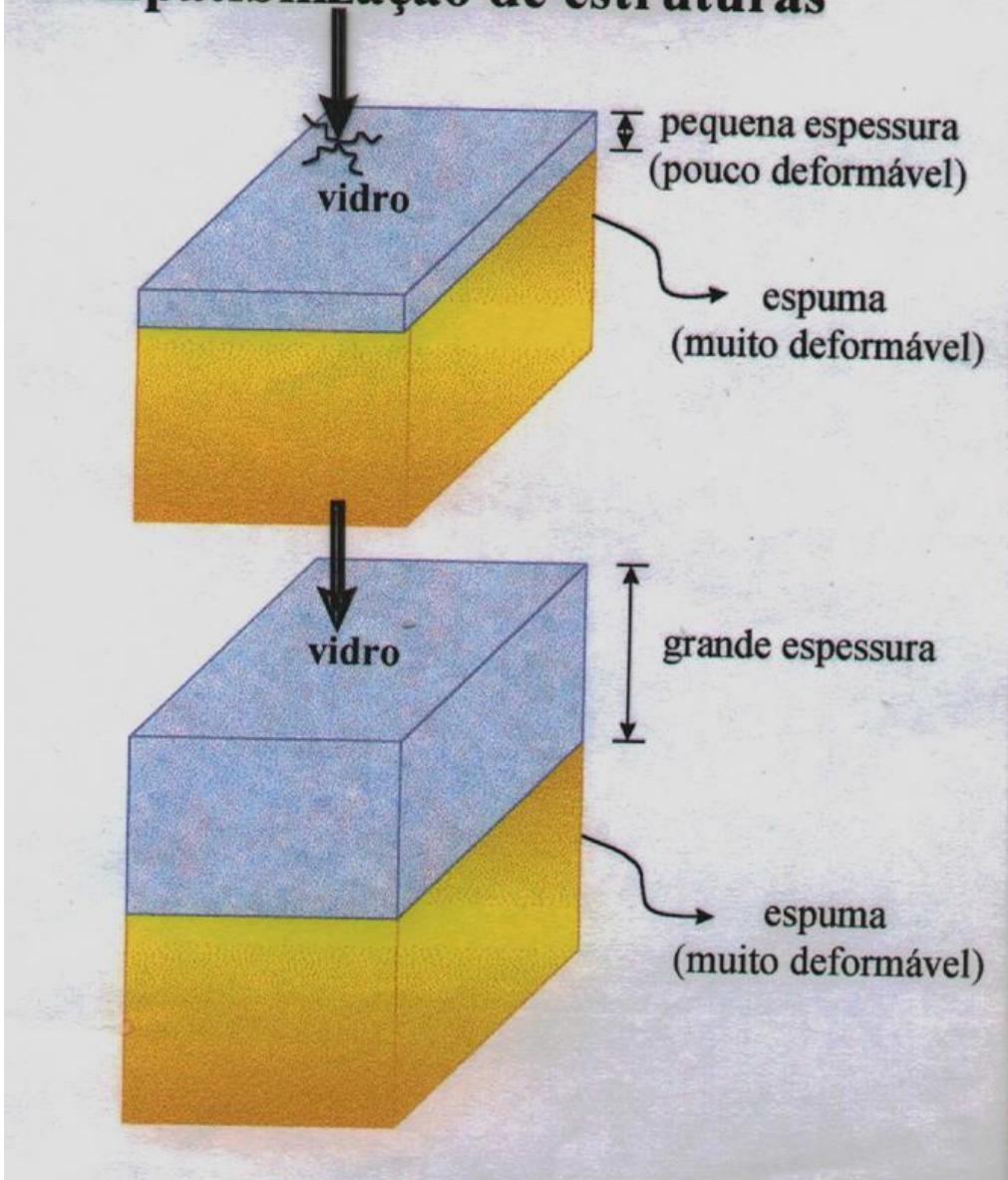
Variáveis do dimensionamento:

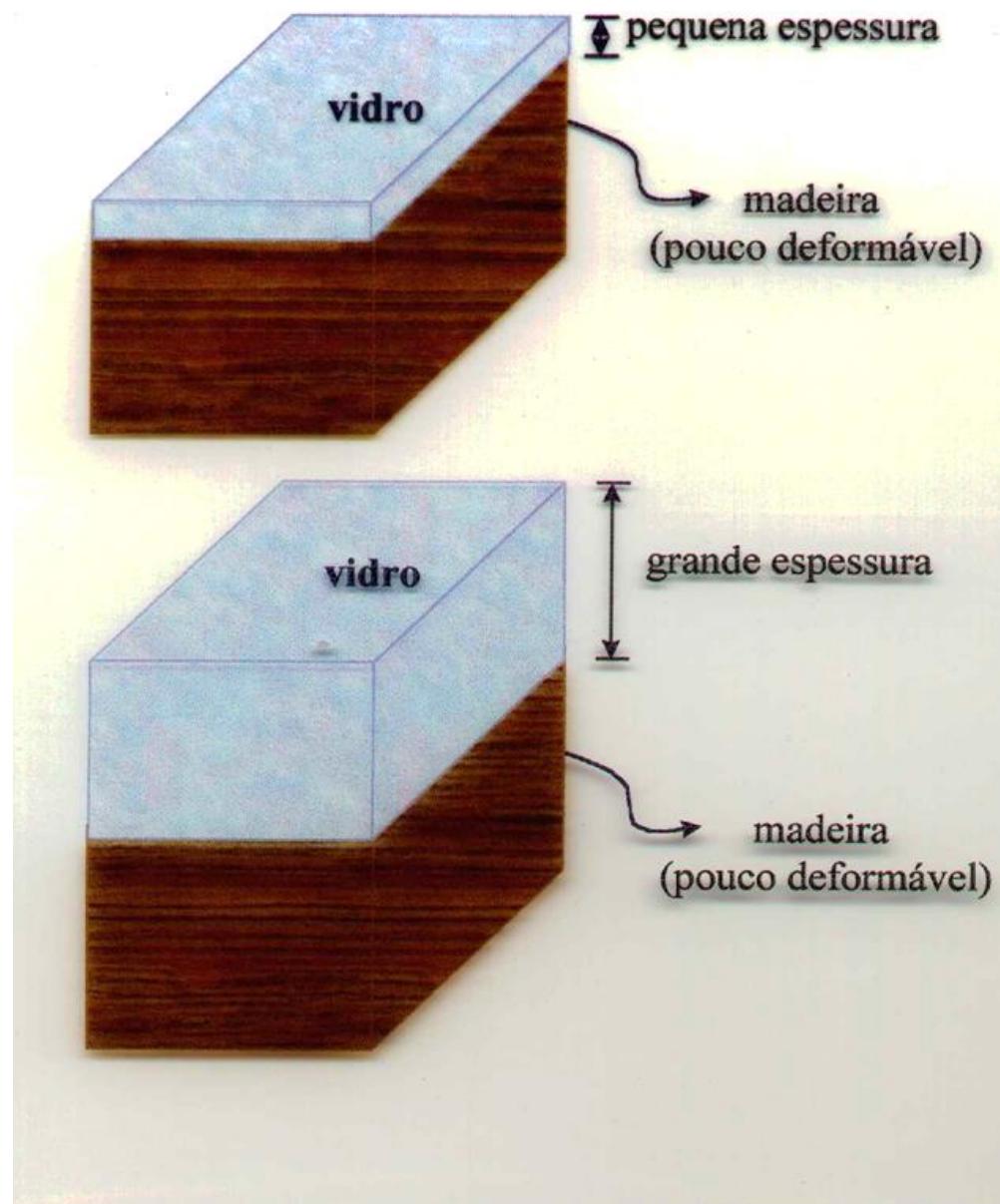
- ” Tráfego de veículos;
- ” Clima;
- ” Materiais: revestimento, base, sub-base e subleito;
- ” Critérios de falha / modelos de dano.

Compatibilização de estruturas

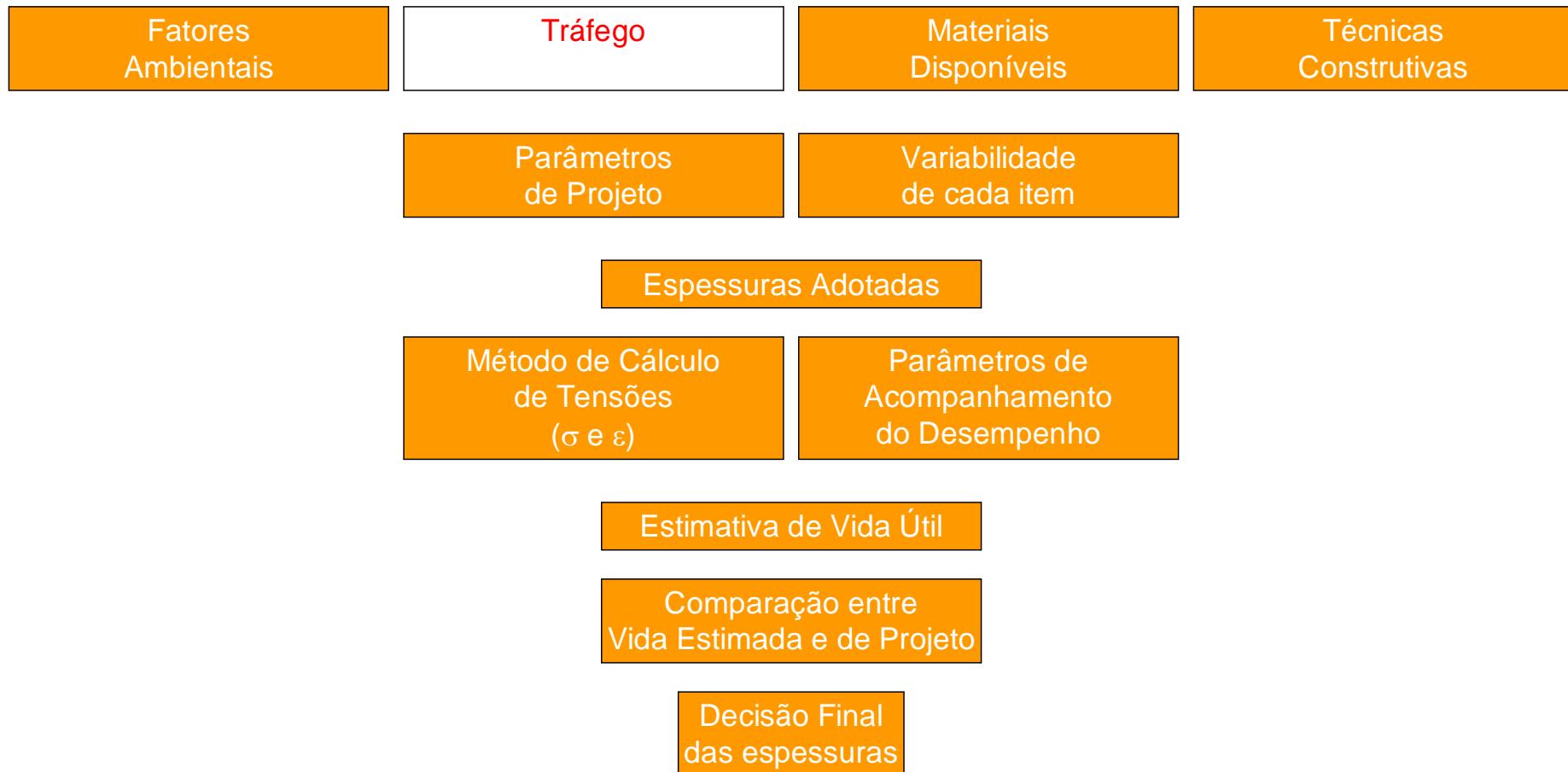


Compatibilização de estruturas





Dimensionamento Mecanístico



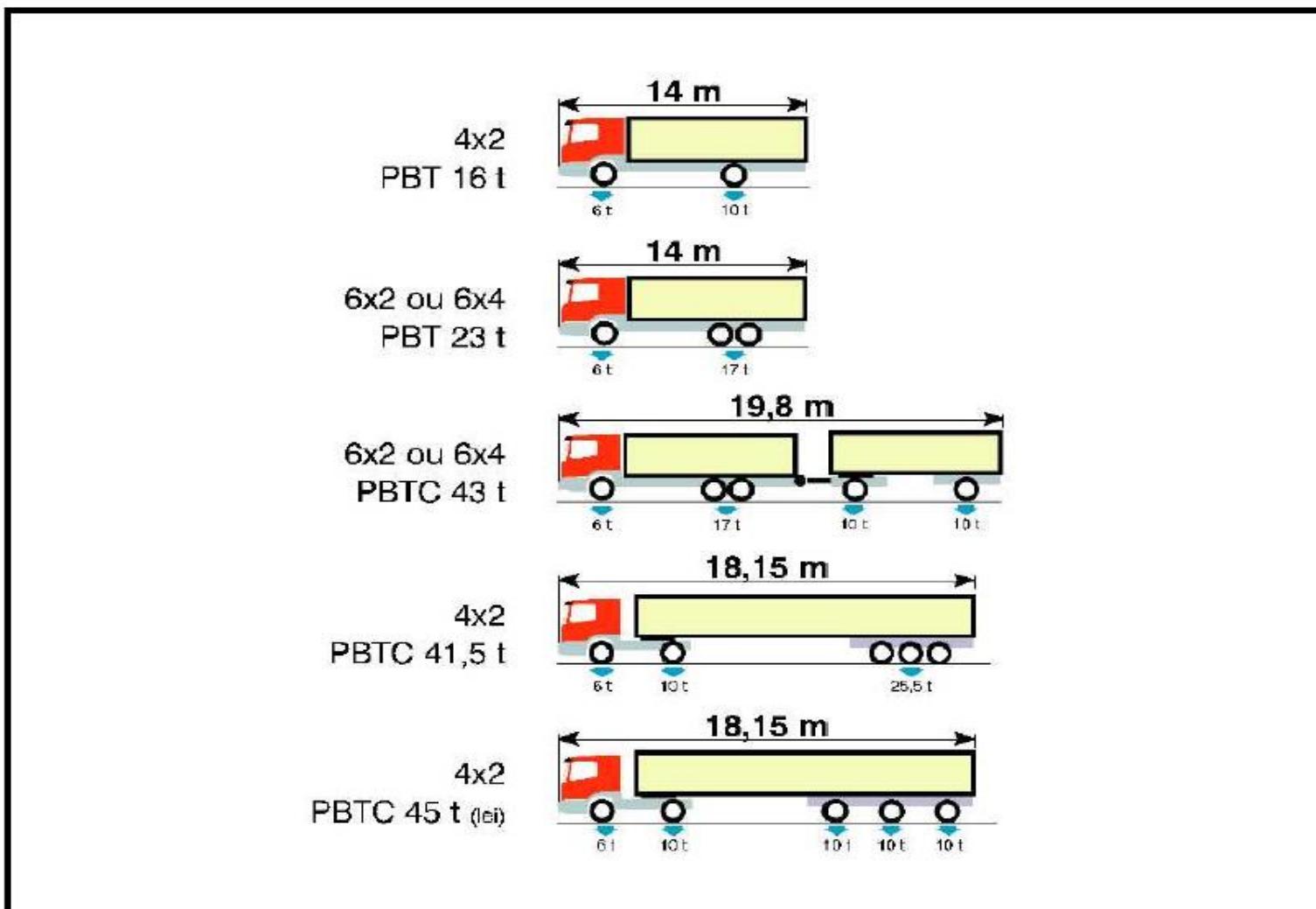
Tráfego de Veículos e o Dimensionamento de Pavimentos

Calcanhar de Aquiles+do Dimensionamento

- “ Principal carregamento
- “ Aleatório: velocidade, fluxo, cargas, repouso...
- “ Crescimento ao longo da vida útil do pavimento, de difícil previsão
- “ Área de contato variável
- “ Pressão de contato variável

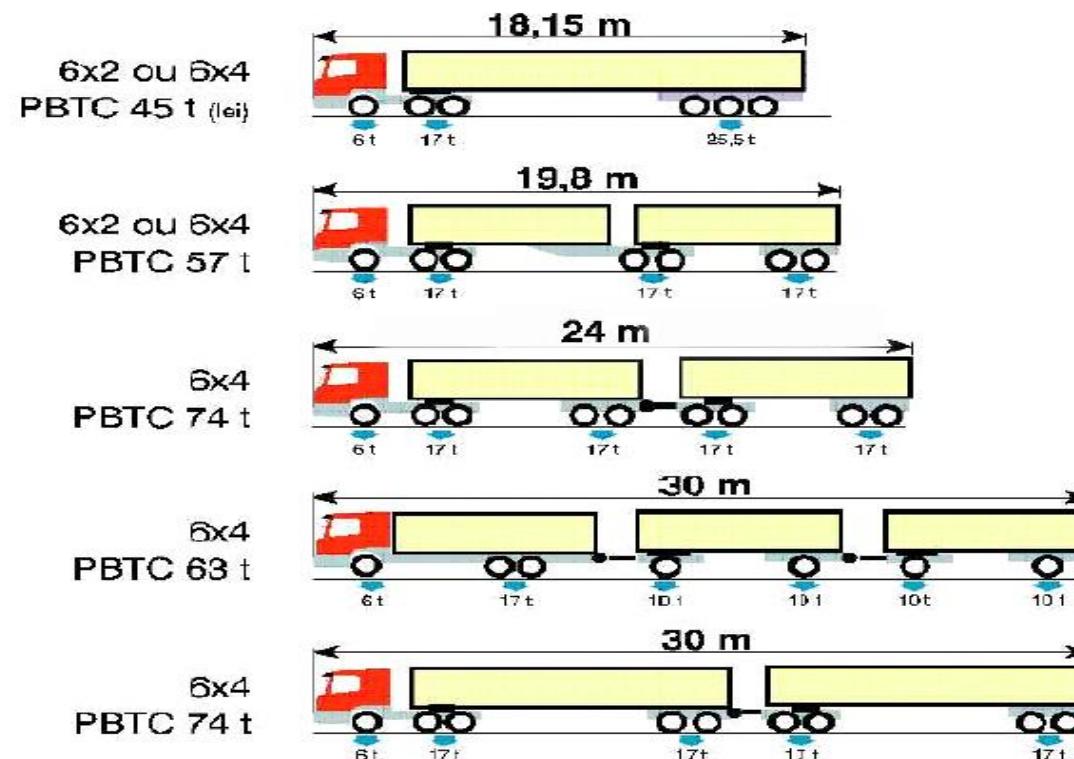
Tipos de Veículos

Figura 1 - Dimensões e pesos de veículos até 45t



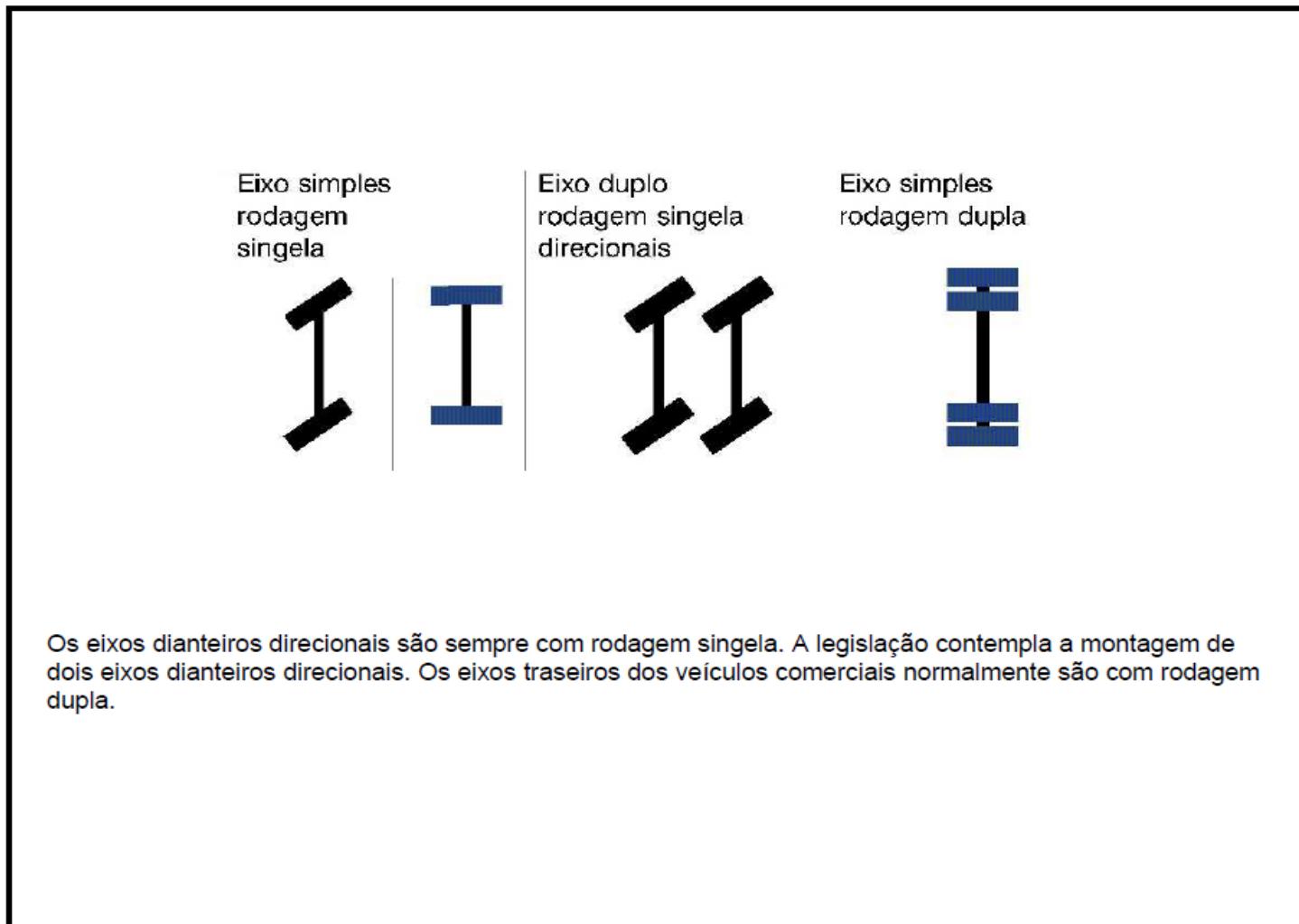
Tipos de Veículos

Figura 2 - Dimensões e pesos de veículos até 74t



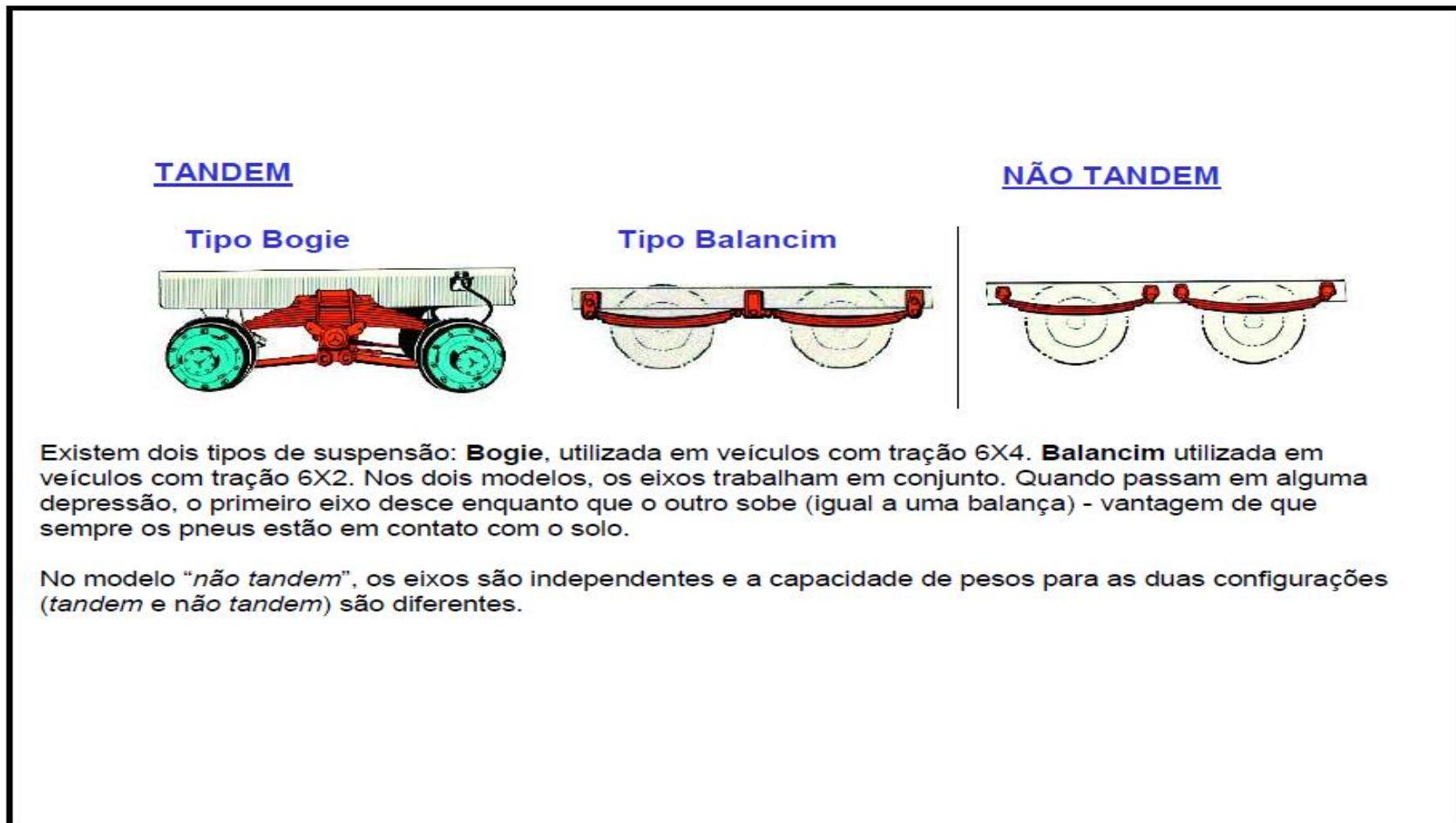
Tipos de Veículos

Figura 3 - Configurações dos eixos



Tipos de Veículos / Eixos

Figura 4 - Configurações das suspensões



Tipos de Veículos / Eixos

Figura 5 - Configurações dos eixos de semi-reboques



Convencional

Semi-reboques convencionais poderão ter 1, 2 ou 3 eixos e a distância entre seus centros ser superior a 1,20 metros e inferior a 2,40 metros.



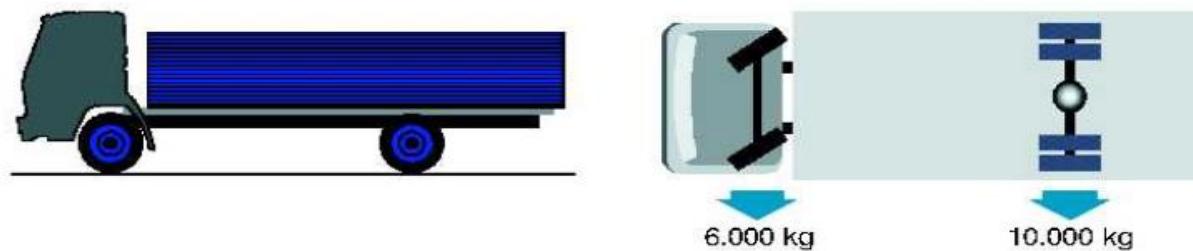
Distanciada

Para serem considerados semi-reboques com eixos distanciados, as distâncias entre os centros de seus eixos deverá ser superior a 2,40 metros e poderão ter 2 ou 3 eixos.

Para esse caso, a lei os considera como eixos independentes, portanto com pesos diferentes dos semi-reboques com eixos convencionais.

Tipos de Veículos / Eixos

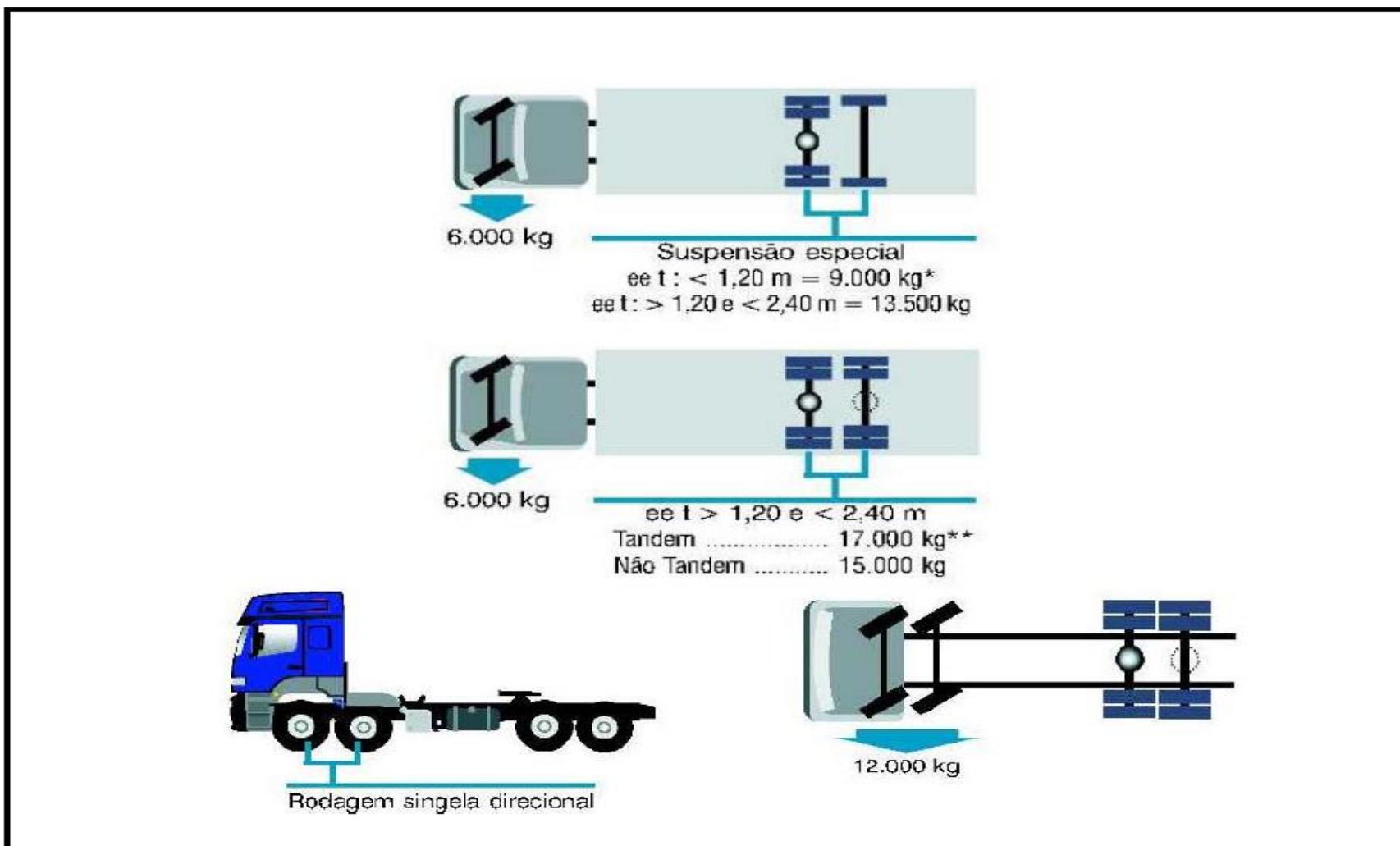
Figura 6 - Capacidade legal, veículos com 2 eixos



Atenção: Deverão ser respeitados os limites técnicos indicados pelos fabricantes dos eixos, dos pneus e o PBT do veículo

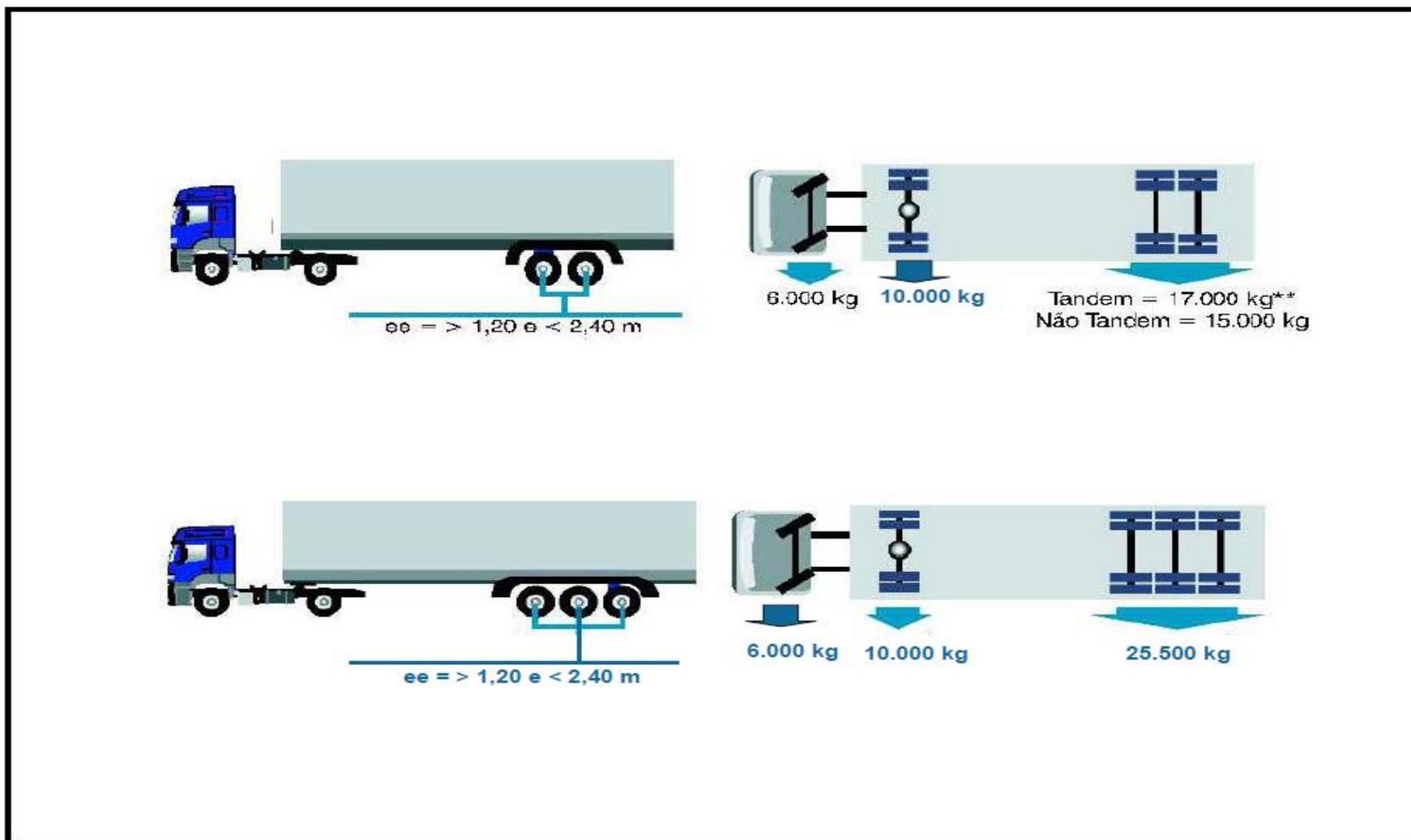
Tipos de Veículos / Eixos

Figura 7 - Capacidade legal, veículos com 3 eixos



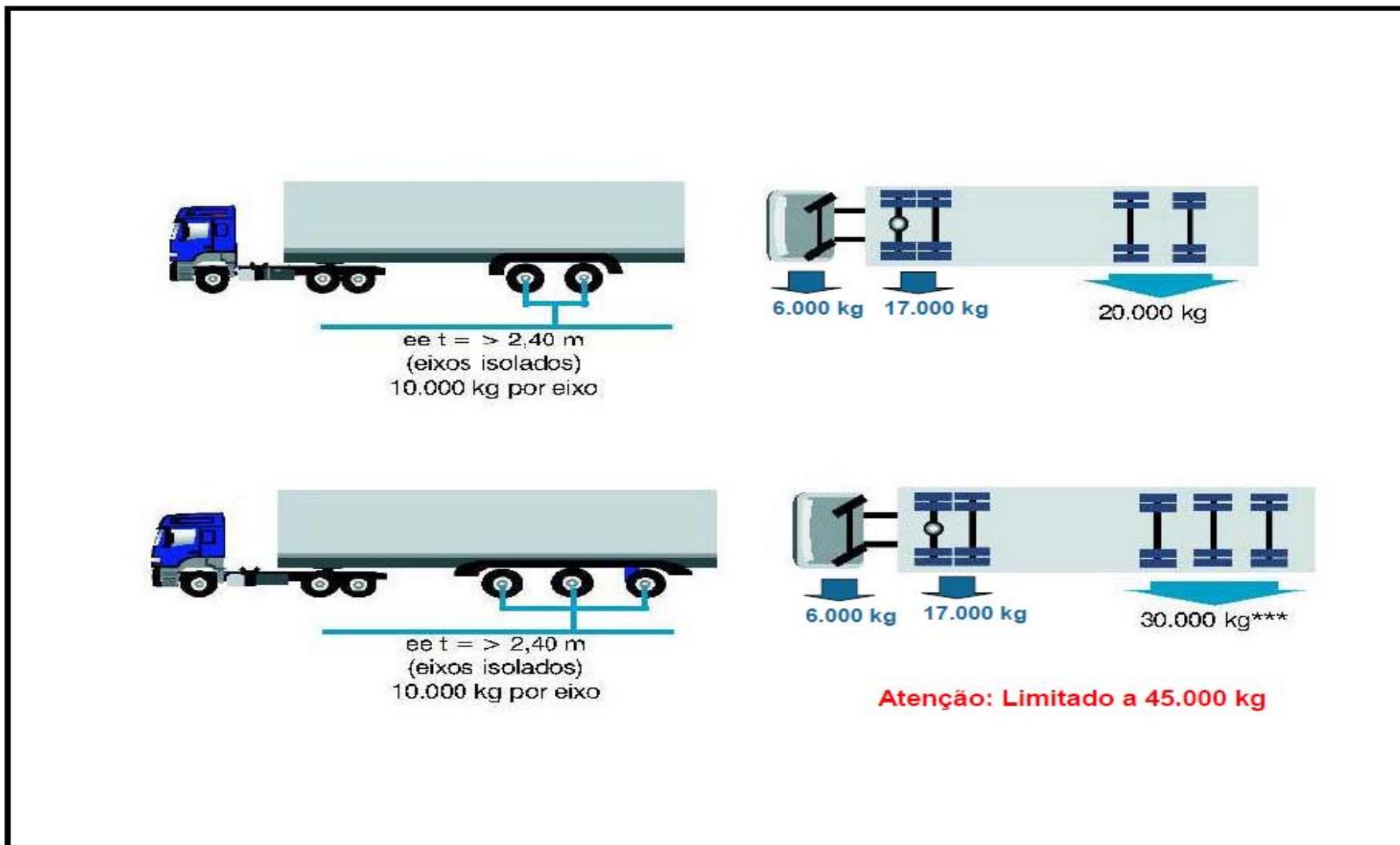
Tipos de Veículos / Eixos

Figura 8 - Capacidade legal, veículos com 4 eixos



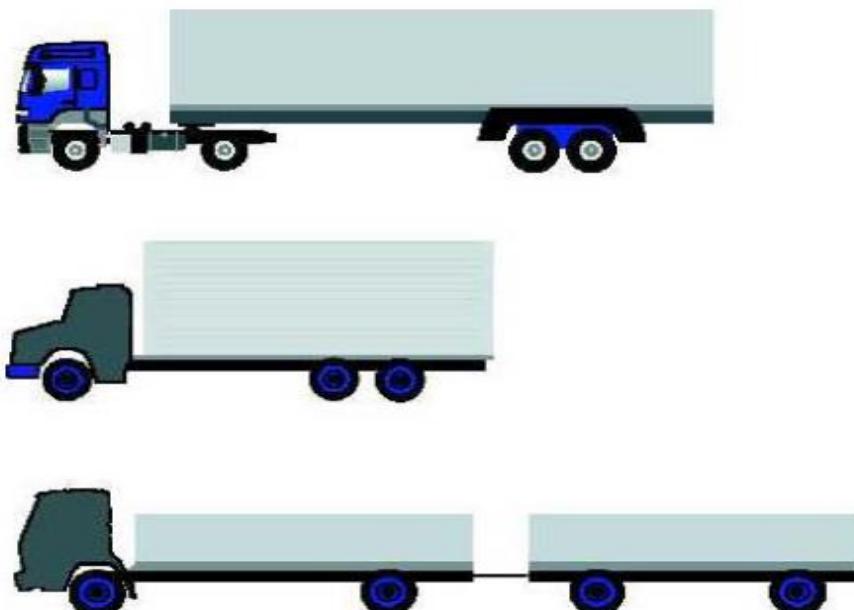
Tipos de Veículos / Eixos

Figura 9 - Capacidade legal, veículos com 5 eixos



Tipos de Veículos / Eixos

Figura 10 - Capacidade Legal (Resumo)



Atenção: Peso Bruto total por unidade ou combinações de veículos (PBT ou PBTC) máximo 45.000 kg

Qualquer que seja a configuração do conjunto (cavalo com semi-reboque ou caminhão com reboque), o PBT ou o PBTC não poderá ultrapassar o limite máximo de 45.000 kg.

Para as configurações que ultrapassarem esse valor (treminhão ou rodotrem) será necessário uma AET - Autorização Especial de Trânsito.

Tipos de Veículos / Eixos

Figura 11 - Dimensões (Resumo)



Tipos de Veículos / Eixos

Figura 12 - Carga máxima (Resumo)



Configuração	Distância entre eixos (ee)	Qtde. de Eixos	Qtde. de Pneus	Suspensão	Carga máxima autorizada
I	—	1	2	—	6
II	—	1	4	—	10
III	—	2	4	—	12
III	Menor que 1,20m	2	6	Especial	9
	De 1,20 a 2,40m	2	6	Especial	13,5
III	Maior que 1,20 e menor que 2,40 m	2	8	Tandem	17
				Não Tandem	15
III	Maior que 1,20 e menor que 2,40 m	3	12	Tandem	25,5
III	Maior que 2,40 m	2	8	—	20
III III	Maior que 2,40 m	3	12	—	30

Tipos de Veículos / Eixos

Manual de Estudos de Tráfego

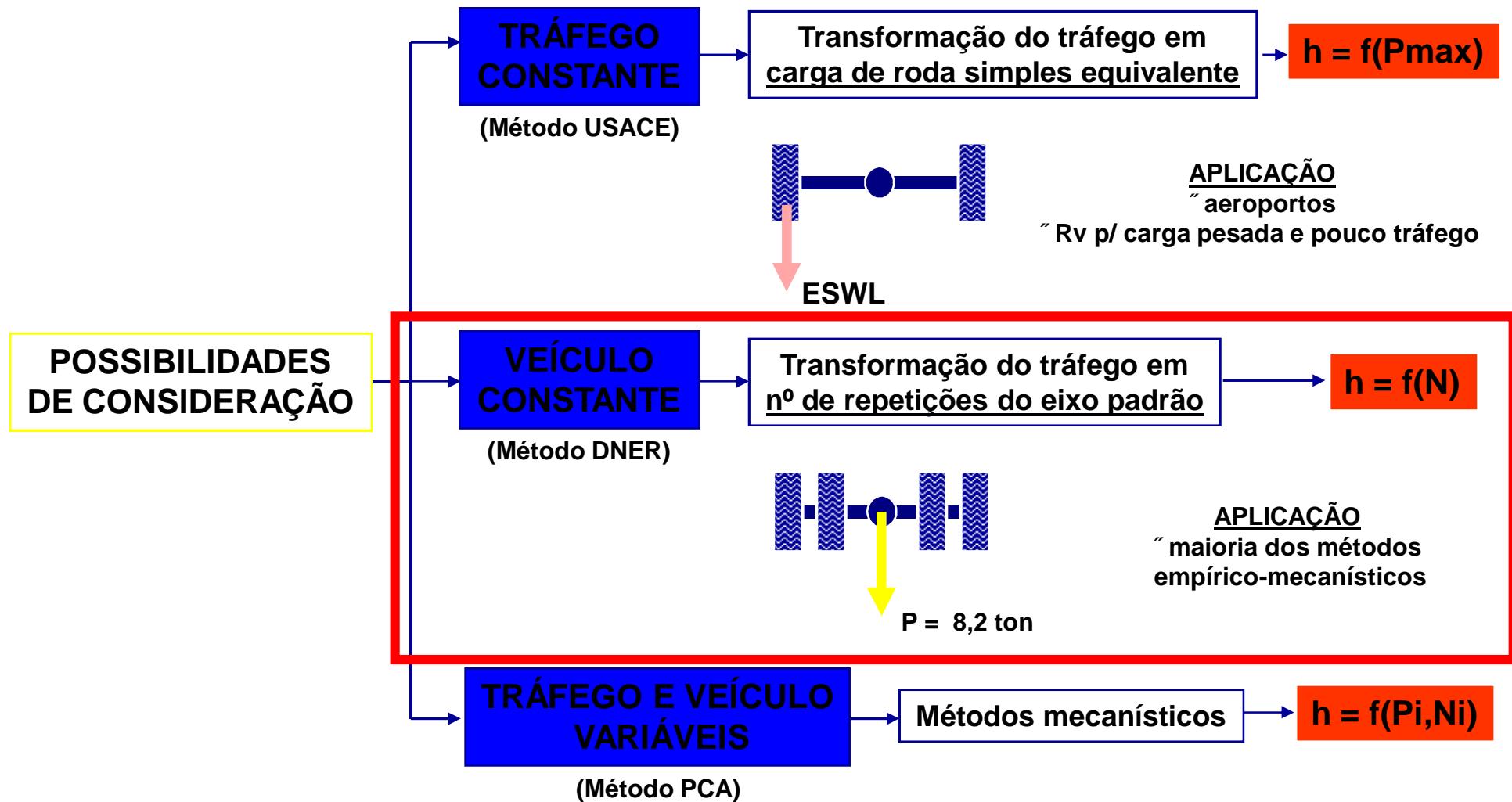
Figura 13
pg 52

Determinação do Volume de Tráfego

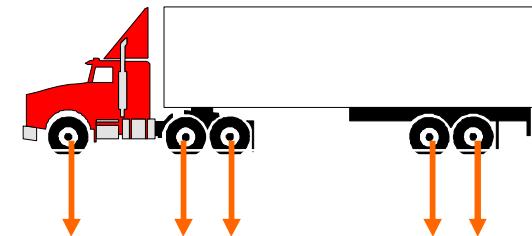
- **Contagem volumétrica:**
 - Global, direcional e por faixa de rolamento
 - Por tipo de veículo
- **Manual:** utilização de fichas, trabalho extenso em campo
 - Uso de técnicas de amostragem e extrapolação. Por exemplo: 2 x 7 dias consecutivos, 24 horas por dia, a cada 13 dias de 6am a 10pm
- **Automática**
 - Sensores piezoelétricos
 - Dispositivos magnéticos
 - Filmagem / Inteligência Artificial
 - Permanentes ou temporárias
- **Pesquisa de Origem / Destino**
 - Geralmente para estimativa de tráfego em novas rodovias
 - Com pesagem dos veículos: procedimento ideal
 - Previsão do **crescimento do tráfego** (critérios variados: PIB, crescimento populacional, etc...): tráfegos normal, desviado, gerado e induzido

$$\text{Volume Médio Diário} = VMD$$

Tráfego para fins de dimensionamento



CONSIDERAÇÃO DO TRÁFEGO

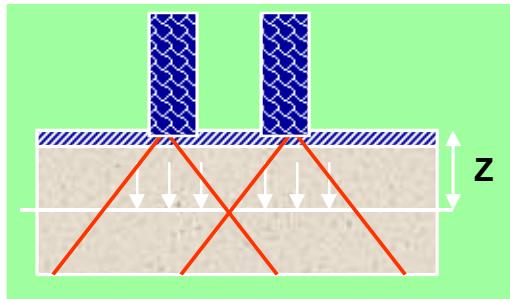


USACE

TRANSFORMAÇÃO EM CARGAS EQUIVALENTES

Exemplos

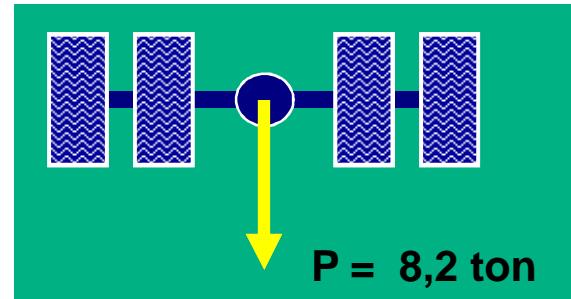
- “ mesma deformação elástica do subleito ”
- “ mesma pressão vertical no subleito ”



DNER

TRANSFORMAÇÃO EM FATOR DE EQUIVALÊNCIA DE OPERAÇÕES

mesmo efeito destrutivo do EIXO PADRÃO



Deficiência

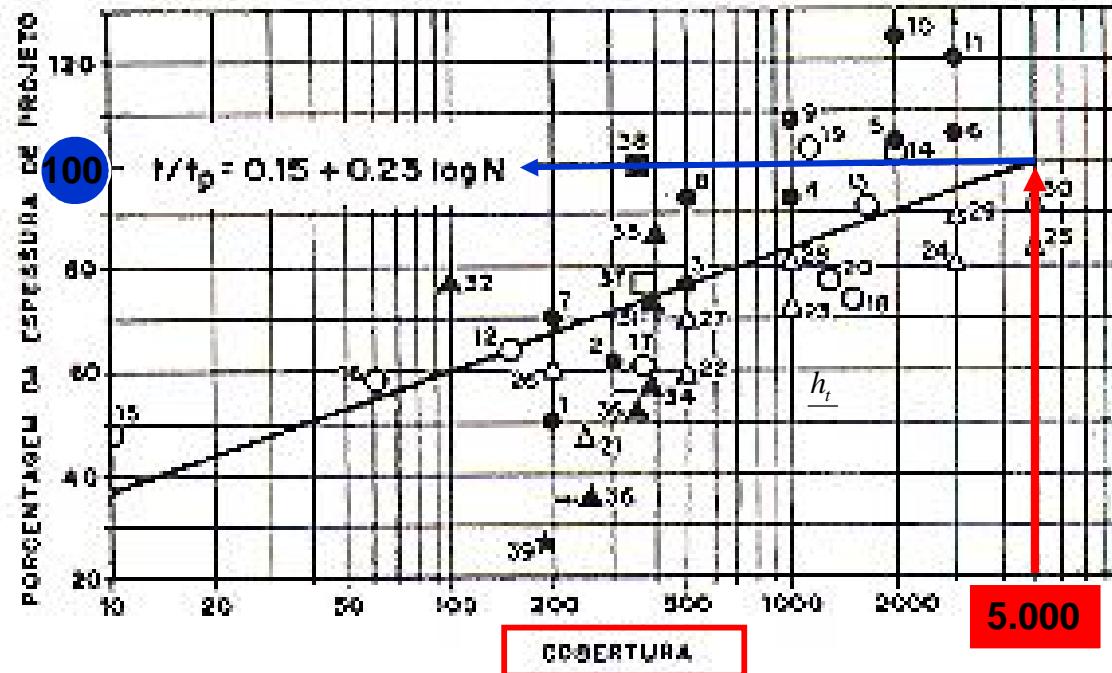
- “ pressão = $f(z)$ → carga equivalente = $f(z)$ ”
- “ deformação = $f(z)$ → carga equivalente = $f(z)$ ”

Deficiência

- “ não considera danos em termos de deformações elásticas ”
- “ não considera eixo triplo ”

FATOR DE EQUIVALÊNCIA DE OPERAÇÕES

(Ref: TURNBULL, W. J.; FOSTER, C.R. e AHLVIN, R. G. *Design of flexible pavements considering mixed loads and traffic volume*. 1st Int Conf Struct Design os Asphalt Pavements. 1962)



$$h_t = \sqrt{P \left(\frac{1}{0.57 CBR} - \frac{1}{\sigma_o \pi} \right)}$$

$P = 8.2$ ton

vida útil 10 a 15 anos

5.000 coberturas

h_t

Exemplo

$P = 11$ ton

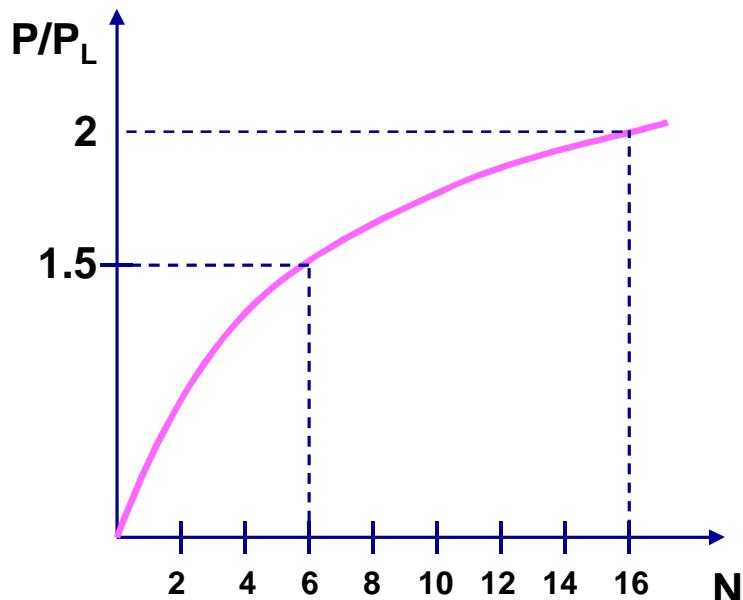
8.2 ton $\rightarrow 100\% h_t$

$$11 \text{ ton} \rightarrow \sqrt{\frac{11}{8.2}} = 116\% h_t$$

Gráfico
116% \rightarrow 25.000 coberturas

**Fator de equivalência
FC = 5**

Efeito danoso de cargas repetidas



$$N = \left(\frac{P}{P_{LEGAL}} \right)^4$$



nº de operações que provocam o mesmo efeito destrutivo da carga máxima legal (Fator de Equivalência)

eixo simples

$$N = \left(\frac{P}{8.17} \right)^{4.32}$$

eixo tandem duplo

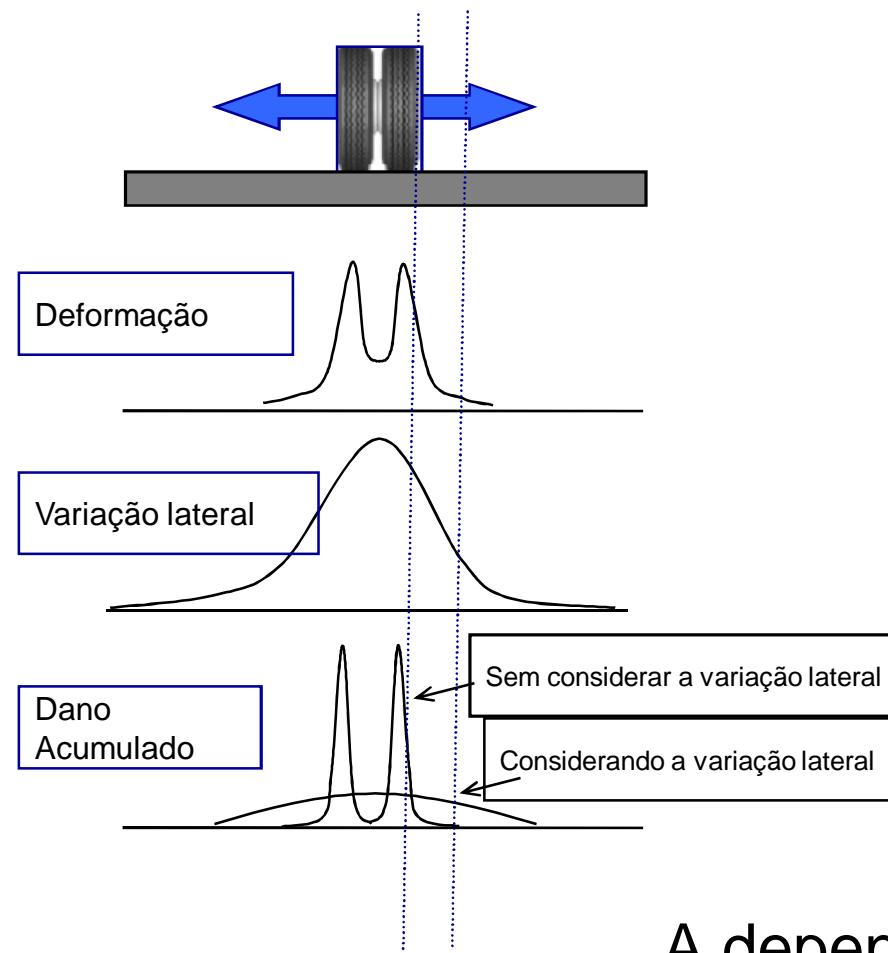
$$N = \left(\frac{P}{15.08} \right)^{4.14}$$

eixo tandem triplo

$$N = \left(\frac{P}{22.95} \right)^{4.22}$$

Carregamento da estrutura

- Variação Lateral do tráfego



A depender do modelo!!

Estimativa quanto à vida útil do pavimento

*Fator acumulativo do dano ó CDF
(Lei de Miner)*

$$CDF = \sum \frac{n_i}{N_i}$$

onde :

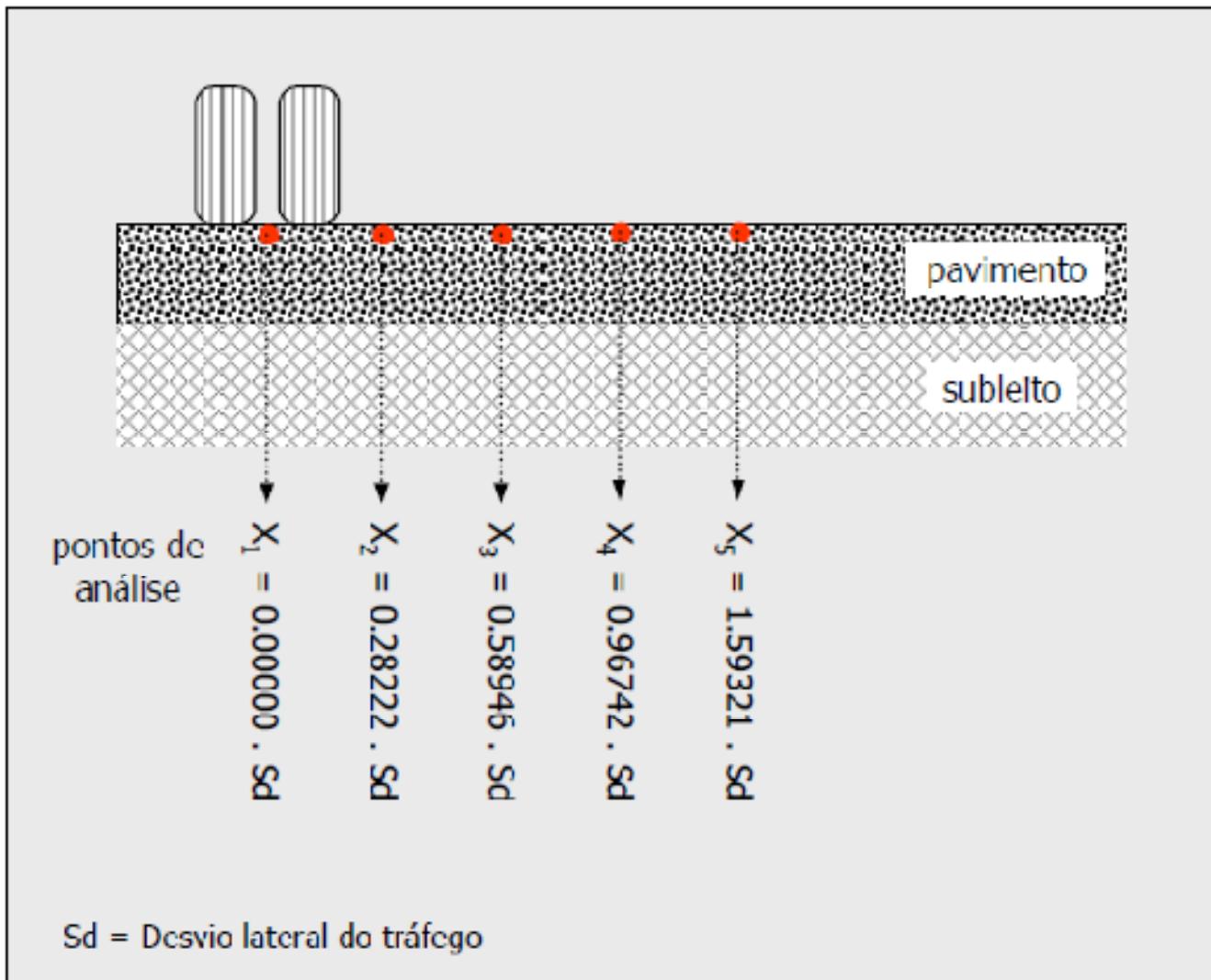
n_i = Número de repetições do n - ésimo carregamento

N_i = Número de repetições admissíveis

- ” Tensões e deformações limites à ruptura
 - ” Identifica-se o CDF para a espessura que possui critério de ruptura
 - ” Dimensiona-se a espessura automaticamente para este quadro estrutural
-

Carregamento da estrutura

- Variação Lateral do tráfego: acúmulo de danos



TRÁFEGO: DETERMINAÇÃO DO NÚMERO %N+

- “ Essencial para o dimensionamento de pavimento novo
- “ Correta avaliação da solicitação que o pavimento já sofreu pelo tráfego é fundamental para diagnóstico preciso. Para reforço ou definição de outras intervenções é necessária determinação do tráfego futuro
- “ Em qualquer caso, devem ser definidos:
 - . Volume médio diário anual (VMD)
 - . Classificação da frota
 - . Carregamento da frota
 - . Fator de equivalência de carga

FATORES DE EQUIVALÊNCIA DE CARGA POR EIXO (FC)

- “ A conversão do tráfego misto em um número equivalente de operações de um eixo considerado padrão é efetuada aplicando-se ***Fatores de Equivalência de Cargas (FC)***:
- “ (converte aplicação de um eixo de determinada carga em um número de aplicações do eixo-padrão que produz efeito equivalente)
- “ **Os conceitos adotados nos diversos métodos para a definição da equivalência de cargas são variados, e não dependem exclusivamente do eixo-padrão considerado.**
- “ ***Exemplos:***
 - “ Método de Projeto Pavimento Novo e TECNAPAV (PRO 269/94): eixo-padrão de 8,2 ton e fatores de equivalência de carga do Corpo de Engenheiros do Exército Norte-americano (USACE).
 - “ PRO 159/85: o eixo-padrão também é de 8,2 ton, porém os fatores de equivalência são os da AASHTO.

Tabela 41 - Fatores de equivalência de carga da AASHTO

Tipos de eixo	Equações (P em tf)
Simples de rodagem simples	$FC = (P / 7,77)^{4,32}$
Simples de rodagem dupla	$FC = (P / 8,17)^{4,32}$
Tandem duplo (rodagem dupla)	$FC = (P / 15,08)^{4,14}$
Tandem triplo (rodagem dupla)	$FC = (P / 22,95)^{4,22}$

P = Peso bruto total sobre o eixo

Tabela 42 - Fatores de equivalência de carga do USACE

Tipos de eixo	Faixas de Cargas (t)	Equações (P em tf)
Dianteiro simples e traseiro simples	0 – 8	$FC = 2,0782 \times 10^{-4} \times P^{4,0175}$
	≥ 8	$FC = 1,8320 \times 10^{-6} \times P^{6,2542}$
Tandem duplo	0 – 11	$FC = 1,5920 \times 10^{-4} \times P^{3,472}$
	≥ 11	$FC = 1,5280 \times 10^{-6} \times P^{5,484}$
Tandem triplo	0 – 18	$FC = 8,0359 \times 10^{-5} \times P^{3,3549}$
	≥ 18	$FC = 1,3229 \times 10^{-7} \times P^{5,5789}$

P = peso bruto total sobre o eixo

Determinação do Número N_+

- “ São considerados: composição do tráfego de cada categoria de veículo, pesos das cargas e distribuição nos tipos de eixos
- “ Valores anuais e acumulados no período de projeto são calculados com base nas projeções do tráfego, sendo necessário conhecimento qualitativo e quantitativo da composição presente e futura
- “ Esse conhecimento é obtido das pesagens, pesquisas de origem e destino, contagens volumétricas classificatórias e pesquisas de tendências da frota regional ou nacional

Percentuais de veículos comerciais na faixa de projeto

” Número de faixas de Tráfego da rodovia e Percentual de veículos comerciais na faixa de projeto (**bidirecional**):

- 2 (pista simples) : 50 %
- 4 (pista dupla): 35 a 48 %
- 6 ou mais (pista tripla): 25 a 48 %

*Usar estes valores apenas
na falta de dados mais
precisos*

Número de faixas de Tráfego da Rodovia	Percentual de veículos comerciais na faixa de projeto (no caso de VDM bidirecional)	Percentual de veículos comerciais na faixa de projeto (no caso de VDM unidirecional)
2 (pista simples)	50%	100%
4 (pista dupla)	35 a 48%	70 a 96%
6 ou mais (pista dupla)	25 a 48%	50 a 96%

” Normalmente calcula-se o volume de tráfego de cada categoria de veículo, ano a ano.

Fator de Carga

Cálculo do Fator de carga (Souza, 1981; DNER, 1996)				
Eixos Simples (tf)	Freqüência na amostra	Percentagem (P _j)	FEC _j *	Equivalência de Operações (P _j × FEC _j)
t ₁	n ₁	P _{j1}	FEC ₁	P _{j1} × FEC ₁
t ₂	n ₂	P _{j2}	FEC ₂	P _{j2} × FEC ₂
...
Eixos Tandem(tf)				
t' ₁	n' ₁	P _{ø1}	FEC _{ø1}	P _{ø1} × FEC _{ø1}
t' ₂	n' ₂	P _{ø2}	FEC _{ø2}	P _{ø2} × FEC _{ø2}
...
			100	FC

$$FC = \frac{\sum(P_j \times FEC_j)}{100}$$

Fator de Eixo

FE - é o número total de eixo da frota dividido pelo volume total do tráfego

Fator de Veículo

$$FV = FE \times FC$$

Atenção aos FVs da Tabela 56 É pg 259 do Manual É não está compatível com a Figura 13

Exemplo:

Dados da
Frota
comercial

Categoria	VMDa	No. Eixos Individuais	No. Eixos Individuais x VMDa
2C	140	2	280
3C	196	3	588
2S2	9	4	36
2S3	115	5	575
3S3	15	6	90
	475		1.569

Nº total
de
eixos

$$FE = 1.569 / 475 = 3,3$$

Categoria	Pesos por Conjunto de Eixo			FEC _j		
	CE1	CE2	CE3	CE1	CE2	CE3
2C	6 tf	10 tf	-	0,278	3,289	-
3C	6 tf	17 tf	-	0,278	8,549	-
2S2	6 tf	10 tf	17 tf	0,278	3,289	8,549
2S3	6 tf	10 tf	25,5 tf	0,278	3,289	9,300
3S3	6 tf	17 tf	25,5 tf	0,278	8,549	9,300

$$FC = \sum (n_i \times FEC_j) / \text{número total de eixos individuais} \\ \therefore FC = 4.090 / 1.569 = 2,6$$

$$FV = 2,6 \times 3,3 = 8,6$$

$$V_t = 365 \times P \times VM$$

$$N = V_t \times FV$$

Categoria	No. de conjuntos de eixo (n _j)			n _j × FEC _j		
	CE1	CE2	CE3	CE1	CE2	CE3
2C	140	140	-	39	461	-
3C	196	196	-	54	1.676	-
2S2	9	9	9	3	30	77
2S3	115	115	115	32	378	1.069
3S3	15	15	15	4	128	139
Subtotal	475	475	139	132	2.672	1.286
Total	1.089			4.090		

Métodos Empírico de Dimensionamento de Pavimentos Flexíveis

DIMENSIONAMENTO DE PAVIMENTOS FLEXÍVEIS

O enfoque sócio-econômico dado à questão de dimensionamento de estruturas de pavimentos objetiva definir as categorias de rodovias em função dos serviços prestados aos usuários, expressos pelos seguintes parâmetros:

- **Segurança** da rodovia - relativa às boas condições de regularidade, drenagem e aderência;
- **Regularidade** dos serviços - a manutenção da rodovia pode ocasionar interrupção do tráfego;
- **Conforto** do usuário - tratamento visual, nível de ruído e boas condições da superfície de rolamento.

O dimensionamento de um pavimento tem como objetivo calcular e/ou verificar espessuras e compatibilizar os materiais de forma que a vida útil corresponda a um certo número projetado de repetições de carga.

A vida útil de um pavimento é o período após o qual este atinge um grau inaceitável de deterioração, quer sob o aspecto estrutural, quer sob o aspecto funcional. O fissuramento generalizado do revestimento asfáltico, por exemplo, pode indicar o fim da sua vida útil. Não existe ruptura súbita em um pavimento, e sim, uma lenta progressão de defeitos ao longo dos anos, em função da qualidade dos materiais, tráfego e clima, e, principalmente, da repetição de deformações resilientes e do acúmulo de deformações permanentes.

Abordagem tradicional

DIMENSIONAMENTO DE PAVIMENTOS FLEXÍVEIS

Para prever o desempenho de pavimentos necessita-se de um grande número de simplificações. O dimensionamento dos pavimentos pode ser abordado fundamentalmente através de 2 métodos:

- Os mecanísticos consideram a análise das tensões e deformações em meios não perfeitamente elásticos (solos e misturas asfálticas) e compararam estas respostas da estrutura com critérios pré-estabelecidos de dimensionamento para determinar as espessuras das camadas do pavimento. Na verdade, não existe um método puramente mecanístico.
- Os empíricos se baseiam em experiências repetidas várias vezes no campo e se limitam a prever espessuras adequadas, garantindo assim o critério de ruptura por deformação permanente e têm como melhor fundamento o método originado do trabalho inicial de O. J. Porter, antigo engenheiro do Departamento de Estradas de Rodagem da Califórnia. Inicialmente conhecido como método Califórnia e posteriormente como do USACE (Corpo de Engenheiros do Exército dos Estados Unidos), este método se baseia no ensaio CBR que foi o ponto de partida para a evolução da engenharia rodoviária mundial. O USACE já o reviu outras vezes, desde a sua criação.

DIMENSIONAMENTO DE PAVIMENTOS FLEXÍVEIS

Método de Dimensionamento do DNIT

O método do DNIT é uma adaptação efetuada pelo Engº Murillo Lopes de Sousa em 1966 do método desenvolvido pelo USACE que utiliza algumas conclusões da pista experimental AASHO (1958 a 1960).

As seguintes **4 etapas** de trabalho discutidas abaixo fazem parte do dimensionamento de pavimentos flexíveis de acordo com o referido método.

(1) DEFINIÇÃO DA CAPACIDADE DE SUPORTE DO SUBLIEITO

Determinada através do CBR que consiste da relação entre a pressão necessária para produzir uma penetração de um pistão num corpo-de-prova de solo, e a pressão necessária para produzir a mesma penetração numa brita padronizada. O valor desta relação é dado em percentagem.

Este ensaio foi introduzido por Porter em 1929 para o dimensionamento de pavimentos rodoviários flexíveis, sendo mais tarde adaptado pelo USACE para o projeto de aeroportos, mantendo-se ainda hoje como um parâmetro de projeto bastante utilizado quando da adoção de procedimentos empíricos de projeto.

DIMENSIONAMENTO DE PAVIMENTOS FLEXÍVEIS

(2) DEFINIÇÃO DOS MATERIAIS

As exigências para materiais de reforço do subleito, subbase, e base estabilizada são:

- **Reforço do subleito:** características geotécnicas superiores a do subleito (CBR, LL, LP, granulometria);
- **Subbase** granulometricamente estabilizada: $CBR \geq 20$; $IG = 0$ para qualquer tipo de tráfego;
- **Base** estabilizada granulometricamente: $LL \leq 25\%$; $IP \leq 6$; $Expansão \leq 0,5\%$;
 - Equivalente de areia $\geq 20\%$;
 - $CBR \geq 40$ (tráfego leve); ≥ 60 (médio); ≥ 80 (pesado).

DIMENSIONAMENTO DE PAVIMENTOS FLEXÍVEIS

(3) DETERMINAÇÃO DO TRÁFEGO

É necessária a determinação do número equivalente de operações de eixo padrão, N , durante o período de projeto.

$$N_{\text{presente}} = 365 \times \text{VMDa} \times \text{FE} \times \text{FC} (\times \text{FR})$$

$$N_{\text{futuro}} = N_{\text{presente}} \times \frac{[(1+t)^P - 1]}{t}$$

A versão de 1979 do método do DNER (Murillo Lopes de Souza) recomenda não se considerar mais o fator climático regional (FR) no dimensionamento. Admiti-se que ao se adotar o CBR embebido por quatro dias já está se considerando a pior situação. Por outro lado, várias pesquisas já mostraram que a variação sazonal do suporte do subleito no Brasil é muito pequena e a própria embebição pode ser questionada.

DIMENSIONAMENTO DE PAVIMENTOS FLEXÍVEIS

(4) DIMENSIONAMENTO DO PAVIMENTO DA PISTA DE ROLAMENTO E ACOSTAMENTOS

Aos materiais constitutivos do pavimento são designados **coeficientes de equivalência estrutural, K**, tendo como base o valor 1,0 para base granular. Materiais com maior rigidez como base ou revestimento de concreto betuminoso são associados a maiores valores de K (neste caso 2,0). **Materiais com menor rigidez como subbase e reforço do subleito são associados a valores menores do que 1,0 (neste caso 0,77 e 0,71, respectivamente).**

Ainda para a subbase e reforço, K pode ser calculado em função da relação entre o CBR dessas camadas e o CBR do subleito como é mostrado na Tabela 1. Note que o coeficiente de equivalência estrutural dessas camadas deverá ser 1,0 toda vez que o CBR do material de um ou outro for igual ou superior a três vezes o do subleito (a *Prefeitura Municipal de São Paulo* adota o valor 1,0 para tráfego médio, pesado e muito pesado).

CBR ₁ /	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2	2,1	2,2	2,3	2,4	2,5	2,6	2,7	2,8	2,9	3
CBR ₂																				
K _{Ref} ou K _S	0,72	0,75	0,76	0,78	0,8	0,82	0,83	0,85	0,86	0,88	0,9	0,91	0,92	0,94	0,95	0,96	0,97	0,98	0,99	1

Tabela 1: Coeficiente de equivalência estrutural em função do CBR

K_R, K_B, K_S, e K_{Ref} são as designações dos coeficientes estruturais para o revestimento, base, subbase, e reforço, respectivamente.

DIMENSIONAMENTO DE PAVIMENTOS FLEXÍVEIS

DNIT

Coeficientes de equivalência estrutural (K):

Camadas do Pavimento		
Revestimentos	CBUQ	2,0
	PMQ	1,7
	PMF	1,4
	Tratamentos superficiais	1,2
Camadas granulares (não cimentadas, não betuminosas)	Base de macadame hidráulico	1,0**
	Base estabilizada granulometricamente	
	Solo melhorado com cimento	
	Sub-base estabilizada granulometricamente	
Solo-cimento	Sub-base de solo melhorado com cimento	1,0**
	Reforço do subleito	
	RCS 7 dias $> 45 \text{ kg/cm}^2$	1,7
	RCS 7 dias entre 28 e 45 kg/cm^2	1,4
	RCS 7 dias entre 21 e 28 kg/cm^2	1,2

DIMENSIONAMENTO DE PAVIMENTOS FLEXÍVEIS

DNIT

Existem *dimensões mínimas* para o revestimento betuminoso R (considerando $K = 2,00$) em função do número N de operações:

- $N \leq 10^6$ \Rightarrow tratamentos superficiais betuminosos e outros tipos de revestimentos intermediários;

- $10^6 < N \leq 5 \times 10^6$ \Rightarrow $R = 5$ cm;

- $5 \times 10^6 < N \leq 10^7$ \Rightarrow $R = 7,5$ cm;

- $10^7 < N \leq 5 \times 10^7$ \Rightarrow $R = 10,0$ cm;

- $N > 5 \times 10^7$ \Rightarrow $R = 12,5$ cm.

DIMENSIONAMENTO DE PAVIMENTOS FLEXÍVEIS

A espessura total de pavimento é dada em função do N e da capacidade de suporte (CBR ou $IS =$ Índice de Suporte dado como a média do $IS_{CBR} = CBR$ e o IS_{IG} que é tabelado de acordo com o IG, notando que $IS \leq IS_{CBR}$), em termos de base granular ($K = 1,00$).

Entra-se com o valor de N na abscissa e traçam-se uma reta vertical até atingir o valor de suporte em causa.

A ordenada correspondente é a espessura do pavimento necessária para proteger um material com o CBR utilizado.

A hipótese neste método é de drenagem adequada e lençol subterrâneo rebaixado em relação ao greide.

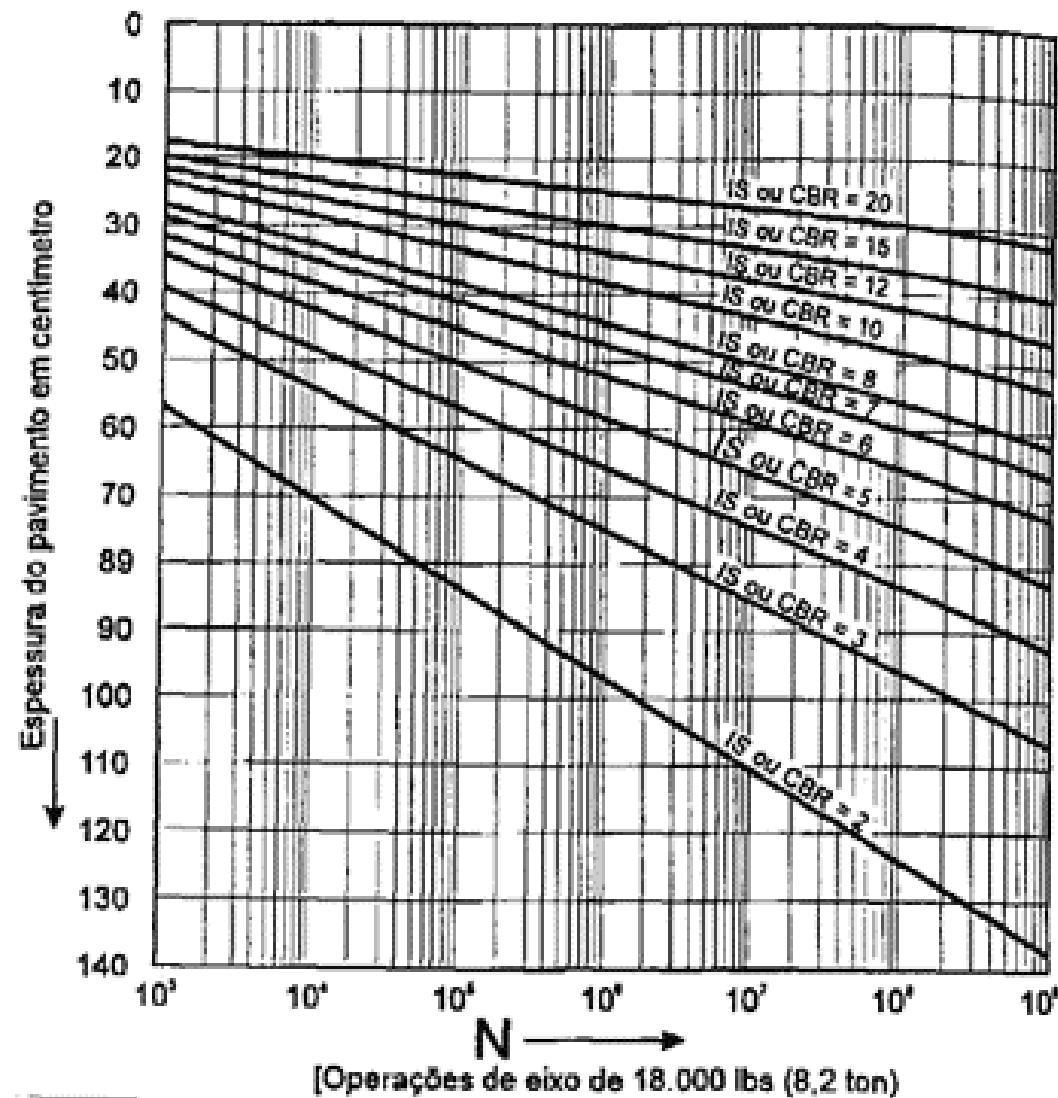


Fig. 1: Espessura do pavimento em cm

DIMENSIONAMENTO DE PAVIMENTOS FLEXÍVEIS

OBSERVAÇÕES:

- No caso de CBR inferior a 2 é recomendável fazer-se substituição do material;
- Espessura mínima para camada granular é de 15 cm;
- H_m designa espessura total de pavimento para proteger um material com CBR ou $IS=m$;
- h_n designa a espessura da camada do pavimento com CBR ou $IS = n$;
- Mesmo que o CBR ou IS da subbase seja > 20, a espessura de pavimento necessária para protegê-la é determinada como se o valor fosse 20;
- B = espessura de base e R = espessura de revestimento;

A espessura do acostamento está de antemão condicionada a pista de rolamento, podendo ser feita uma redução na camada de revestimento (R).

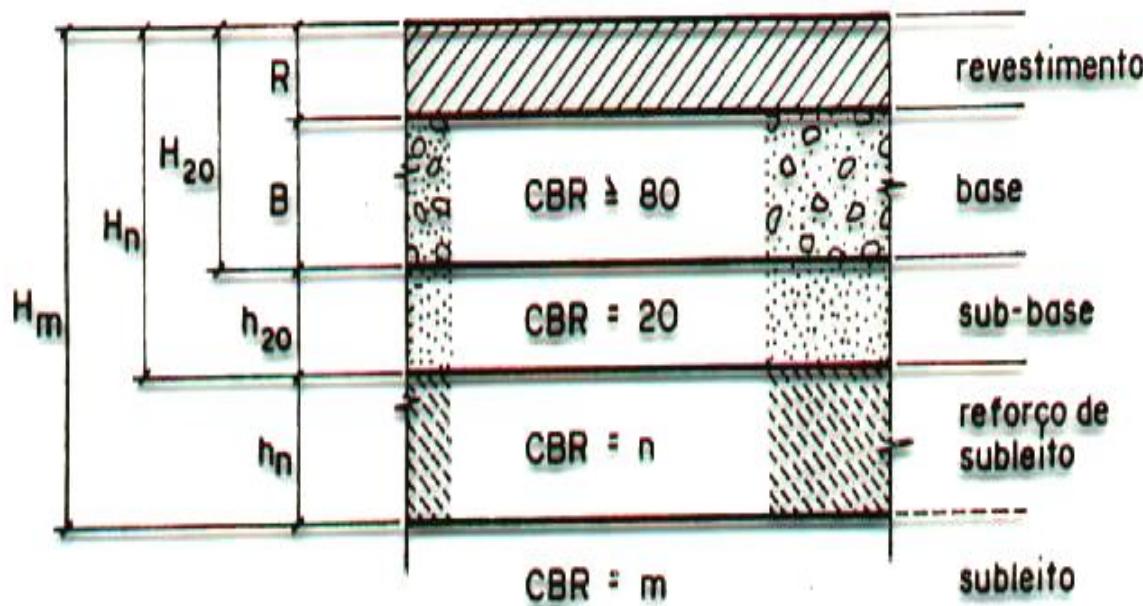
Determina-se de acordo com a Figura 1 as espessuras H_m , H_n , e H_{20} . R é determinada de acordo com as especificações de espessura mínima para o revestimento. As espessuras B , h_n , e h_{20} são obtidas pela resolução das seguintes inequações:

$$R K_R + B K_B \geq H_{20}$$

$$R K_R + B K_B + h_{20} K_S \geq H_n$$

$$R K_R + B K_B + h_{20} K_S + h_n K_{Ref} \geq H_m$$

Esquema para dimensionamento



$$R K_R + B K_B \leq H_{20}$$

$$R K_R + B K_B + h_{20} K_S \leq H_n$$

$$R K_R + B K_B + h_{20} K_S + h_n K_{Ref} \leq H_m$$

DIMENSIONAMENTO DE PAVIMENTOS FLEXÍVEIS

Exemplo

Dados: Tráfego: $N = 10^6$;

Subleito: $CBR = 3\%$;

Reforço do subleito: $CBR = 9\%$;

Subbase: $CBR = 20\%$;

Base: $CBR = 60\%$.

Dimensionar o pavimento considerando um revestimento betuminoso por penetração.

RESOLUÇÃO

Dados:

Tráfego: $N = 10^6$;

Subleito: $CBR = 3\%$;

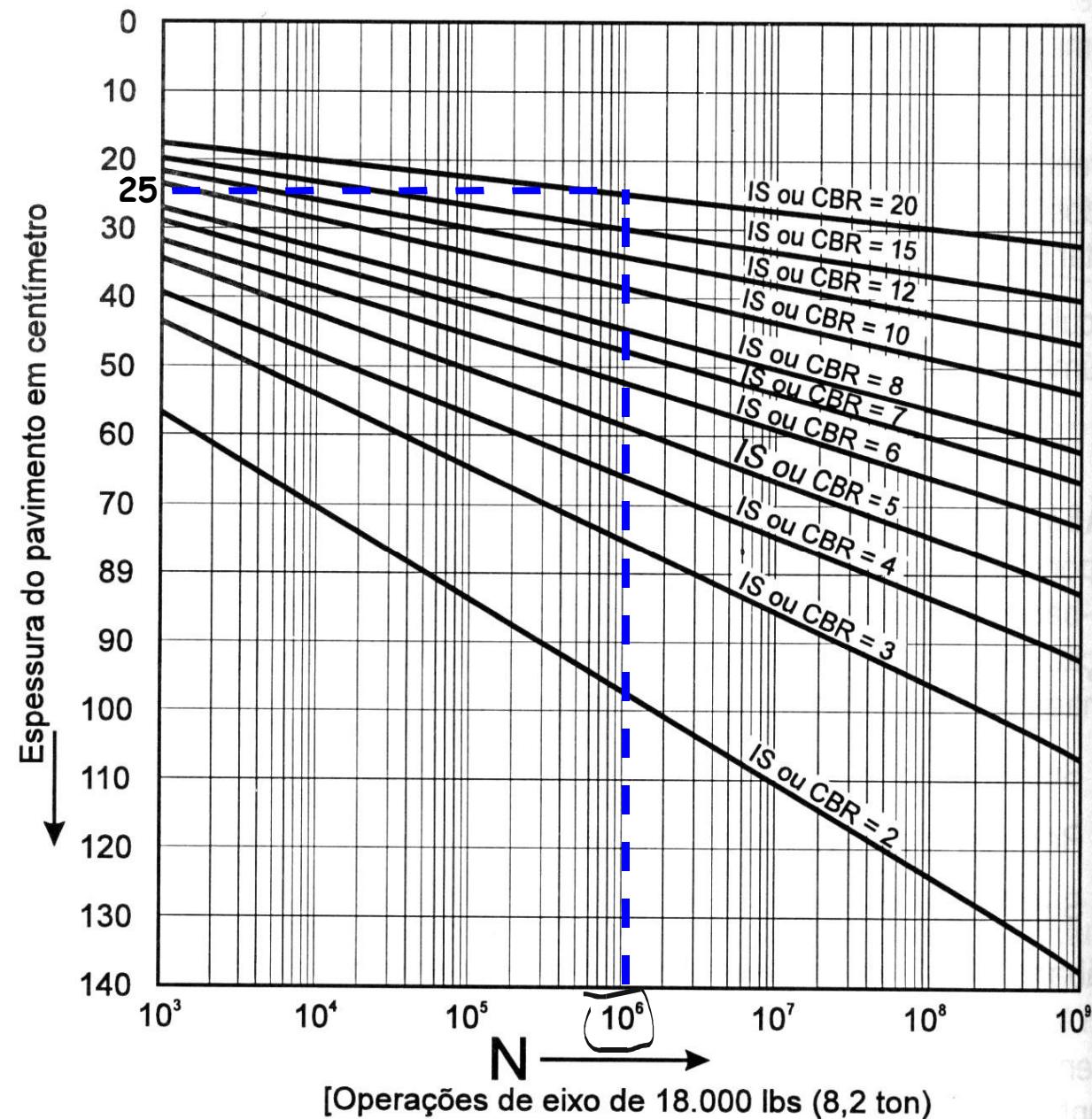
Reforço do subleito: $CBR = 9\%$;

Subbase: $CBR = 20\%$;

Base: $CBR = 60\%$.

Subbase (CBR = 20)

$H_{20} = 25 \text{ cm}$



RESOLUÇÃO

Dados:

Tráfego: $N = 10^6$;

Subleito: $CBR = 3\%$;

Reforço do subleito: $CBR = 9\%$;

Subbase: $CBR = 20\%$;

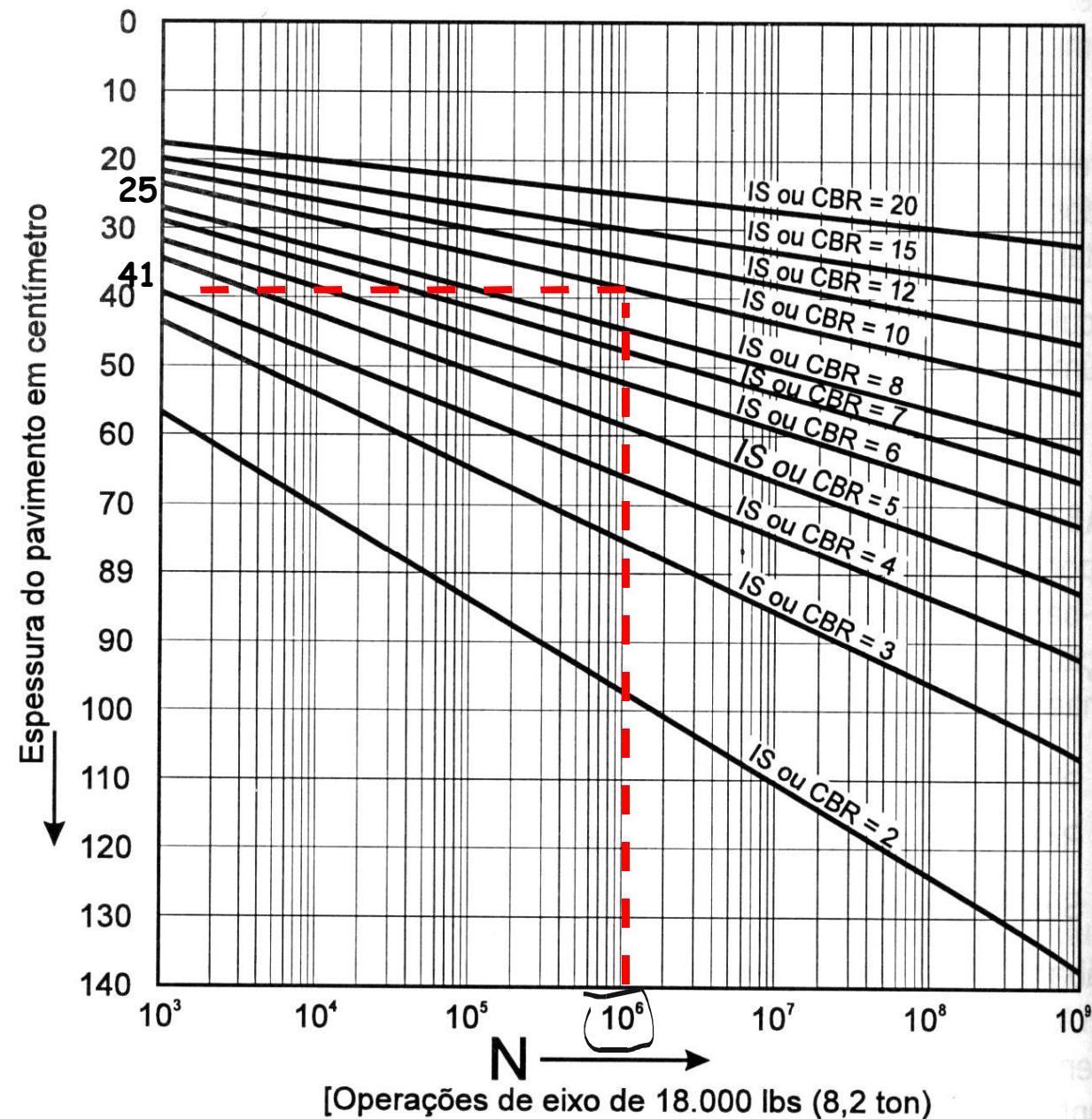
Base: $CBR = 60\%$.

Subbase (CBR = 20)

$$H_{20} = B + R = 25 \text{ cm}$$

Reforço (CBR = 9)

$$H_9 = 41 \text{ cm}$$



RESOLUÇÃO

Dados:

Tráfego: $N = 10^6$;

Subleito: $CBR = 3\%$;

Reforço do subleito: $CBR = 9\%$;

Subbase: $CBR = 20\%$;

Base: $CBR = 60\%$.

Subbase (CBR = 20)

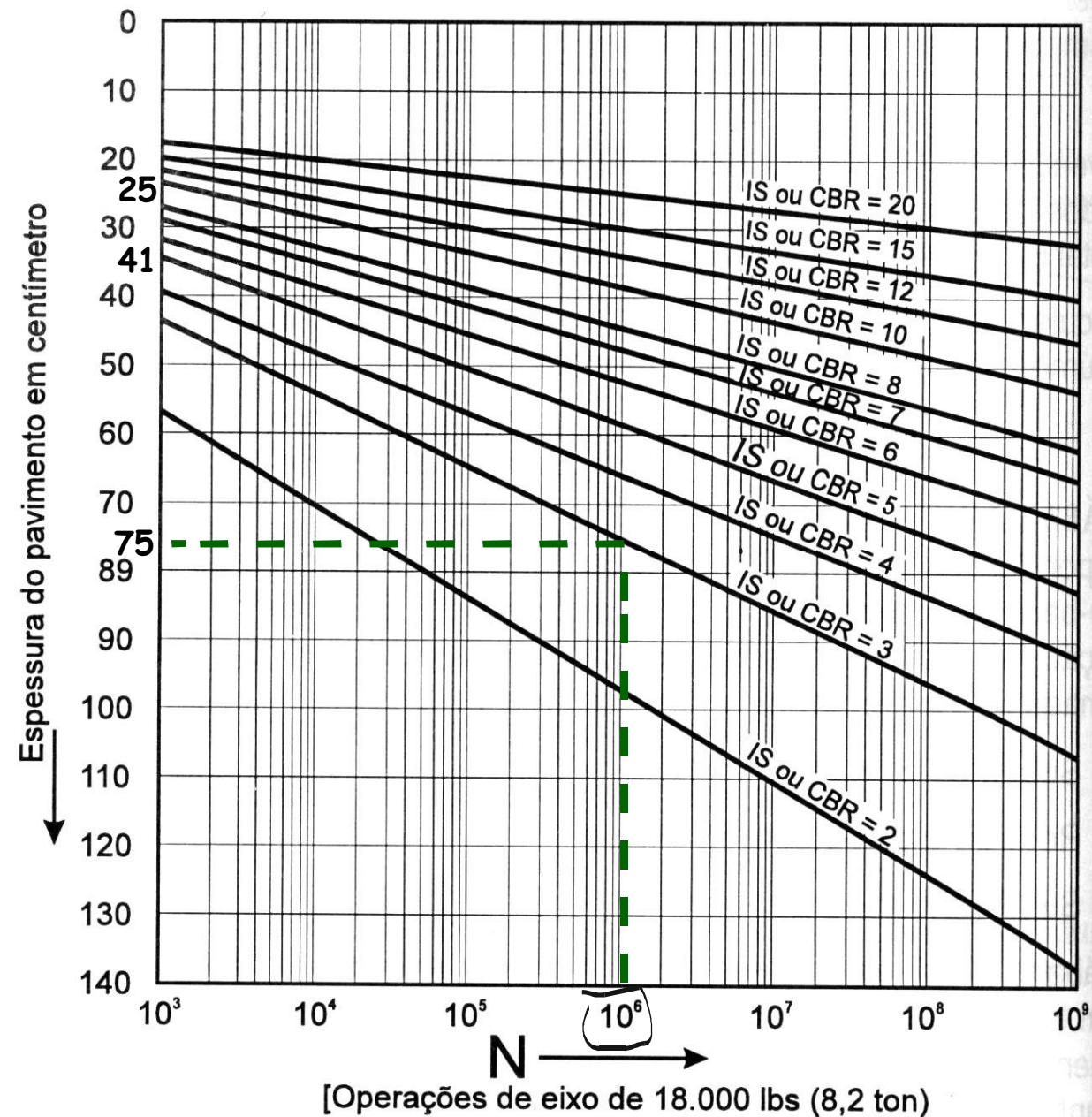
$H_{20} = 25 \text{ cm}$

Reforço (CBR = 9)

$H_9 = 41 \text{ cm}$

Subleito (CBR = 3)

$H_3 = 75 \text{ cm}$



RESOLUÇÃO

Dados:

Tráfego: $N = 10^6$;

Subleito: $CBR = 3\%$;

Reforço do subleito: $CBR = 9\%$;

Subbase: $CBR = 20\%$;

Base: $CBR = 60\%$.

Para proteger subbase ($CBR = 20$) precisa-se de:

$$H_{20} = 25 \text{ cm} \text{ (direto do gráfico)}$$

Para proteger reforço ($CBR = 9$) precisa-se de:

$$H_9 = 41 \text{ cm} \text{ (direto do gráfico)}$$

Para proteger subleito ($CBR = 3$) precisa-se de:

$$H_3 = 75 \text{ cm} \text{ (direto do gráfico)}$$

Base:

Revestimento betuminoso por penetração ($K = 1,2$); camadas granulares ($K = 1,0$).

$$R \times K_R + B \times K_B \geq H_{20}$$

$$2,5 \times 1,2 + B \times 1,0 \geq 25 \text{ cm} \therefore B \geq 25 - 3 = 22 \text{ cm}$$

Sub-base:

$$R \times K_R + B \times K_B + h_{20} \times K_S \geq H_n$$

$$2,5 \times 1,2 + 22 \times 1,0 + h_{20} \times 1,0 \geq 41 \text{ cm} \therefore h_{20} \geq 41 - 25 = 16 \text{ cm}$$

Reforço do Subleito:

$$R \times K_R + B \times K_B + h_{20} \times K_S + h_n \times K_{Ref} \geq H_m$$

$$2,5 \times 1,2 + 22 \times 1,0 + 16 \times 1,0 + h_9 \times 1,0 \geq 75 \text{ cm} \therefore h_9 \geq 75 - 41 = 34 \text{ cm}$$

Este defeito não é considerado neste tipo de dimensionamento !!!



O que é o CBR?

Ensaio de penetração CBR (1929) é um marco na história da engenharia de pavimentação mundial: concepção simples, equipamento portátil, embora empírico, teve ampla divulgação em todo mundo e deu origem a vários métodos de dimensionamento também empíricos.

Estabeleceu-se que para um dado valor de CBR do subleito, existe uma espessura de pavimento que protege este subleito de deformações excessivas ou mesmo de ruptura. As primeiras observações foram de trechos de estradas da Califórnia na década de 1920, umas de desempenho satisfatório e outras que se romperam em pouco tempo.

O que é o CBR?

- “ CBR ou ISC . Índice de Suporte Califórnia
- “ Ensaio criado em 1929 pelo Eng. Porter do DOT da Califórnia (EUA)
- “ Durante a 2^a Guerra Mundial: introduzido no Brasil e várias partes do mundo pelo Exército Norte-americano

Fases do ensaio

- Compactação / moldagem do corpo de prova nas densidade e umidade de projeto (Proctor Normal, Intermediário e Modificado)
- Dimensões: diâmetro de 150 mm por 125 mm de altura



Fases do ensaio

- “ Imersão do corpo de prova por 96 horas (4 dias)
 - . Aplicação de sobrecarga padrão de 10 libras



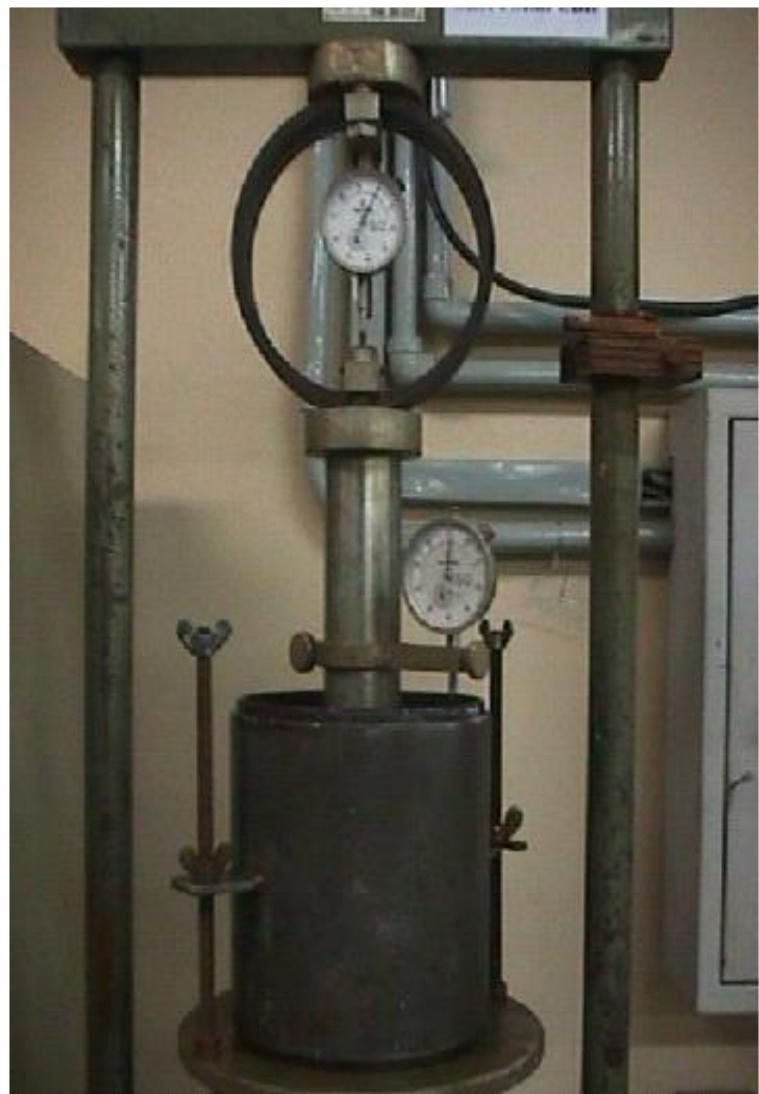
Fases do ensaio

- “ Determinação da expansão axial a cada 24 horas, pelo menos

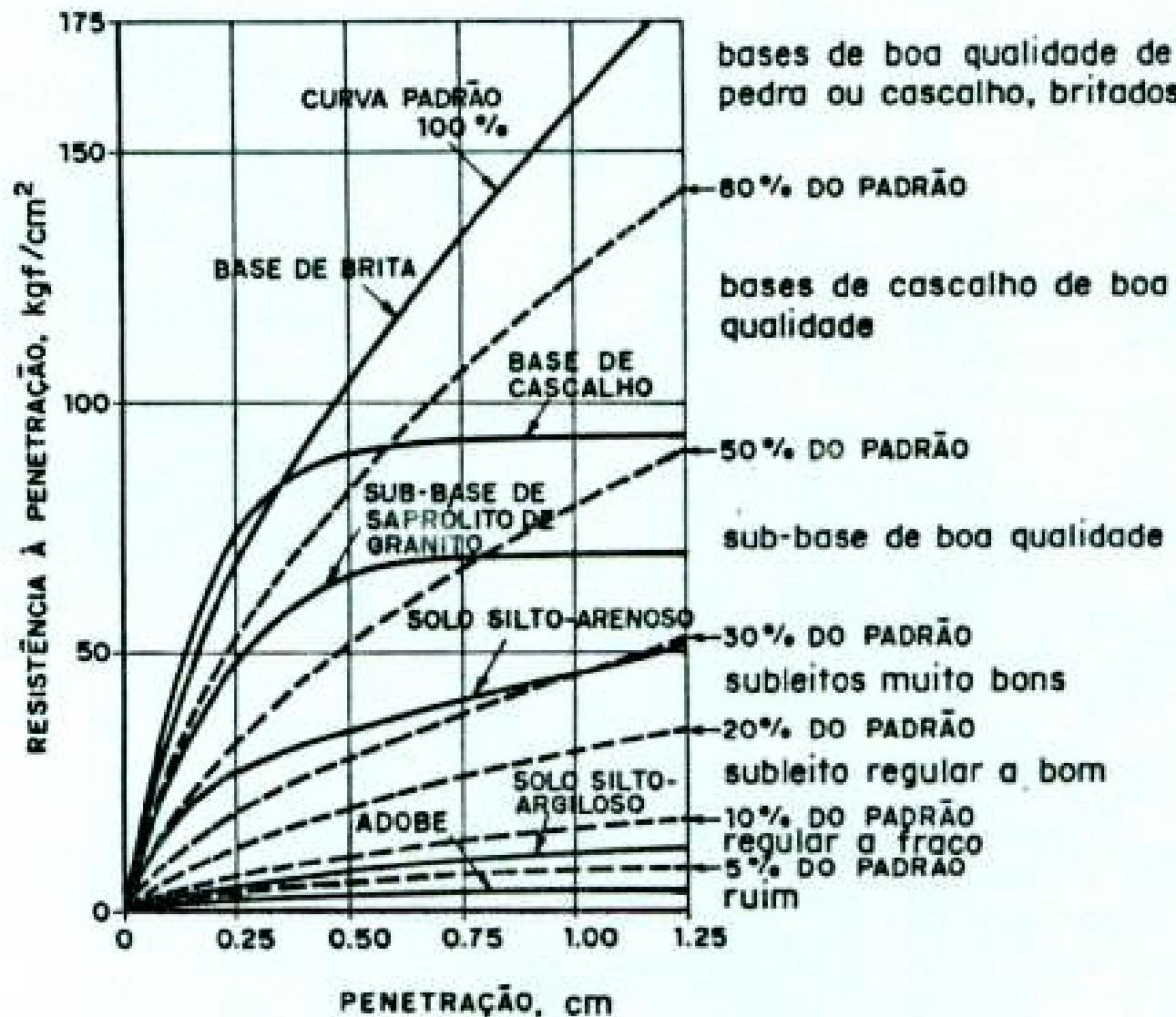


Fases do ensaio

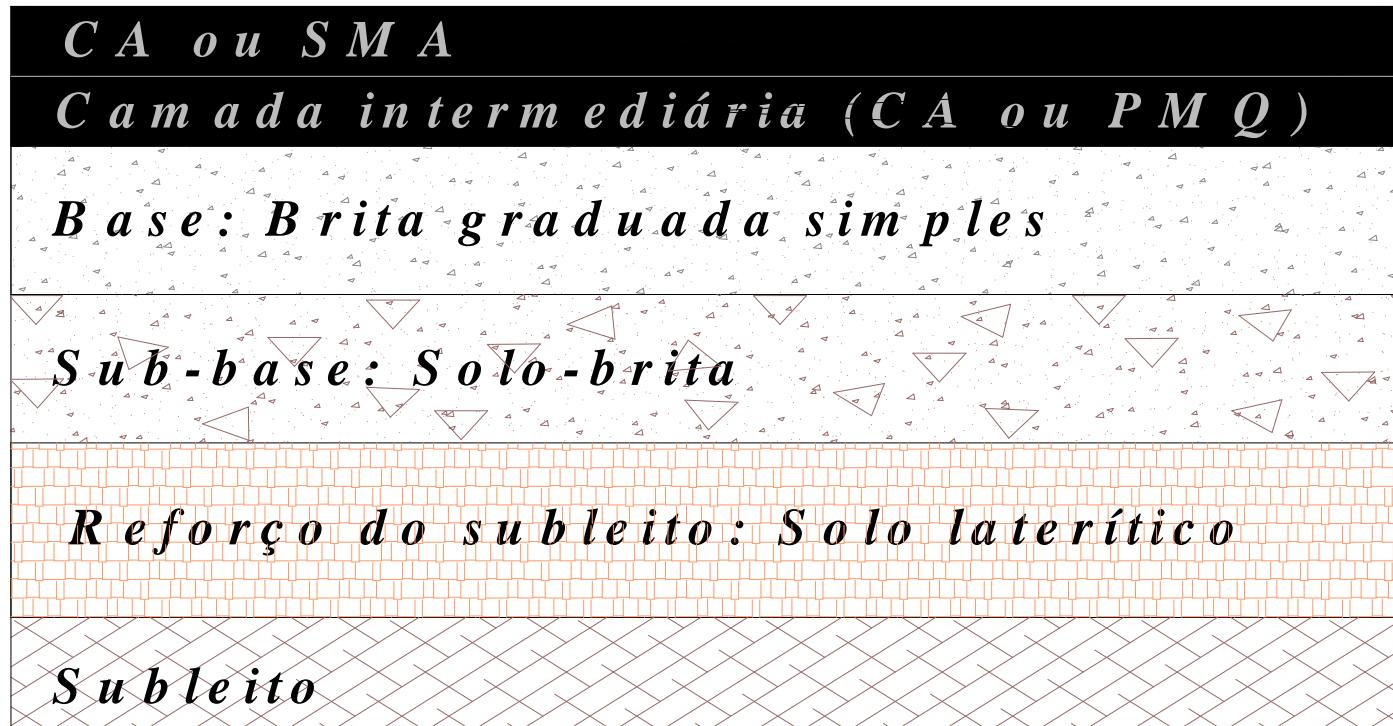
- ” Ruptura na prensa (penetração), após período de imersão
 - . Velocidade: 1,25 mm/min
 - . Punctionamento por cilindro de 50 mm de diâmetro
 - . Anotam-se deslocamento e carga ao longo do ensaio
- ” $ISC_{0,1+} = 100 \times P_{0,1} / 70$
- ” $ISC_{0,2+} = 100 \times P_{0,2} / 105$
- ” P = pressão em kg/cm²
- 70 e 105 são cargas encontradas em materiais de referência . britas da Califórnia.
- O ISC será o maior entre os dois valores.



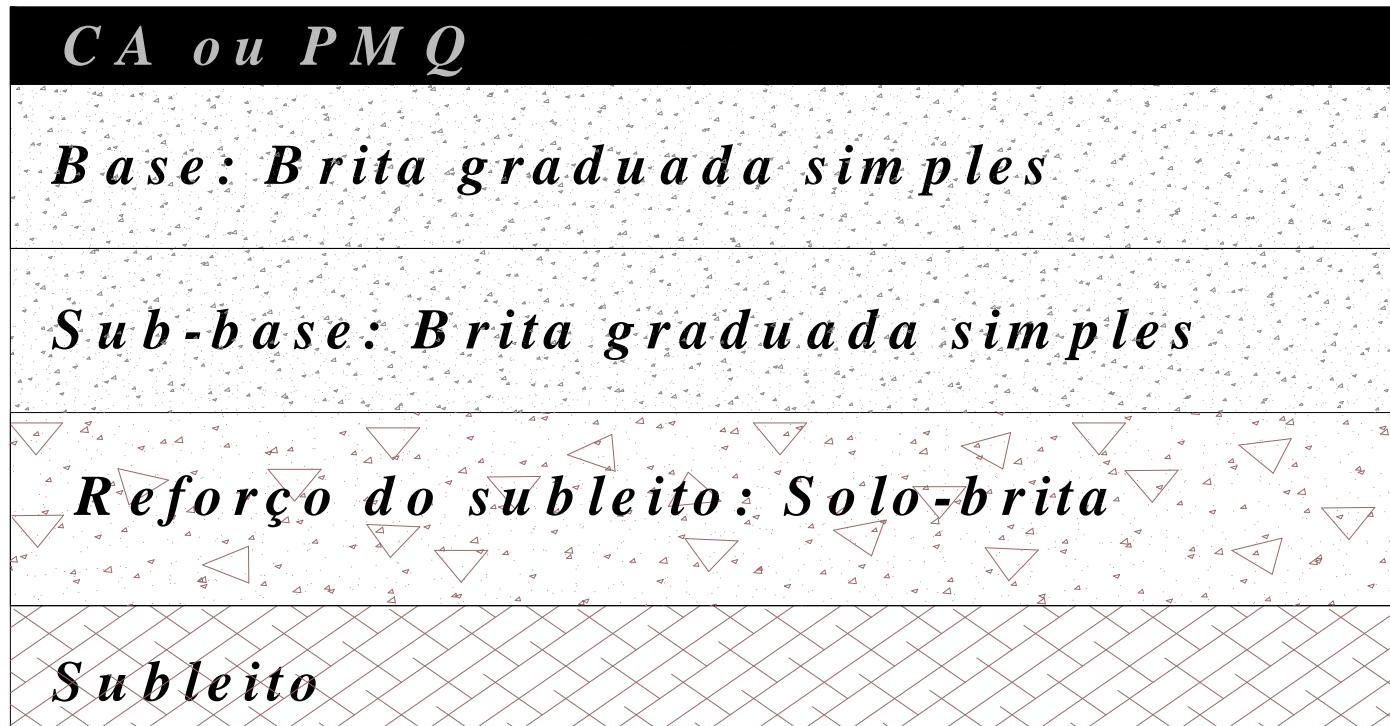
Curvas Típicas do ensaio CBR



Algumas estruturas típicas



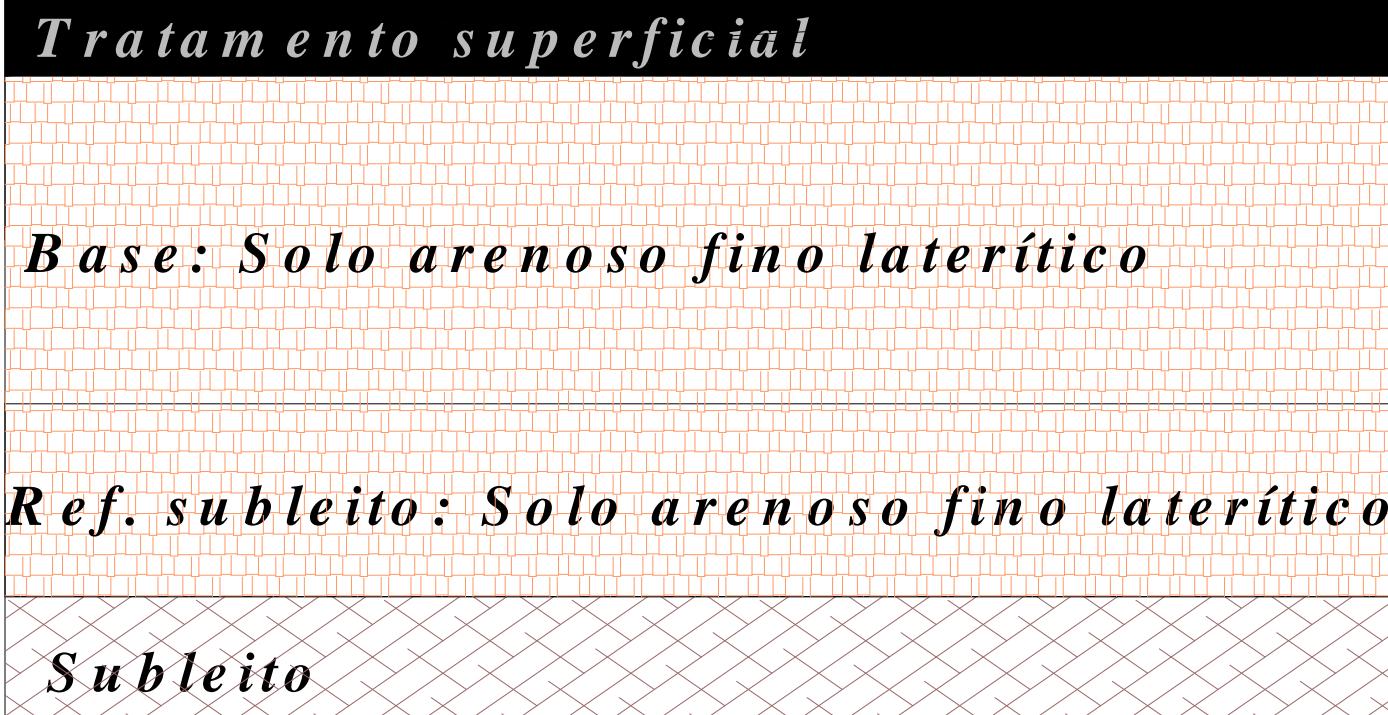
Algumas estruturas típicas



Algumas estruturas típicas



Estruturas típicas bvt



Mecânica dos Pavimentos, Análise Estrutural e Comportamento Mecânico dos Materiais de Pavimentação

Conceitos Básicos

Luis A. Herrmann do Nascimento

DIMENSIONAMENTO DE PAVIMENTOS FLEXÍVEIS

O enfoque sócio-econômico dado à questão de dimensionamento de estruturas de pavimentos objetiva definir as categorias de rodovias em função dos serviços prestados aos usuários, expressos pelos seguintes parâmetros:

- **Segurança** da rodovia - relativa às boas condições de regularidade, drenagem e aderência;
- **Regularidade** dos serviços - a manutenção da rodovia pode ocasionar interrupção do tráfego;
- **Conforto** do usuário - tratamento visual, nível de ruído e boas condições da superfície de rolamento.

O dimensionamento de um pavimento tem como objetivo calcular e/ou verificar **espessuras e compatibilizar os materiais** de forma que a vida útil corresponda a um certo número projetado de repetições de carga.

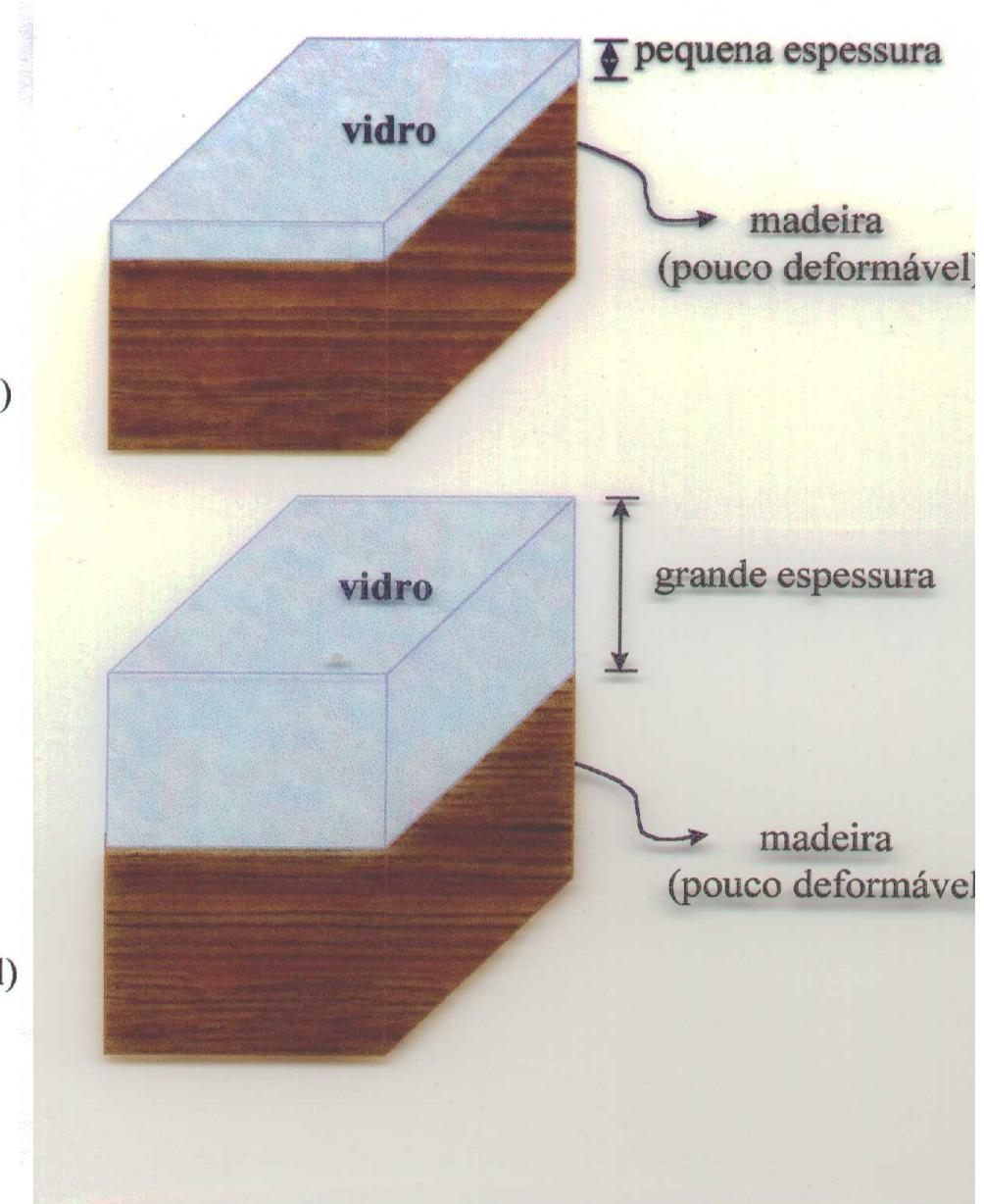
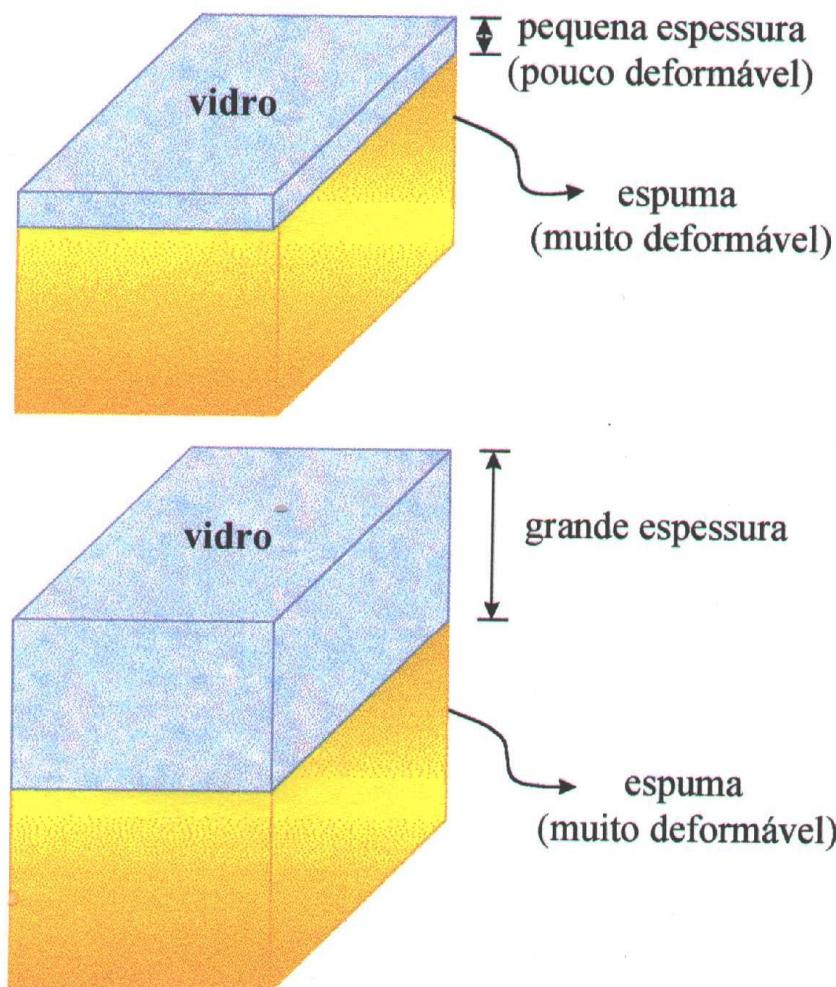
A vida útil de um pavimento é o período após o qual este atinge um grau inaceitável de deterioração, quer sob o aspecto **estrutural**, quer sob o aspecto **funcional**. O fissuramento generalizado do revestimento asfáltico, por exemplo, pode indicar o fim da sua vida útil. Não existe ruptura súbita em um pavimento, e sim, uma lenta progressão de defeitos ao longo dos anos, em função da qualidade dos materiais, tráfego e clima, e, principalmente, da repetição de deformações resilientes e do acúmulo de deformações permanentes.

DIMENSIONAMENTO DE PAVIMENTOS FLEXÍVEIS

Para prever o desempenho de pavimentos necessita-se de um grande número de simplificações. O dimensionamento dos pavimentos pode ser abordado fundamentalmente através de 2 métodos:

- Os mecanísticos consideram a análise das **tensões e deformações** em meios não perfeitamente elásticos (solos e misturas asfálticas) e compararam estas respostas da estrutura com critérios pré-estabelecidos de dimensionamento para determinar as espessuras das camadas do pavimento. Na verdade, não existe um método puramente mecanístico.
- Os empíricos se baseiam em experiências repetidas várias vezes no campo e se limitam a prever espessuras adequadas, garantindo assim o critério de ruptura por deformação permanente e têm como melhor fundamento o método originado do trabalho inicial de O. J. Porter, antigo engenheiro do Departamento de Estradas de Rodagem da Califórnia. Inicialmente conhecido como método Califórnia e posteriormente como do USACE (Corpo de Engenheiros do Exército dos Estados Unidos), este método se baseia no ensaio CBR que foi o ponto de partida para a evolução da engenharia rodoviária mundial. O USACE já o reviu outras vezes, desde a sua criação.

Compatibilização de estruturas

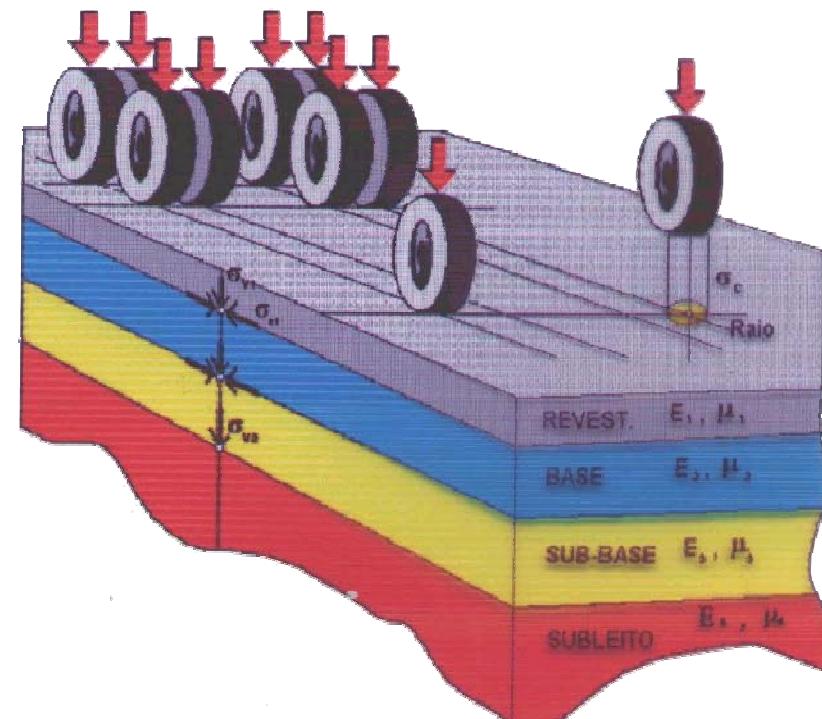


MÉTODO DE DIMENSIONAMENTO MECANÍSTICO-EMPÍRICO

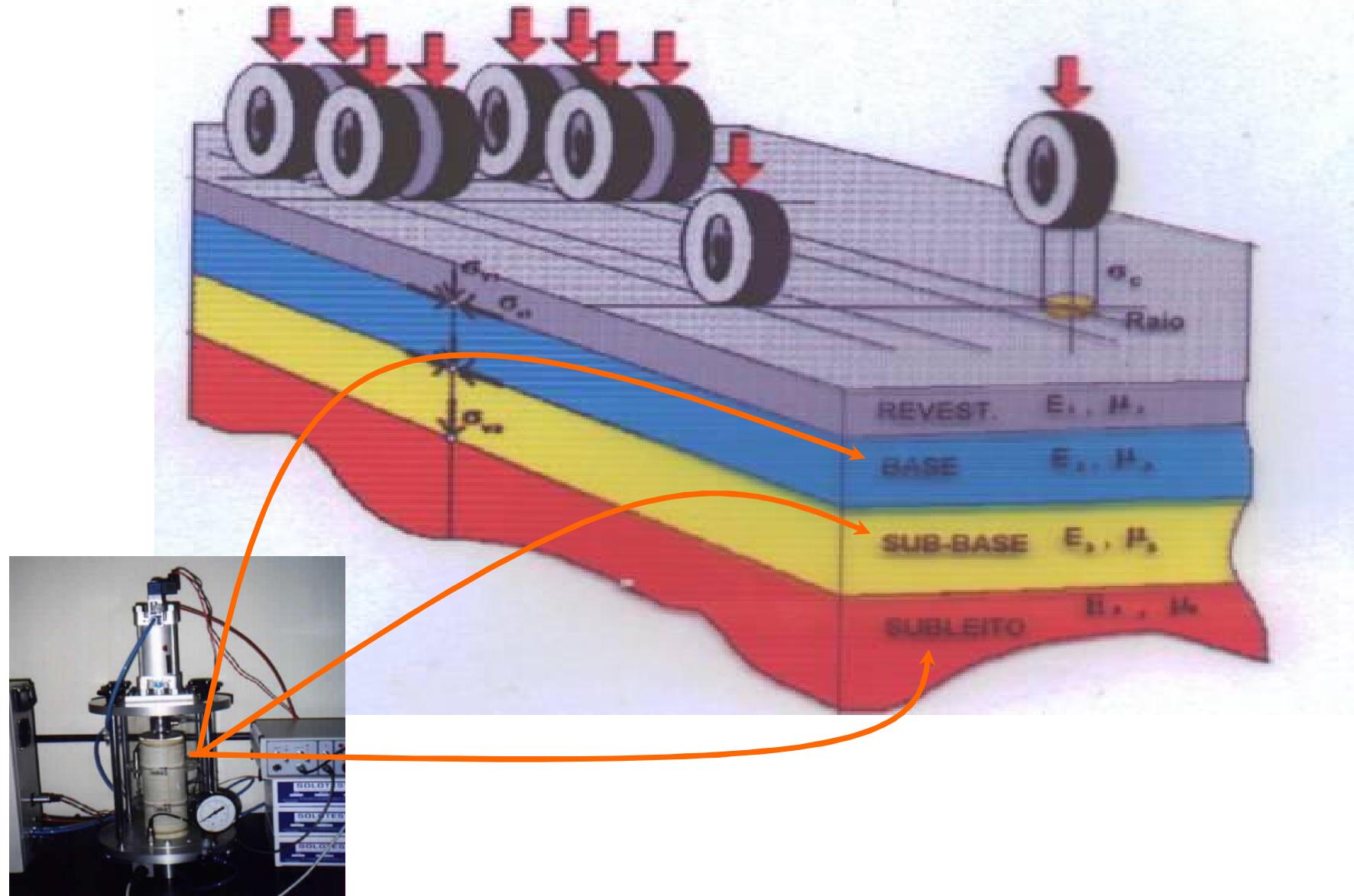
Até a década de 70, os métodos de dimensionamento empregados no Brasil enfocavam, sobretudo, a capacidade de suporte dos pavimentos retratada através do **CBR** das subcamadas.

Em virtude da apresentação de uma **prematura deterioração** da malha rodoviária, foi introduzido no país o estudo da **resiliência** dos materiais de pavimentação, permitindo analisar **o comportamento estrutural** até então não explicável pelos métodos empíricos clássicos de dimensionamento.

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.



Módulo de Resiliência ?



Ensaios - Mecânica dos Solos

Montagem dos corpos de prova



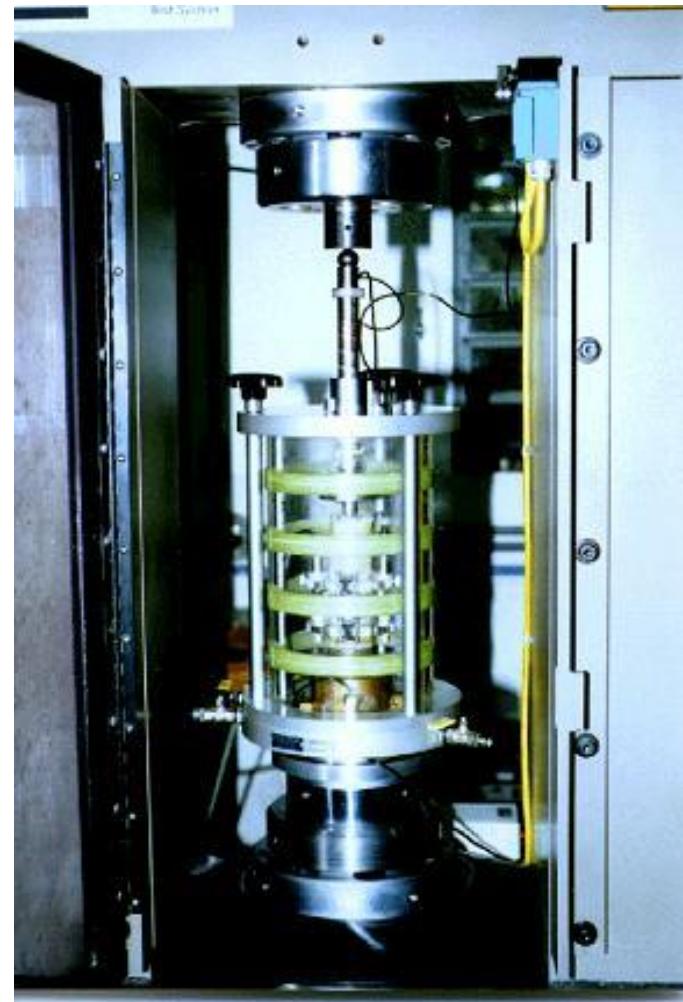
corpos de prova 10x20

Ensaios - Mecânica dos Solos

Execução do ensaio



Câmara triaxial corpo de prova 10x20



Câmara triaxial corpo de prova 5x10

Ensaios - Mecânica dos Solos

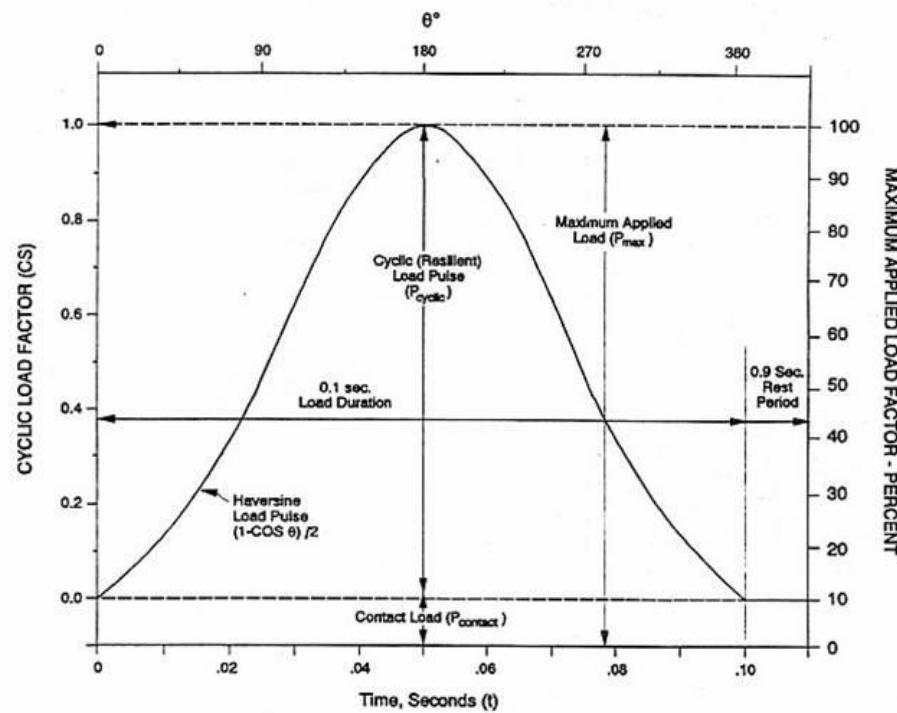


FIGURE 1. Definition of Resilient Modulus Terms

Tipo de carregamento utilizado

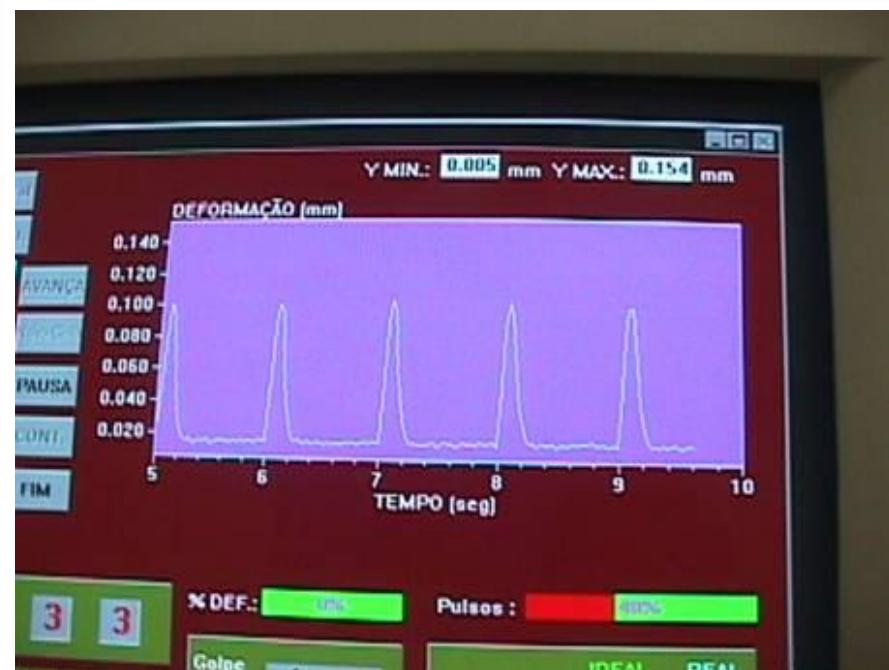


Gráfico dos deslocamentos

Ensaios - Mecânica dos Solos

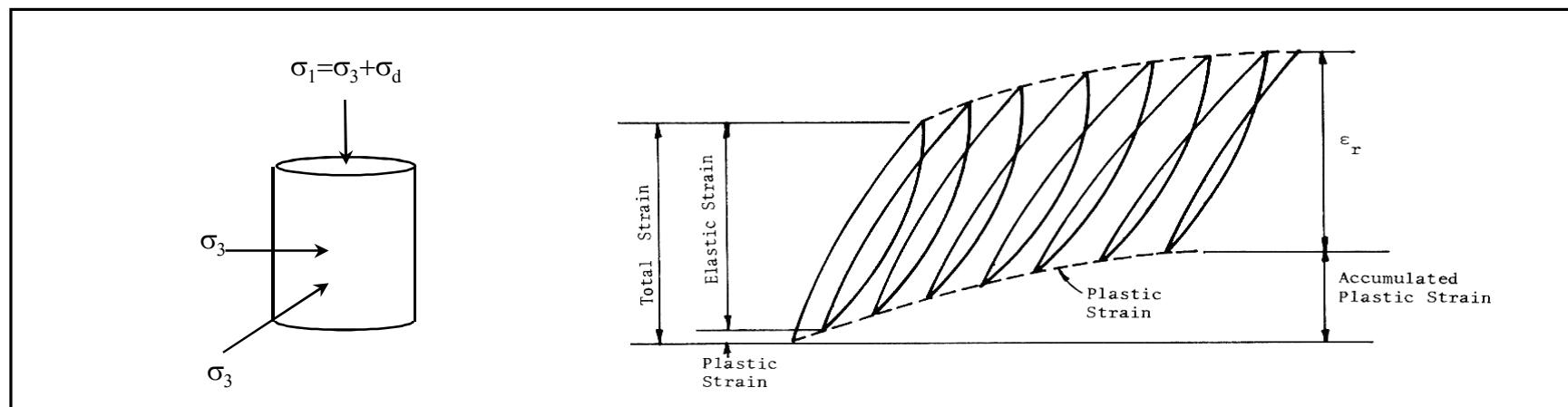
No período inicial pós-construção, carregamentos variados e repetidos, provenientes de veículos com diferentes pesos, provocam no pavimento **deformações permanentes**. Após este período, os pavimentos adquirem um comportamento tensão-deformação **aproximadamente constante**.

Para determinar o MR:

$$MR = \sigma_d / \varepsilon_r$$

onde,

- σ_d = tensão desvio;
- ε_r = deformação específica axial resiliente (recuperável).



História da deformação no ensaio de carga repetida

MÉTODO DE DIMENSIONAMENTO MECANÍSTICO-EMPÍRICO

O **método da resiliência** objetiva proporcionar melhores parâmetros de projeto e uma consideração mais **racional do dimensionamento** de pavimentos, obtidos através da utilização de **ensaios dinâmicos** de caracterização de materiais de pavimentos e da análise não-linear de sistemas em camadas.

O dimensionamento dos **sistemas em camadas** usando teorias elásticas possibilita a **compatibilização das espessuras** com as **características dos materiais**, podendo-se obter nos materiais disponíveis, e para as condições climáticas locais, a melhor distribuição de tensões.

Os fatores envolvidos nos métodos de dimensionamento são tratados de formas diferenciadas: nos **mecanísticos**, eles são **probabilísticos**, enquanto que nos **empíricos** são **determinísticos**.

Nos **revestimentos**, utiliza-se o **módulo de resiliência** ao invés da **estabilidade Marshall** usado no empírico do DNER.

Os ensaios de compressão diametral determinam os **MR** e a **RT**, enquanto o número **N** admissível para o dimensionamento é obtido no **ensaio de fadiga**, fator determinante no fissuramento dos pavimentos brasileiros



MÉTODO DE DIMENSIONAMENTO MECANÍSTICO-EMPÍRICO

Programas computacionais são utilizados para determinar a resposta da estrutura.

Nos resultados de saída estão os valores de interesse imediato no dimensionamento:

- Deflexão (D); $\log D_{adm} = 3,01 - 0,176 \log N$
- Deformação específica de tração (ε);
- Tensão vertical no subleito (σ_v) $\sigma_{v_{adm}} = 0,006 Mr / (1 + 0,7 \log N)$
- Tensão de tração no revestimento (σ_t), e
- Diferença de tensões no revestimento ($\Delta\sigma$, diferença entre a tensão radial de tração e a tensão vertical de compressão, no primeiro elemento sob a carga, na linha inferior do revestimento).

?



Um critério de confiabilidade pode ainda ser aplicado, estimando-se a média e o desvio padrão da variável dependente em função das variáveis aleatórias independentes sem que seja preciso conhecer as distribuições de probabilidade destas variáveis.

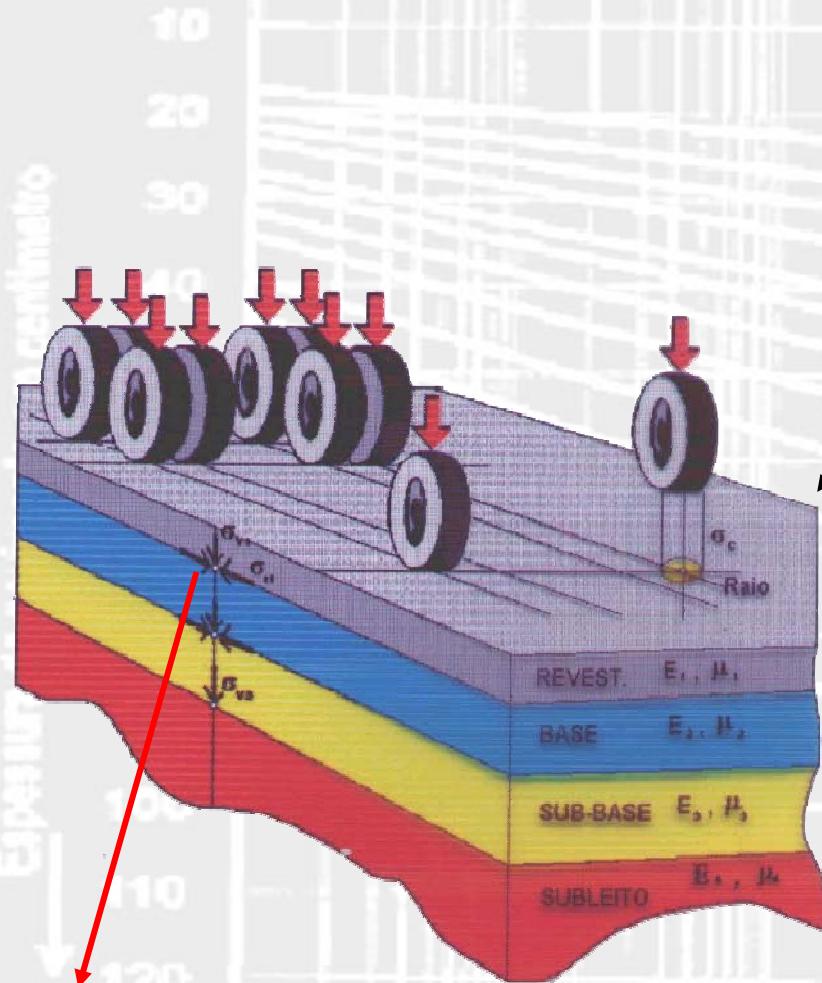
MÉTODO DE DIMENSIONAMENTO MECANÍSTICO-EMPÍRICO

Alguns modelos de CBUQs do Manual de Restauração do DNIT

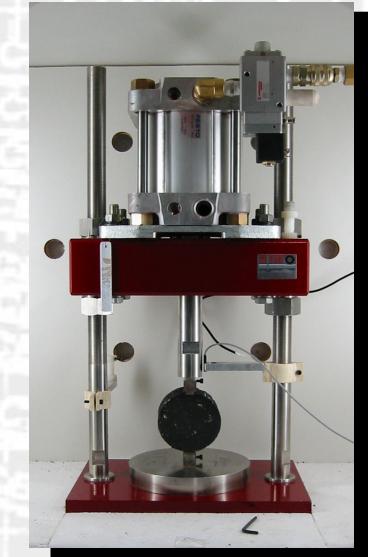
Tabela 58

RODOVIA: BR - 153/MG TRECHO: Entr ^o BR/497 - Entr ^o PATRIMÔNIO												
FÓRMULA GERAL			Nf = 1,67 x 10 ⁷									
Nf = a (1/et) ^b ou et (limite) = A . Nf ^B , em que, A = a ^{1/b}			CAMADA			CBUQ - 8		Binder CBUQ - A				
et (limite) = A . Nf ^B , em que, A = a ^{1/b}			Módulo de rigidez (E)			28.000		22.000				
B = -1/b			Volume de betume - Vb (%)			13,5		14,0				
			Volume de vazios - Vv (%)			4,0		6,0				
nº	AUTORES	a	b	A	B	σt (lim)	et (lim)	σt (lim)	et (lim)			
1	Belgian Road Research Center (BRRC)	4,856 x 10 ⁻¹⁴	4,762	1,6 x 10 ⁻³	-0,21	1,4	4,9 x 10 ⁻⁵	1,1	4,9 x 10 ⁻⁵			
2	Federal Highway Administration (FHWA)	9,7255 x 10 ⁻¹⁵	5,163	1,931 x 10 ⁻³	-0,194	2,1	7,7 x 10 ⁻⁵	1,7	7,7 x 10 ⁻⁵			
3	Transport and Road Research Laboratory (TRRL)	1,71 x 10 ⁻¹⁰	4,32	5,484 x 10 ⁻³	-0,231	3,3	1,2 x 10 ⁻⁴	2,6	1,2 x 10 ⁻⁴			
4	ULLIDTZ (Denmark)	1,41 x 10 ⁻¹⁵	5,62	2,279 x 10 ⁻³	-0,178	3,3	1,2 x 10 ⁻⁴	2,6	1,2 x 10 ⁻⁴			
5	NAASRA (Austrália)	5,76 x 10 ⁻¹³	5,00	3,566 x 10 ⁻³	-0,20	3,6	1,3 x 10 ⁻⁴	2,8	1,3 x 10 ⁻⁴			
6	B.W. Porter/T.W. Kennedy (University of Texas)	1,85 x 10 ⁻⁵	3,04	2,77 x 10 ⁻²	-0,329	3,3	1,2 x 10 ⁻⁴	2,5	1,2 x 10 ⁻⁴			
7	THE ASPHALT INSTITUTE				M -		0,394		0,048			
$M = 4,84 \left(\frac{Vb}{Vv + Vb} - 0,69 \right)$			$a = 18,4 \times 10^M \times 4,325 \times 10^{-3} \times (0,06894/E)^{0,854}$			$a -$		$3,2 \times 10^{-6}$				
			$b = 3,291$			$A -$		$2,1 \times 10^{-2}$				
			$A = a^{1/b} - B = 0,304$			$\epsilon t -$		$3,8$				
8	NIJBOER (SHELL, KSLA)	No Ábaco anexo -				3,5		$1,4 \times 10^{-4}$				
ADOTADOS						1,4		$4,9 \times 10^{-5}$				
						2,6		$1,2 \times 10^{-4}$				

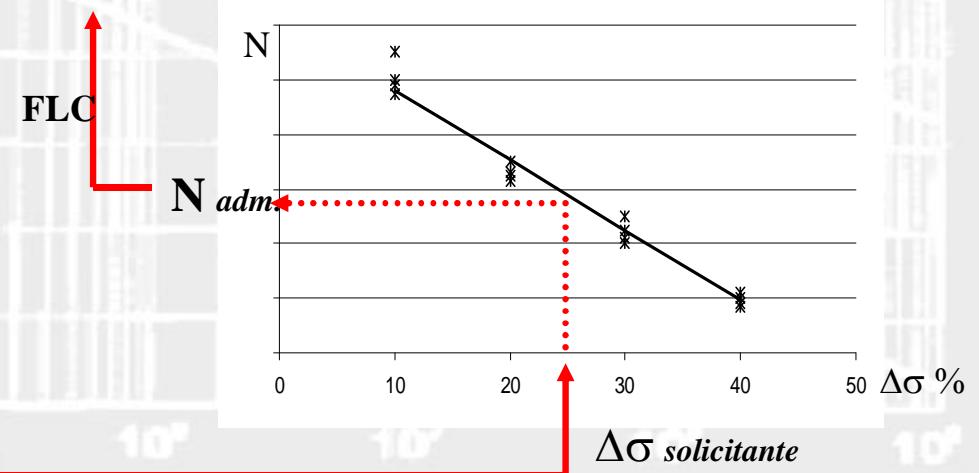
MECÂNICA DOS PAVIMENTOS



$N_{adm.}$ - CAMPO

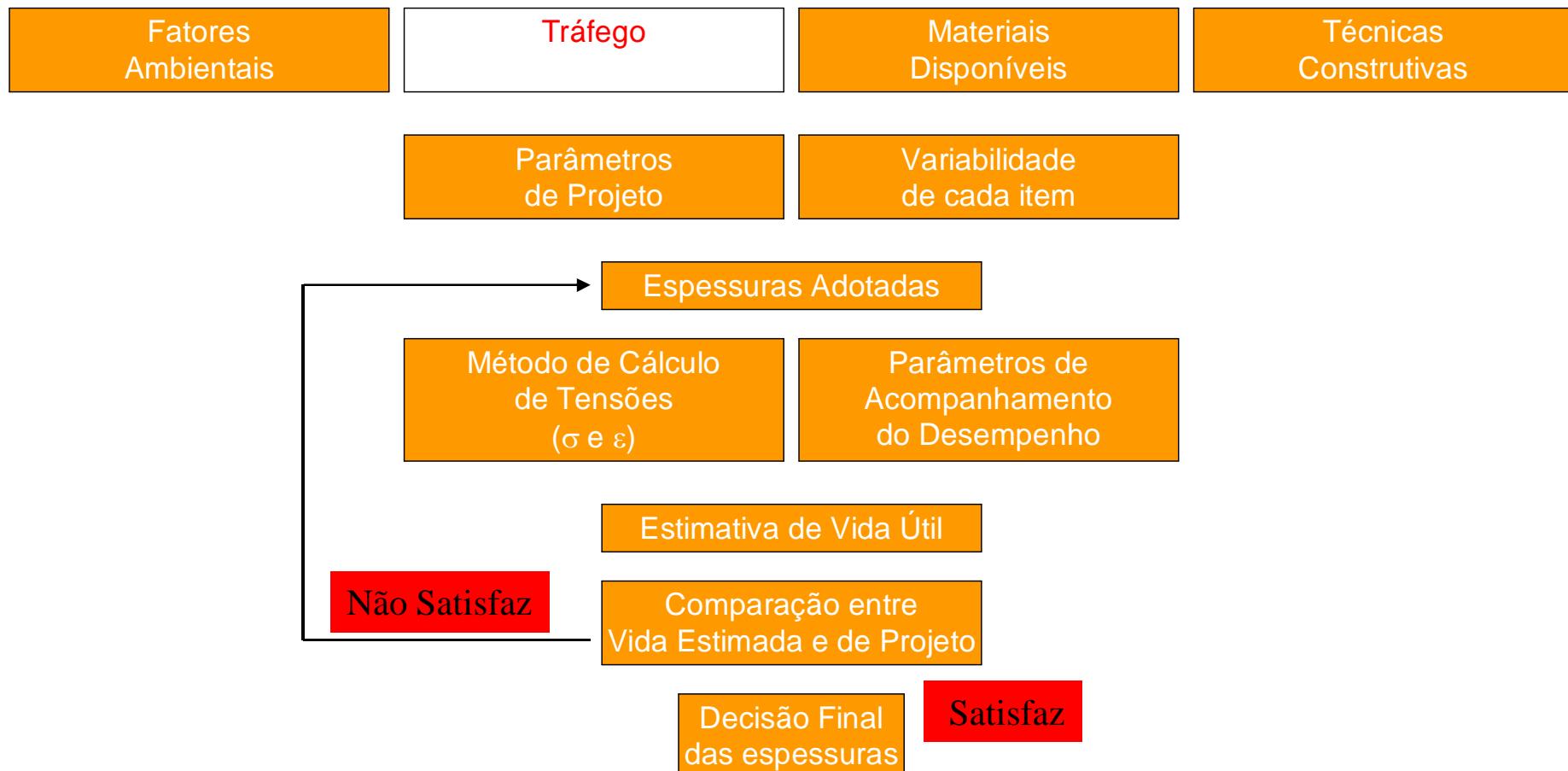


Modelo Fenomenológico

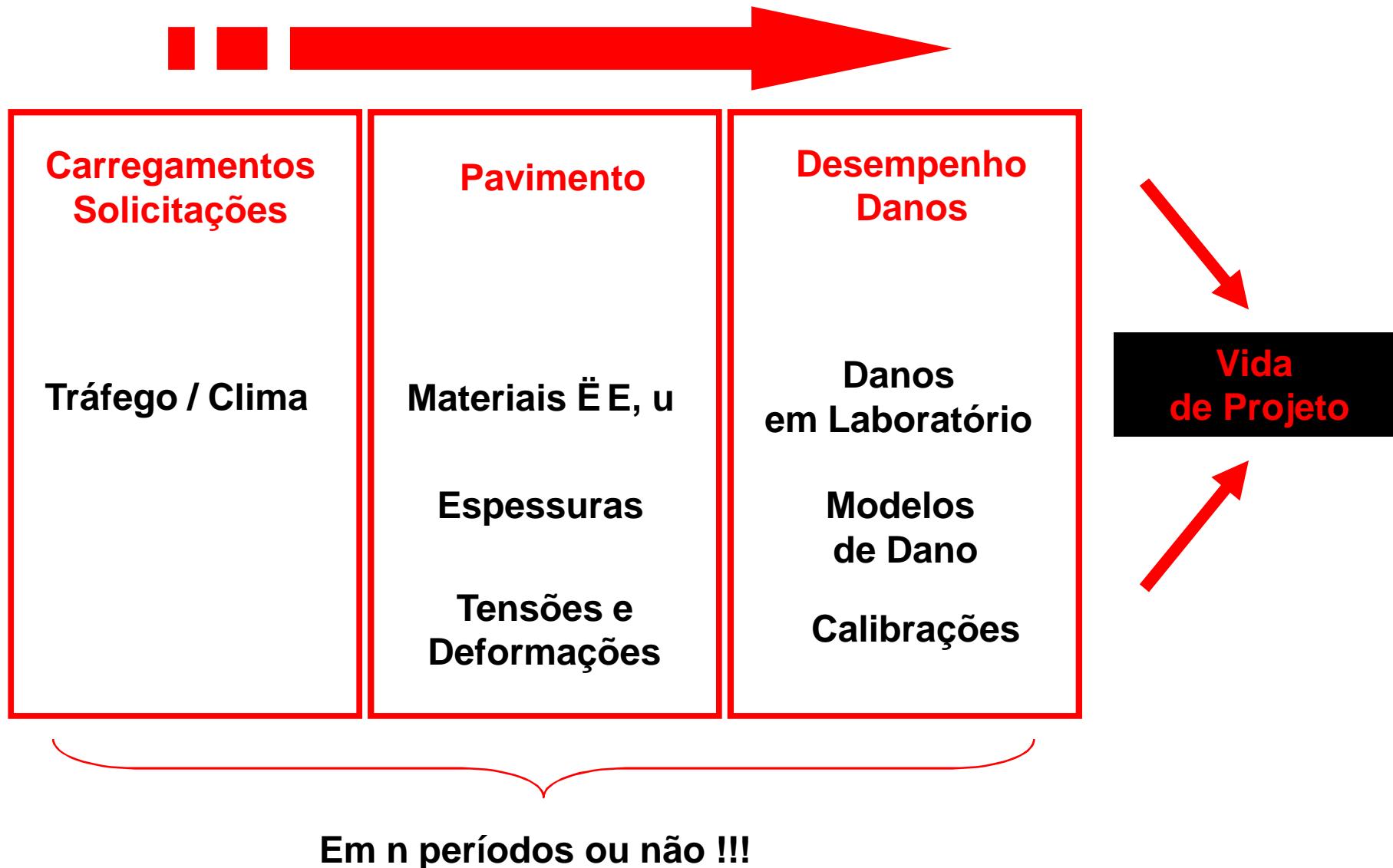


N
(Operações de eixo de 18.000 lbs (8,2 ton))

MÉTODO DE DIMENSIONAMENTO MECANÍSTICO-EMPÍRICO



MÉTODO DE DIMENSIONAMENTO MECANÍSTICO-EMPÍRICO



Mecânica dos Pavimentos

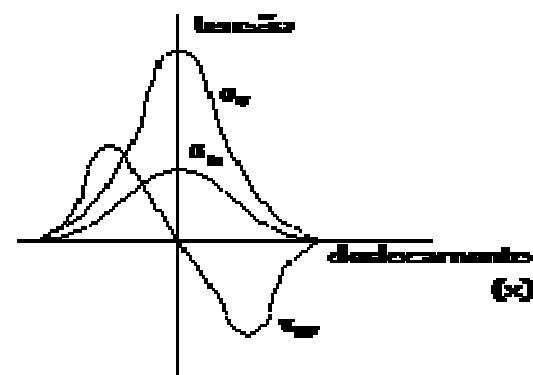
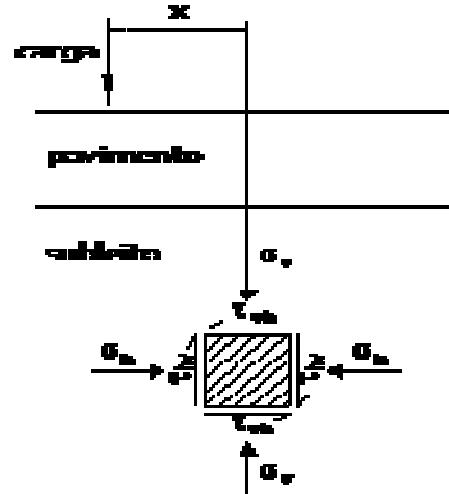
Comportamento Mecânico dos Materiais

Luis Alberto Herrmann do Nascimento

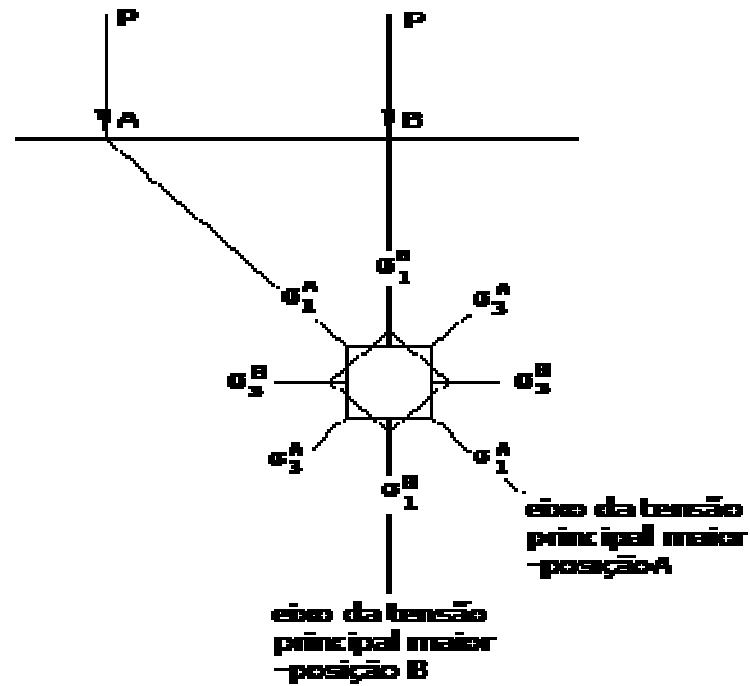
Dimensionamento Mecanístico



Tensões devido a uma carga



(a) - Tensões normais e tangenciais



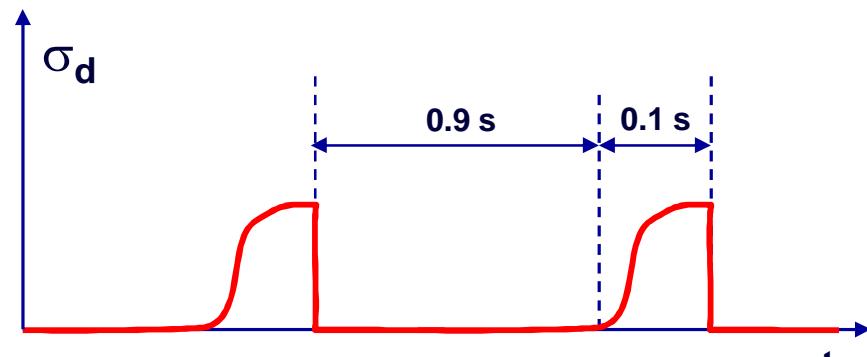
(b) - rotação dos planos principais

DEFORMABILIDADE DE SOLOS E AGREGADOS

LIMITAÇÕES DOS
ENSAIOS
ESTÁTICOS
CONVENCIONAIS

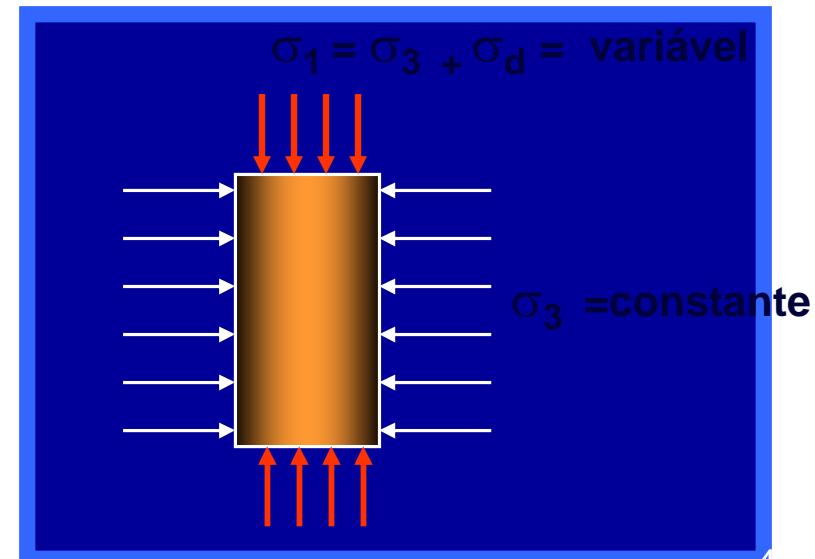
- 1) pequenas deformações na ruptura
- 2) CBR → ruptura localizada
- 3) pavimentos → carregamento repetido

PULSOS DE CARGA

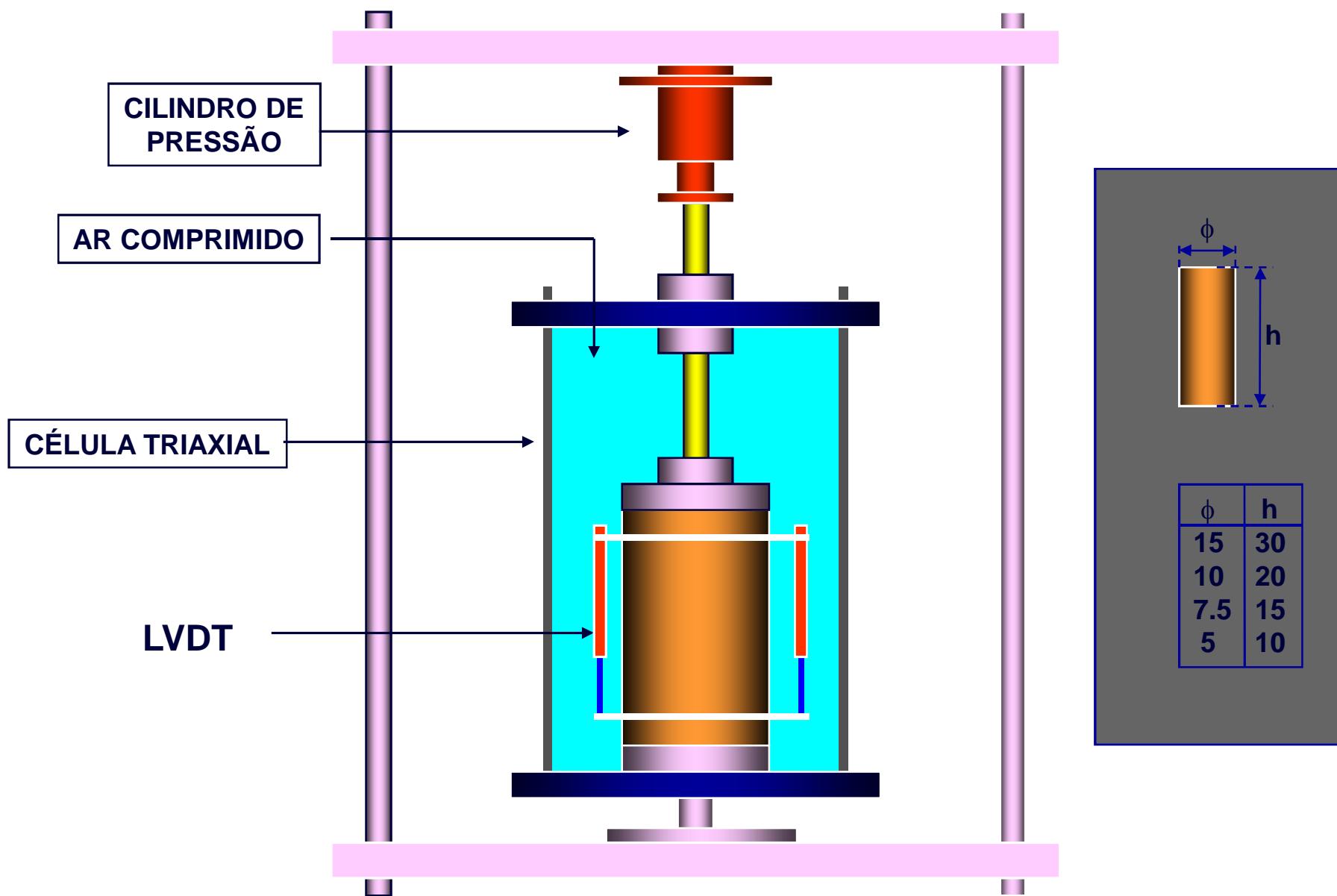


Freqüência do ensaio = 1 Hz

ENSAIO TRIAXIAL DINÂMICO



ENSAIO TRIAXIAL DE CARGA REPETIDA



Módulo de Resiliência de solos e britas

Por definição:

Módulo de resiliência de um solo é a relação entre a tensão desvio (σ_d) aplicada repetidamente e a deformação elástica axial (ε_a) resultante, para uma certa condição de ensaio

(número de repetições da carga, tempo de aplicação, frequência, umidade, densidade, tipo de compactação, etc)

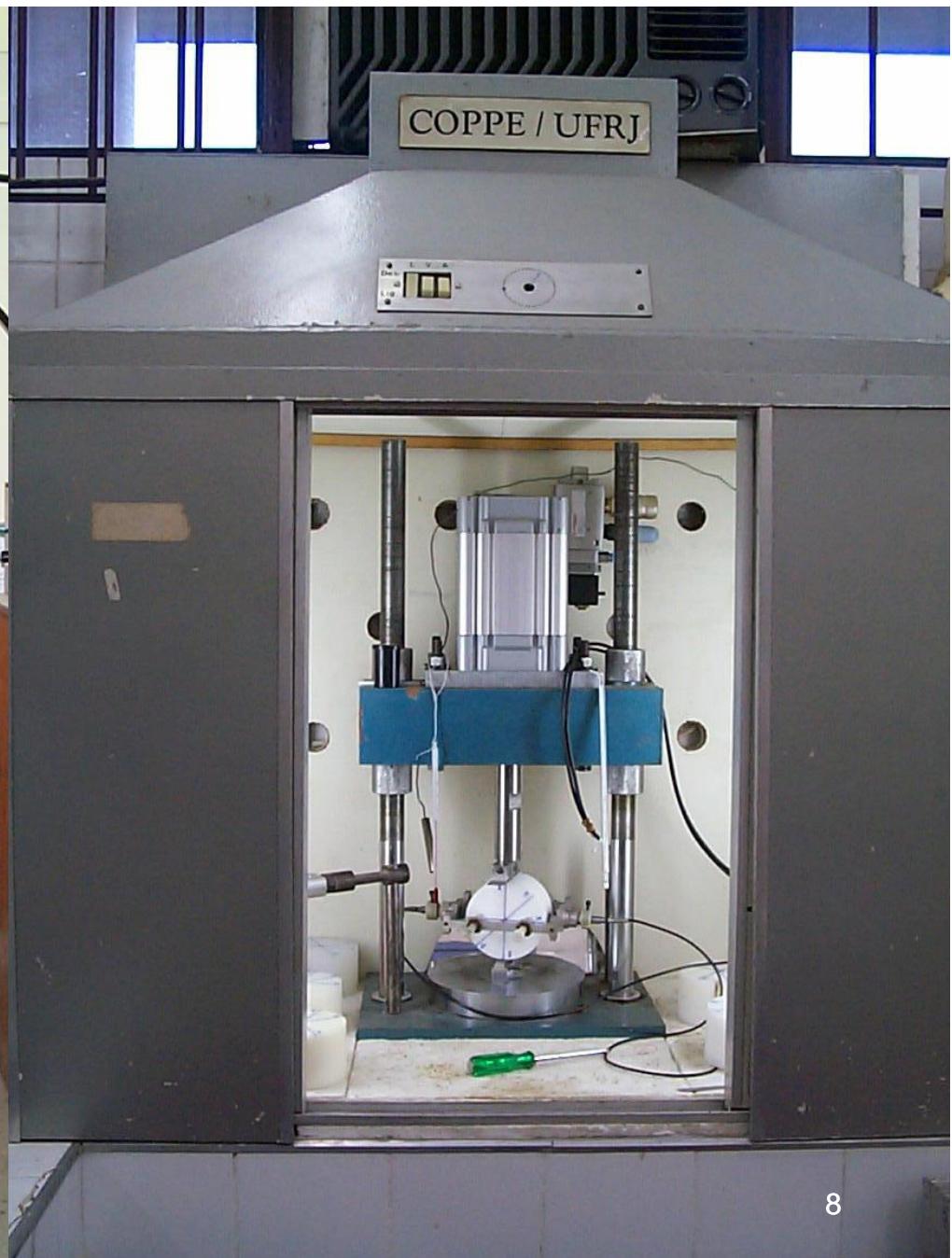
$$MR = \sigma_d / \varepsilon_a$$

Ensaio: triaxial dinâmico DNER ME 131/94

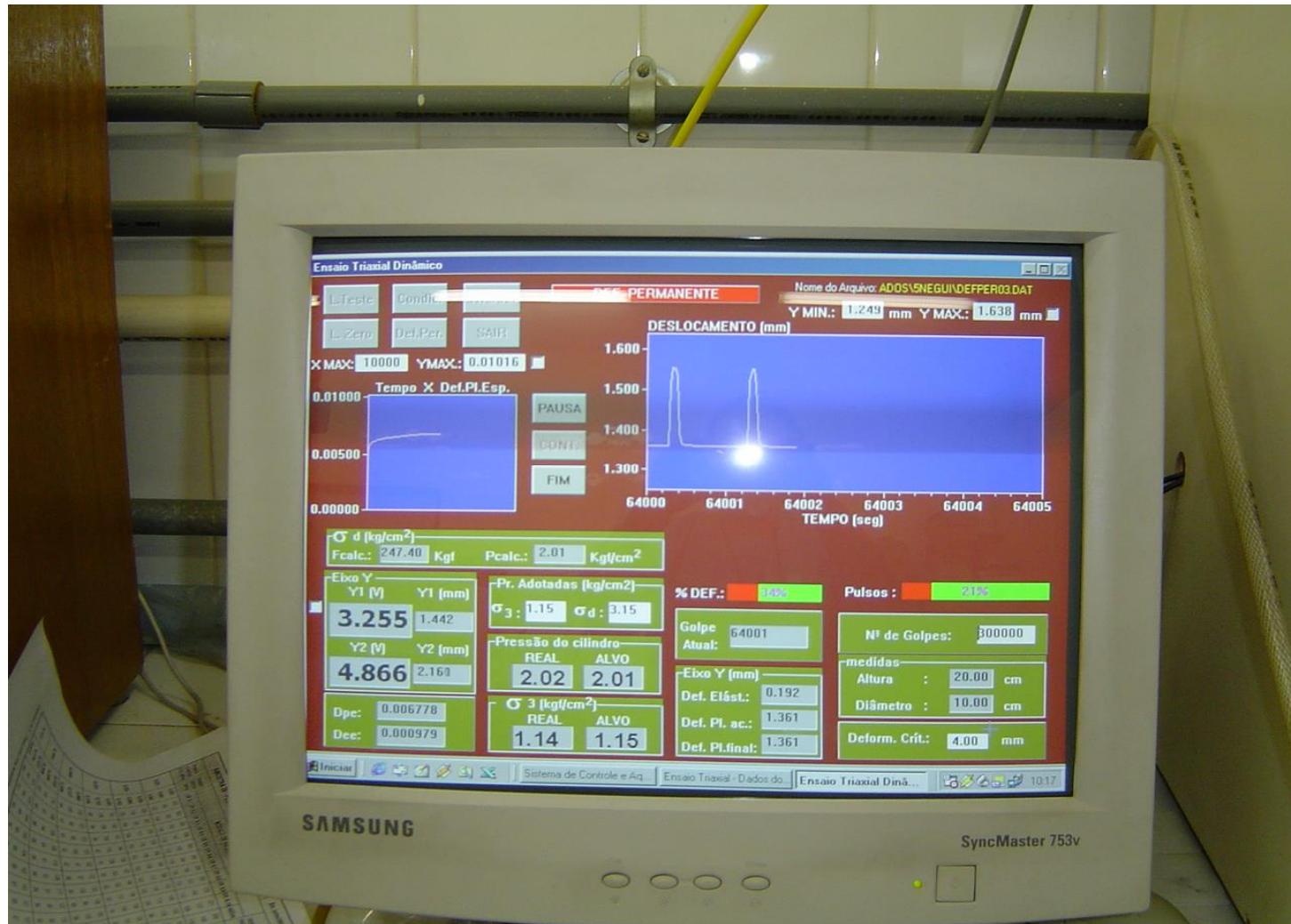
Significado e uso

❖ O ensaio de módulo de resiliência determina uma relação básica entre tensão e deformação dos materiais, para uso na análise estrutural do pavimento como sistema em camadas.

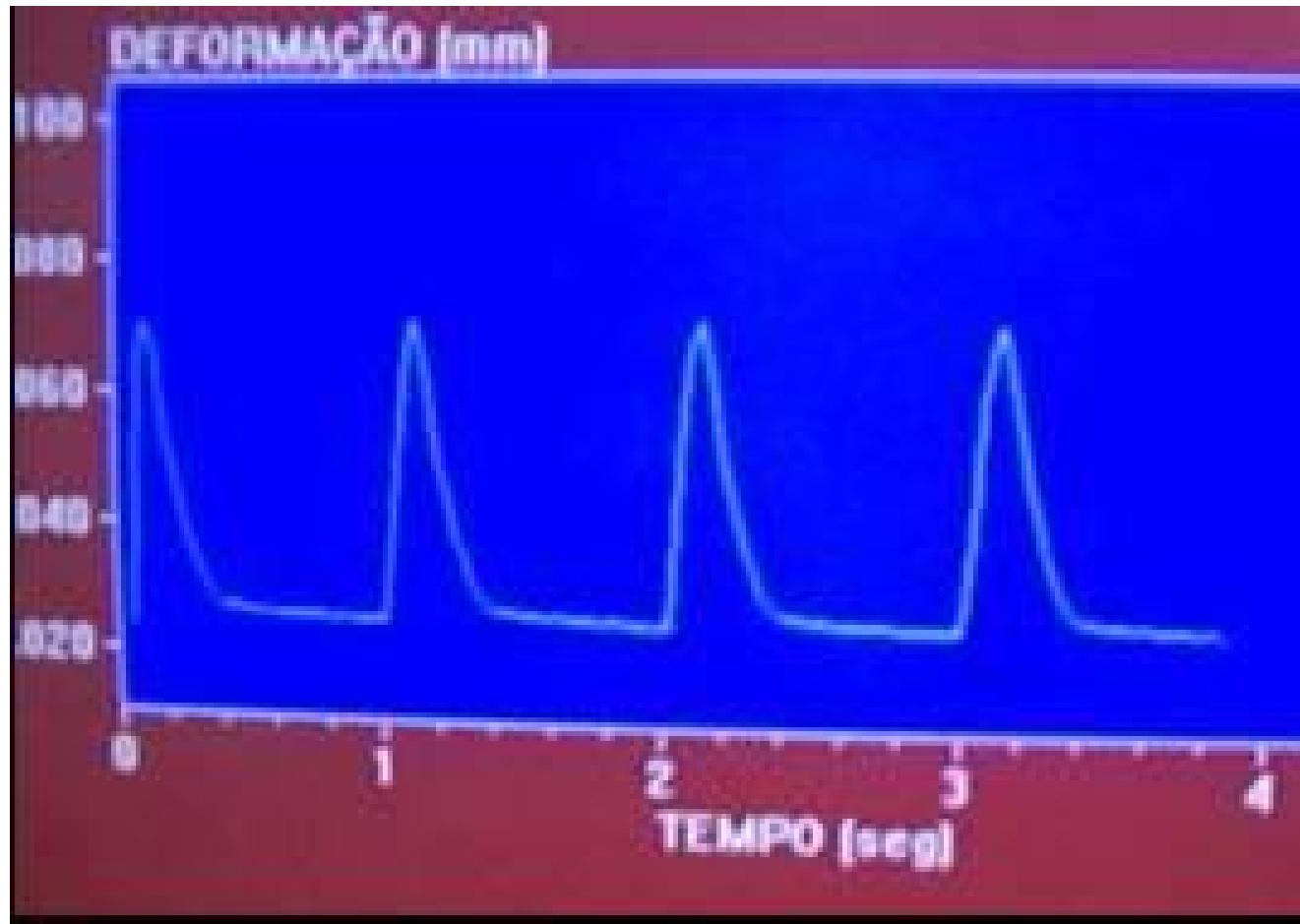
❖ O ensaio de módulo provê uma forma de caracterização dos materiais de construção de pavimento, incluindo o solo do subleito, sob uma variedade de condições (umidade, densidade, etc) e estados de tensão que simulam as condições de um pavimento sujeito a cargas em movimento.



Módulo de resiliência de solos e britas



Registro da deformação elástica de solos



Resumo do ensaio triaxial dinâmico

Uma tensão cíclica axial repetida de grandeza fixada, duração de carga (0,1s) e duração do ciclo (1s) é aplicada a um corpo de prova cilíndrico.

Durante o ensaio, o corpo de prova é submetido a pares de tensão axial cíclica dinâmica e a tensão confinante estática obtida por meio de uma câmara triaxial.

A deformação axial resiliente (recuperável) do corpo de prova é medida e usada para calcular o módulo de resiliência

A deformabilidade elástica dos solos compactados

- Em geral é altamente dependente do estado de tensões: σ_3 +não linear
- Portanto é necessário se definir modelos de comportamento resiliente de solos
$$f(\sigma_3, \sigma_d)$$
- que variam com a natureza do solo, densidade, umidade e grau de saturação

MODELOS DE COMPORTAMENTO RESILIENTE

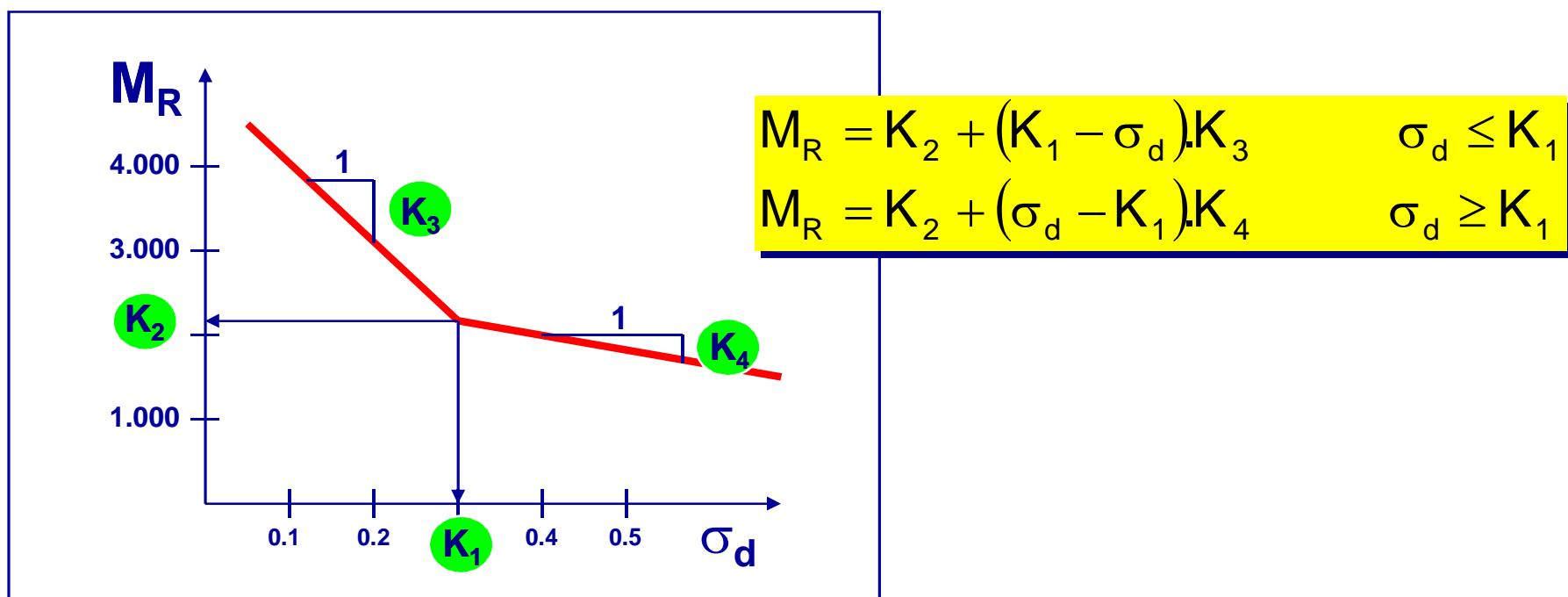
$$M_R = f(\sigma_3, \sigma_d)$$



SOLOS FINOS

$$M_R = f(\sigma_d)$$

modelo bi-linear
(escala aritmética)

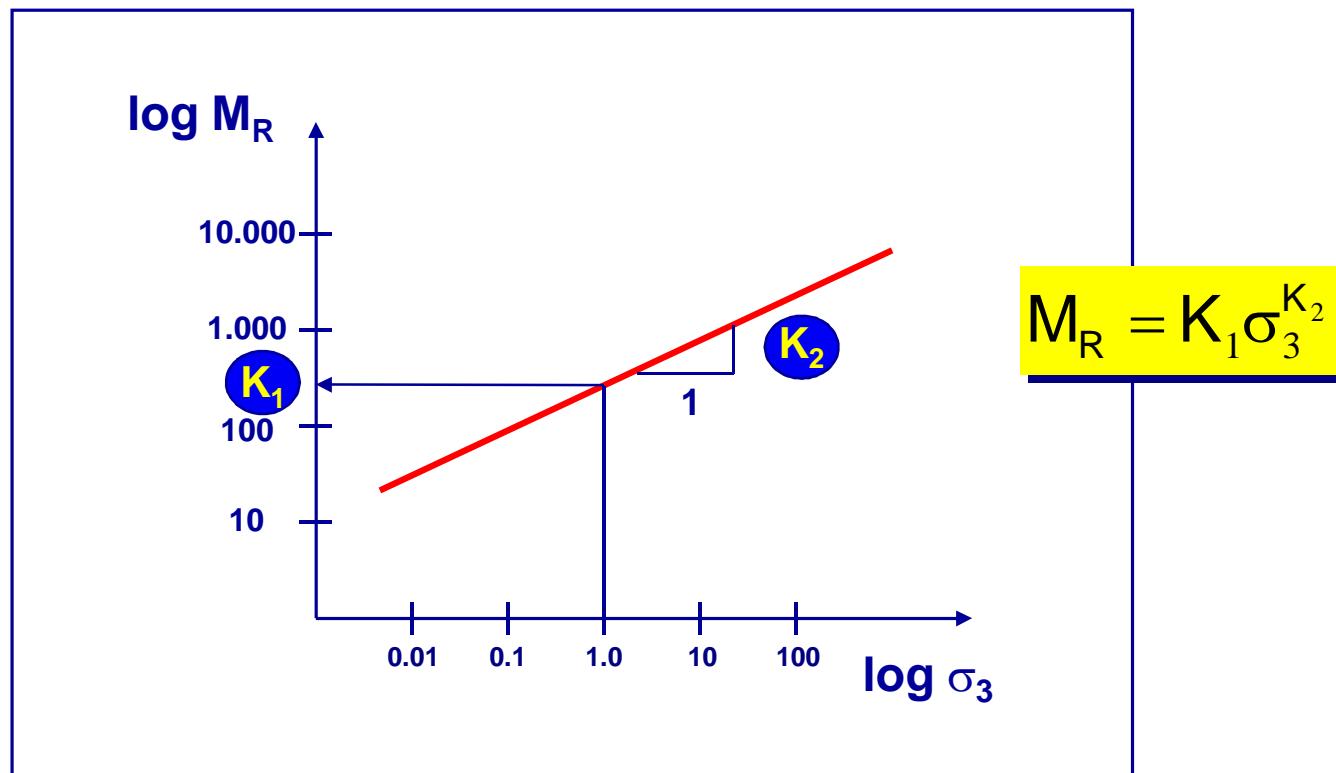


CARACTERÍSTICAS RESILIENTES DOS SOLOS

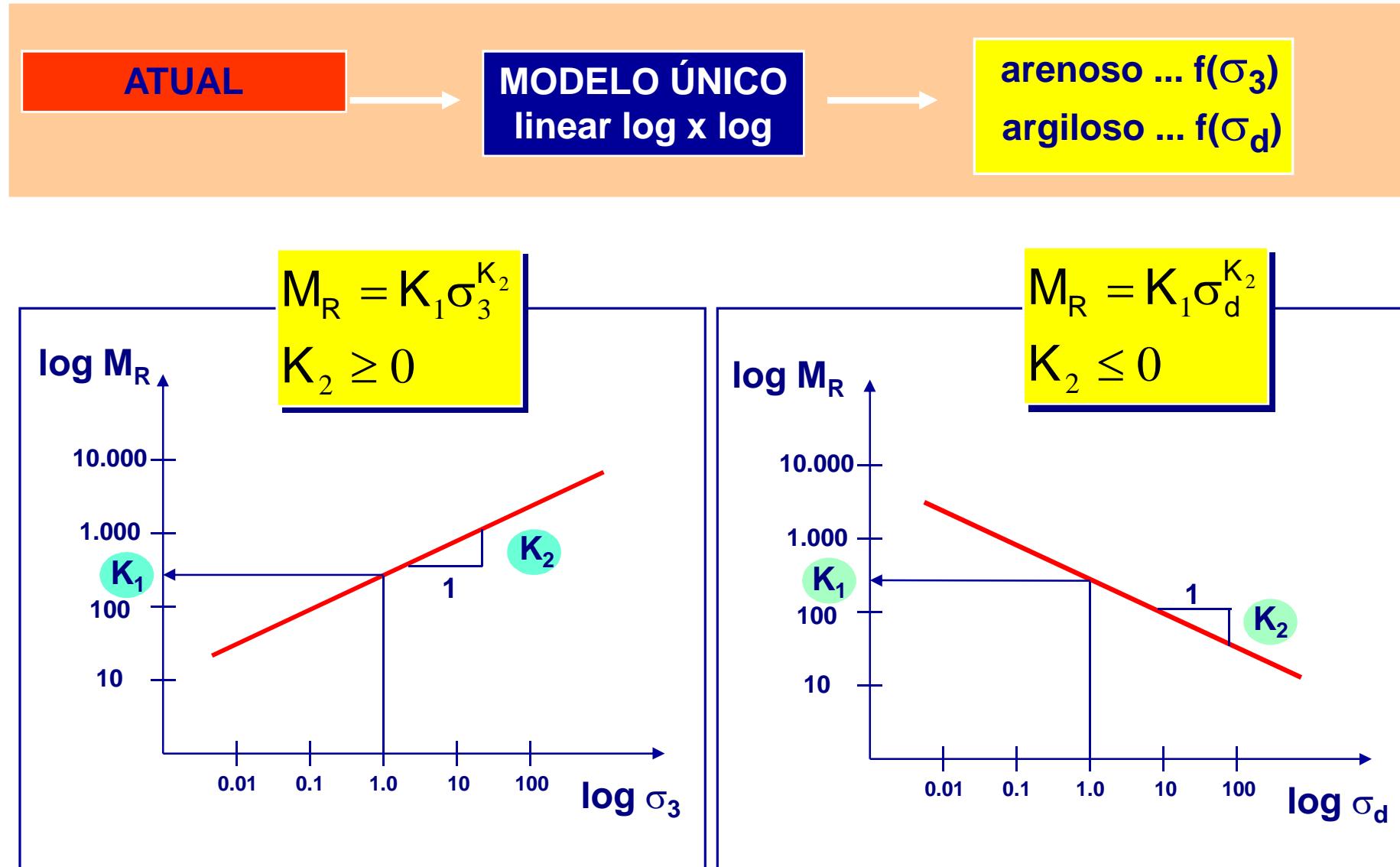
SOLOS GRANULARES

$$M_R = f(\sigma_3)$$

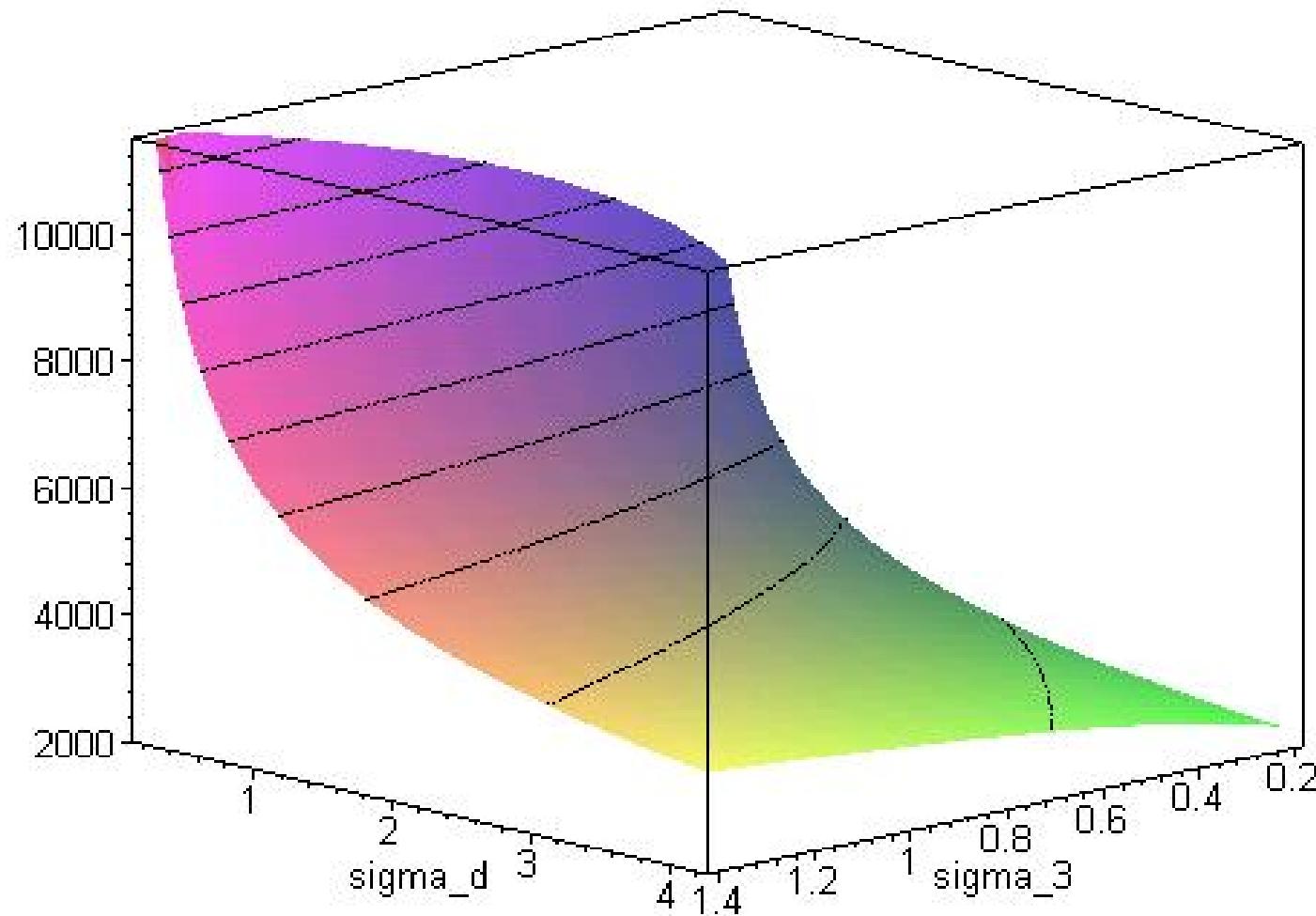
modelo linear
(escala log-log)



CARACTERÍSTICAS RESILIENTES DOS SOLOS

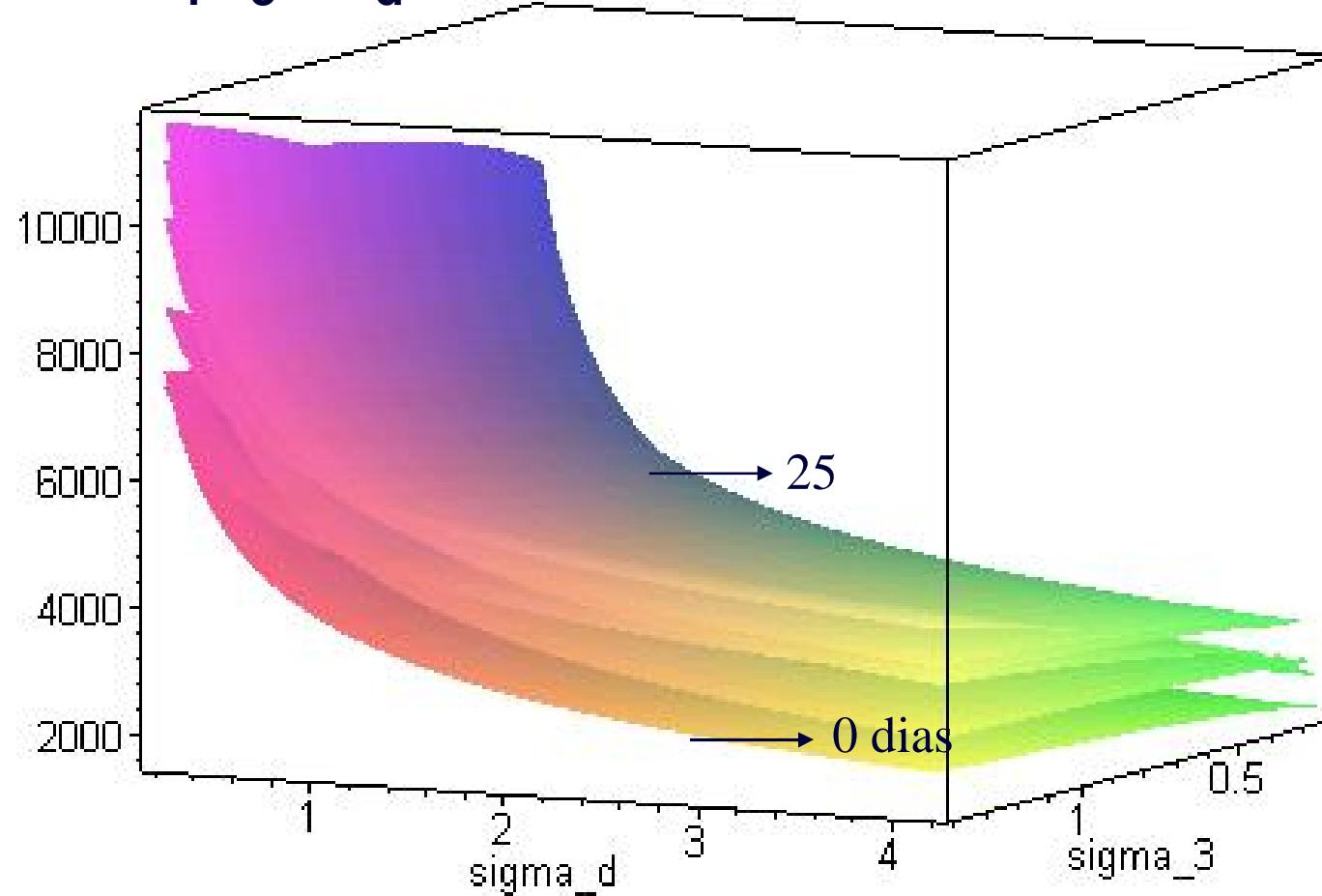


$$MR = K_1 \sigma_3^{k_2} \sigma_d^{k_3}$$



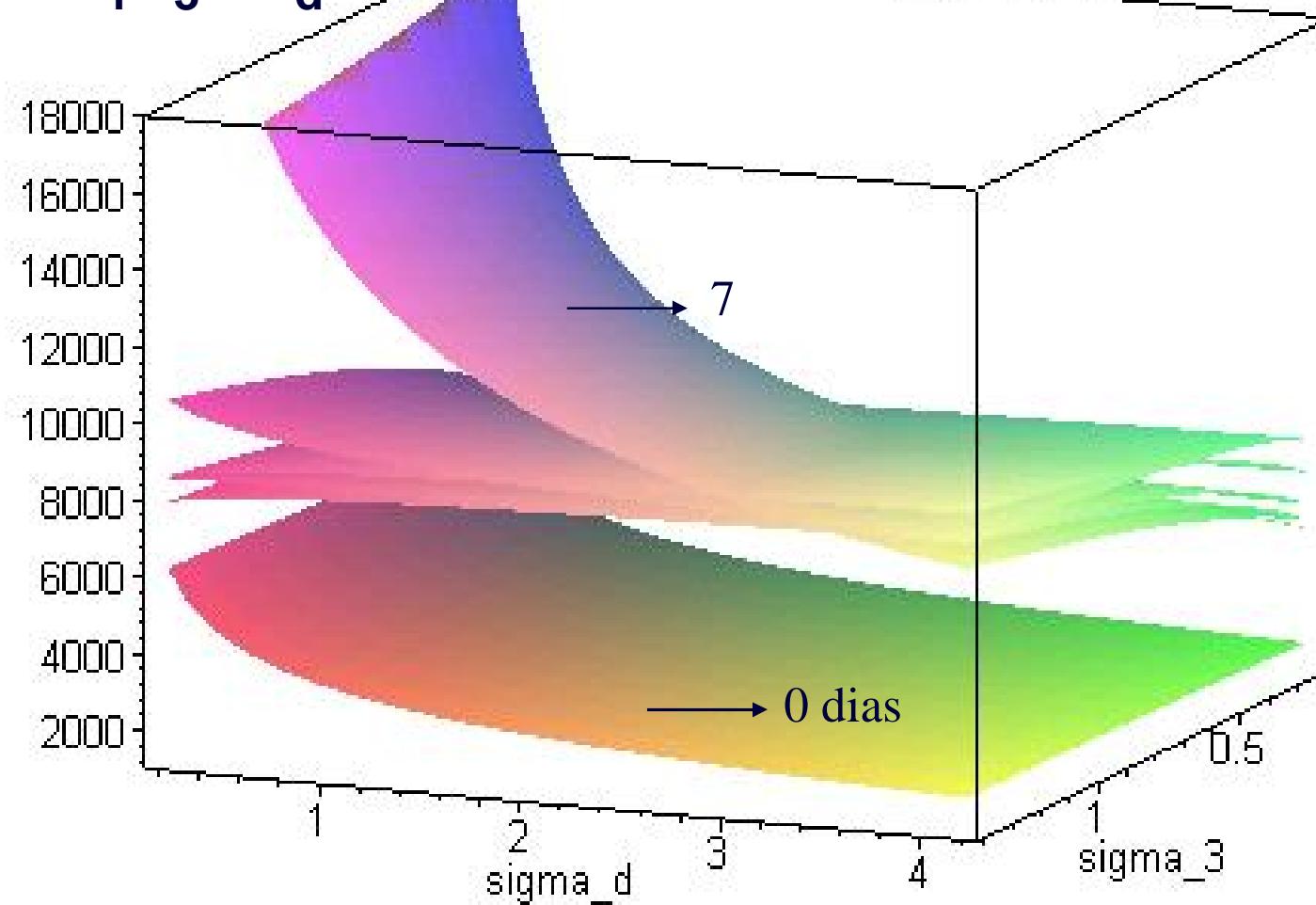
SOLO A ó CÂMARA ÚMIDA

$$MR = K_1 \sigma_3^{k2} \sigma_d^{k3}$$



SOLO B ó SECO AO AR

$$MR = K_1 \sigma_3^{k_1} \sigma_d^{k_2}$$



SOLO B ó CÂMARA ÚMIDA

$$MR = K_1 \sigma_3^{k2} \sigma_d^{k3}$$

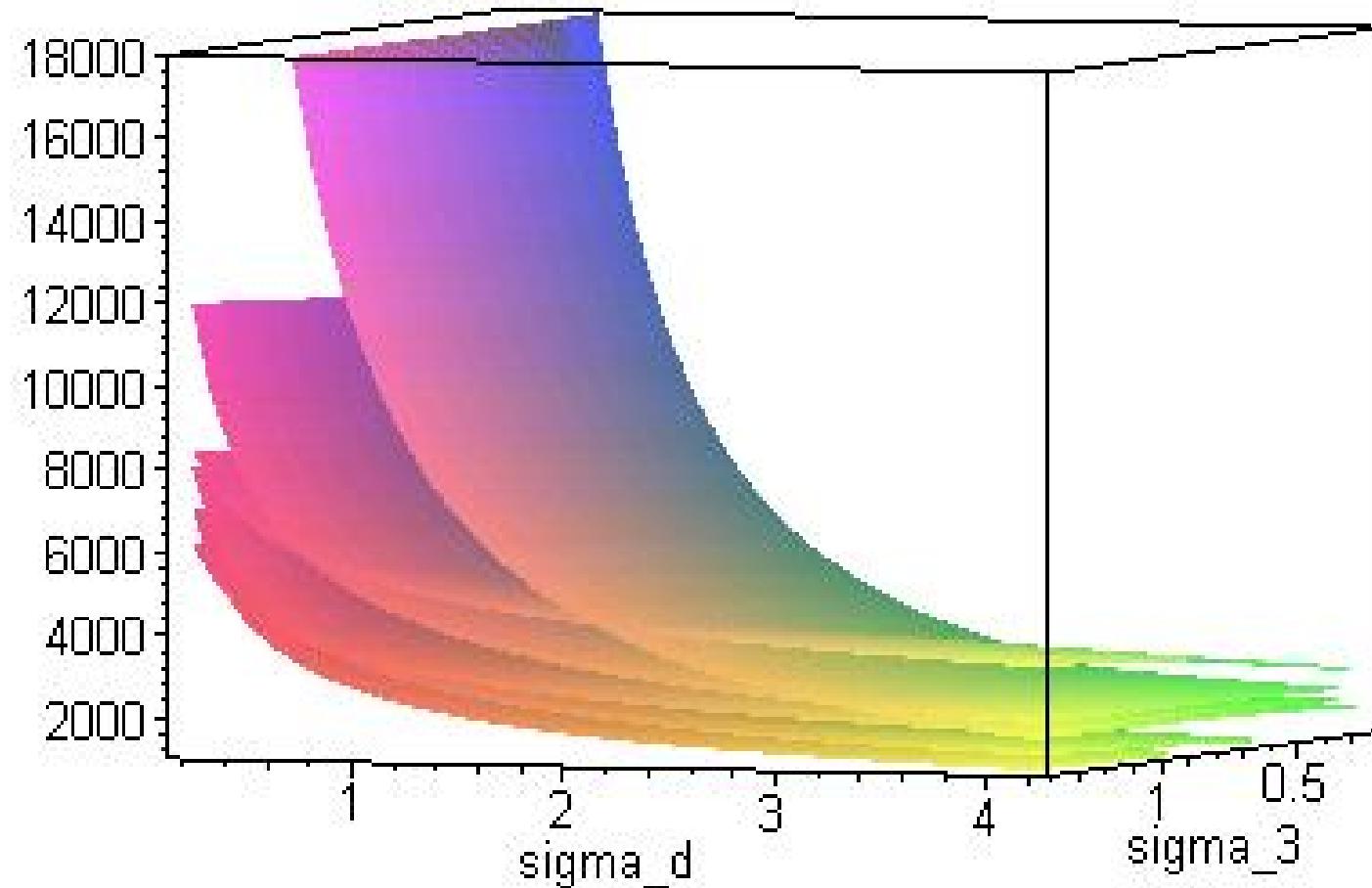


Gráfico W x MR

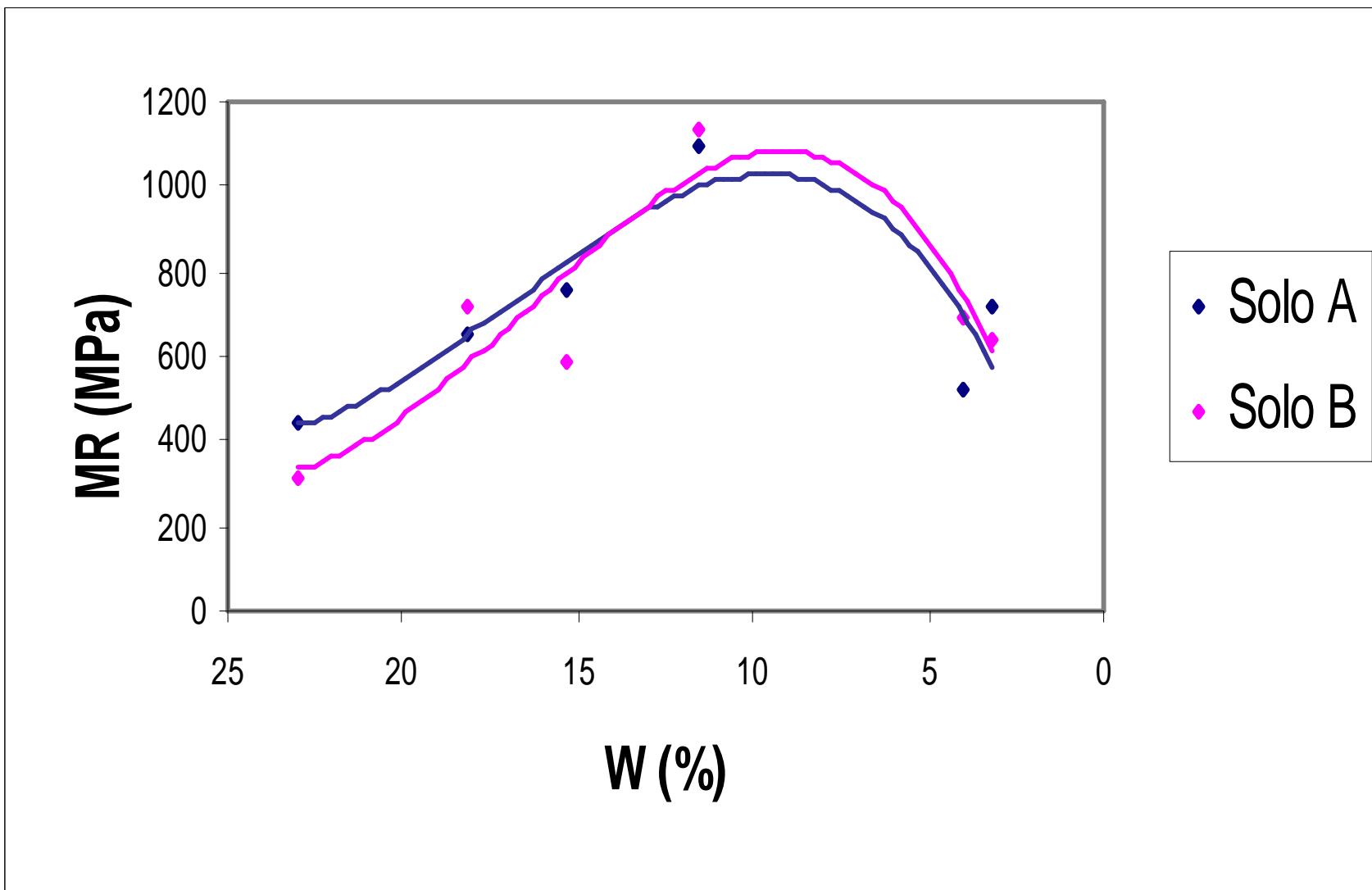


Tabela 5.12 – Características físicas dos agregados das Pedreiras selecionadas.

Identificação Pedreira	Brita nº 1		Brita nº 0	
	Desg. Los Angeles (%)	I. Forma	Desg. Los Angeles (%)	I. Forma
ESAM	25	0,72	27	0,66
Vigné	20	0,67	22	0,68
CONCREBRAS	44	0,68	47	0,67
São Pedro	44	0,67	47	0,66
Nossa S. Fátima	19	0,68	24	0,69
Nova S. Luzia	43	0,69	47	0,67
Anhanguera	33	0,71	38	0,70
Bangu	40	0,68	44	0,69
Pena Branca	48	0,70	51	0,69
EMASA	46	0,69	49	0,71
Sepetiba	42	0,68	45	0,67
IBRATA	45	0,71	47	0,69
Tamoio	46	0,66	50	0,67

Tabela 5.13 – Análise Física do Pó de Pedra das Pedreiras selecionadas para este estudo.

Registro COPPE	Descrição do material	L. Atterberg			Granulometria - % passando						Energia Comp.	Dens. Máxima Kg/m ³	Umid ótima %	Exp. %	CBR %	
		LL	LP	IP	1"	3/4"	3/8"	Nº4	Nº10	Nº40						
S-372/02	Pó de pedra VIGNÉ	NL	NP	NP	100	100	100	100	70	24	4	Intermediário	1926	11,8	0,00	69
S-373/02	Pó de pedra CONCREBRÁS	NL	NP	NP	100	100	100	100	76	31	5	Intermediário	2060	8,5	0,00	54
S-378/02	Pó de pedra São Pedro	NL	NP	NP	100	100	100	100	69	29	3	Intermediário	1906	9,4	0,00	59
S-379/02	Pó de pedra N. Sr. ^a Fátima	NL	NP	NP	100	100	100	100	78	23	3	Intermediário	1910	12,6	0,00	58
S-382/02	Pó de pedra ESAM	NL	NP	NP	100	100	100	100	74	28	5	Intermediário	1954	9,8	0,00	60
S-392/02	Pó de pedra Anhanguera	NL	NP	NP	100	100	100	94	74	22	1	Intermediário	1896	8,4	0,00	32,5
S-393/02	Pó de pedra Bangu	NL	NP	NP	100	100	100	99	84	33	4	Intermediário	1859	9,5	0,00	25,2
S-394/02	Pó de pedra Sepetiba	NL	NP	NP	100	100	100	94	71	32	5	Intermediário	2048	8,3	0,00	28,3
S-395/02	Pó de pedra Pena Branca	NL	NP	NP	100	100	100	93	71	27	1	Intermediário	1960	8,1	0,00	26,8
S-396/02	Pó de pedra EMASA	NL	NP	NP	100	100	100	98	72	28	5	Intermediário	1978	7,5	0,00	24,7
S-397/02	Pó de pedra Santa Luzia	NL	NP	NP	100	100	100	100	72	25	3	Intermediário	1946	9,5	0,00	26,2
S-412/02	Pó de pedra IBRATA	NL	NP	NP	100	100	100	98	80	23	4	Intermediário	1908	9,0	0,00	31,3
S-413/02	Pó de pedra TAMOIO	NL	NP	NP	100	100	100	95	90	40	6	Intermediário	1954	9,0	0,00	26,7

Tabela 5.14 – Análise Física da Brita Corrida das Pedreiras selecionadas para este estudo

R.COPPE	Descrição do material E Pedreira	L. Atterberg			Granulometria- % passando						Energia Comp.	Dens. Máxima	Umid ótima	Exp.	CBR
		LL	LP	IP	1"	3/8"	Nº4	Nº10	Nº40	Nº200					
S-374/02	Brita Corrida CONCREBRAS	NL	NP	NP	100	78	62	48	6	1	Intermediário	2033	7,5	0,00	57
S-375/02	Brita Corrida VIGNE	NL	NP	NP	97	55	34	31	13	2	Intermediário	2040	7,7	0,00	69
S-377/02	Brita corrida ESAM	NL	NP	NP	100	64	39	22	8	1	Intermediário	2030	4,8	0,00	74
S-380/02	Brita Corrida N. Sra. Fátima	NL	NP	NP	100	79	43	33	7	1	Intermediário	1990	7,0	0,00	71
S-381/02	Brita Corrida São Pedro	NL	NP	NP	100	100	44	31	13	2	Intermediário	2204	5,0	0,00	72
S-398/02	Brita Corrida EMASA	NL	NP	NP	100	78	65	48	19	3	Intermediário	2186	7,4	0,00	82
S-399/02	Brita Corrida Anhanguera	NL	NP	NP	100	75	51	37	16	2	Intermediário	2268	6,8	0,00	96
S-401/02	Brita Corrida Sepetiba	NL	NP	NP	100	81	65	49	21	3	Intermediário	2256	7,0	0,00	68
S-402/02	Brita Corrida Santa Luzia	NL	NP	NP	100	70	61	53	27	4	Intermediário	2145	5,7	0,00	40
S-403/02	Brita Corrida Pena Branca	NL	NP	NP	100	77	65	53	30	4	Intermediário	2150	5,6	0,00	79
S-404/02	Brita Corrida Bangu	NL	NP	NP	100	52	36	24	8	1	Intermediário	2136	7,3	0,00	72
S-419/02	Brita Corrida TAMOIO	NL	NP	NP	100	83	69	57	26	5	Intermediário	2150	6,5	0,00	50
S-420/02	Brita Corrida IBRATA	NL	NP	NP	100	82	68	54	24	6	Intermediário	2095	8,8	0,00	64
S-374/02	Brita Corrida CONCREBRAS	NL	NP	NP	100	78	62	48	6	1	Modificado	2140	6,2	0,00	83
S-375/02	Brita Corrida VIGNE	NL	NP	NP	97	55	34	31	13	2	Modificado	2088	4,7	0,00	100
S-377/02	Brita Corrida ESAM	NL	NP	NP	100	64	39	22	8	1	Modificado	2096	4,0	0,00	76
S-380/02	Brita Corrida N. Sra. Fátima	NL	NP	NP	100	79	43	33	7	1	Modificado	2044	5,0	0,00	92
S-381/02	Brita Corrida São Pedro	NL	NP	NP	100	100	44	31	13	2	Modificado	2240	4,0	0,00	100
S-398/02	Brita corrida EMASA	NL	NP	NP	100	78	65	48	19	3	Modificado	2227	5,9	0,00	100
S-399/02	Brita corrida Anhanguera	NL	NP	NP	100	75	51	37	16	2	Modificado	2293	6,5	0,00	100
S-401/02	Brita corrida Sepetiba	NL	NP	NP	100	81	65	49	21	3	Modificado	2260	5,6	0,00	79
S-402/02	Brita corrida Santa Luzia	NL	NP	NP	100	70	61	53	27	4	Modificado	2210	5,5	0,00	58
S-403/02	Brita corrida Pena Branca	NL	NP	NP	100	77	65	53	30	4	Modificado	2190	5,0	0,00	86
S-404/02	Brita corrida Bangu	NL	NP	NP	100	52	36	24	8	1	Modificado	2230	6,8	0,00	82
S-419/02	Brita corrida Tamaio	NL	NP	NP	100	83	69	57	26	5	Modificado	2190	6,0	0,00	82
S-420/02	Brita corrida IBRATA	NL	NP	NP	100	82	68	54	24	6	Modificado	2144	6,8	0,00	84

Tabela 5.15 - Equações do Módulo de Resiliência em função da tensão desvio, confinante e do modelo composto das amostras de pós de pedra ensaiadas neste estudo.

Registro COPPE	Descrição do Material	Energia Compactação	Dens. Máx. Kg/m ³	Umidade, %			MR = $k_1 \sigma_3^{k^2} \sigma_d^{k^3}$ (MPa)				MR = $k_1 \sigma_d^{k^2}$ (MPa)			MR = $k_1 \sigma_3^{k^2}$ (MPa)		
				hot	Mol	Ens	K ₁	K ₂	K ₃	R ²	K ₁	K ₂	R ²	K ₁	K ₂	R ²
PO DE PEDRA																
S-372/02	Pó VIGNE	Intermediaria	1926	11,8	11,3	10,6	417	0,41	-0,15	0,94	239	0,12	0,16	382	0,26	0,48
S-373/02	Pó CONCREBRAS	Intermediaria	2060	8,5	8,0	7,9	601	0,48	-0,10	0,98	314	0,23	0,43	570	0,38	0,85
S-378/02	Pó São Pedro	Intermediaria	1906	9,4	9,1	9,1	534	0,39	-0,04	0,97	276	0,18	0,28	448	0,29	0,64
S-379/02	Pó Nossa Sr. ^a Fátima	Intermediaria	1910	10,0	10,0	9,5	388	0,33	-0,27	0,95	248	-0,05	0,03	350	0,08	0,05
S-382/02	Pó ESAM	Intermediaria	1954	9,8	9,5	9,5	328	0,31	-0,41	0,93	172	-0,32	0,35	237	-0,13	0,05
S-392/02	Pó Anhanguera	Intermediaria	1896	8,4	8,8	8,1	566	0,46	-0,11	0,97	303	0,19	0,37	531	0,35	0,78
S-393/02	Pó a Bangu	Intermediaria	1859	9,5	9,4	9,0	613	0,45	-0,11	0,99	299	0,13	0,22	505	0,29	0,68
S-394/02	Pó a Sepetiba	Intermediaria	2048	8,3	8,6	8,3	577	0,40	0,01	0,99	303	0,21	0,48	512	0,35	0,86
S-395/02	Pó Pena Branca	Intermediaria	1960	8,1	8,2	8,2	659	0,41	0,01	0,98	375	0,28	0,64	665	0,42	0,93
S-396/02	Pó EMASA	Intermediaria	1978	7,5	7,2	7,1	550	0,42	-0,23	0,97	311	0,04	0,03	478	0,18	0,37
S-397/02	Pó S.ta Luzia	Intermediaria	1946	9,5	9,4	9,2	495	0,48	-0,38	0,95	256	0,06	0,04	393	0,10	0,06
S-412/02	Pó IBRATA	Intermediaria	1908	9,0	8,6	8,6	614	0,41	-0,03	0,97	354	0,24	0,54	609	0,38	0,88
S-413/02	Pó TAMOIO	Intermediaria	1954	9,0	8,8	8,7	593	0,40	-0,19	0,96	263	0,21	0,28	529	0,41	0,73

hot – umidade ótima Mol – umidade de moldagem do CP

Ens – umidade após ensaio triaxial dinâmico

Tabela 5.16 - Equações do Módulo de Resiliência em função da tensão desvio, confinante e do modelo composto para amostras de britas corridas ensaiadas neste estudo.

Reg. COPPE	Descrição do Material	Energia	Dens. Kg/m ³	Umidade, %			MR = k ₁ σ ₃ ^{1/2} σ _d ^{1/2} (MPa)				MR = k ₁ σ _d ^{1/2} (MPa)				MR = k ₁ σ ₃ ^{1/2} (MPa)			
				hot	Mol	Ens	K1	K2	K3	R ²	K1	K2	R ²	K1	K2	R ²		
BRITA CORRIDA																		
S-374/02	Brita Corrida CONCREBRAS	Intermediaria	2033	7,5	7,43	7,28	592	0,47	-0,27	0,96	313	0,05	0,03	506	0,21	0,33		
S-375/02	Brita Corrida VIGNE	Intermediaria	2040	7,7	7,6	6,68	604	0,29	-0,11	0,96	406	0,08	0,12	565	0,18	0,39		
S-377/02	Brita Corrida ESAM	Intermediaria	2030	4,8	4,67	4,47	307	0,26	-0,47	0,94	159	-0,47	0,47	204	-0,28	0,12		
S-380/02	Brita Corrida Nossa Sr. ³ Fátima	Intermediaria	1990	7,0	6,73	6,50	690	0,35	0,02	0,97	430	0,25	0,61	703	0,37	0,86		
S-381/02	Brita Corrida São Pedro	Intermediaria	2204	5,0	4,95	5,05	729	0,38	0,01	0,98	432	0,26	0,61	735	0,39	0,89		
S-398/02	Brita Corrida EMASA	Intermediaria	2186	7,4	7,51	7,22	605	0,43	-0,31	0,95	327	-0,01	0,01	506	0,15	0,17		
S-399/02	Brita Corrida Anhanguera	Intermediaria	2268	6,8	6,68	6,41	563	0,33	-0,27	0,95	358	-0,04	0,02	483	0,07	0,05		
S-401/02	Brita Corrida Sepetiba	Intermediaria	2256	7,0	6,96	6,18	693	0,38	-0,07	0,96	411	0,18	0,38	668	0,32	0,73		
S-402/02	Brita Corrida S. Luzia	Intermediaria	2145	5,7	4,87	4,85	847	0,46	-0,11	0,97	452	0,19	0,36	796	0,35	0,79		
S-403/02	Brita Corrida Pena Branca	Intermediaria	2150	5,6	5,60	5,28	969	0,44	-0,01	0,97	532	0,25	0,53	948	0,40	0,89		
S-404/02	Brita Corrida Bangu	Intermediaria	2136	7,3	7,46	7,26	483	0,39	-0,15	0,96	284	0,11	0,16	443	0,24	0,52		
S-419/02	Brita Corrida TAMOIO	Intermediaria	2150	6,5	6,52	5,98	810	0,47	-0,12	0,96	425	0,20	0,35	757	0,36	0,75		
S-420/02	Brita Corrida IBRATA	Intermediaria	2095	8,8	8,52	8,14	769	0,41	0,02	0,98	438	0,30	0,65	782	0,44	0,93		
S-374/02	Brita Corrida CONCREBRAS	Modificada	2140	6,2	6,25	5,77	815	0,44	-0,08	0,96	446	0,22	0,43	783	0,37	0,81		
S-375/02	Brita Corrida VIGNE	Modificada	2088	4,7	4,82	4,91	1051	0,48	-0,06	0,96	548	0,26	0,46	1018	0,42	0,82		
S-377/02	Brita Corrida ESAM	Modificada	2096	4,0	3,83	3,65	678	0,33	-0,02	0,97	431	0,21	0,50	676	0,32	0,79		
S-380/02	Brita Corrida Nossa Sr. ³ Fátima	Modificada	2044	5,0	4,59	4,77	603	0,29	-0,20	0,94	407	-0,01	0,01	534	0,09	0,07		
S-381/02	Brita Corrida São Pedro	Modificada	2240	4,0	4,12	4,24	971	0,43	0,06	0,97	540	0,34	0,69	1009	0,49	0,92		
S-398/02	Brita Corrida EMASA	Modificada	2227	5,9	5,91	5,41	956	0,52	-0,11	0,96	484	0,24	0,43	894	0,40	0,82		
S-399/02	Brita Corrida Anhanguera	Modificada	2293	6,5	6,03	5,78	944	0,47	-0,06	0,96	497	0,25	0,48	913	0,41	0,84		
S-401/02	Brita Corrida Sepetiba	Modificada	2260	5,6	5,33	5,44	520	0,20	-0,30	0,93	212	-0,53	0,54	219	-0,40	0,22		
S-402/02	Brita corrida Santa Luzia	Modificada	2210	5,5	4,38	5,13	661	0,55	-0,45	0,95	313	-0,09	0,06	505	0,10	0,05		
S-403/02	Brita Corrida Pena Branca	Modificada	2190	5,0	4,90	4,91	956	0,52	-0,11	0,96	471	0,23	0,39	897	0,41	0,79		
S-404/02	Brita Corrida Bangu	Modificada	2230	6,8	6,82	6,61	772	0,46	-0,10	0,97	412	0,21	0,40	731	0,37	0,80		
S-419/02	Brita Corrida TAMOIO	Modificada	2190	6,0	6,32	6,08	938	0,54	-0,13	0,96	449	0,23	0,37	869	0,42	0,78		
S-420/02	Brita Corrida IBRATA	Modificada	2144	6,8	7,41	6,24	656	0,33	-0,04	0,97	305	0,01	0,01	430	0,12	0,08		

Tabela 5.17 – Media dos valores dos coeficientes K_i das equações do modelo composto para Pó de Pedra.

Coeficientes Elásticos	kgf/cm ²			MPa		
	K1	K2	K3	K1	K2	K3
ESAM	4063	0,31	-0,41	328	0,31	-0,41
VIGNE	2303	0,41	-0,15	417	0,41	-0,15
CONCREBRAS	2502	0,48	-0,10	601	0,48	-0,10
SÃO PEDRO	2349	0,39	-0,04	534	0,39	-0,04
N. Sr. ^a FÁTIMA	3408	0,33	-0,37	388	0,33	-0,37
SANTA LUZIA	3938	0,48	-0,17	495	0,48	-0,17
ANHANGUERA	2524	0,46	-0,11	566	0,46	-0,11
BANGU	2804	0,45	-0,11	613	0,45	-0,11
PENA BRANCA	2479	0,42	-0,01	659	0,42	-0,01
EMASA	3603	0,42	-0,24	550	0,42	-0,24
SEPETIBA	2283	0,40	0,00	577	0,40	0,00
IBRATA	2565	0,41	-0,03	614	0,41	-0,03
TAMOIO	2327	0,60	-0,19	593	0,60	-0,19
Média	2857,54	0,43	-0,15	533,46	0,43	-0,15
Desvio Padrão	653,60	0,07	0,13	99,30	0,07	0,13
Media + desvio	3511,14	0,50	-0,02	632,76	0,50	-0,02
Media - desvio	2203,94	0,36	-0,28	434,16	0,36	-0,28
Nova Média	2554,4	0,43	-0,11	571,44	0,43	-0,11
Novo Desvio Padrão	338,49	0,03	0,07	46,63	0,03	0,07

$$MR = 2554,4 \sigma_3^{0,43} \sigma_d^{-0,11} \quad (5.2)$$

$$MR = 571,4 \sigma_3^{0,43} \sigma_d^{-0,11} \quad (5.3)$$

Tabela 5.18 – Media do Módulo de Resiliência Composto da Brita Corrida (Intermediaria)..

Coeficiente Elástico	kgf/cm ²			MPa		
	K1	K2	K3	K1	K2	K3
ESAM	5000	0,26	-0,47	307	0,26	-0,47
VIGNE	4000	0,29	-0,11	604	0,29	-0,11
CONCREBRAS	3699	0,47	-0,27	592	0,47	-0,27
SÃO PEDRO	2946	0,39	0,01	729	0,39	0,01
N. Sr. ^a FÁTIMA	2926	0,35	0,02	690	0,35	0,02
SANTA LUZIA	3804	0,46	-0,11	847	0,46	-0,11
ANHANGUERA	4797	0,34	-0,26	563	0,34	-0,26
BANGU	2785	0,39	-0,15	483	0,39	-0,15
PENA BRANCA	3871	0,44	-0,01	969	0,44	-0,01
EMASA	4304	0,46	-0,31	605	0,46	-0,31
SEPETIBA	3353	0,38	-0,07	693	0,38	-0,07
IBRATA	2806	0,42	0,02	769	0,42	0,02
TAMOIO	3558	0,48	-0,12	810	0,48	-0,12
Média	3680,69	0,39	-0,14	666,23	0,39	-0,14
Desvio Padrão	726,18	0,07	0,16	170,10	0,07	0,16
Media + desvio	4406,87	0,46	0,02	836,33	0,46	0,02
Media - desvio	2954,51	0,33	-0,30	496,13	0,33	-0,30
Nova Média	3584,43	0,40	-0,12	672,78	0,40	-0,12
Novo Desvio Padrão	403,40	0,04	0,11	86,50	0,04	0,11

$$MR = 3584,4 \sigma_3^{0,40} \sigma_d^{-0,12} \quad (5.4)$$

$$MR = 672,8 \sigma_3^{0,40} \sigma_d^{-0,12} \quad (5.5)$$

Tabela 5.19 – Media do Módulo de Resiliência Composto da Brita Corrida (modificada)

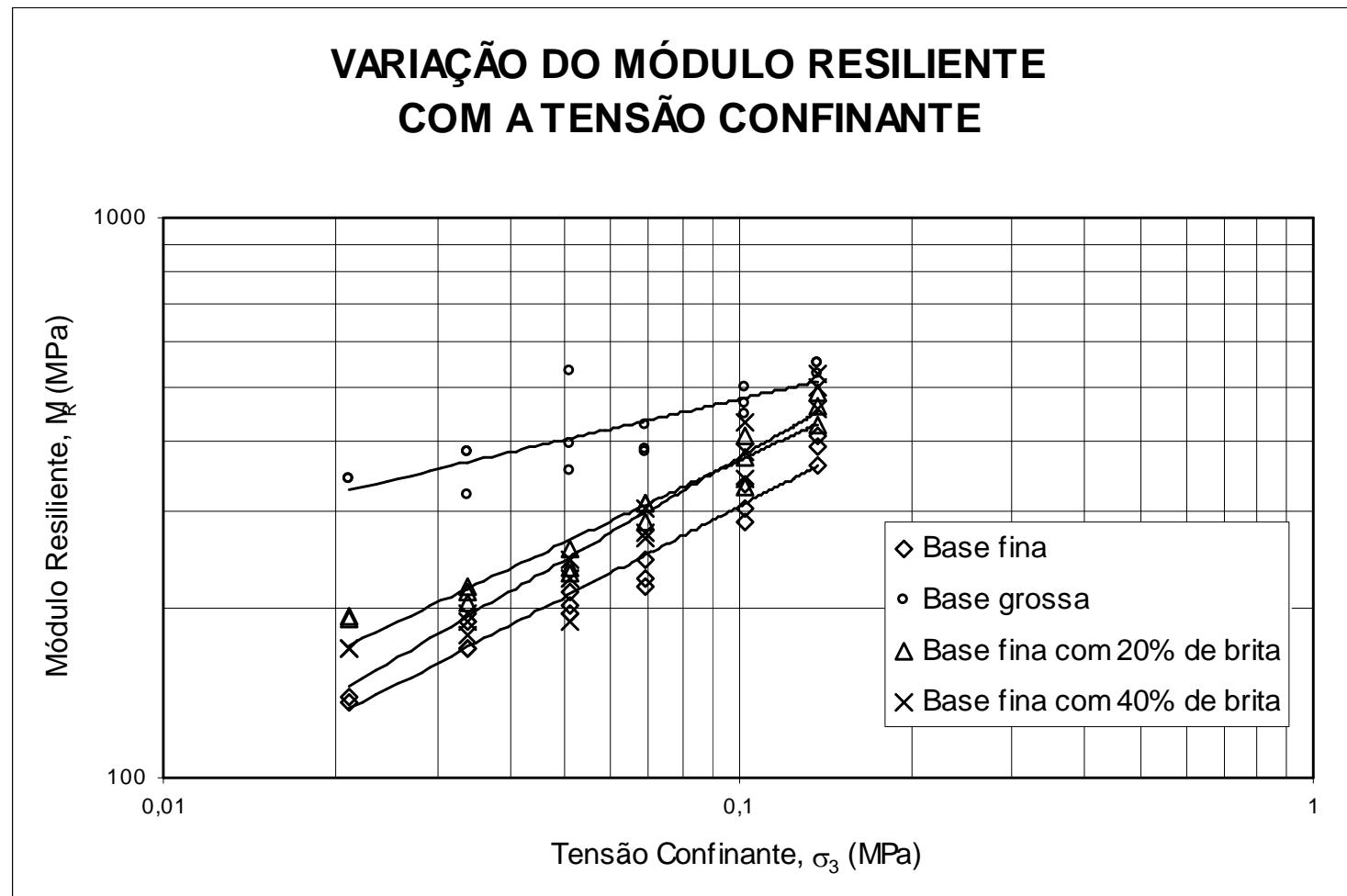
Coeficiente de Elástico	kgf/cm ²			MPa		
	K1	K2	K3	K1	K2	K3
ESAM	3253	0,34	-0,02	678	0,34	-0,02
VIGNE	4024	0,48	-0,06	1051	0,48	-0,06
CONCREBRAS	3501	0,44	-0,08	815	0,44	-0,08
SÃO PEDRO	3138	0,43	0,06	971	0,43	0,06
N. Sr. ^a FÁTIMA	4891	0,29	-0,20	603	0,29	-0,20
SANTA LUZIA	5296	0,55	-0,46	661	0,55	-0,46
ANHANGUERA	3657	0,47	-0,06	944	0,47	-0,06
BANGU	3318	0,46	-0,10	772	0,46	-0,10
PENA BRANCA	3722	0,52	-0,11	956	0,52	-0,11
EMASA	3704	0,49	-0,09	971	0,49	-0,09
SEPETIBA	6528	0,21	-0,30	520	0,21	-0,30
IBRATA	3399	0,33	-0,05	656	0,33	-0,05
TAMOIO	3641	0,54	-0,13	938	0,54	-0,13
Média	4005,54	0,43	-0,12	810,46	0,43	-0,13
Desvio Padrão	985,40	0,11	0,13	172,56	0,11	0,13
Media + desvio	4990,94	0,53	0,01	983,02	0,53	0,01
Media - desvio	3020,13	0,32	-0,25	637,90	0,32	-0,25
Nova Média	3658,91	0,44	-0,09	836,20	0,44	-0,09
Novo Desvio Padrão	479,84	0,07	0,05	135,58	0,07	0,05

$$MR = 3658,9 \sigma_3^{0,44} \sigma_d^{-0,09} \quad (5.6)$$

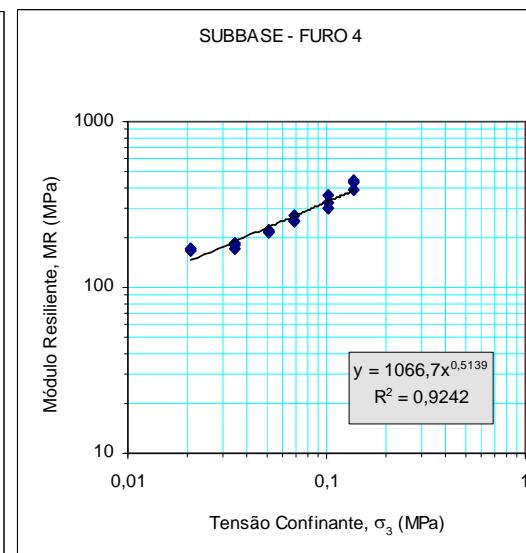
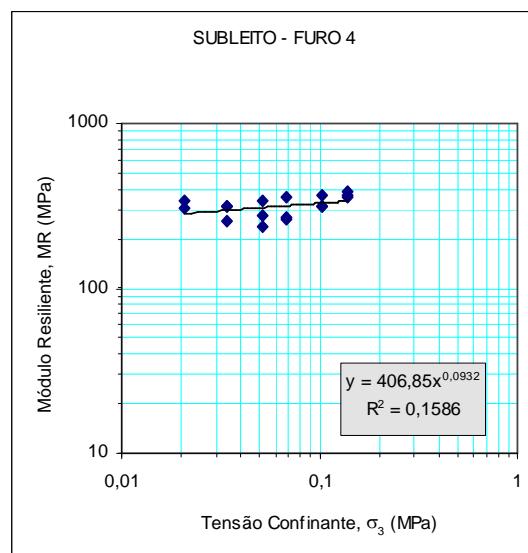
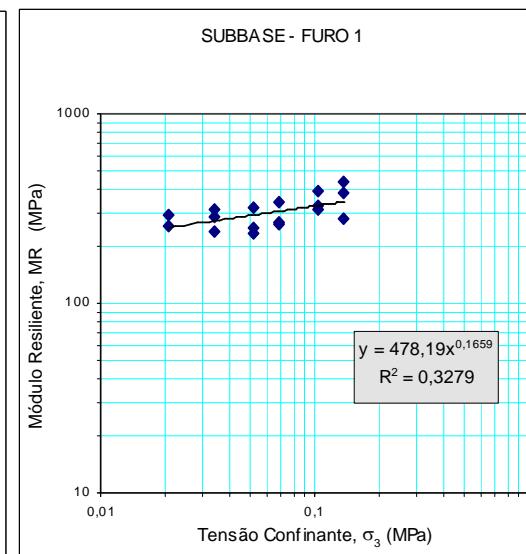
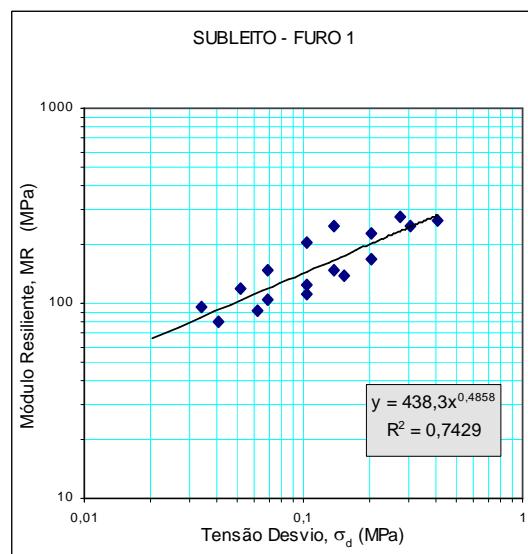
$$MR = 836,2 \sigma_3^{0,44} \sigma_d^{-0,09} \quad (5.7)$$

INCORPORAÇÃO À BASE

RESULTADOS MR - ICÓ-IGUATU (segmento 2)



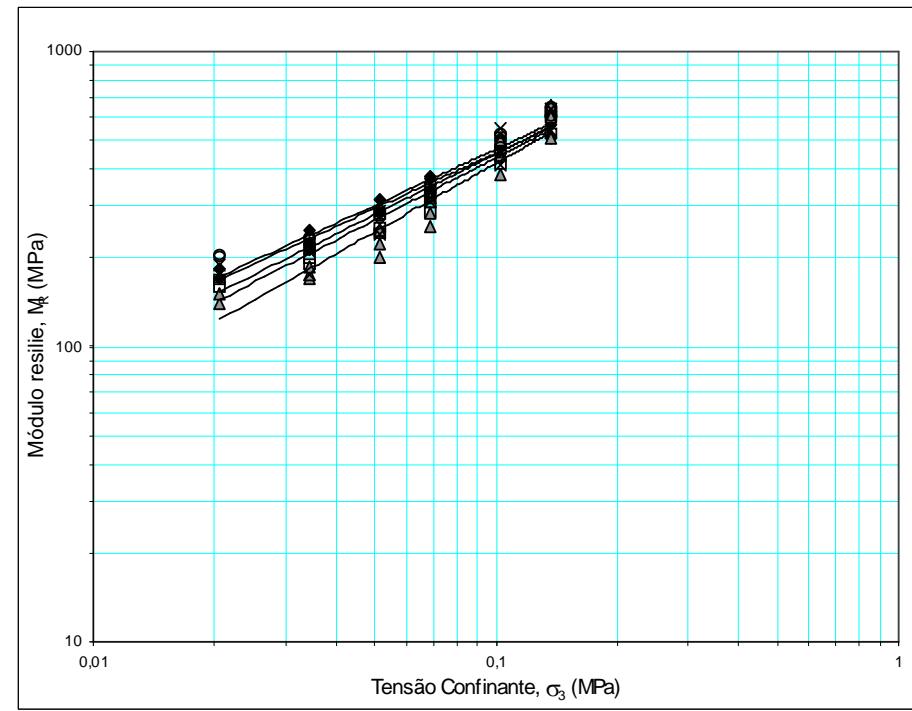
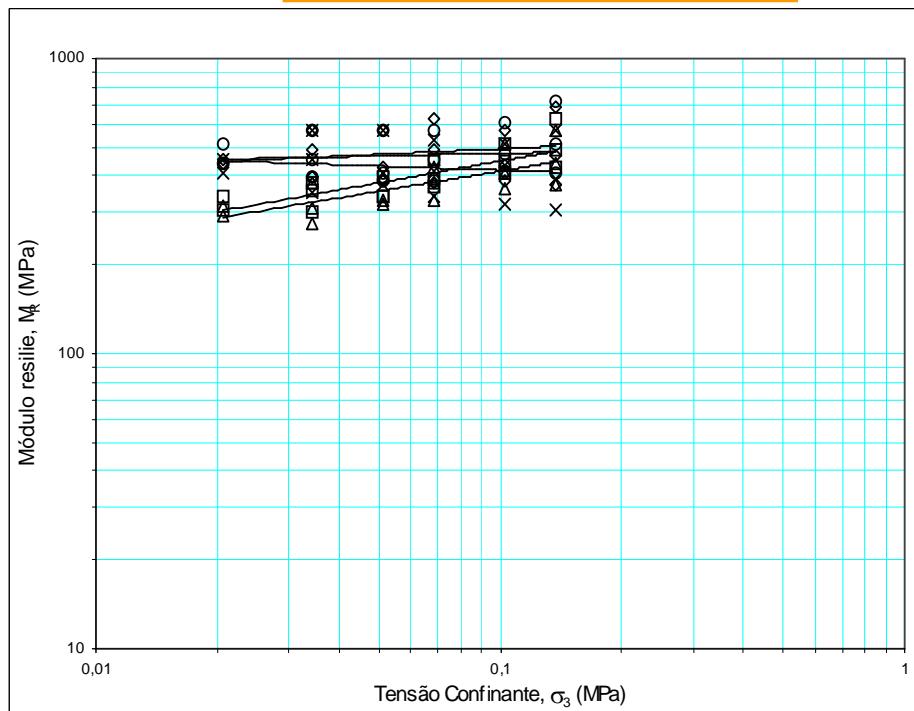
SUBBASE E SUBLEITO



Caracterização Mecânica dos Materiais

Amostra	Subleito		Base de brita	
	k_1	K_2	k_1	k_2
1	4.861	0,0287	4.572	0,6256
2	4.560	0,2453	4.391	0,7015
3	4.218	0,2278	4.202	0,7714
4	4.265	-0,0476	4.530	0,6811
5	5.038	0,0626	4.704	0,6294
Média	4.588	0,1034	4.480	0,6818
Desvio padrão	360	0,1281	191	0,0598

$$MR (\text{kgf/cm}^2) = k_1 \sigma_3^{k_2}$$



COEFICIENTE DE POISSON

Ref: Trichês, Glicério. *Determinação do coeficiente de Poisson de solos compactados no ensaio triaxial dinâmico e o cálculo da deflexão de pavimentos*. Tese de mestrado. COPPE/ UFRJ, 1988.

(HICKS)

$$\mu = b_1 + b_2 \left(\frac{\sigma_1}{\sigma_3} \right) + b_3 \left(\frac{\sigma_1}{\sigma_3} \right)^2 + b_4 \left(\frac{\sigma_1}{\sigma_3} \right)^3$$

CONCLUSÕES

fatores influentes

grau de saturação
energia de compactação
tipo de material, etc

POUCA INFLUÊNCIA DA VARIAÇÃO DE μ
NO CÁLCULO DE DEFLEXÕES DE PAVIMENTOS

VALORES USUAIS

concreto de cimento portland	$\mu = 0.15$
misturas asfálticas	$\mu = 0.30$
materiais granulares	$\mu = 0.35$
solos argilosos	$\mu = 0.45$

Deformação Permanente

A cada aplicação da tensão desvio tem-se:

$$t = r + p$$

$$\varepsilon_p = A N^B \quad (\text{Monismith, 1975})$$

O deslocamento total vertical por deformação plástica ou permanente é o somatório do cálculo feito para cada camada sob o estado de tensões atuantes

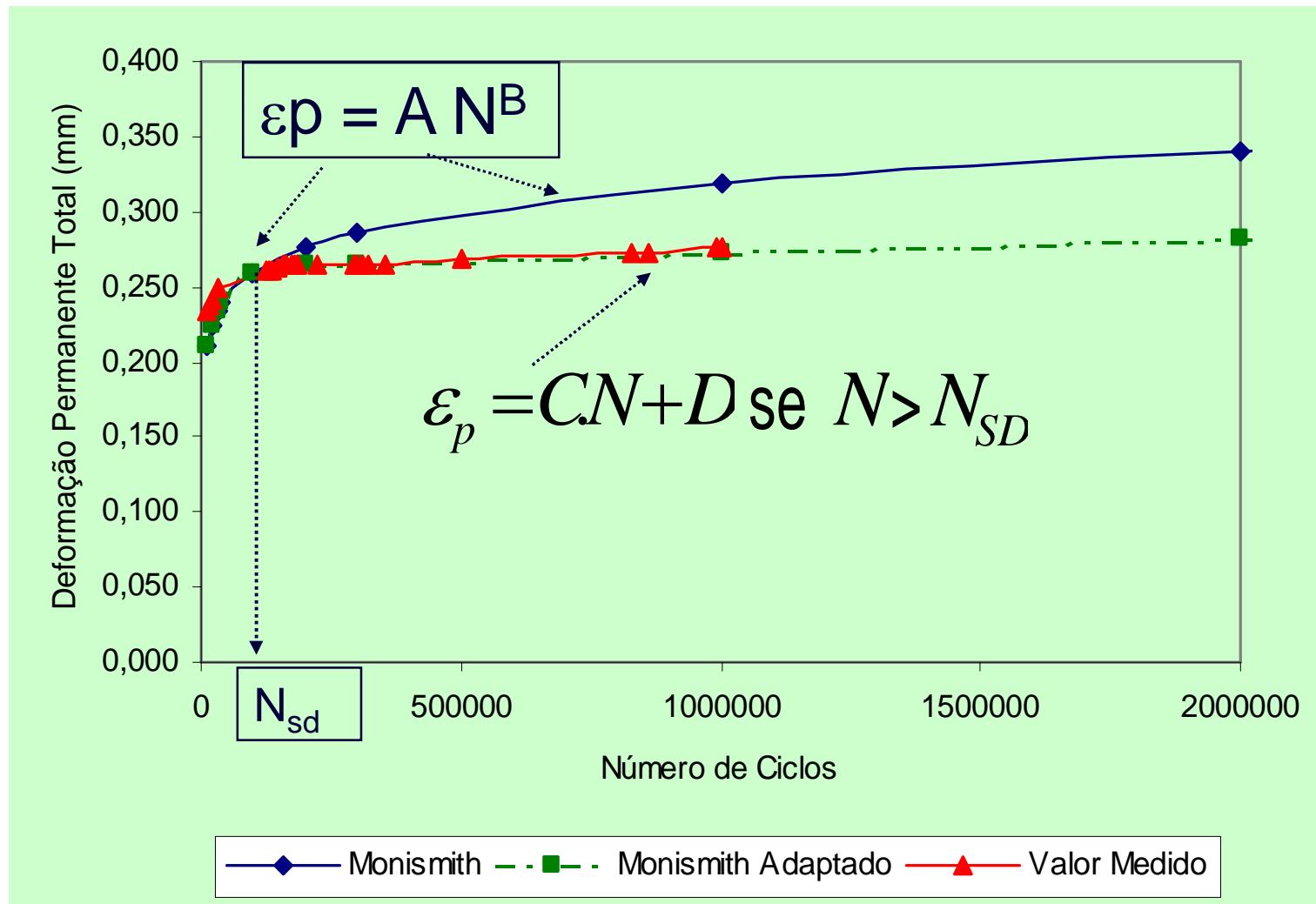
$$\delta p_{total} = \sum_{i=1}^n \left(\varepsilon_{p(i)} \cdot h_i \right)$$

Deformação Permanente

- A deformação plástica tanto pode evoluir conforme a expressão de Monismith como tender para um acomodamento (%shakedown+), seja:

$$\varepsilon_p = A \cdot N^B \text{ se } N \leq N_{SD}$$

$$\varepsilon_p = C \cdot N + D \text{ se } N > N_{SD}$$



$$\sigma_d = 0,11 \text{ MPa}, \sigma_3 = 0,07 \text{ MPa}$$

Comparação entre os Modelos de Monismith e Monismith Adaptado para um Ensaio da Laterita Brasília (Ensaio 1).

Estudo da deformabilidade de lateritas pedregulhosas (cont)

Deformação permanente

- Exemplos calculados pela expressão de Monismith (1975) : $\varepsilon_p = A N^B$
- e Uzan (1985):

$$\frac{\varepsilon_{p(N)}}{\varepsilon_r} = \mu \cdot N^{-\alpha}$$

- $\varepsilon_{p(N)}$ é a deformação acumulada para N repetições de carga,
- ε_r é a deformação resiliente, admitida independente de N;
- $\mu = ab / \varepsilon_r$, $\alpha = 1 - b$, correspondendo a a e b aos parâmetros A e B

Estudo da deformabilidade de lateritas pedregulhosas

Deformação permanente(cont)

- Exemplo: Laterita pedregulhosa do Mato Grosso (Santos, 1998)
- São pavimentos de % espessura plena+de laterita, subleito de laterita e tratamento superficial asfáltico
- $\sigma_3 = 0,105$; $\sigma_d = 0,315$; $\sigma_1 / \sigma_3 = 4$:
- $\Rightarrow \varepsilon_p = 0,002 N^{0,13}$ (Monismith)

$$\frac{\varepsilon_p}{\varepsilon_r} = 0,376 \cdot N^{-0,87} \quad (\text{Uzan})$$

VALORES ADMISSÍVEIS

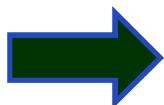
HEUKELOM E KLOMP (1962)

$$\sigma_{v,máx} = \frac{0,006MR}{1 + 0,7 \log(N)}$$

{ v máx - tensão vertical admissível no topo
do subleito
MR - módulo resiliente médio
N - número de ciclos

{

$z = 21600 \cdot 10^{-6} \cdot N^{-0,25}$	(NOTTINGHAN)
$z = 28000 \cdot 10^{-6} \cdot N^{-0,25}$	(SHELL, 1977)
$z = 11000 \cdot 10^{-6} \cdot N^{-0,23}$	(CRR)
$z = 21000 \cdot 10^{-6} \cdot N^{-0,24}$	(LCPC)

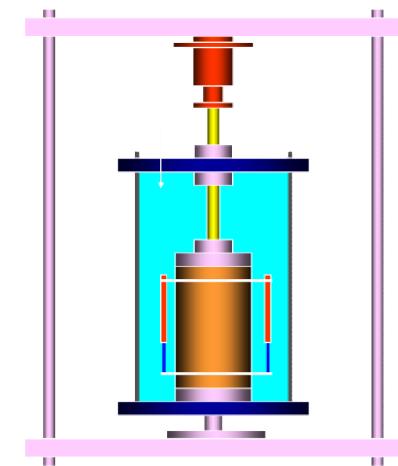
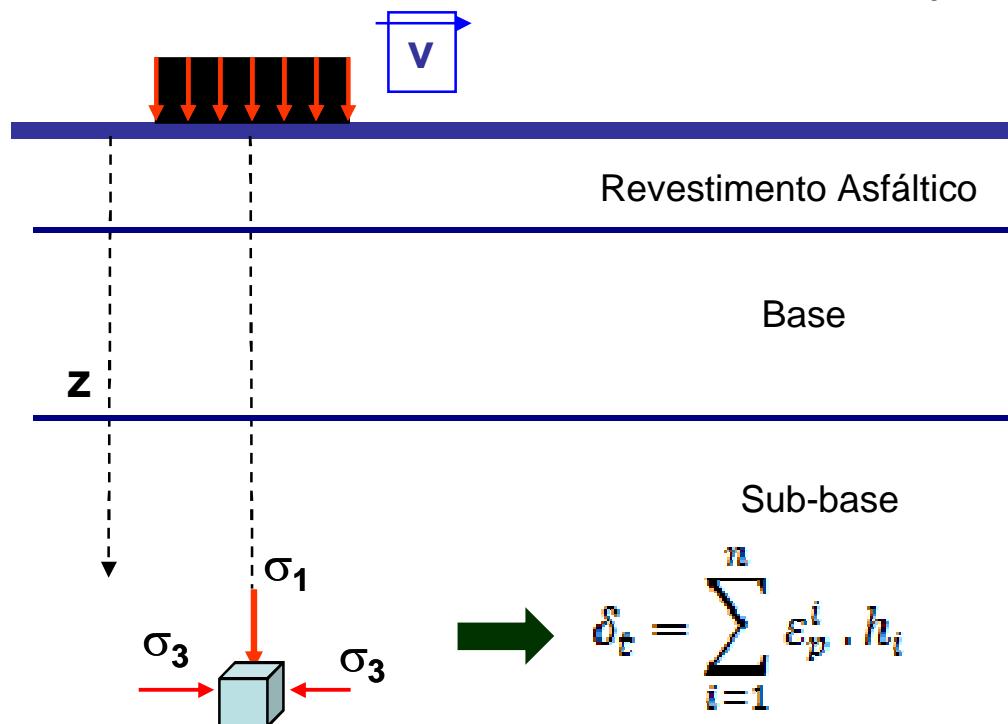


Muito conservador !!!!

Guimarães, 2009

- Modelo mecanístico que descreve as deformações permanentes em termos do estado de tensões:

$$\varepsilon_p (\%) = \psi_1 \left(\frac{\sigma_3}{\rho_0} \right)^{\psi_2} \left(\frac{\sigma_d}{\rho_0} \right)^{\psi_3} N^{\psi_4}$$



Utilizado de duas maneiras:

- Acúmulo de deformação permanente nas camadas estruturais
- Para qualificar/rejeitar o subleito

Comportamento das Misturas Asfálticas

Introdução

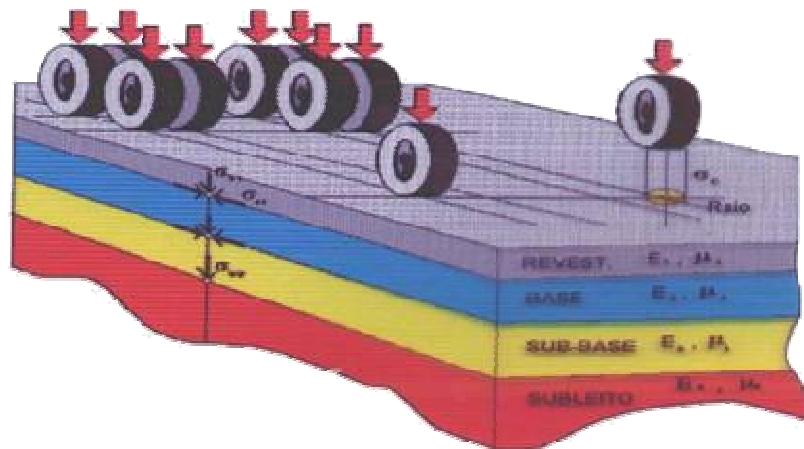
Até a década de 70, os métodos de dimensionamento empregados no Brasil enfocavam, sobretudo, a capacidade de suporte dos pavimentos retratada através do **CBR** das subcamadas. A mistura era caracterizada pelos parâmetros **Estabilidade Marshall e Fluênci**a.

Em virtude da apresentação de uma prematura deterioração da malha rodoviária, vem sendo introduzida no país uma caracterização mecânica mais rigorosa das misturas, que permite analisar **o comportamento estrutural** do pavimento até então não explicável pelos métodos empíricos clássicos de dimensionamento.

Neste capítulo são descritos de forma resumida, alguns dos principais ensaios mecânicos realizados em misturas betuminosas no país.

Calibração

DESEMPENHO (CAMPO)



X

COMPORTAMENTO MECÂNICO (LAB)

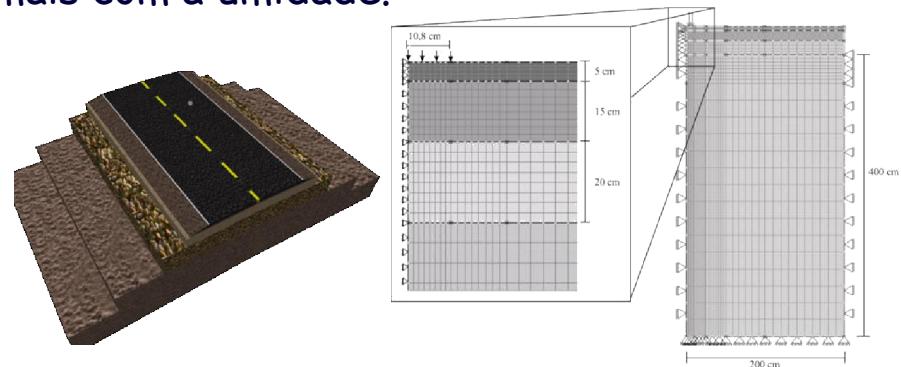
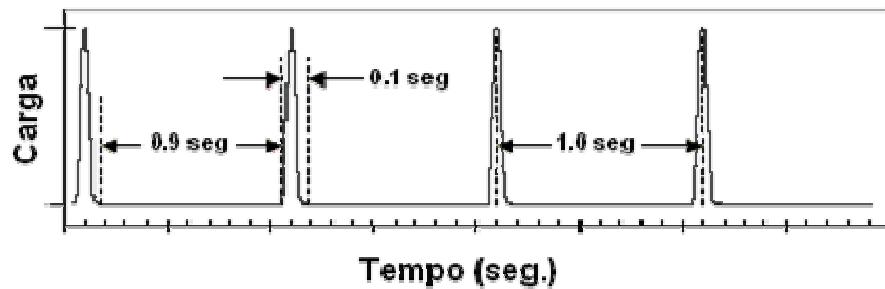


MÓDULO

1) Módulo de Resiliência (MR) (DNER-ME 133/94)

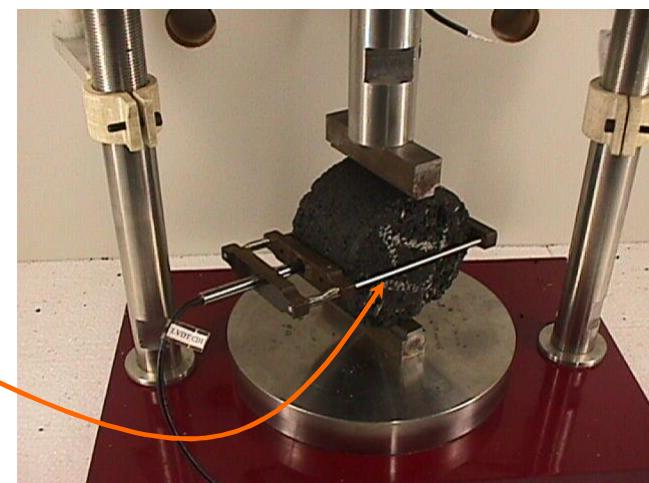
Módulo elástico usado como **entrada de dados** para o cálculo de σ e ε nos diferentes pontos do pavimento. Os materiais de pavimentação não são elásticos, sendo o uso da teoria da elasticidade uma aproximação.

O MR da mistura asfáltica depende da temperatura, enquanto que os módulos dos materiais de base, subbase e subleito variam mais com a umidade.



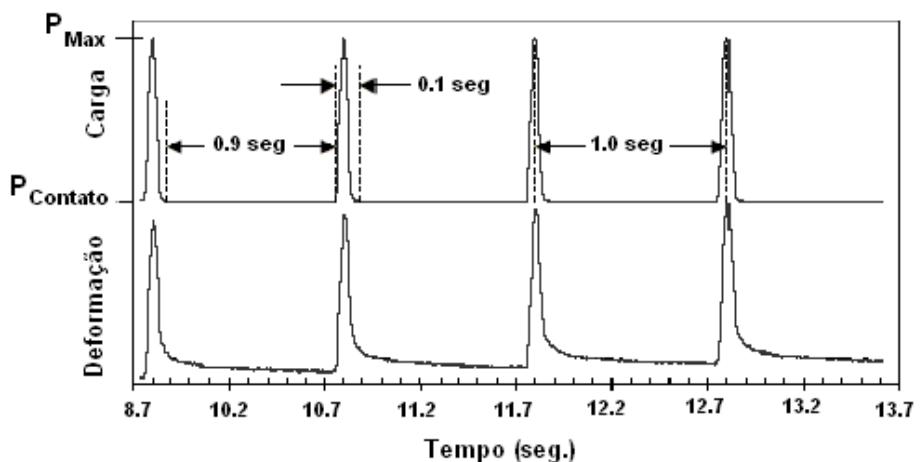
$$MR = \left(\frac{t}{\varepsilon_t} \right) \quad \sigma_t = \frac{2P}{\pi bd}$$

$\Delta L/L + \text{Teoria da Elasticidade}$



MÓDULO

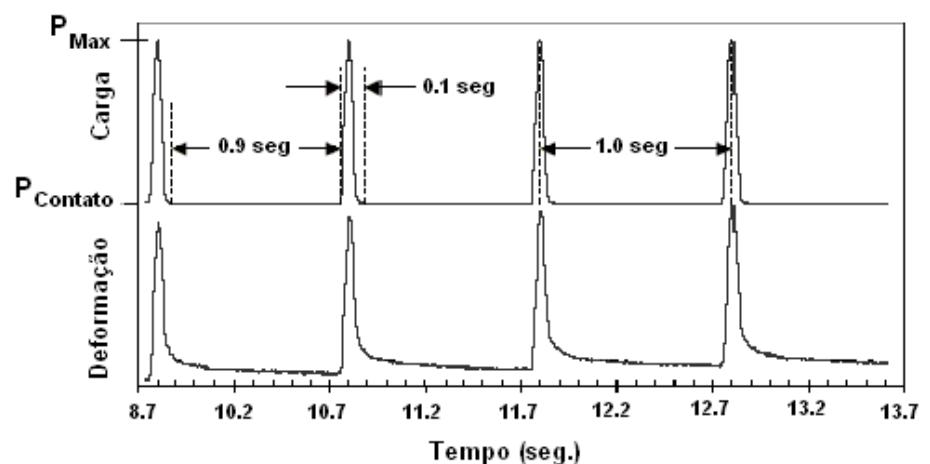
O MR de mistura asfáltica é obtido no ensaio de tração indireta, definido: a relação entre a **tensão de tração (σ_t)**, aplicada repetidamente no plano diametral vertical de uma amostra e a **deformação específica recuperável (ε_t)** correspondente à carga aplicada numa temperatura (T).



$$MR = \left(\frac{t}{\varepsilon_t} \right)$$

MÓDULO

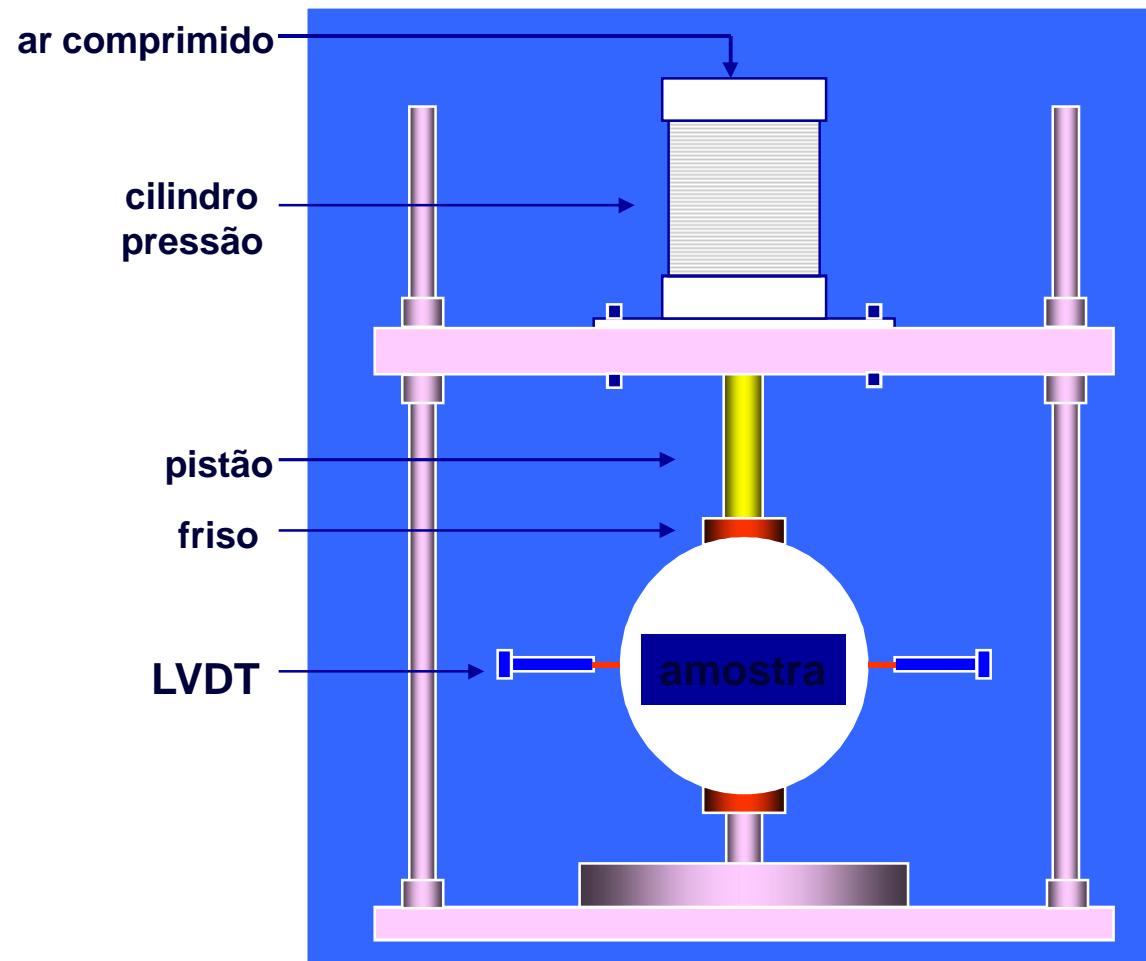
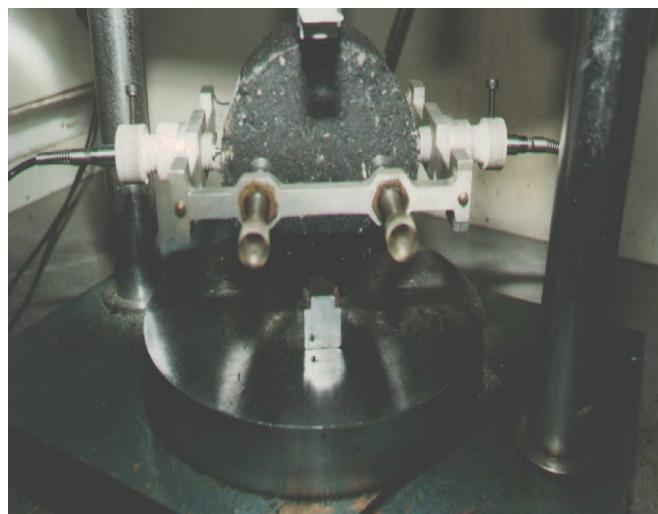
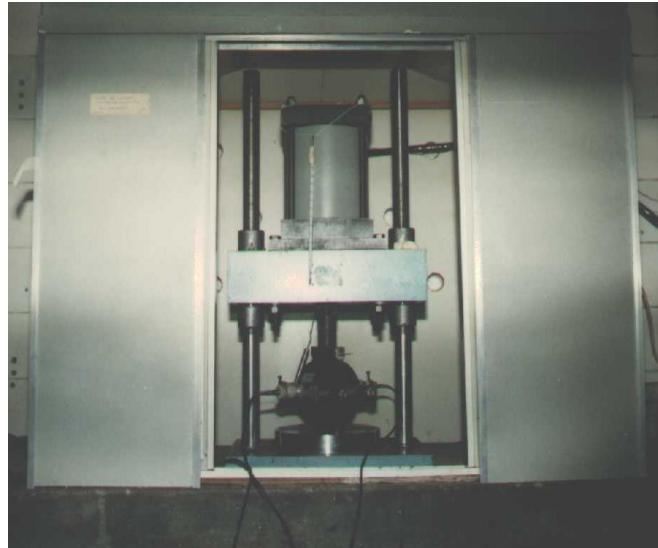
- **Cargas Repetidas** são aplicadas ao corpo de prova, medindo-se o deslocamento.
- Aplicação de cargas pode ser por **compressão uniaxial, tração indireta ou flexão em viga**
- Cargas podem ser **senoidais ou quadradas**



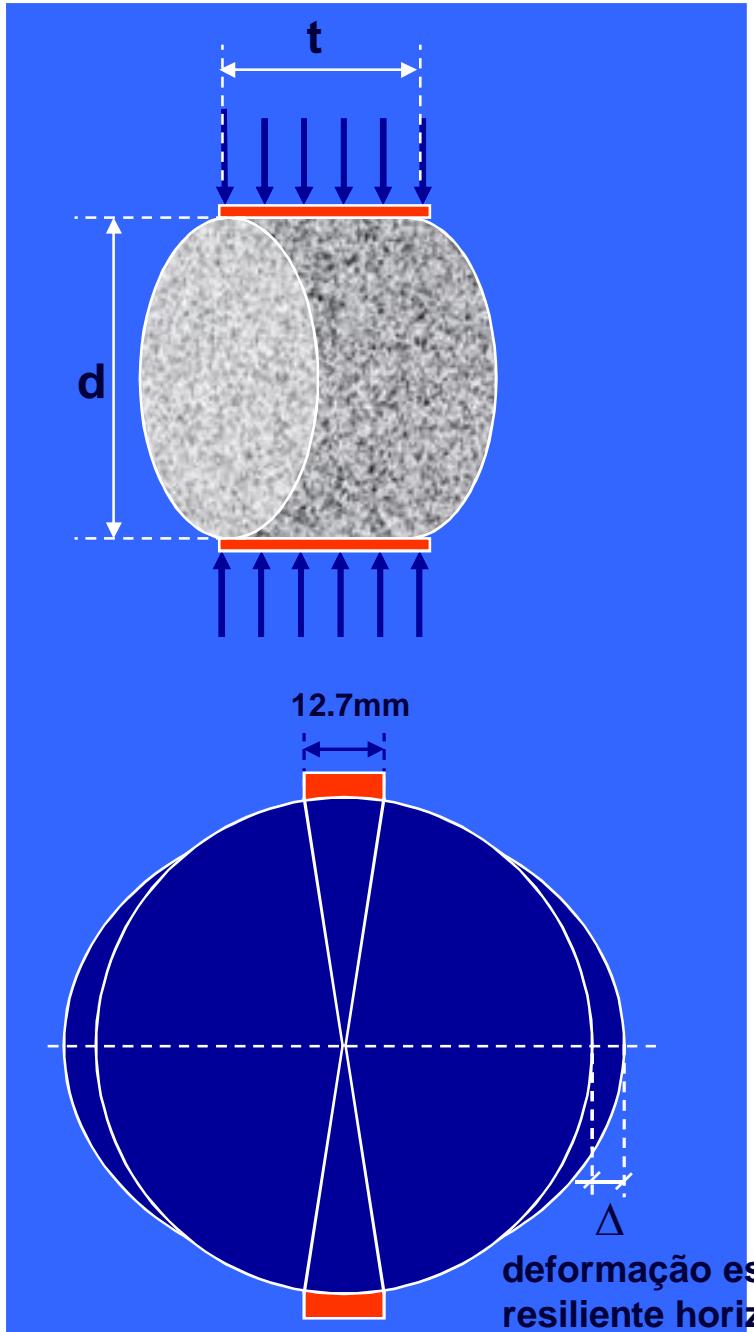
$$MR = \left(\frac{t}{\varepsilon_t} \right)$$

MÓDULO

ENSAIO DE COMPRESSÃO DIAMETRAL DE CARGAS REPETIDAS



MÓDULO



$$\sigma_t = \frac{2F}{\pi t d}$$

Normalmente $d = 10 \text{ cm} (4\hat{l})$

$$\sigma_t = 0.064 \frac{F}{t}$$

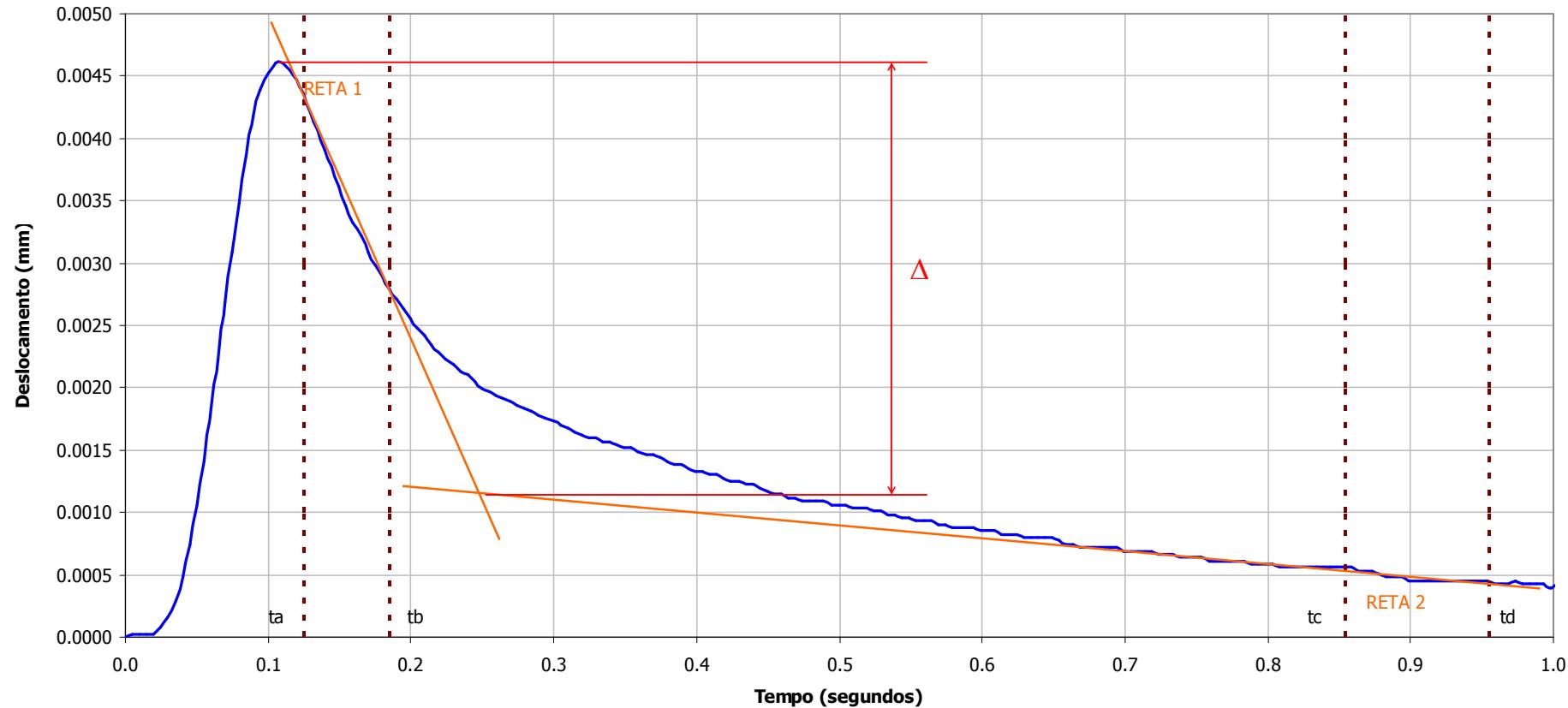
Para friso de carga de 1,27 cm de largura

$$M_R = \frac{\sigma_t}{\varepsilon_t} = \frac{F}{t\Delta} (0.9976\mu + 0.2692)$$

Admitindo $\mu = 0.35$

$$M_R = \frac{F}{t(2\Delta)} 0.6184$$

MÓDULO
Norma DNER
PARA DETERMINAÇÃO DA DEFORMAÇÃO INSTANTÂNEA



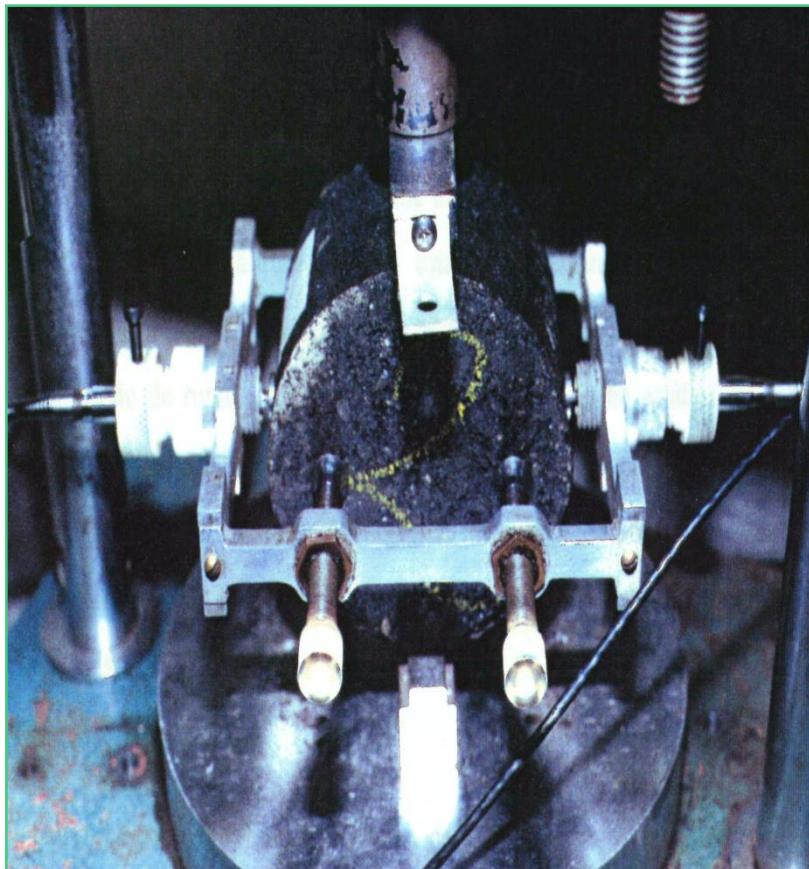
Reta 1 É Traçada por 2 pontos

Reta 2 É Traçada pela Regressão entre os pontos

MÓDULOS

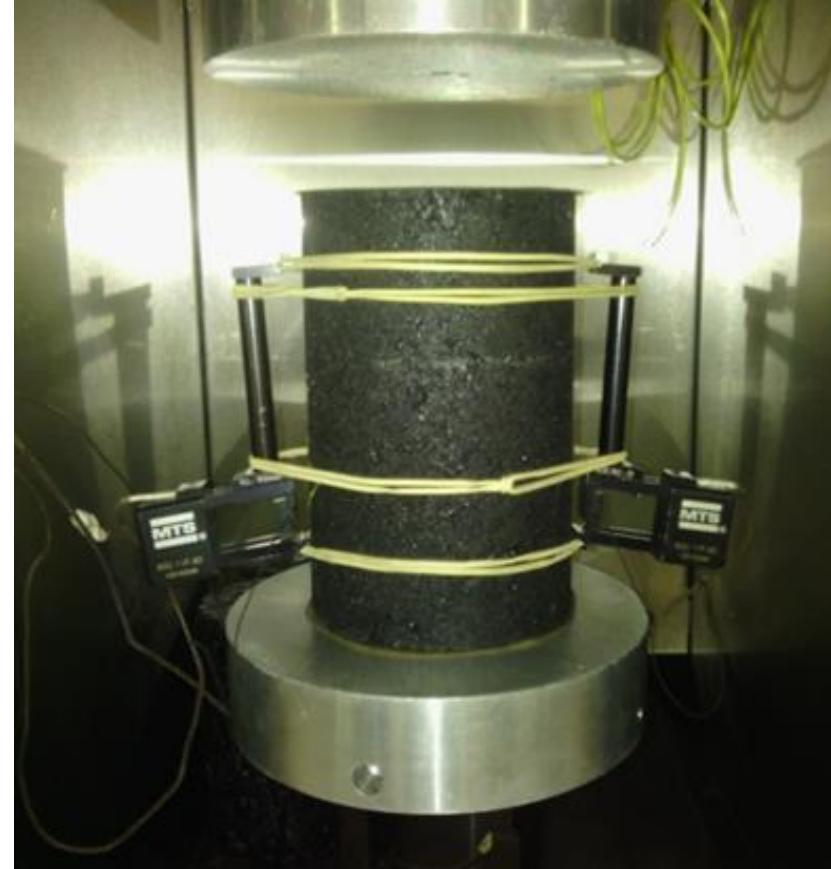
RESILIÊNCIA

DNIT ou ABNT



DINÂMICO complexo

AASTHO T 342



RESISTÊNCIA A TRAÇÃO

2) Resistência à Tração Indireta (DNER-ME 138/94; ABNT ????)

Determinar a resistência à tração de corpos de prova cilíndricos de misturas betuminosas através do ensaio de **compressão diametral**.

O corpo de prova pode ser obtido diretamente do campo por extração através de **sonda rotativa** ou fabricado em laboratório.

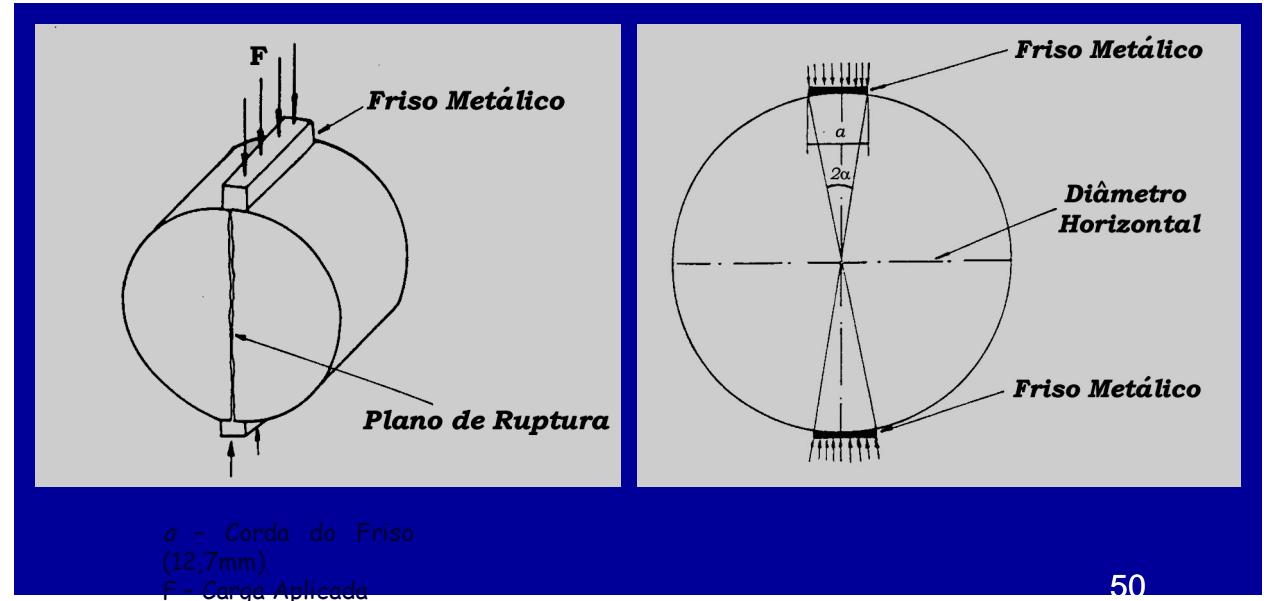
Com o valor da carga de ruptura (F), a RT do corpo de prova é calculada através da expressão:



$$RT = \frac{2F}{DH}$$

onde,

- RT = resistência à tração
- F = carga de ruptura
- D = diâmetro do cp
- H = altura do cp

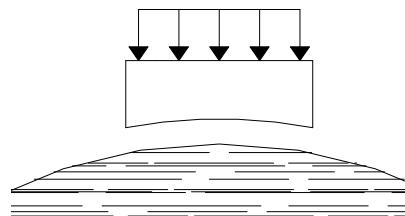


$$\sigma = \frac{F}{DH}$$

RESISTÊNCIA A TRAÇÃO



O ensaio de compressão diametral (CD) para determinação da RT, conhecido como ensaio brasileiro, desenvolvido pelo Professor Lobo Carneiro para concreto-cimento (1943).



- Mais adequado para medir as características de dosagem associadas à fadiga do que a Estabilidade Marshall
- Alta correlação com o Módulo Resiliente

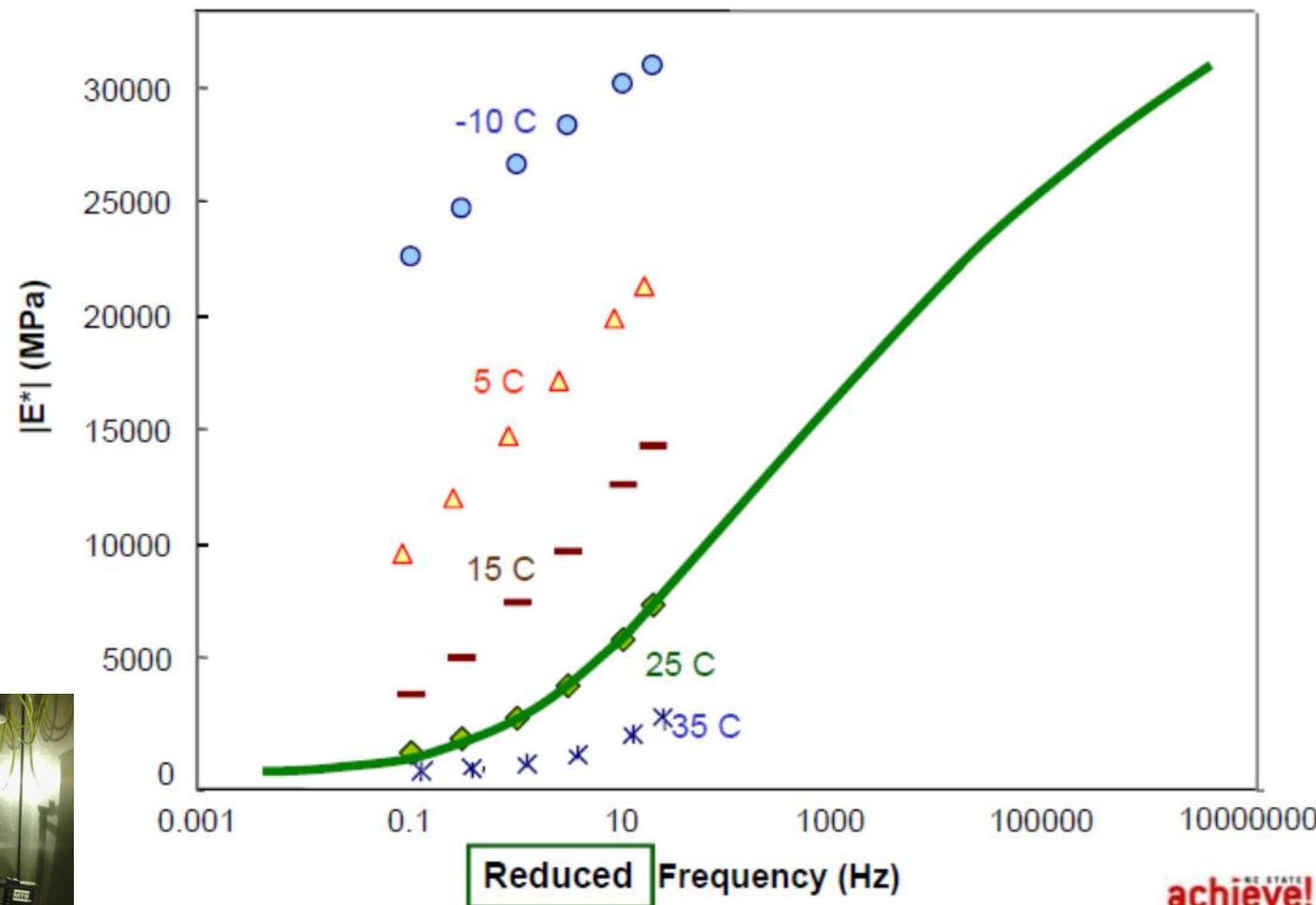
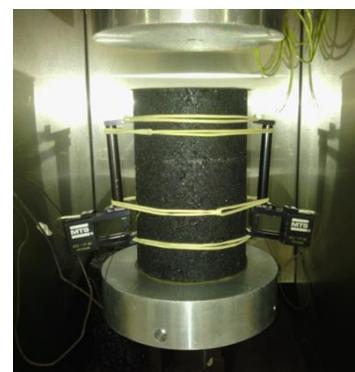
Relação Módulo Resiliente (MR) e Resistência à Tração estática (RT)

- DNER PRO 269/94:
 $MR = 5000 RT$
- Motta e Pinto (1994):
 $MR = 4385 RT$
- Motta (1998):
Para misturas com polímero:
 $MR = 3000 a 3500 RT$
- Ensaios à $25^{\circ}C$, qualquer idade das misturas

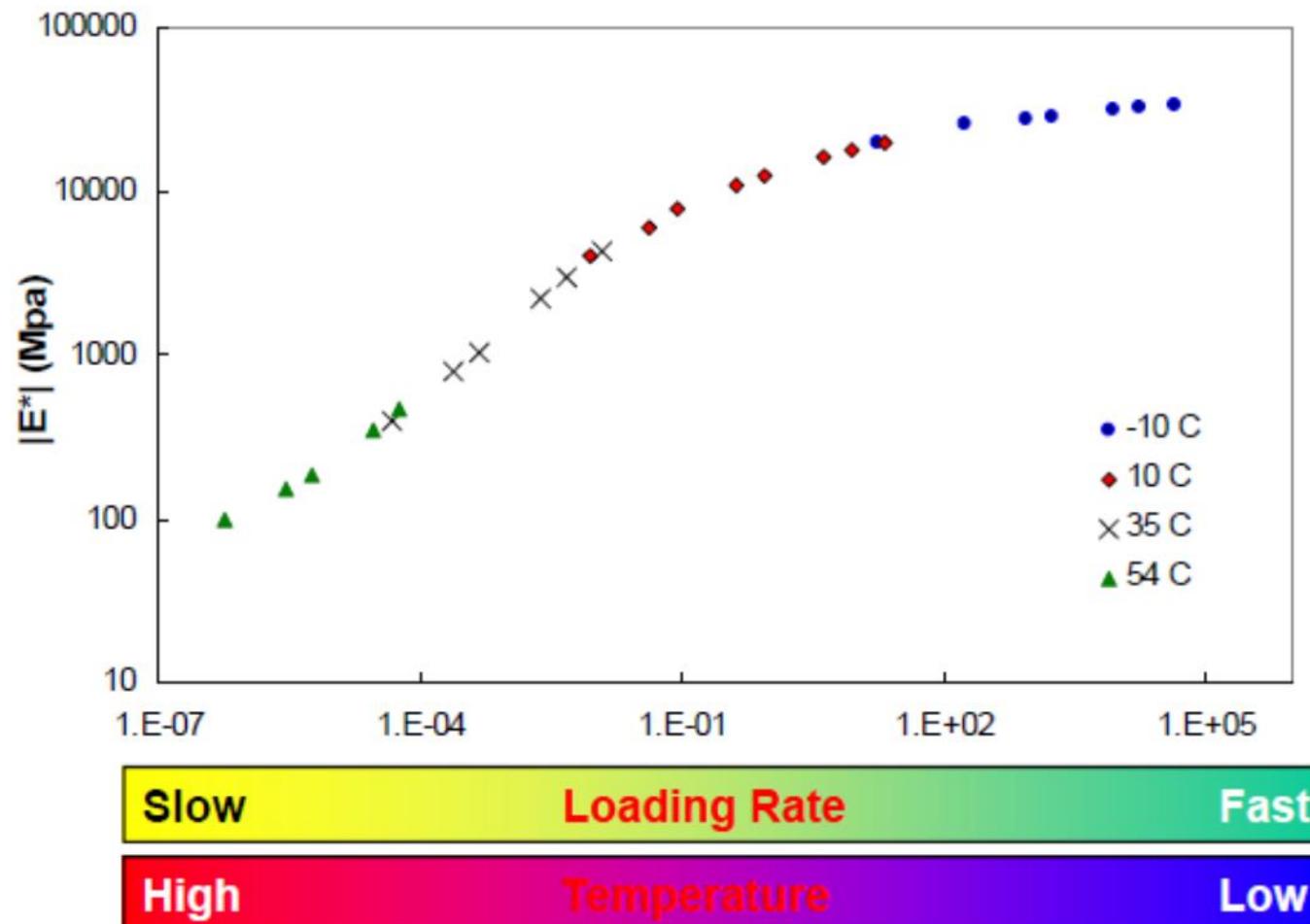


Módulo Dinâmico Uniaxial

Superposição t-T



Módulo Dinâmico È Curva Mestra



Fator de Deslocamento t-T (*Shift Factor*)

- Determina o deslocamento horizontal, tanto no domínio do tempo quanto no da frequência, relacionando tempo e temperatura.

$$a_T = \frac{t_T}{\xi} \quad \text{ou} \quad a_T = \frac{f_R}{f}$$

Fator de Deslocamento t-T (*Shift Factor*)

- Para $T < T_g$ (glass transition), a relação de Arrhenius é geralmente utilizada:

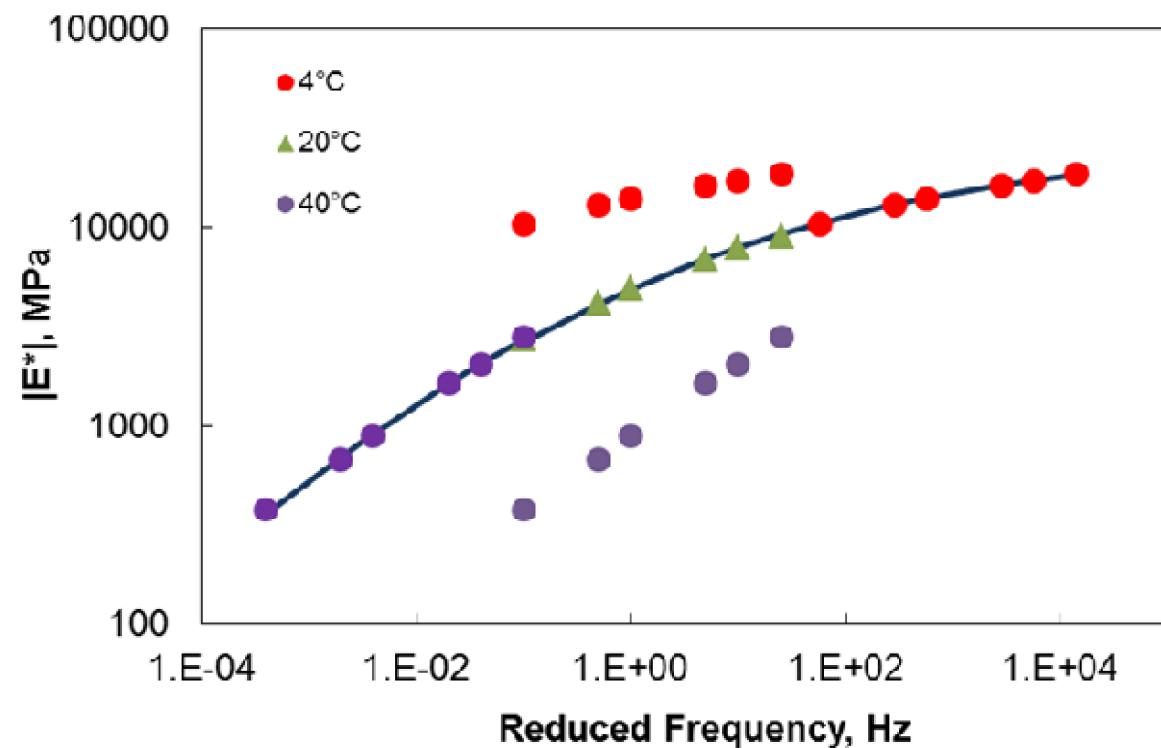
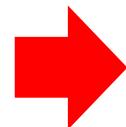
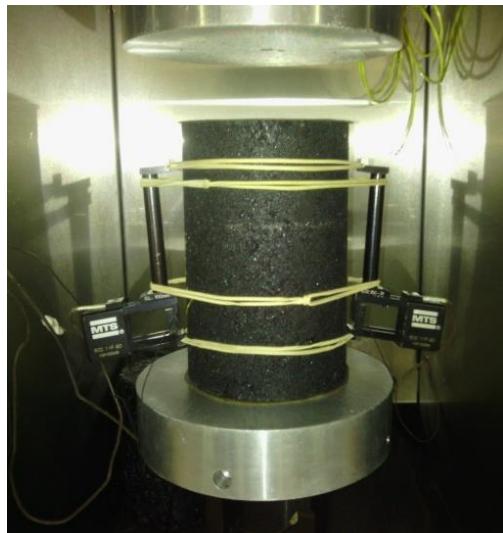
$$\log_{10} a_T = \frac{\Delta F}{2.303R} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_R} \right)$$

- Para $T > T_g$, a equação WLF normalmente se aplica:

$$\log_{10} a_T = \frac{-C_1(T - T_R)}{(C_2 + T - T_R)}$$

Curva Mestra de $|E^*|$ (Experiência)

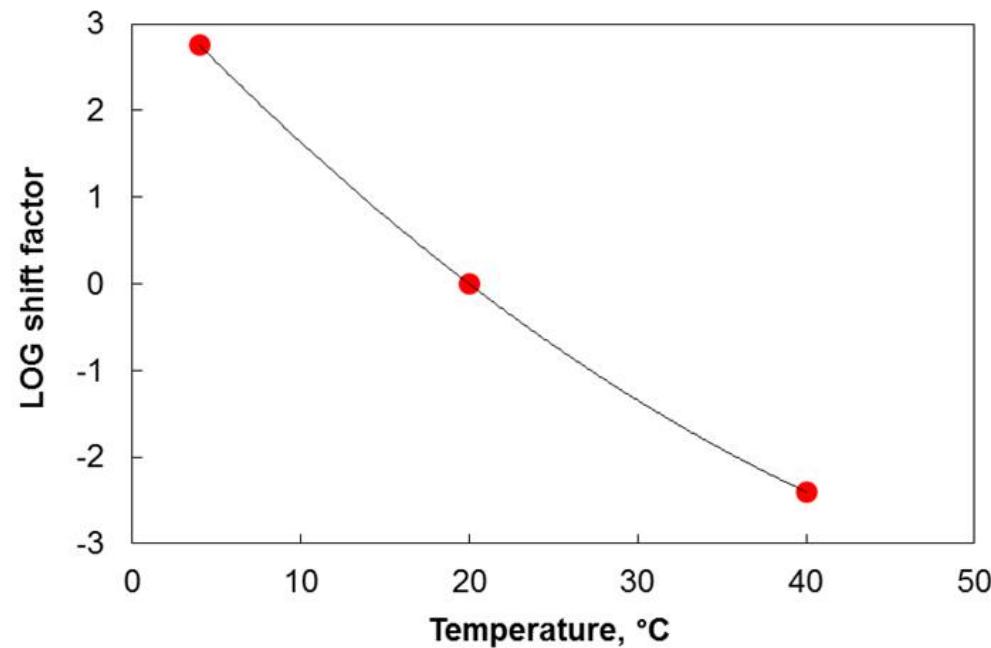
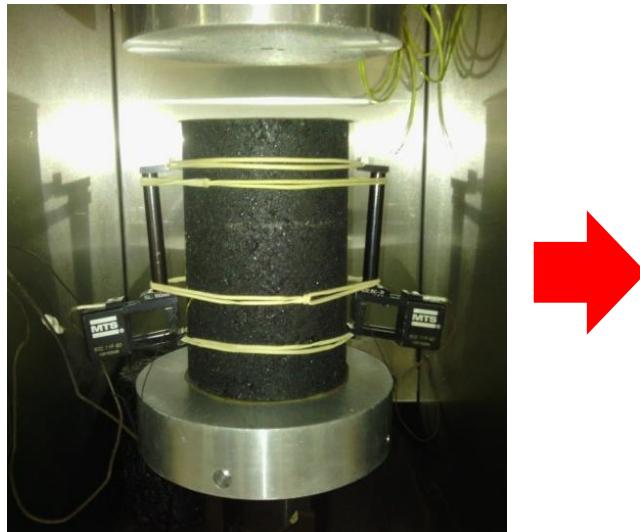
Módulo Dinâmico Uniaxial: AASHTO T 342 / TP 79



- Modelo sigmoidal:
$$\log|E^*| = a + \frac{b}{1 + \frac{1}{e^{d + g * \log(f_R)}}}$$

Shift Factors (Experiência)

Módulo Dinâmico Uniaxial: AASHTO T 342 / TP 79

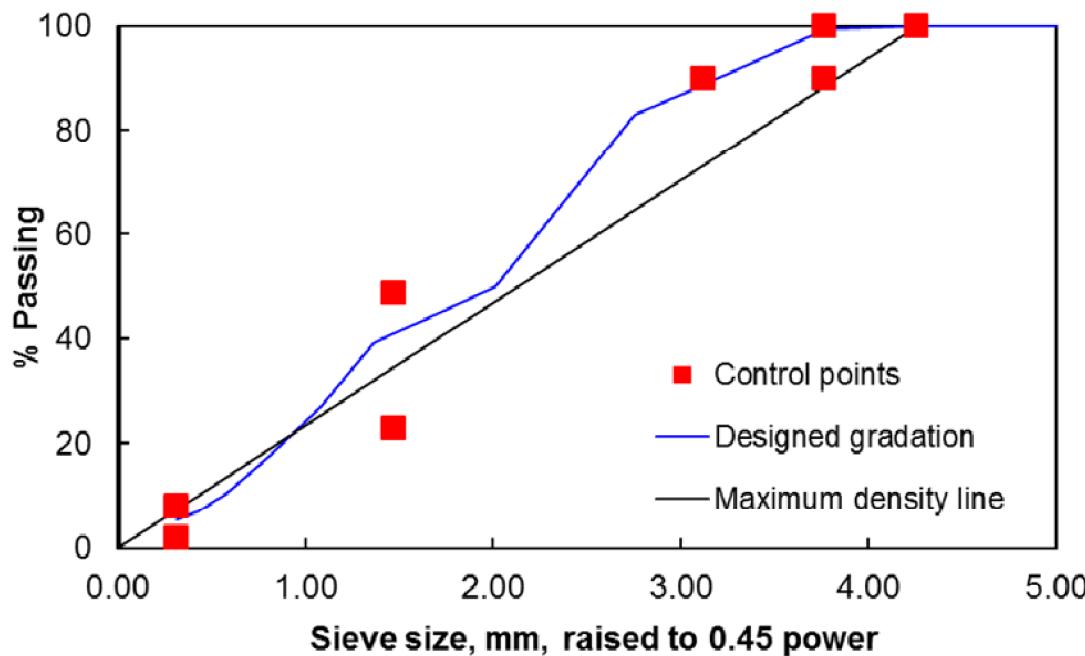


- Log shift factor (polinômio de segunda ordem):

$$\log(a_T) = \alpha_1 T^2 + \alpha_2 T + \alpha_3$$

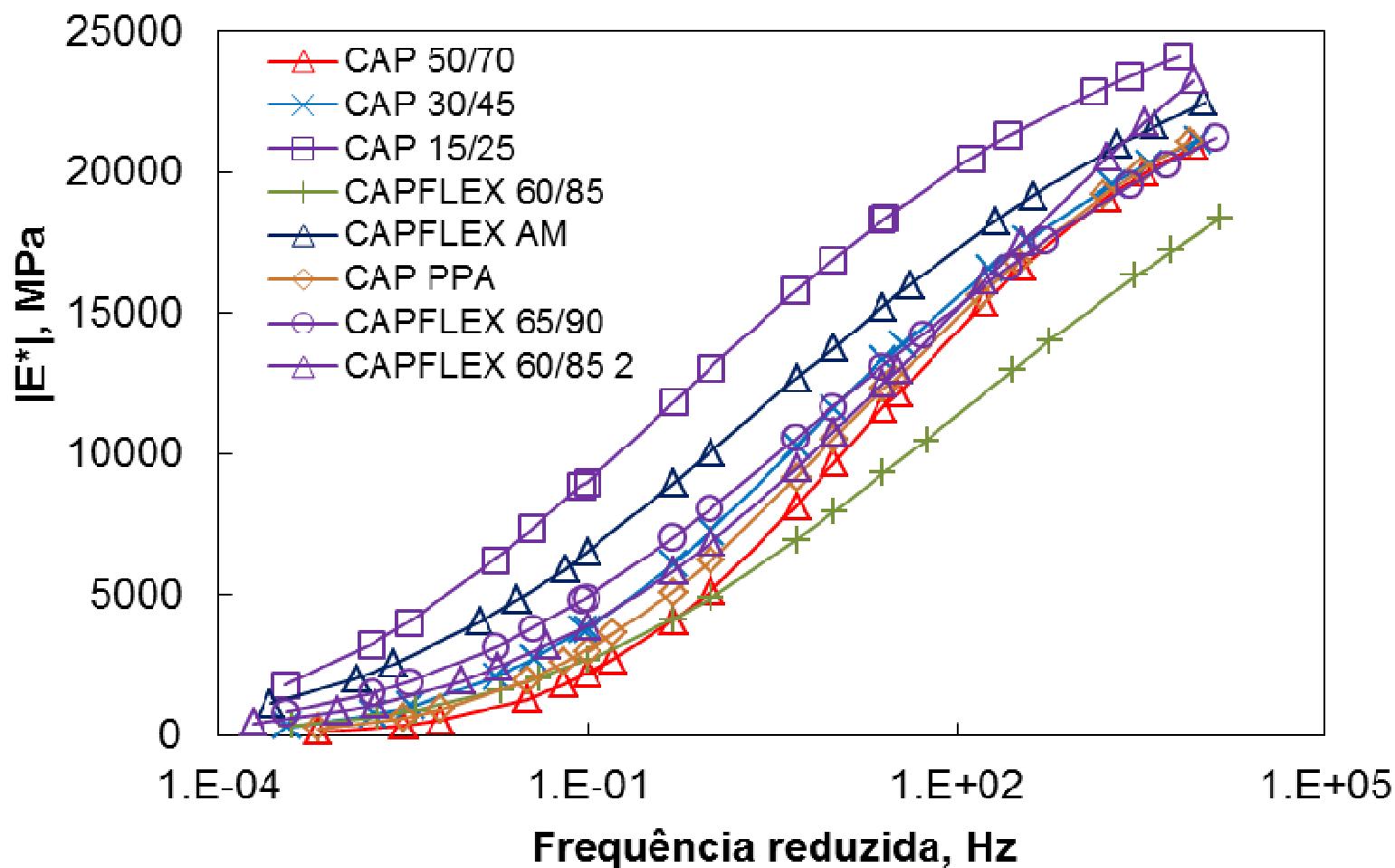
Exemplos Módulos Dinâmicos

- ❑ Misturas projetadas de acordo com a AASTHO M 323
→ $N_{des} = 100$ giros
- ❑ Todas as misturas com o mesmo teor de ligante, baseado na dosagem do CAP 50/70
 - ❑ Tamanho máximo nominal de 19.1 mm

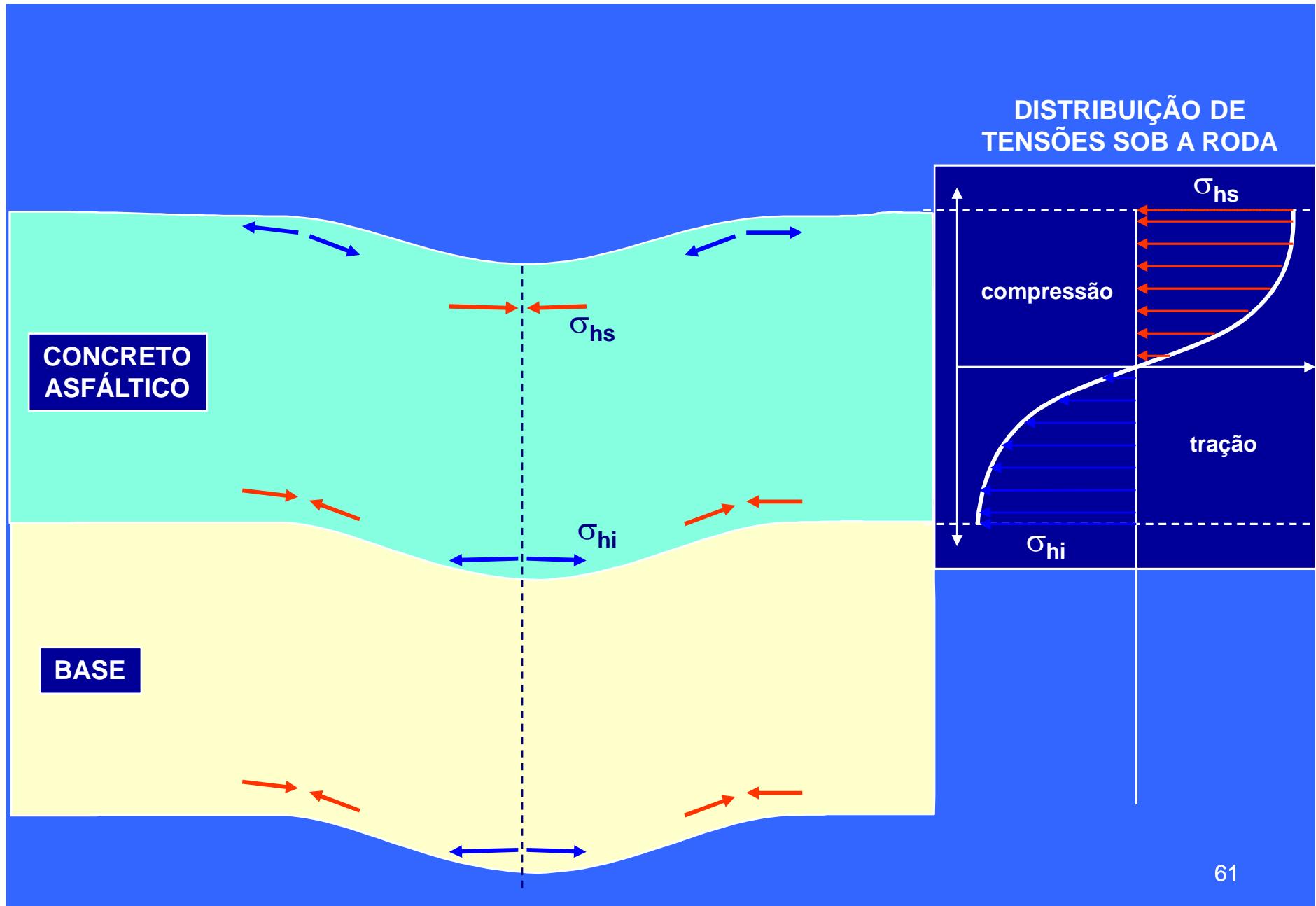


- ✓ Agregados de boa qualidade
- ✓ Sem reciclado

Exemplos Módulos Dinâmicos



FADIGA DE MISTURAS ASFÁLTICAS





3.12.2002



3.12.2002



3.12.2002

Fadiga de solo cimento sem e com fibra



ENSAIO DE FADIGA POR COMPRESSÃO DIAMETRAL

Amostra: Prepredígna - Tese DSc. - Pista Circular IPR/DNER

Temperatura de ensaio: 25 °C

Operador(es): Alvaro Dellê e Marcos Antunes

Tensão de tração estática máxima, $\sigma_{T\max}$ = 13,00 kgf/cm²

Data: 20/08/97

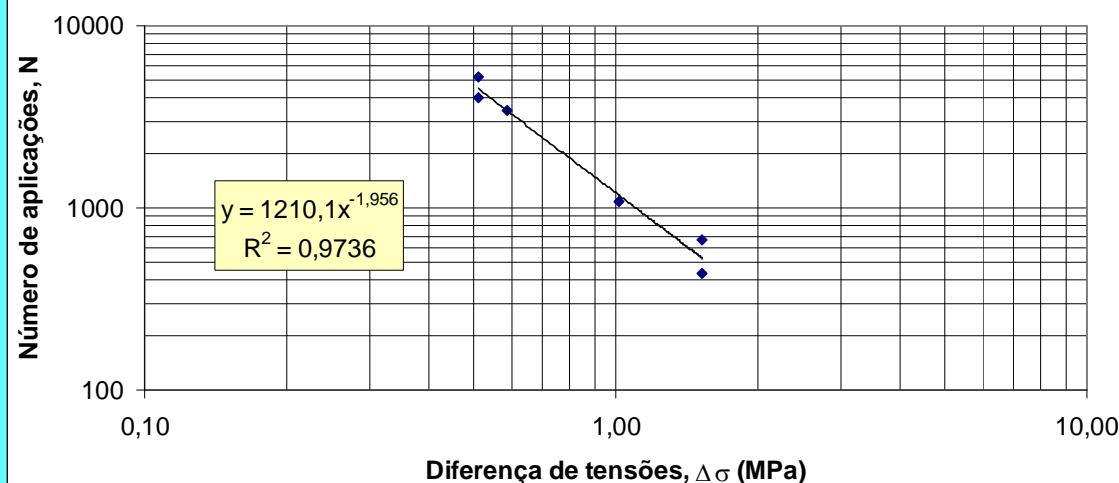
$$Pm(0-1) = 0,0069 F - 0,1166 ; Pm(0-10) = 0,0055 F + 0,0804$$

Equação do cil. de carga (6 pol):

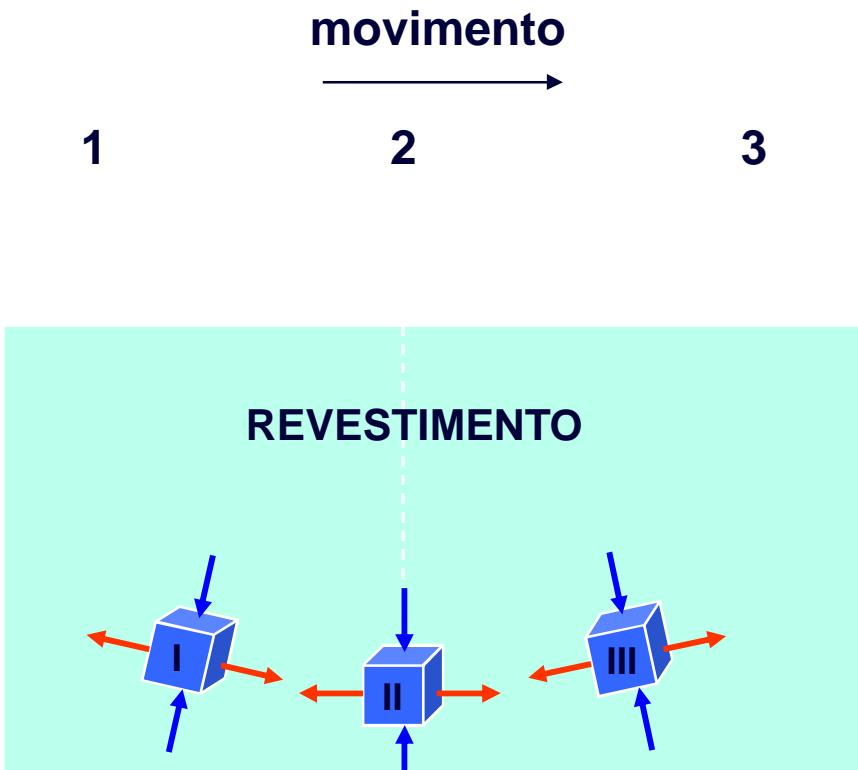
$$F(0-1) = 145,09 Pm + 16,973 ; F(0-10) = 182,47 Pm - 14,267$$

Número do C.P.	Espessura (cm)	Diâmetro (cm)	Nível de tensão (%)	carga aplicada (kgf)	Pres. manométrica (kgf/cm ²)	(MPa)	Número de aplicações	Diferença de tensões (MPa)
2536	7,54	10,2	20	314,1	1,81	0,18	1078	1,02
2537	7,12	10,24	11,5	171,2	1,02	0,10	3430	0,59
2538	7,35	10,23	30	460,6	2,61	0,26	674	1,53
2539	6,71	10,32	30	424,2	2,41	0,24	433	1,53
2540	7,08	10,34	10	149,5	0,91	0,09	4000	0,51
2541	7,26	10,25	10	152,0	0,93	0,09	5268	0,51

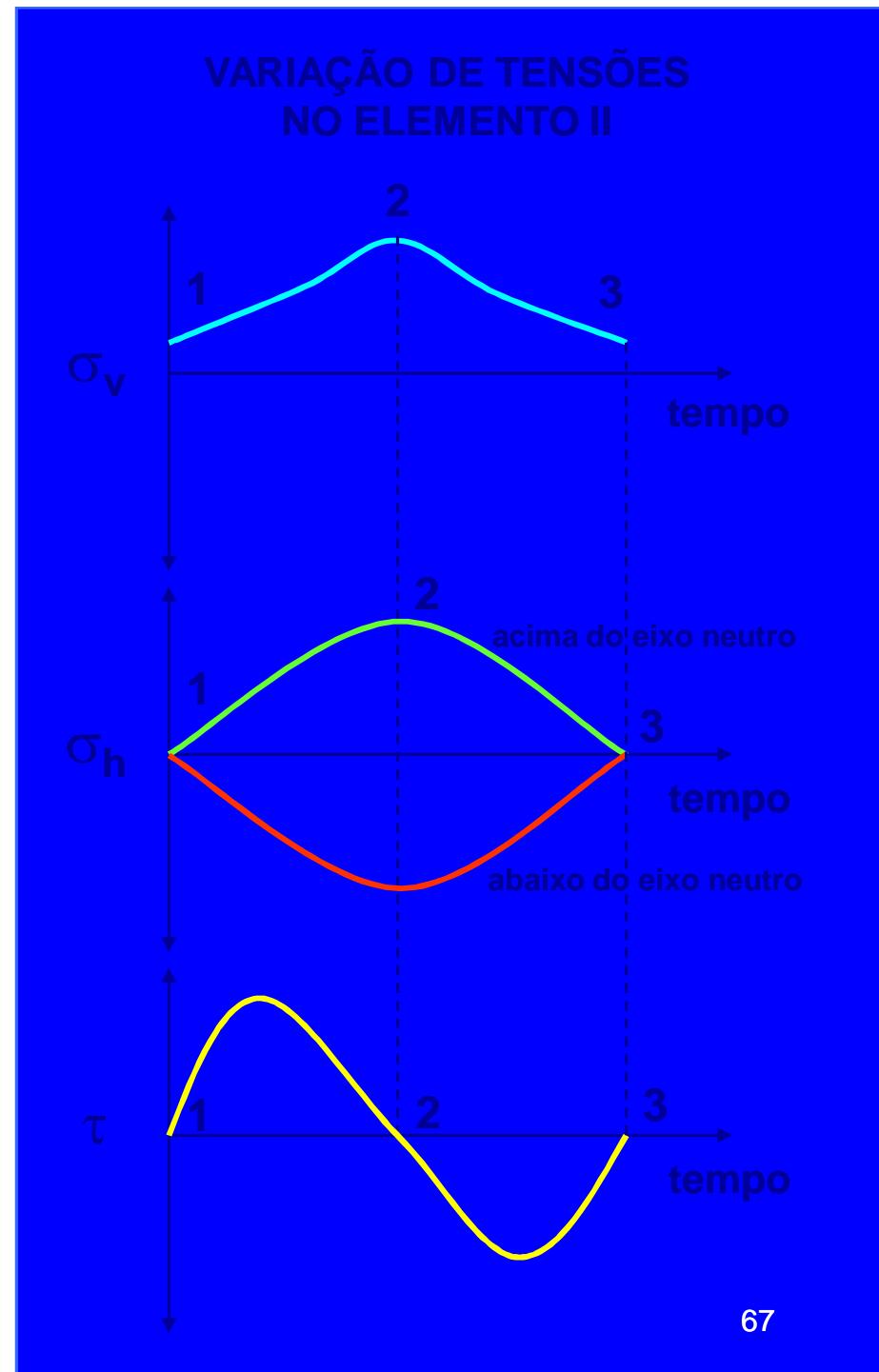
VIDA DE FADIGA x DIFERENÇA DE TENSÕES



TENSÕES NO REVESTIMENTO

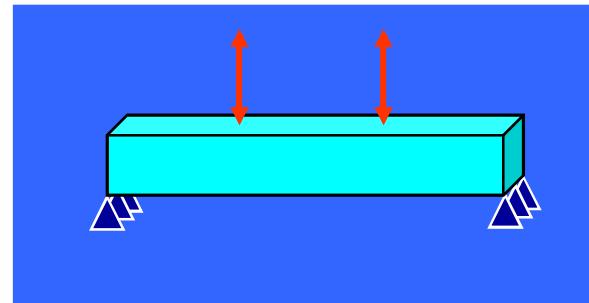


DIREÇÃO DAS TENSÕES PRINCIPAIS

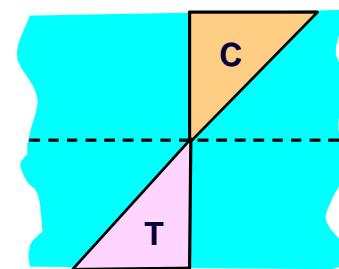


ENSAIOS DE FADIGA

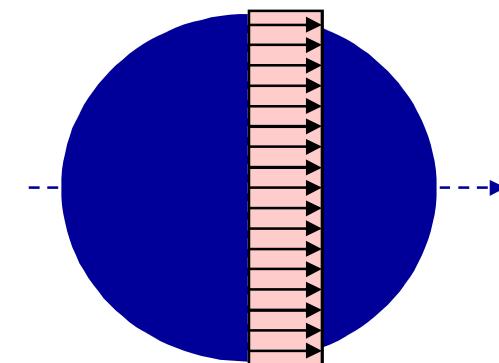
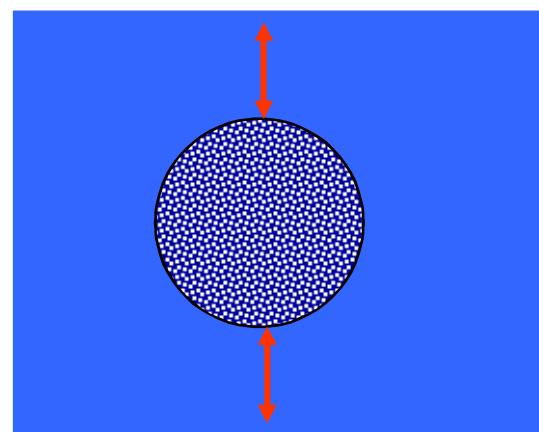
ENSAIOS EM VIGAS



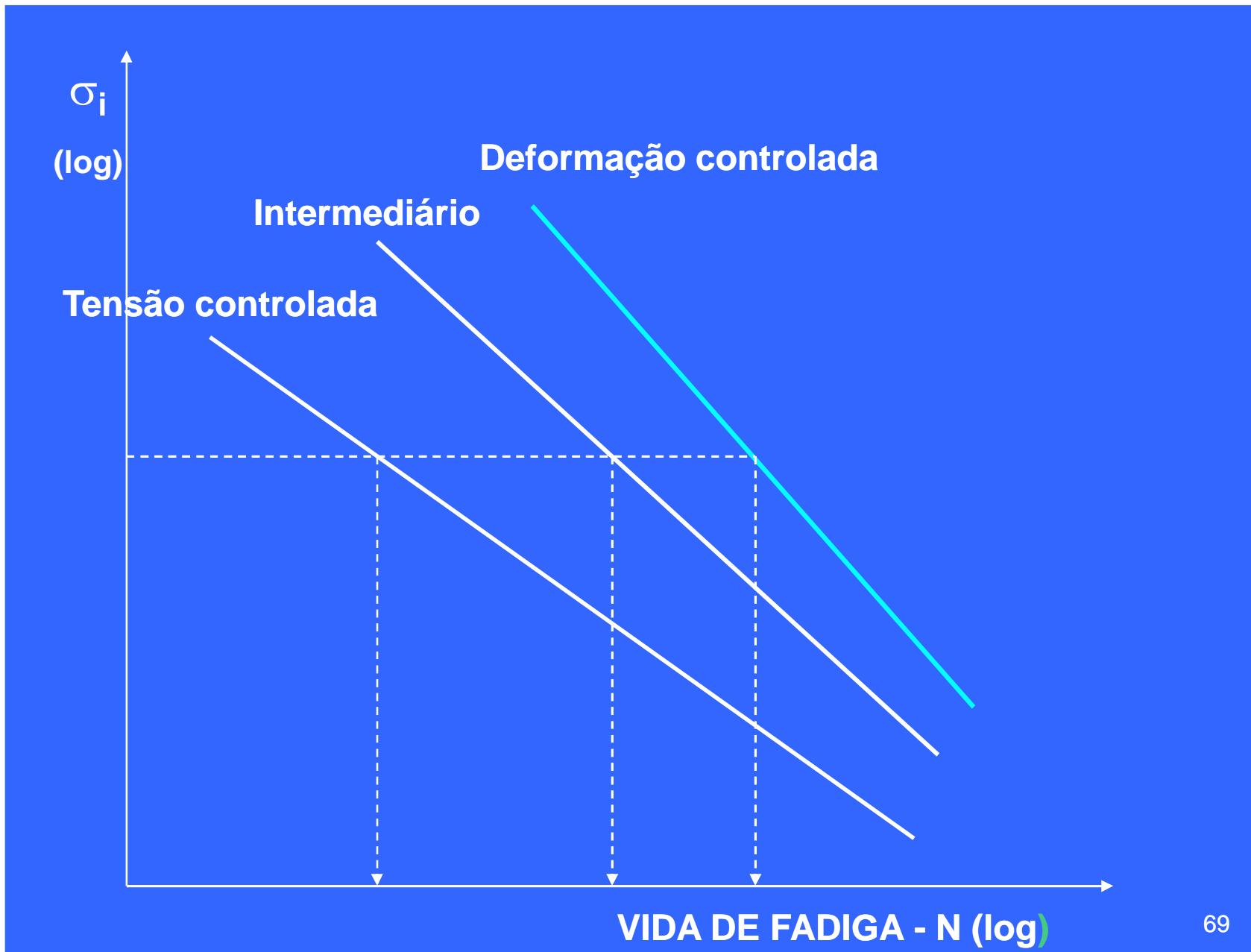
distribuição
das tensões



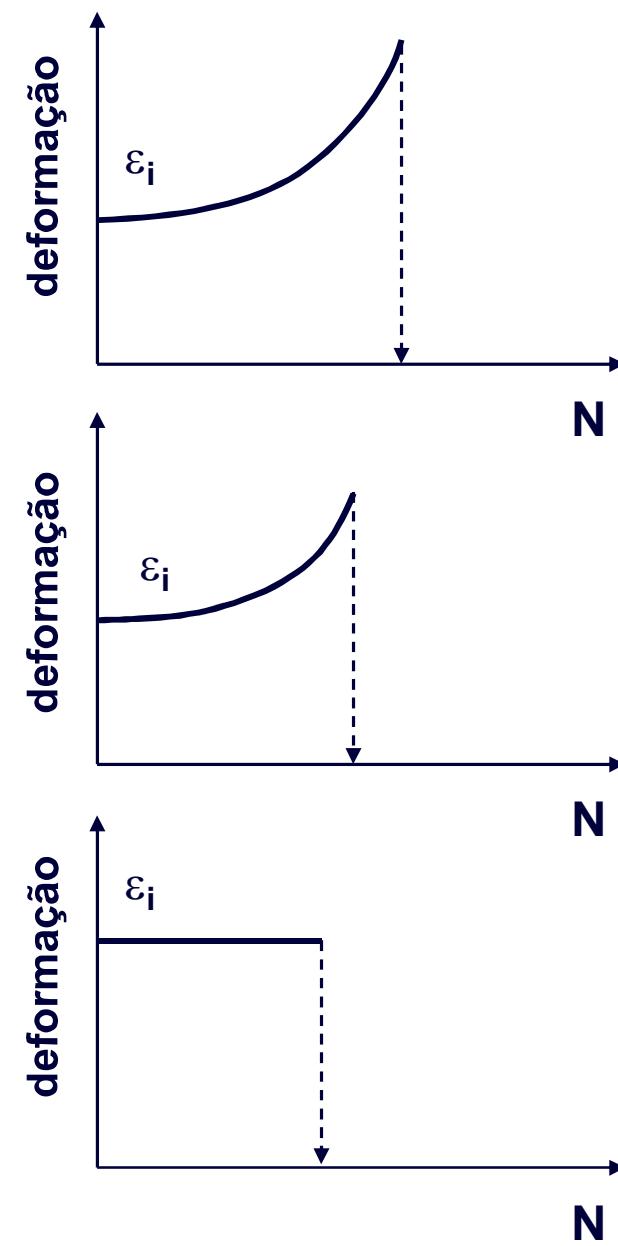
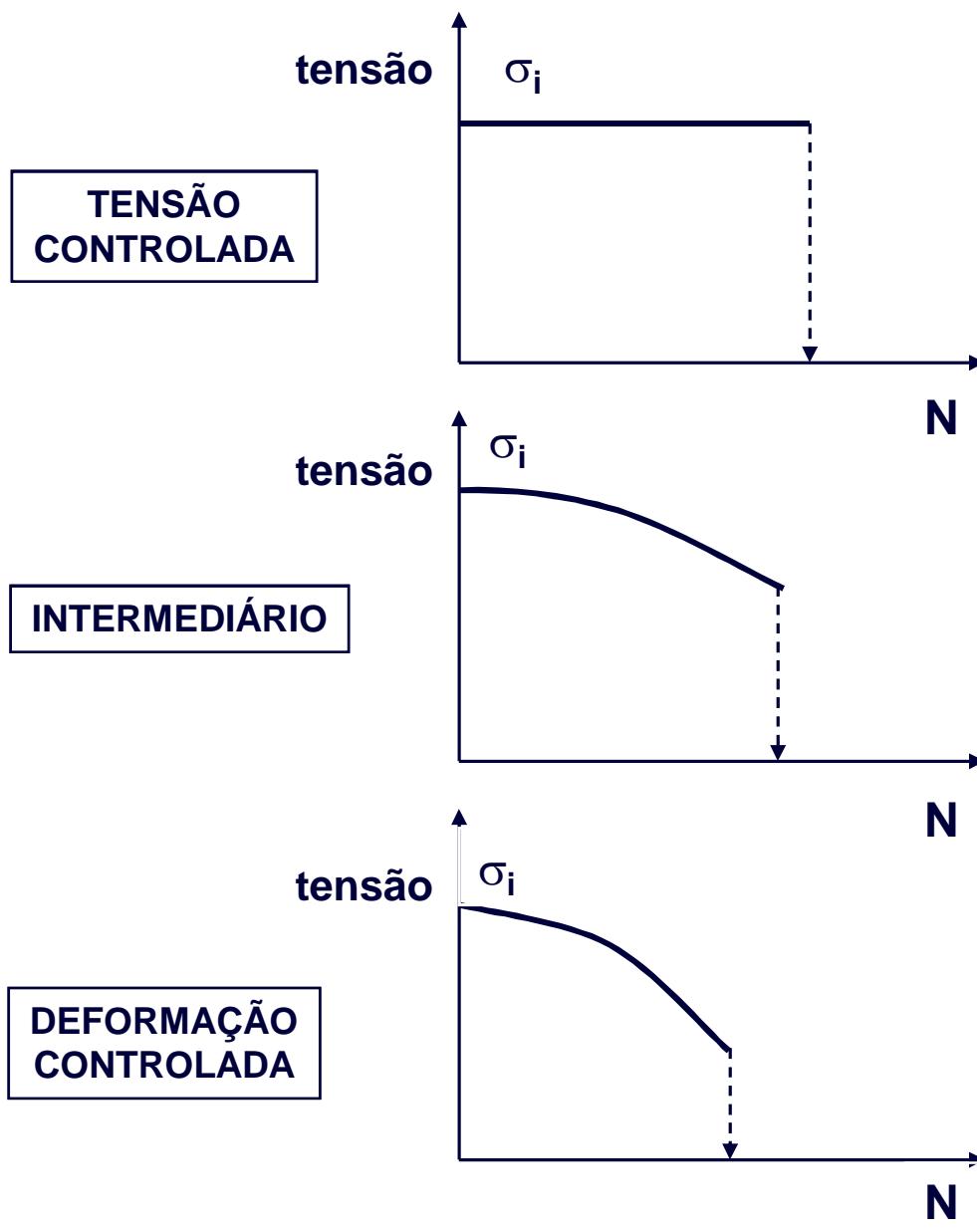
ENSAIOS EM
CORPOS-DE-PROVA
CILÍNDRICOS



INFLUÊNCIA DO TIPO DE CARREGAMENTO



INFLUÊNCIA DO TIPO DE CARREGAMENTO



INFLUÊNCIA DO TIPO DE CARREGAMENTO

Pinto, S. Tese de Doutorado: *Estudo do Comportamento à Fadiga de Misturas Betuminosas e Aplicação na Avaliação Estrutural de Pavimentos*. COPPE, 1991.

“ensaios de deformação controlada aplicam-se melhor a pavimentos com camadas betuminosas delgadas ($e < 15$ cm) e de pequena rigidez em relação às demais camadas
→ pequena contribuição do revestimento na rigidez da estrutura
→ deformação controlada pela deformação das demais camadas

“ensaios de tensão controlada aplicam-se melhor a pavimentos com camadas betuminosas espessas ($e > 15$ cm) e rígidas em relação às demais camadas
→ grande contribuição do revestimento na rigidez da estrutura
→ deformação do pavimento controlada pelo revestimento

CONCLUSÃO

O comportamento à tensão ou deformação depende:
→ da espessura do revestimento
→ da rigidez do revestimento
→ da rigidez das demais camadas

VIDA DE FADIGA DE MISTURAS BETUMINOSAS

MODELO DE RUPTURA

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

$$\Delta\sigma \text{ ou } \varepsilon_t$$

N → VIDA DE FADIGA expressa em número de solicitações da carga

σ ou ε → tensão ou deformação de tração

K e n → parâmetros experimentais

ENSAIOS TC

deformações atingem
valor máximo

ENSAIOS DC

diminuição do carregamento
aplicado

CRITÉRIO DE FADIGA

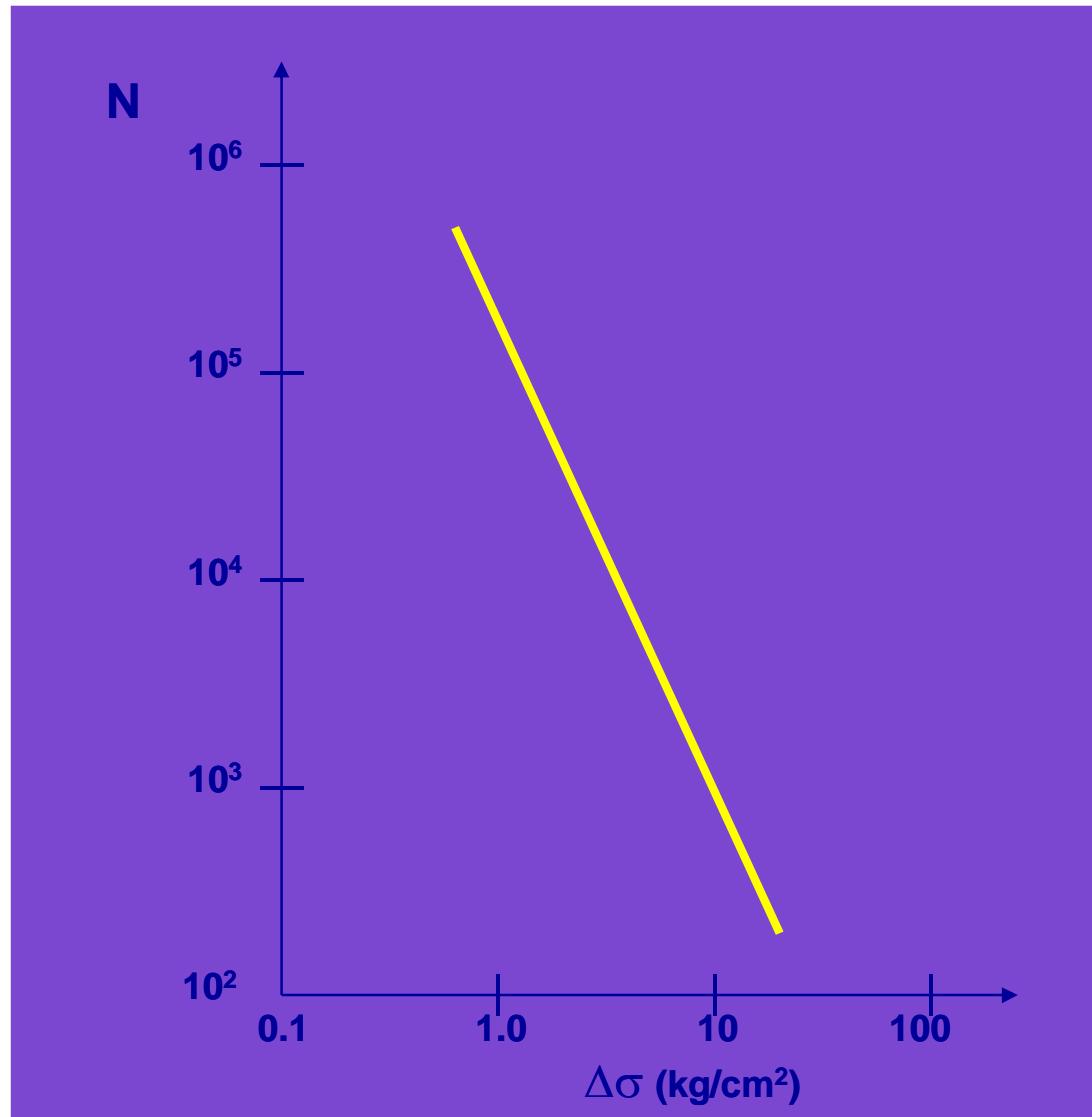
fratura da amostra

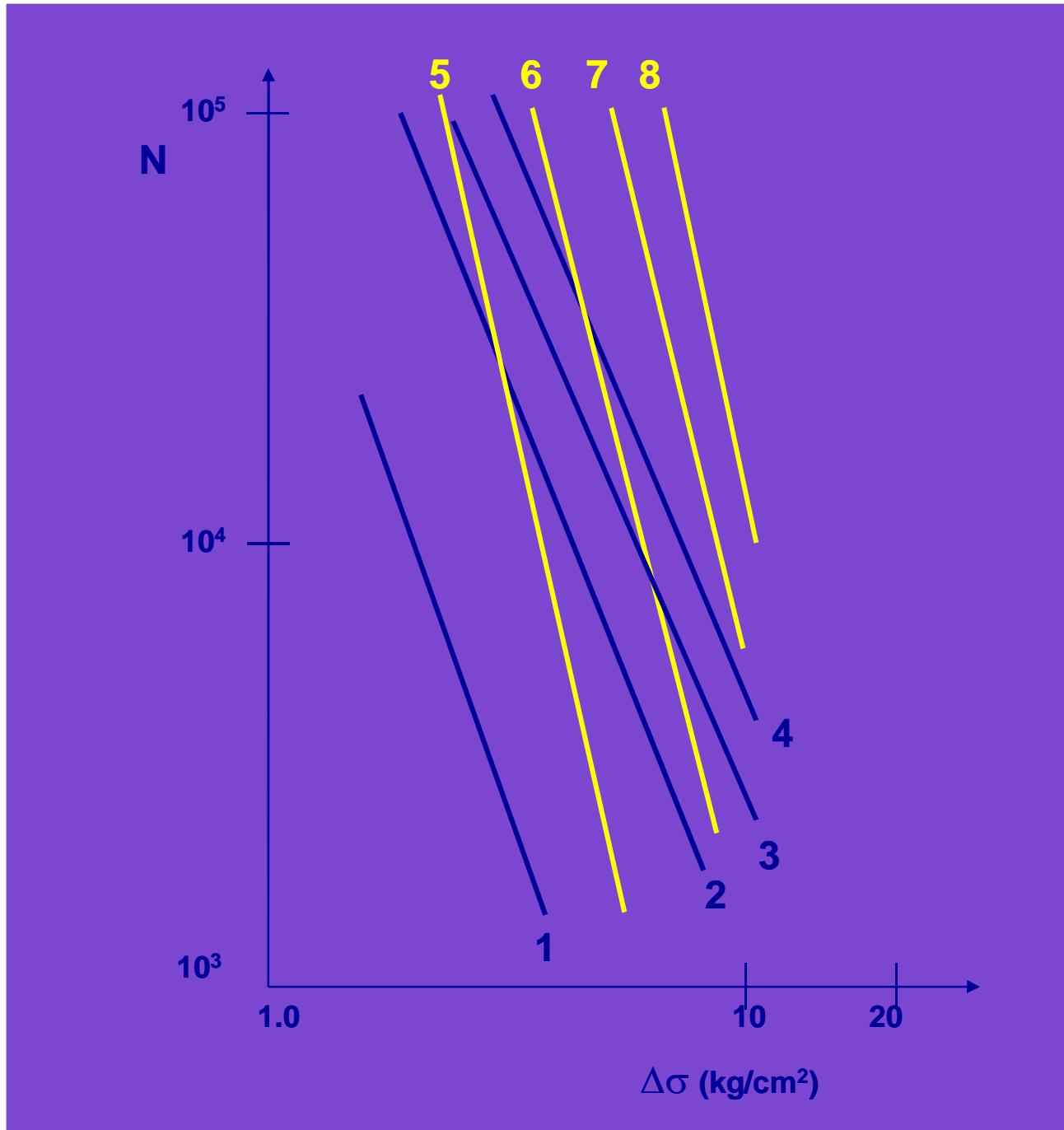
redução do desempenho:
- redução módulo de resiliência (50% p.ex.)
- redução da carga aplicada (40 ou 50% p.ex.)

RESULTADOS

Pinto, S. Tese de Doutorado: *Estudo do Comportamento à Fadiga de Misturas Betuminosas e Aplicação na Avaliação Estrutural de Pavimentos*. COPPE, 1991.

$$N = K \left(\frac{1}{\Delta\sigma} \right)^n$$





RESULTADOS

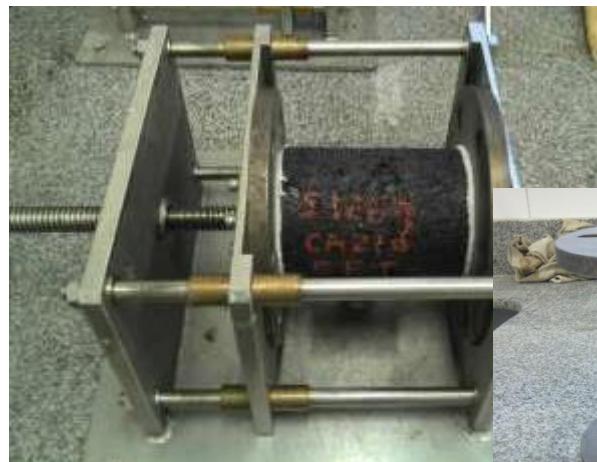
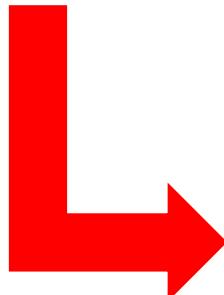
Fadiga por Tração Direta

Corpo de prova



- CP moldado em compactador giratório:
 - 100 mm x 170 mm
 - Serrado para 100 mm x 130 mm

Jig de colagem

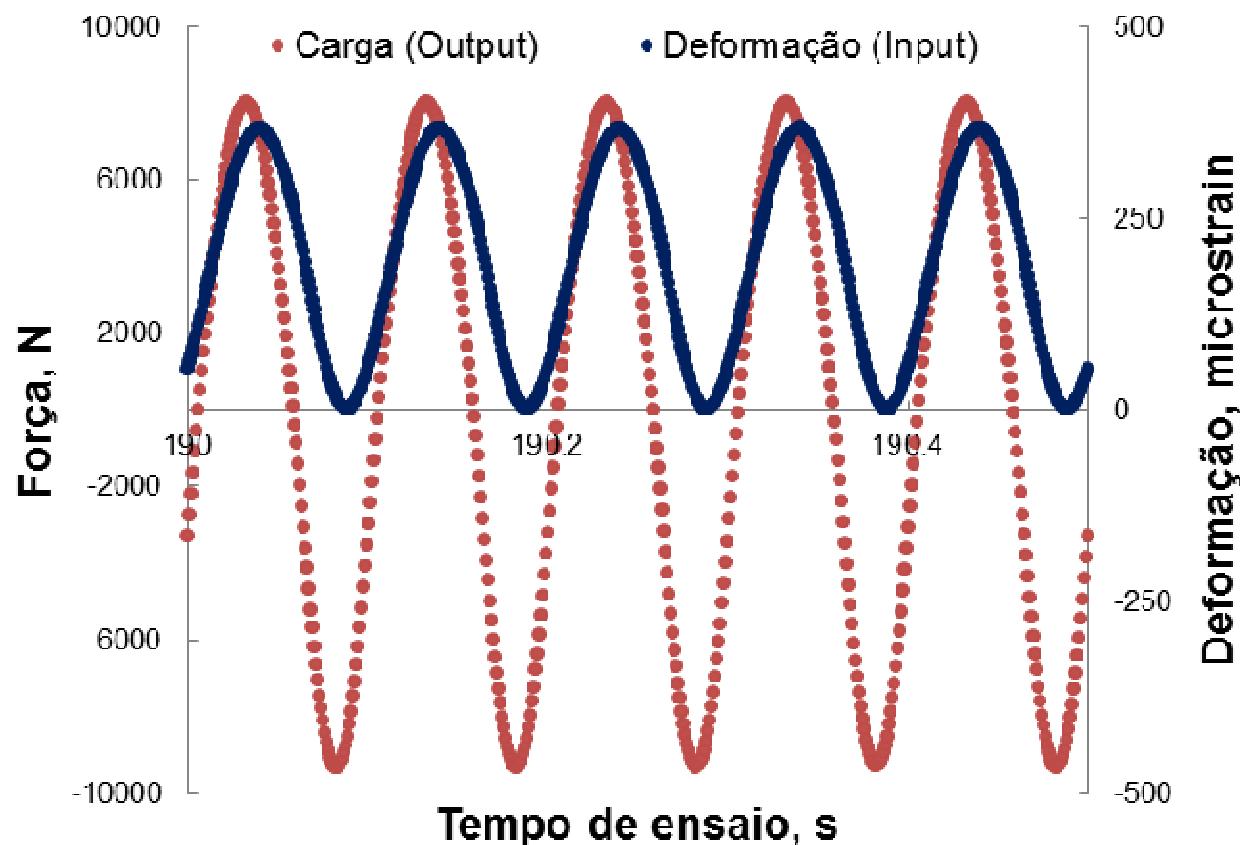


Corpo de prova na MTS



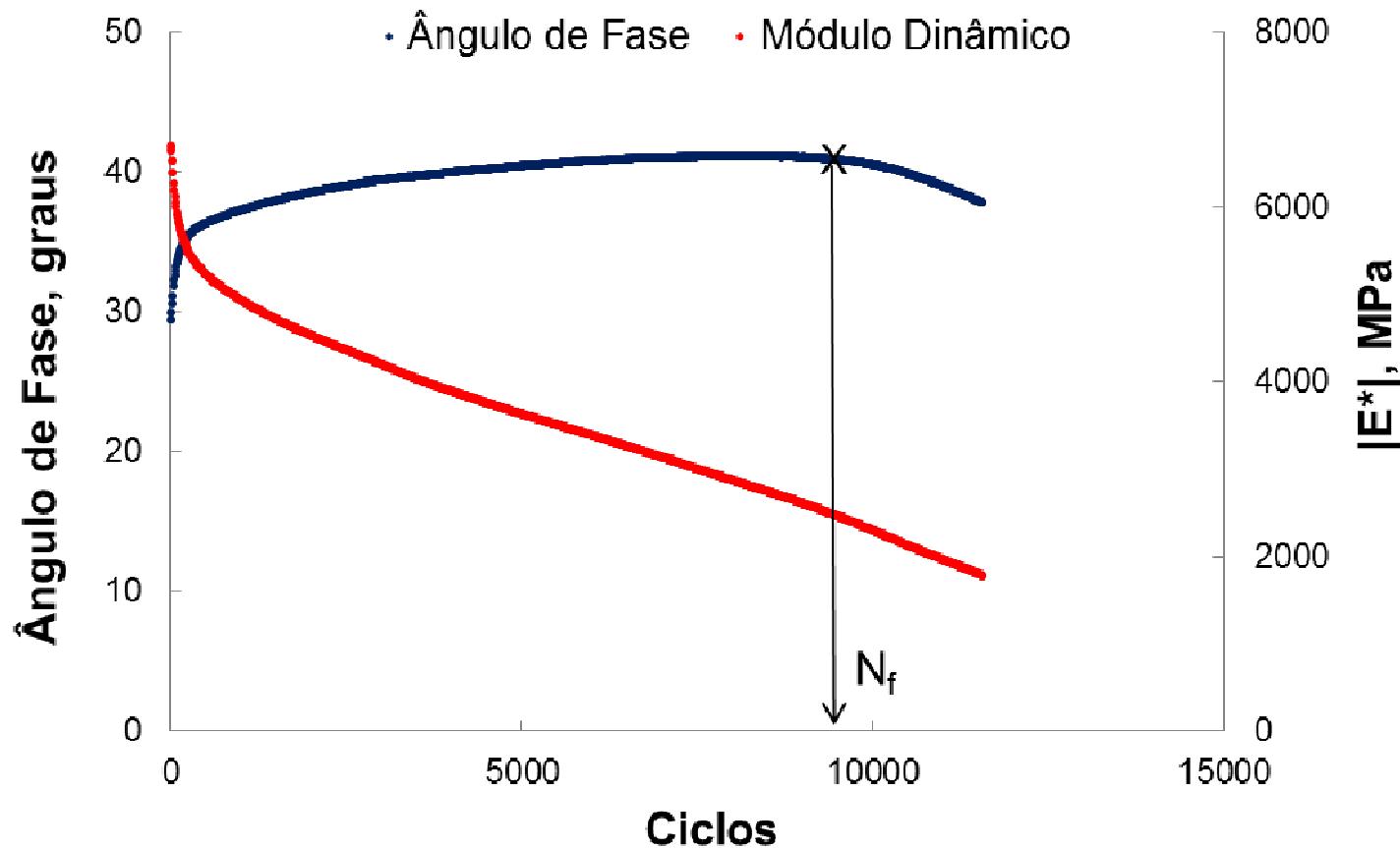
Fadiga por Tração Direta

- Controle da deformação *on-specimen*
 - Sem deformação plástica



Fadiga por Tração Direta

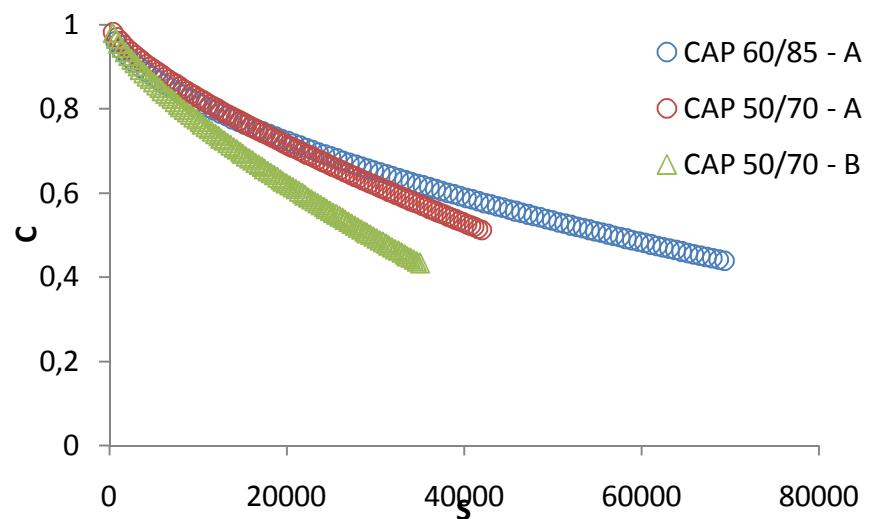
Evolução do ensaio



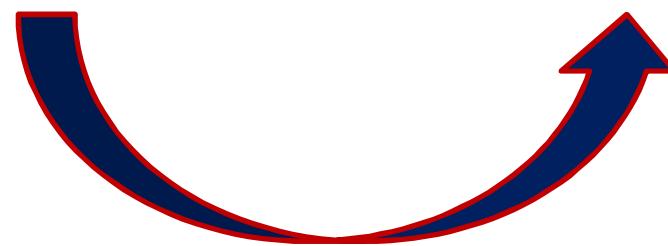
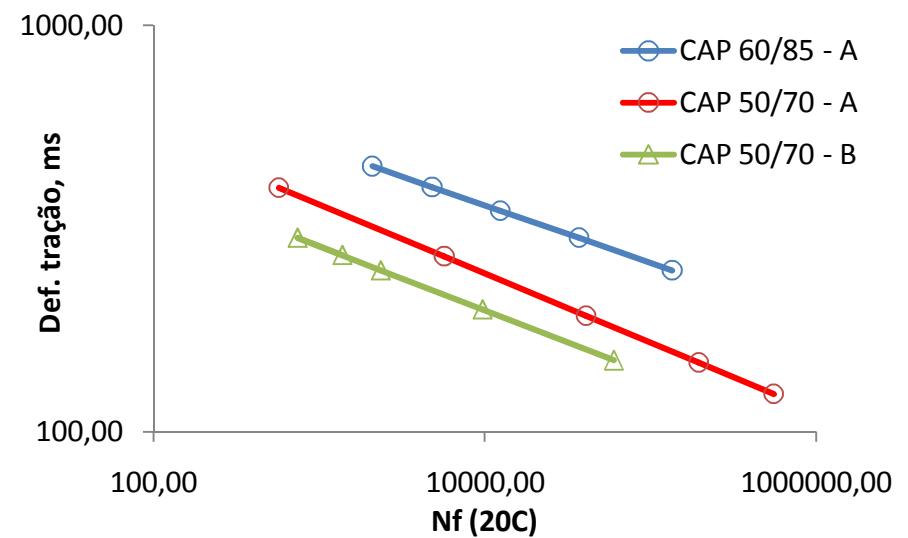
Fadiga por Tração Direta

Curva Característica de Dano É modelo VECD C vs. S

Curvas Características de Dano



Vida de fadiga simulada (def.)

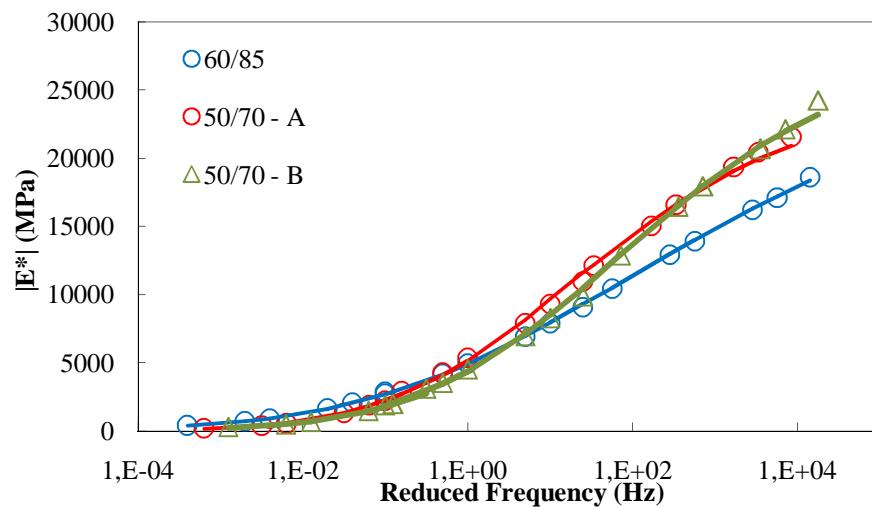


Fadiga por Tração Direta

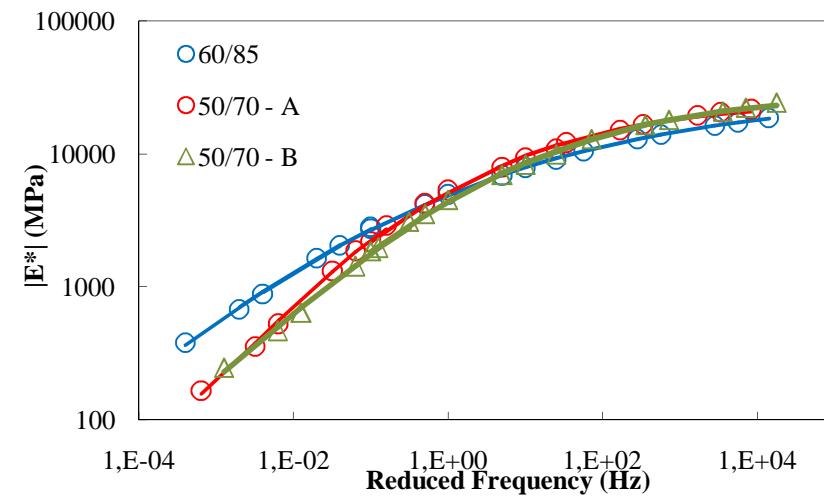
Comparação de diferentes misturas

$|E^*|$

Espaço semi-log



Espaço log-log



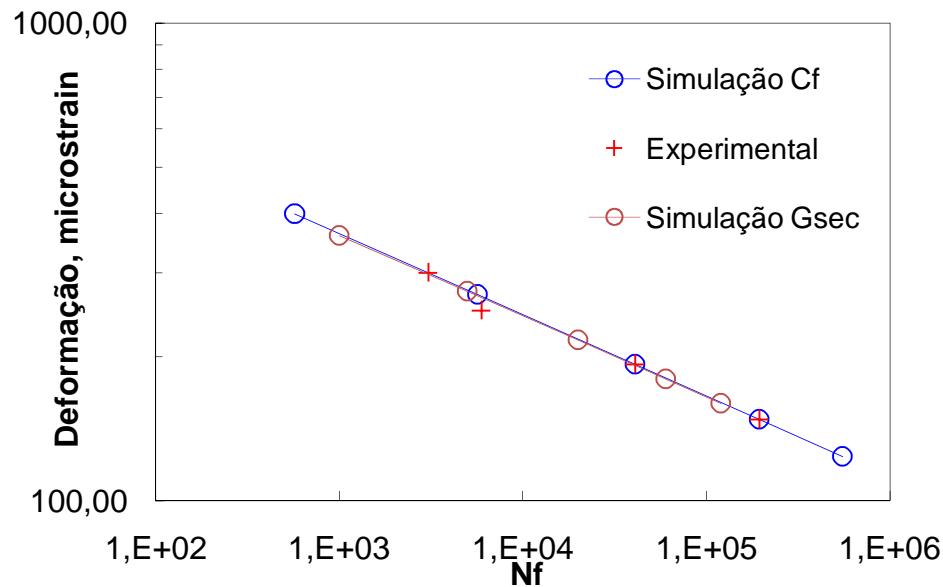
→ *Misturas com mesma rigidez, porém resistência ao dano por fadiga completamente diferentes !!*

Fadiga por Tração Direta

Simulações de múltiplas temperaturas ...e múltiplos $|E^*|$

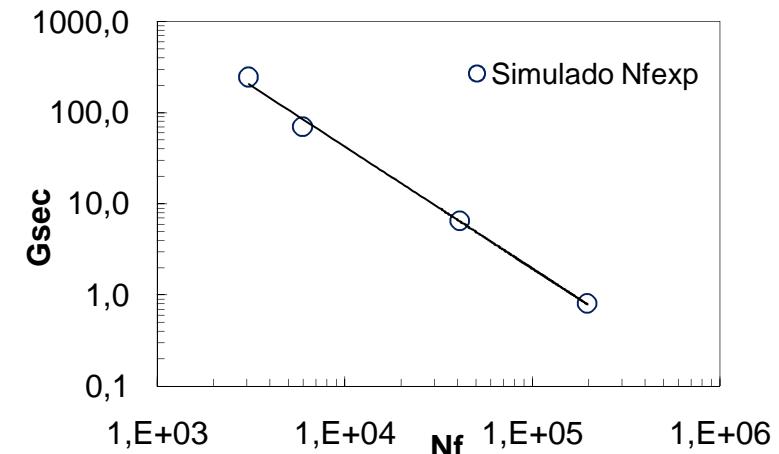
Exemplo CAP 50/70 - A

Dados experimentais

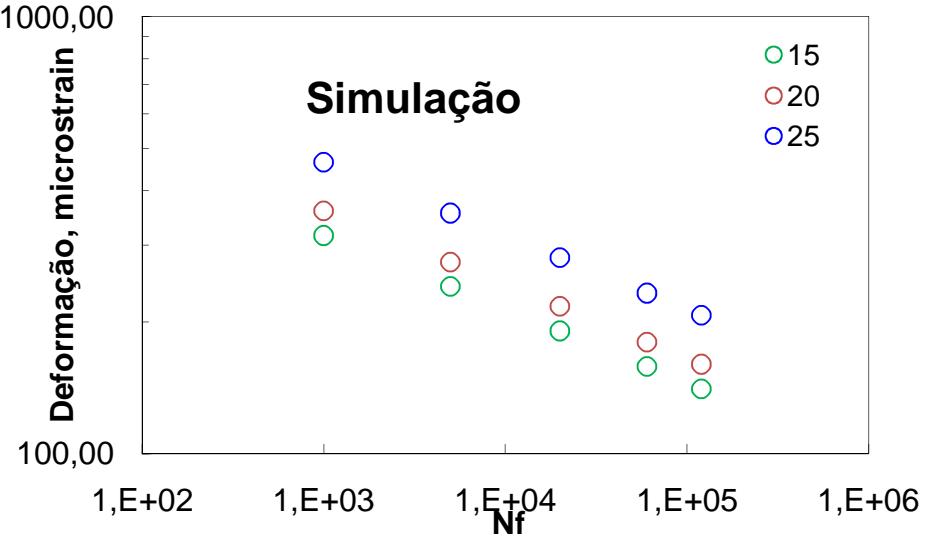


→ Utilização do critério de ruptura baseado na liberação de energia

Crit. de ruptura



Simulação

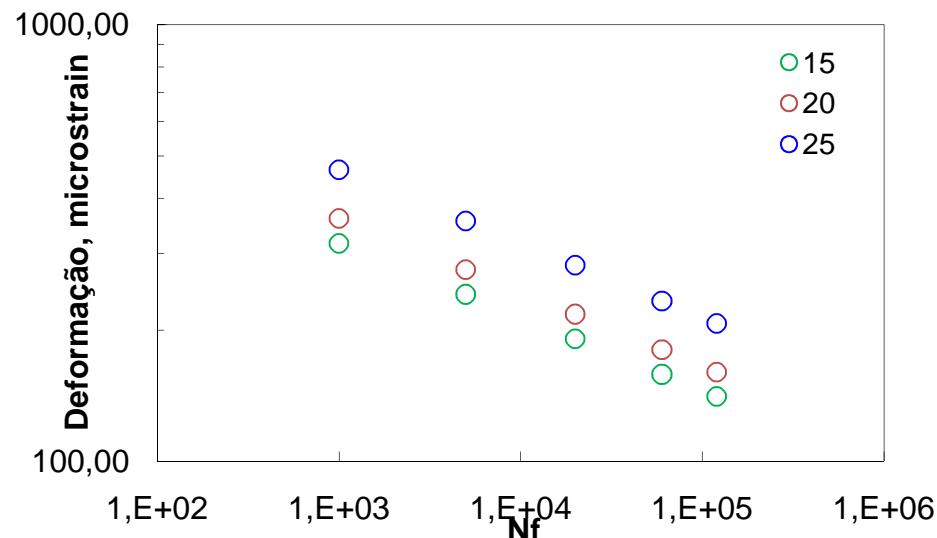


Fadiga por Tração Direta

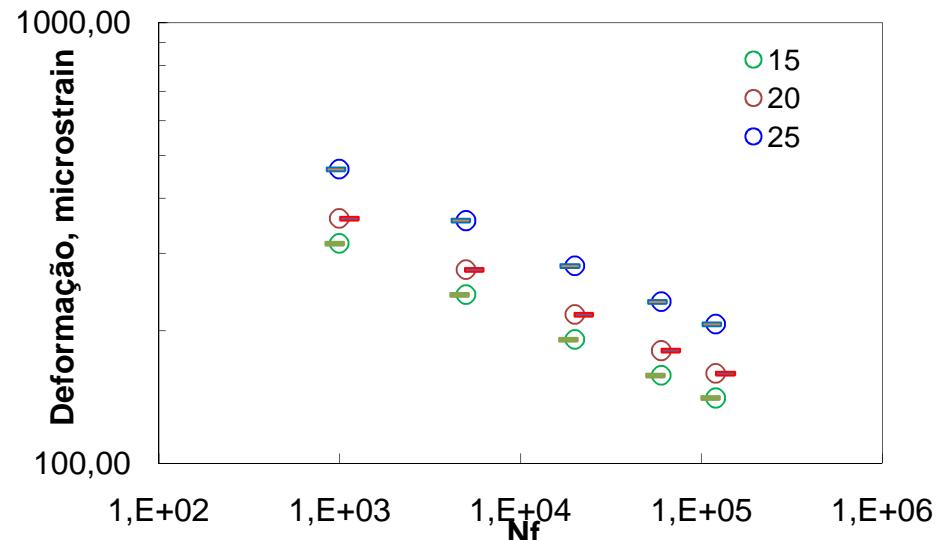
Simulações de múltiplas temperaturas
...e múltiplos $|E^*|$

Exemplo CAP 50/70 - A

Simulação Gr



Simulação vs. Fitting ME



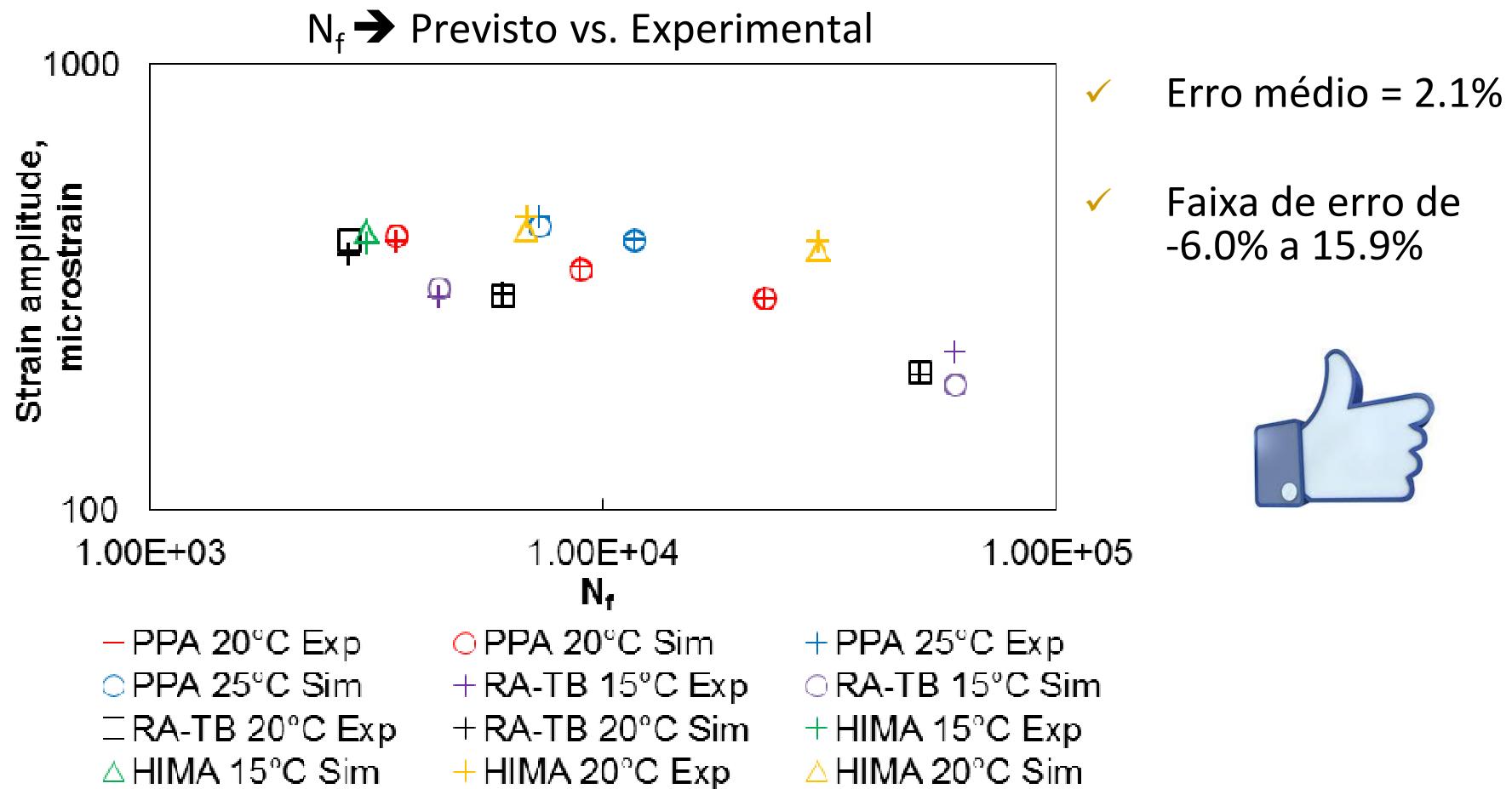
$$N_f = K1 \left(\frac{1}{\varepsilon_t} \right)^{K_2} E^{K_3}$$



k1	3847529
k2	5.92
k3	-3.43

Fadiga por Tração Direta

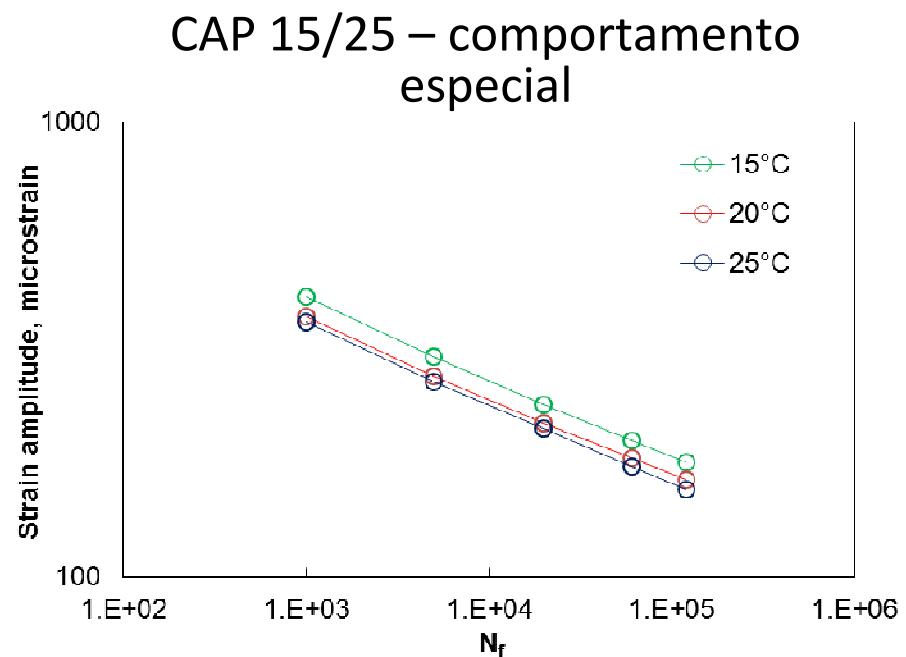
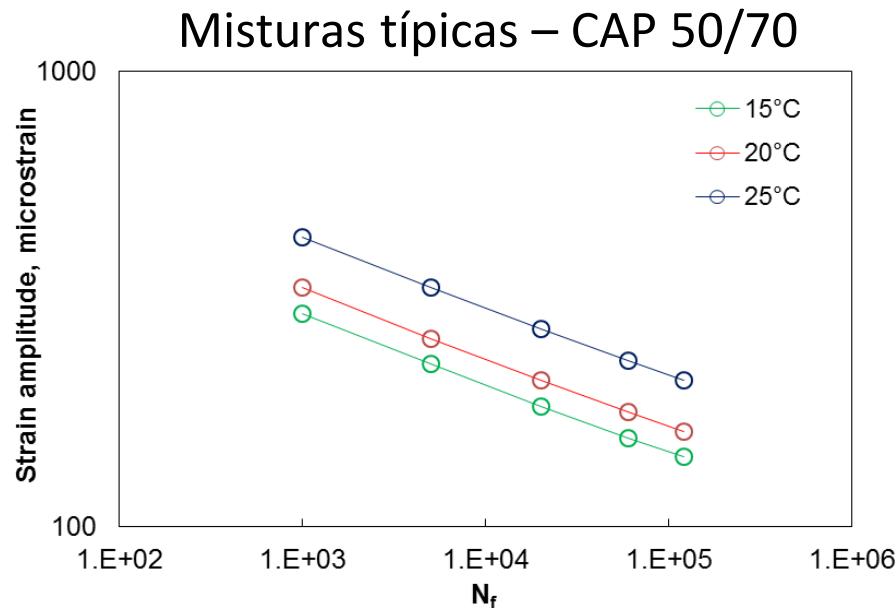
Exemplos / validação *Diferentes materiais e múltiplas temperaturas*



Fadiga por Tração Direta

Exemplos *Caso especial*

- Previsão com o VECD

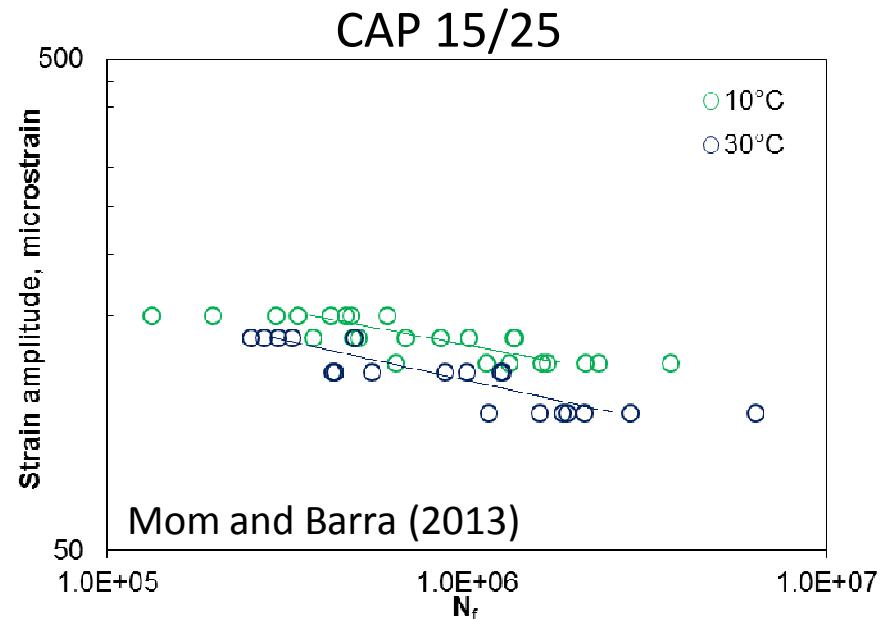


Exemplos

Diferentes materiais e múltiplas temperaturas

- Caso especial: mistura asfáltica com CAP 15/25

Ensaio francês → trapezoidal @ 25 Hz



4 meses de ensaio !!!



21.11.2002



21. 11. 2002



21. 11. 2002

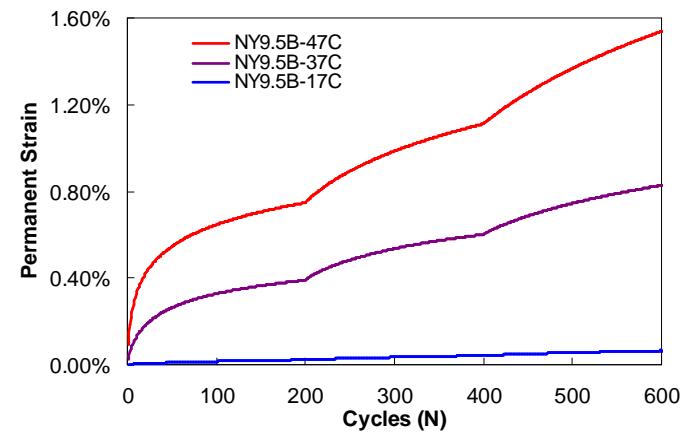
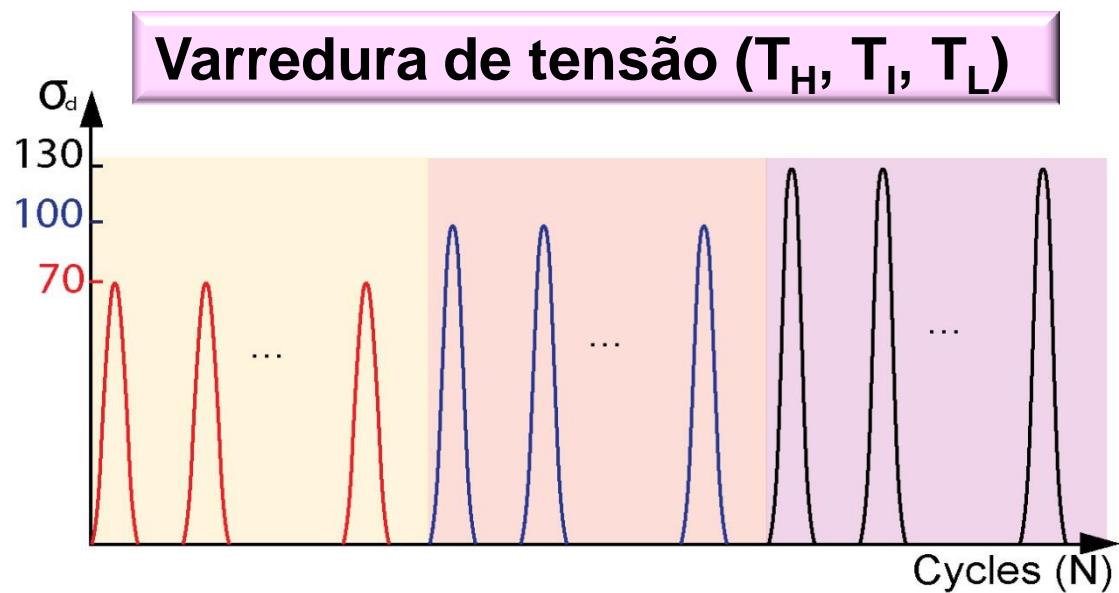
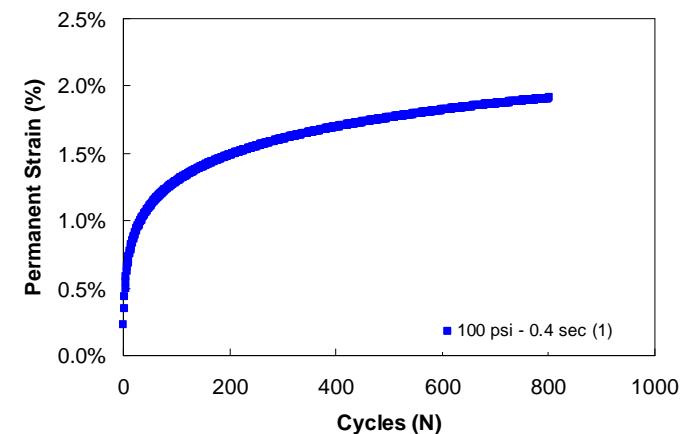
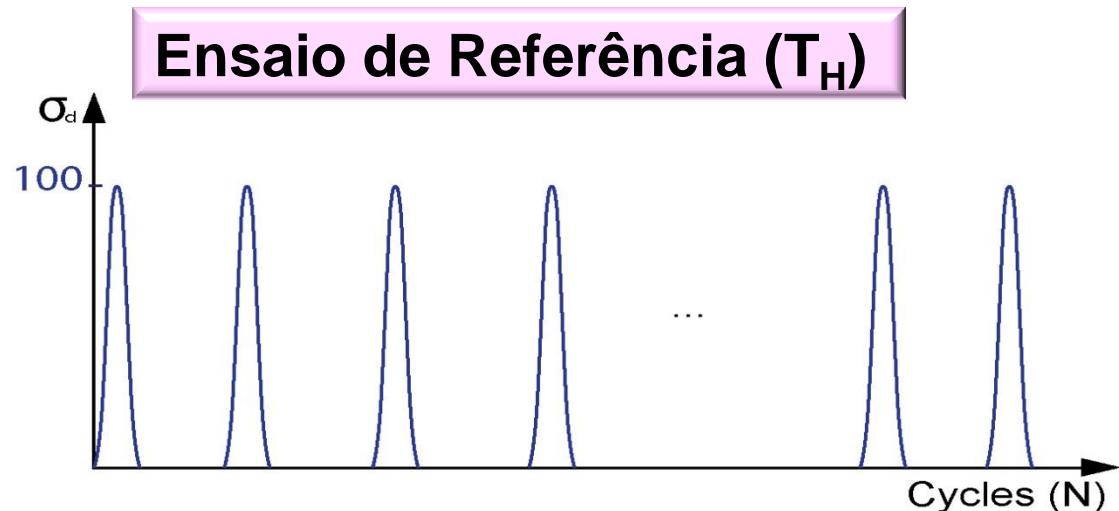
*Deformação Permanente de Misturas Asfálticas
na Análise de Pavimentos*

Ensaio triaxial com varredura de tensão (TSS test)

- Ensaio cíclico de compressão com controle de carga e carregamento tipo haversine com repouso → similar ao Flow Number
- CPs com diâmetro de 100 mm por 150 mm de altura, obtidos no compactador giratório
- Pressão confiante de 10 psi e tensões desviatórias variando de 70 a 130 psi, no mesmo teste
- 3 dias de ensaio → 8 CPs



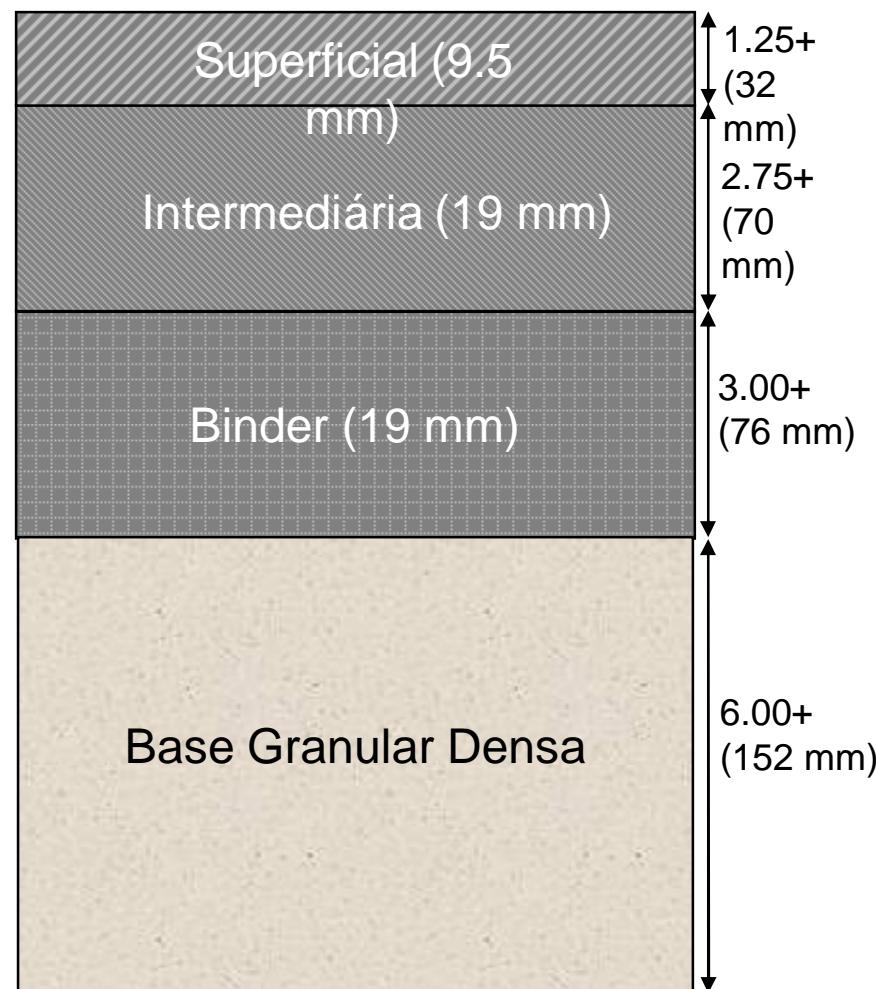
Ensaio triaxial com varredura de tensão (TSS test)



Ensaio triaxial com varredura de tensão (TSS test)

Validação nas Pistas Experimentais do NCAT

Misturas	Sigla
Controle	C
OGFC	O
RAP	R
RAP+WMA	RW
Foam WMA	FW
Evotherm WMA	AW

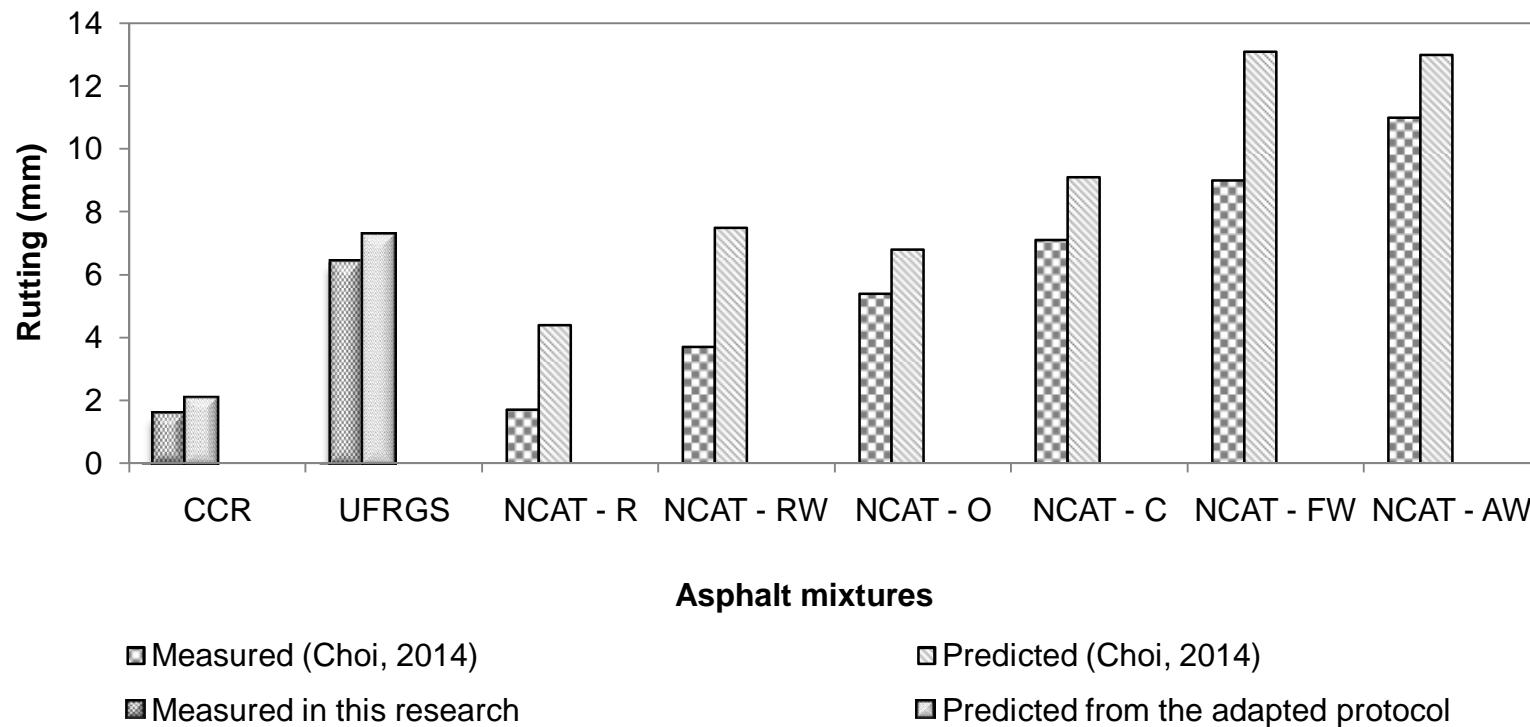


(Lacroix, 2013)

Subleito de alta rigidez

Ensaio triaxial com varredura de tensão (TSS test)

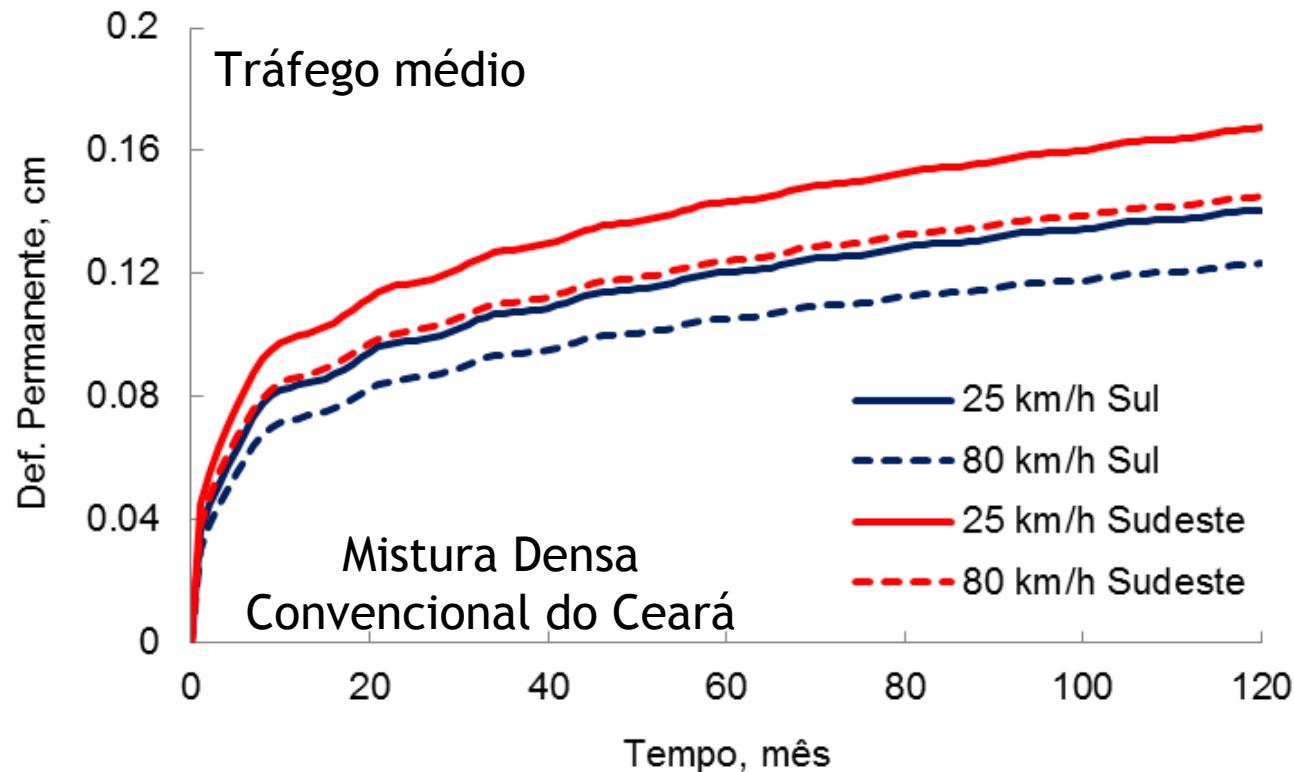
Validação nas Pistas Experimentais do NCAT e Brasil



(UFC / Juceline)

Ensaio triaxial com varredura de tensão (TSS test)

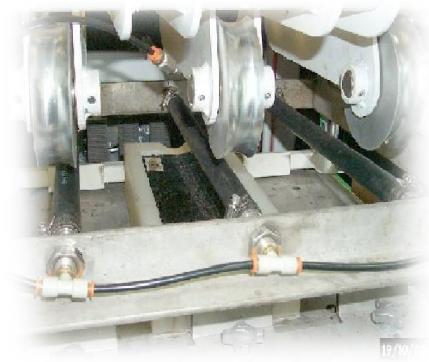
Simulação de pavimentos no Brasil - LVECD



Pergunta-se:

Controla-se através do dimensionamento ou da dosagem?

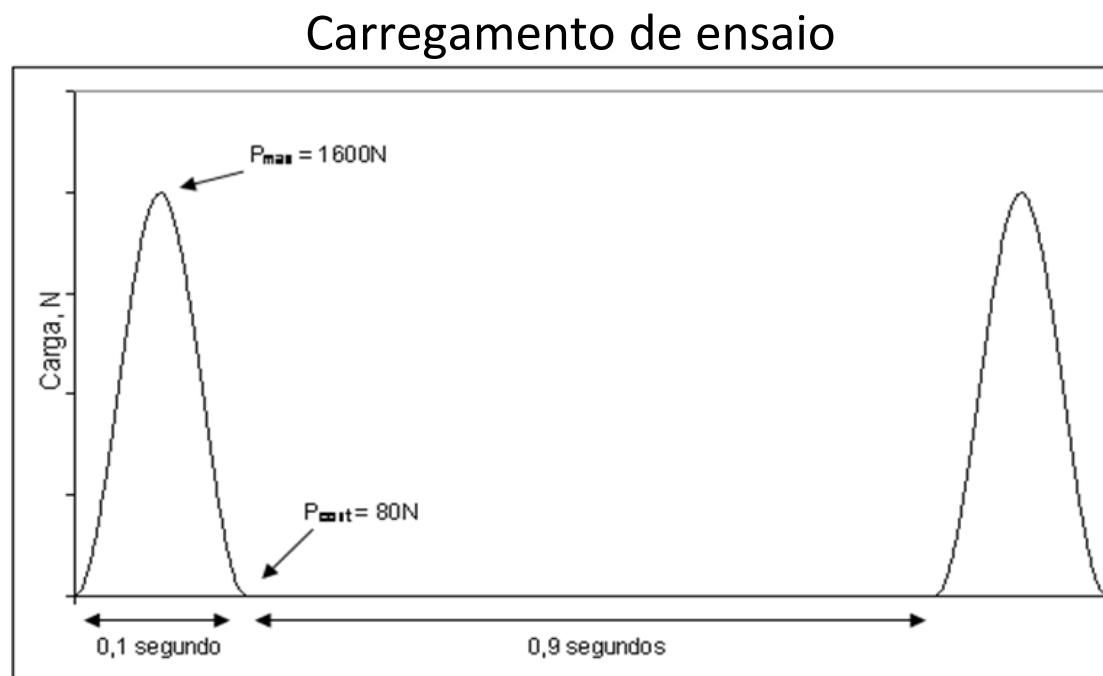
PROTOCOLO DE DOSAGEM



CDI/TDI + Bailey + etc... + Flow Number

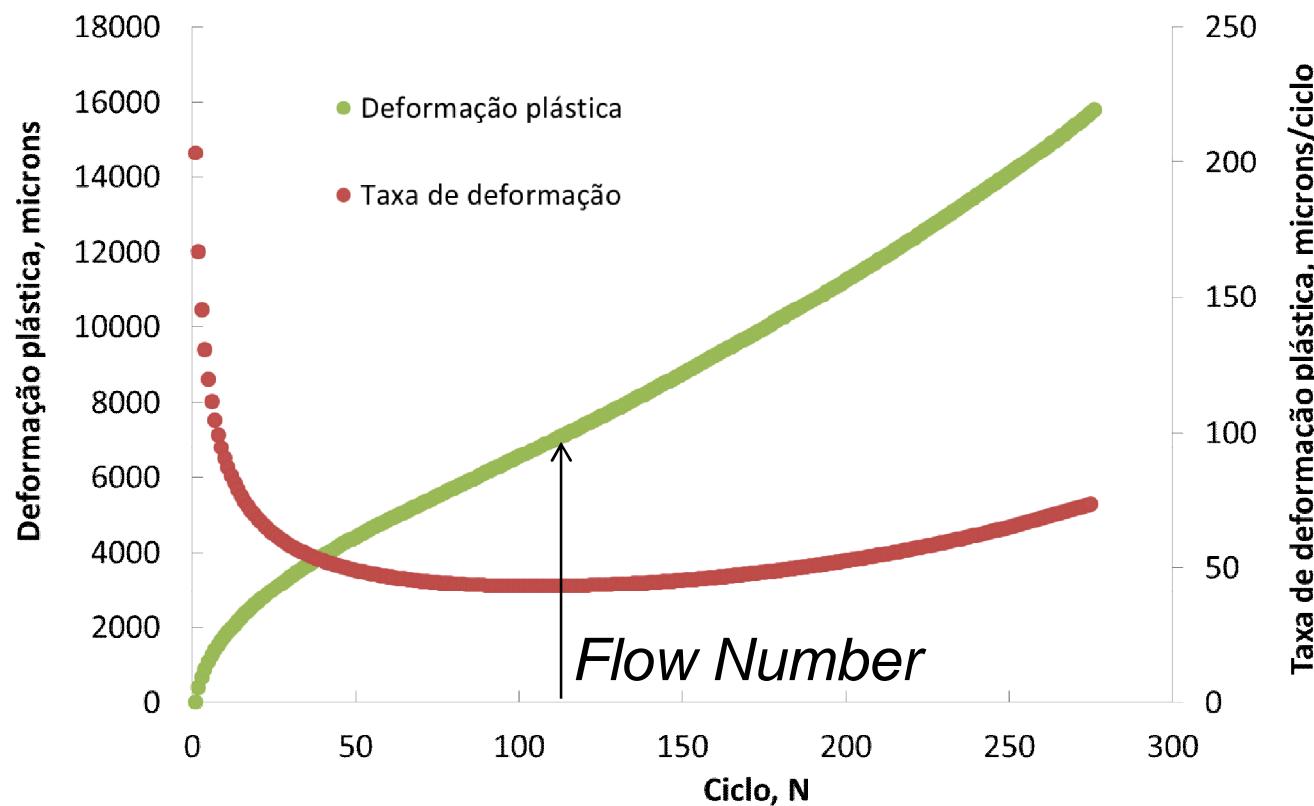
Flow Number (Def. Permanente) - ABNT 16505

- Ensaio uniaxial cíclico a 60°C, onde mede-se a deformação permanente acumulada ao longo do carregamento
- Pulso de 0,1 s e repouso de 0,9 s
- Carga de pico de 204 kPa
- Limites definidos para condições brasileiras

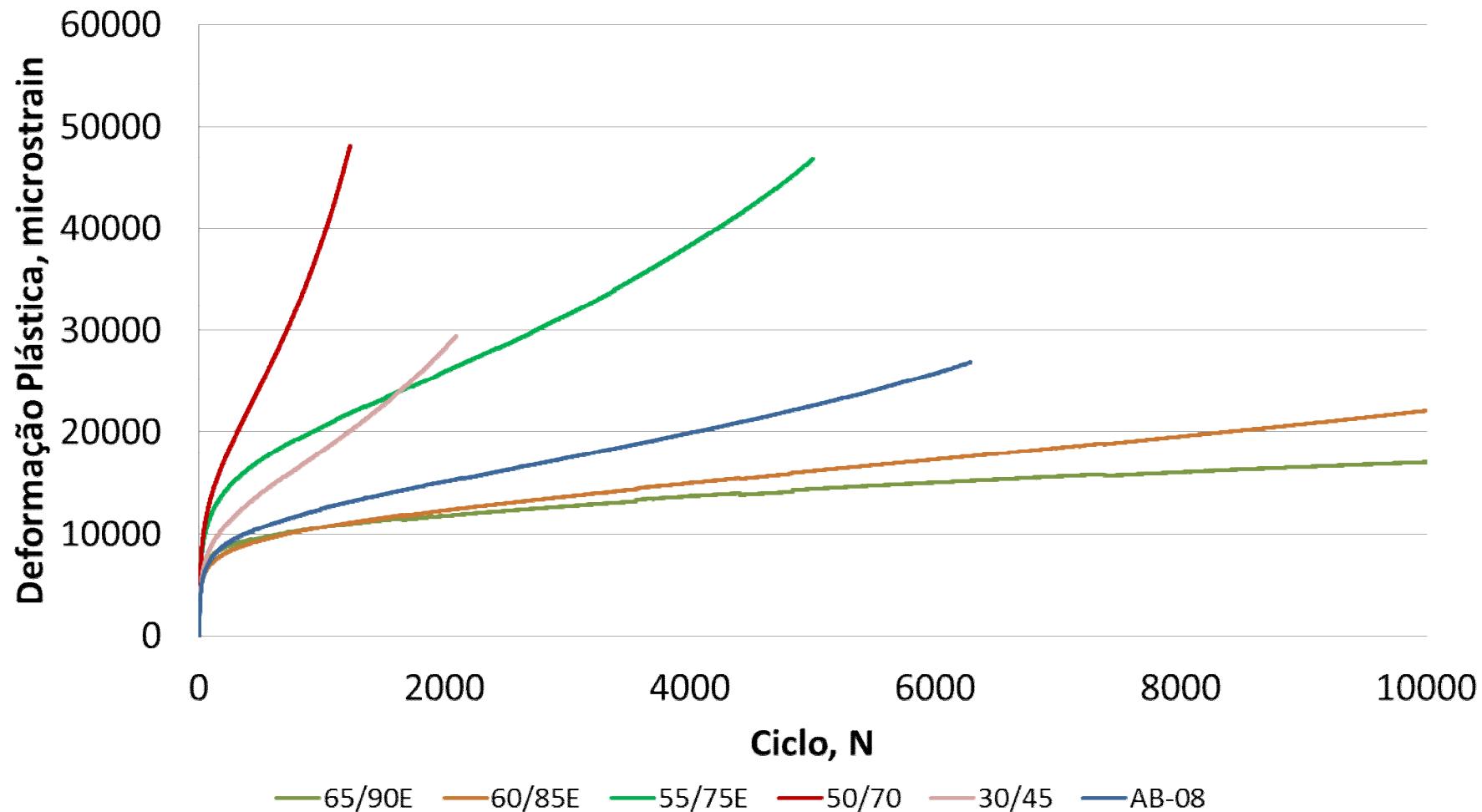


Flow Number (Deformação Permanente)

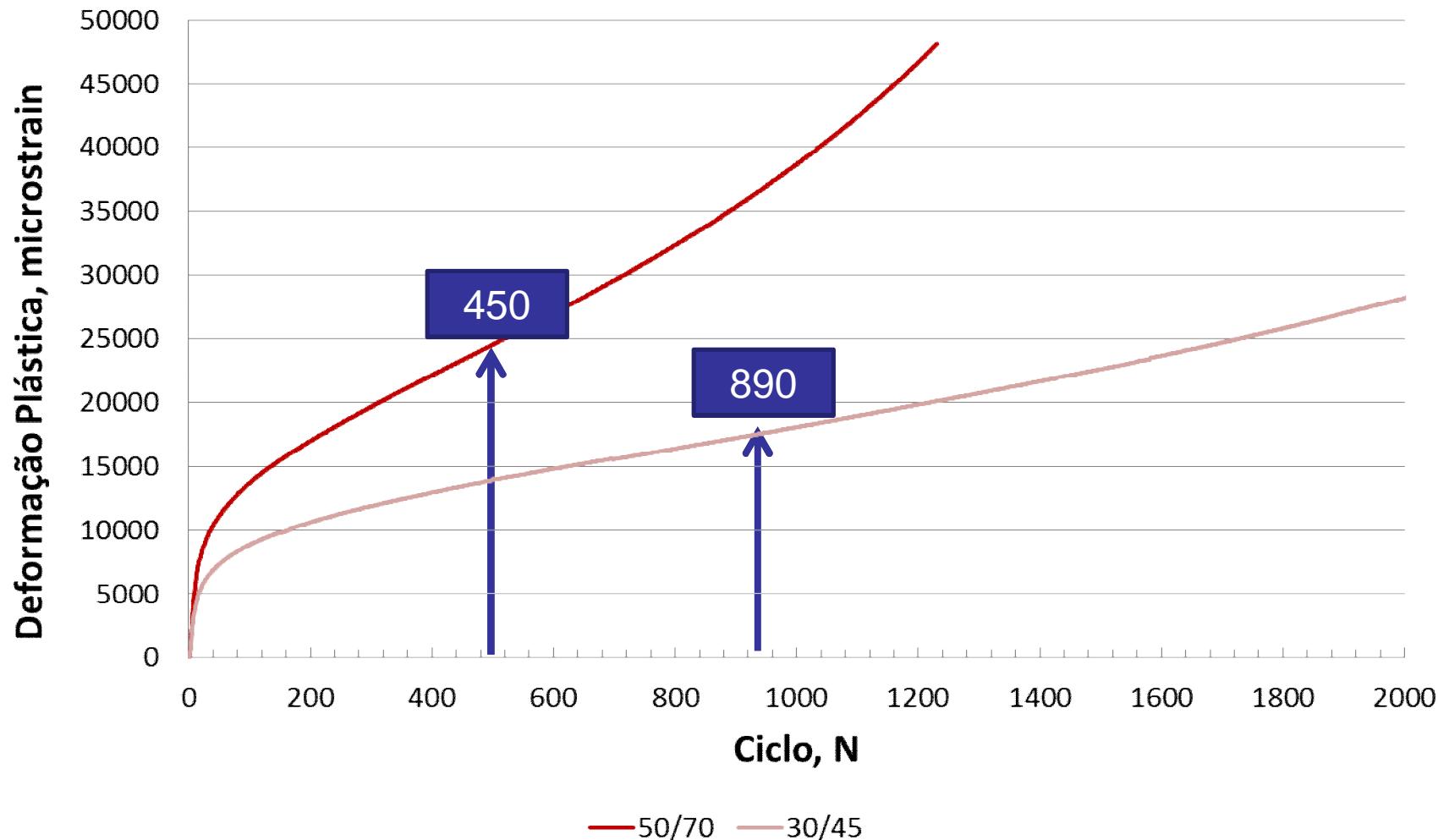
- Flow Number é o ciclo em que o corpo de prova passa a sofrer deformações a volume constante → ruptura por cisalhamento



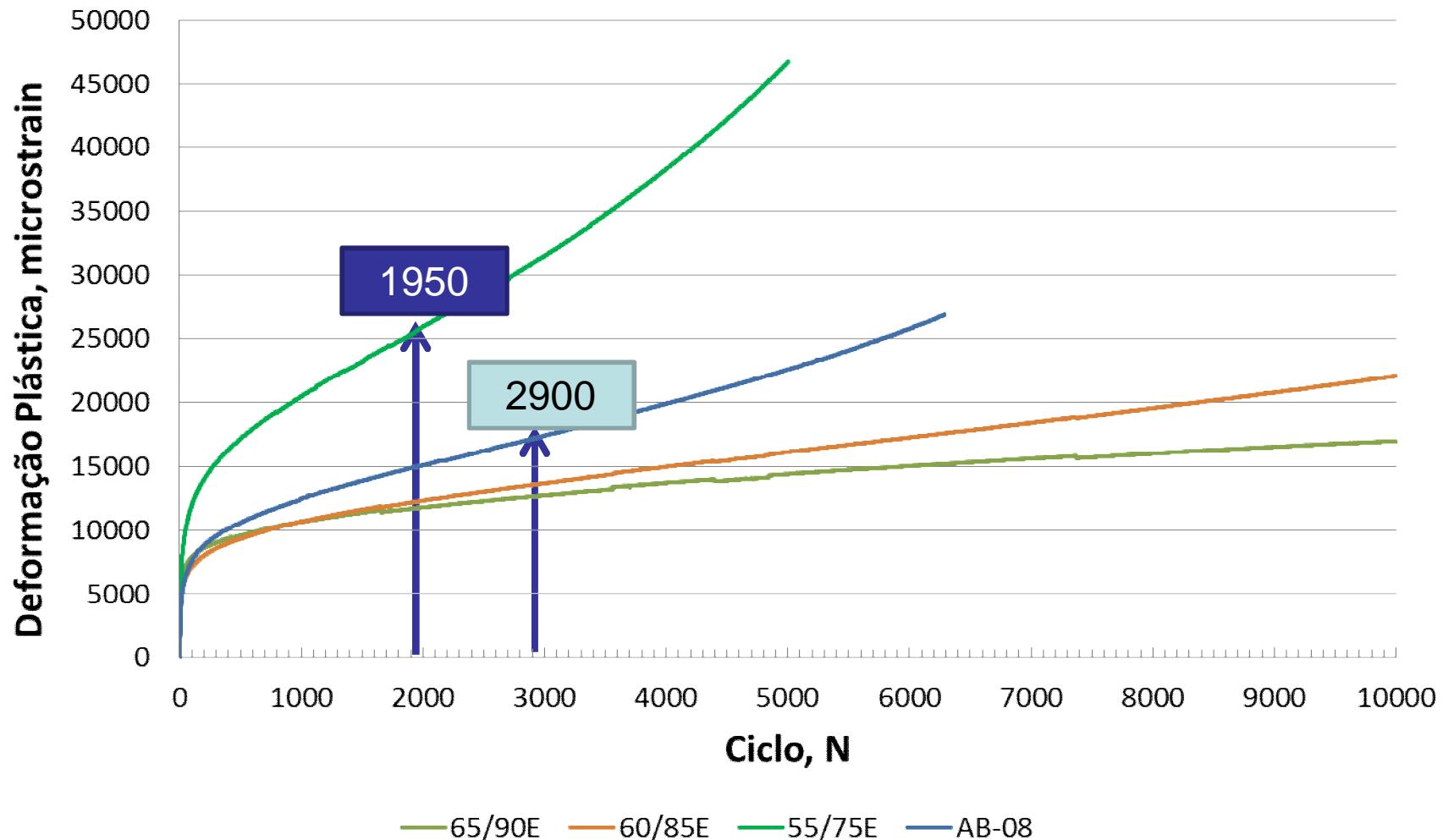
Flow Number - influência dos ligantes



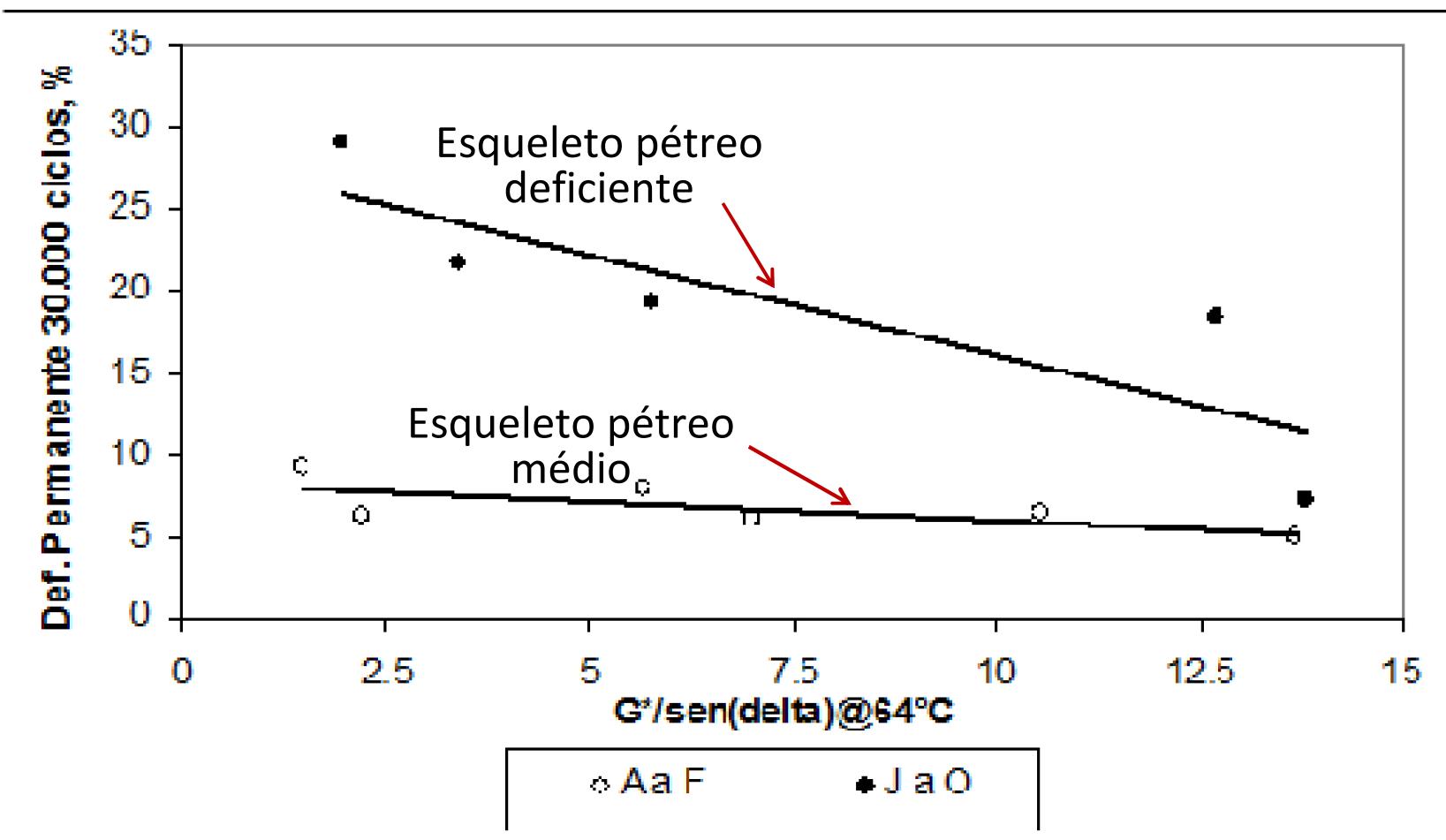
Flow Number - influência dos ligantes



Flow Number - influência dos ligantes



Deformação Permanente *Influência dos agregados*

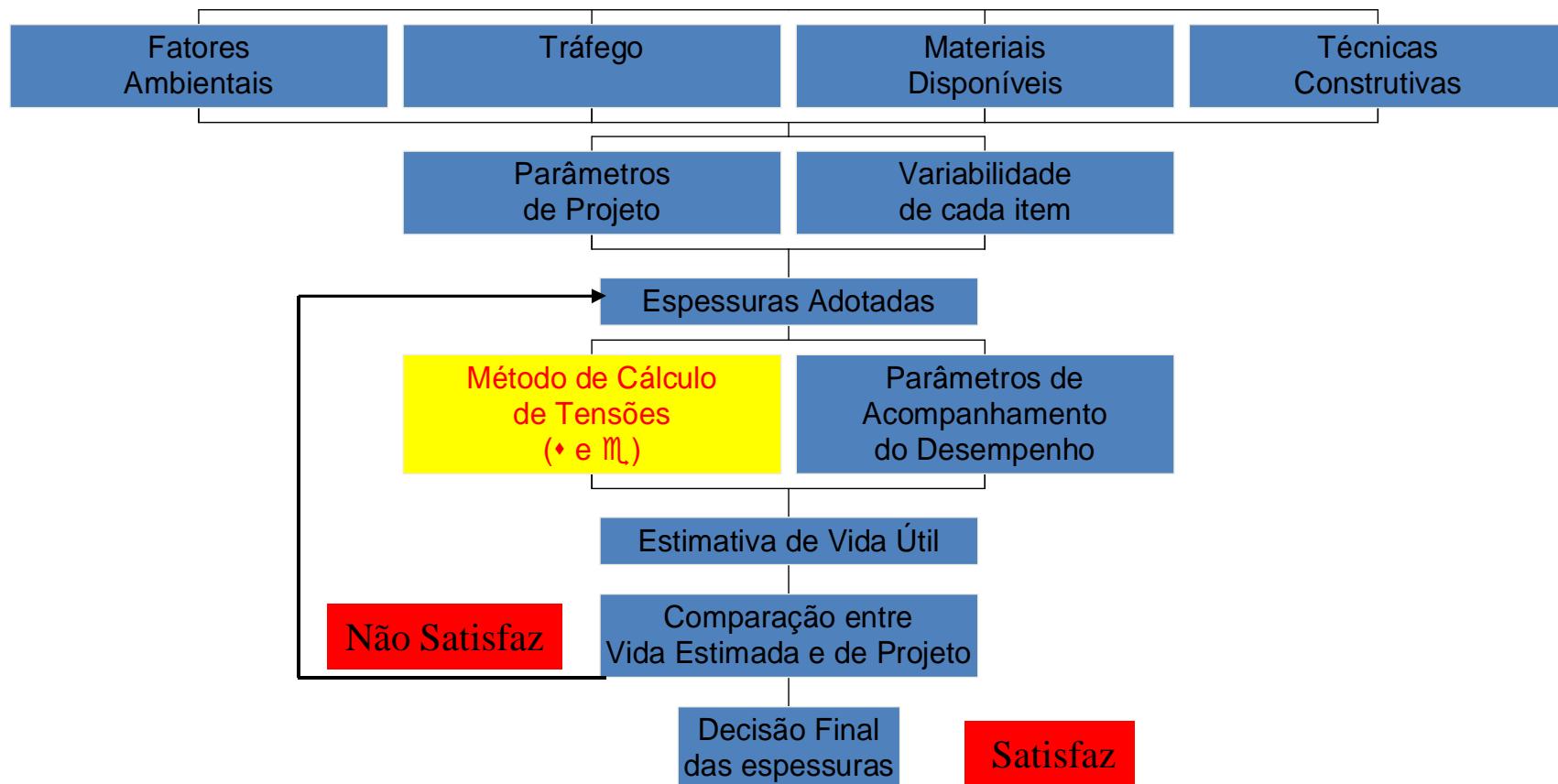


Mecânica dos Pavimentos, Análise Estrutural e Comportamento Mecânico dos Materiais de Pavimentação

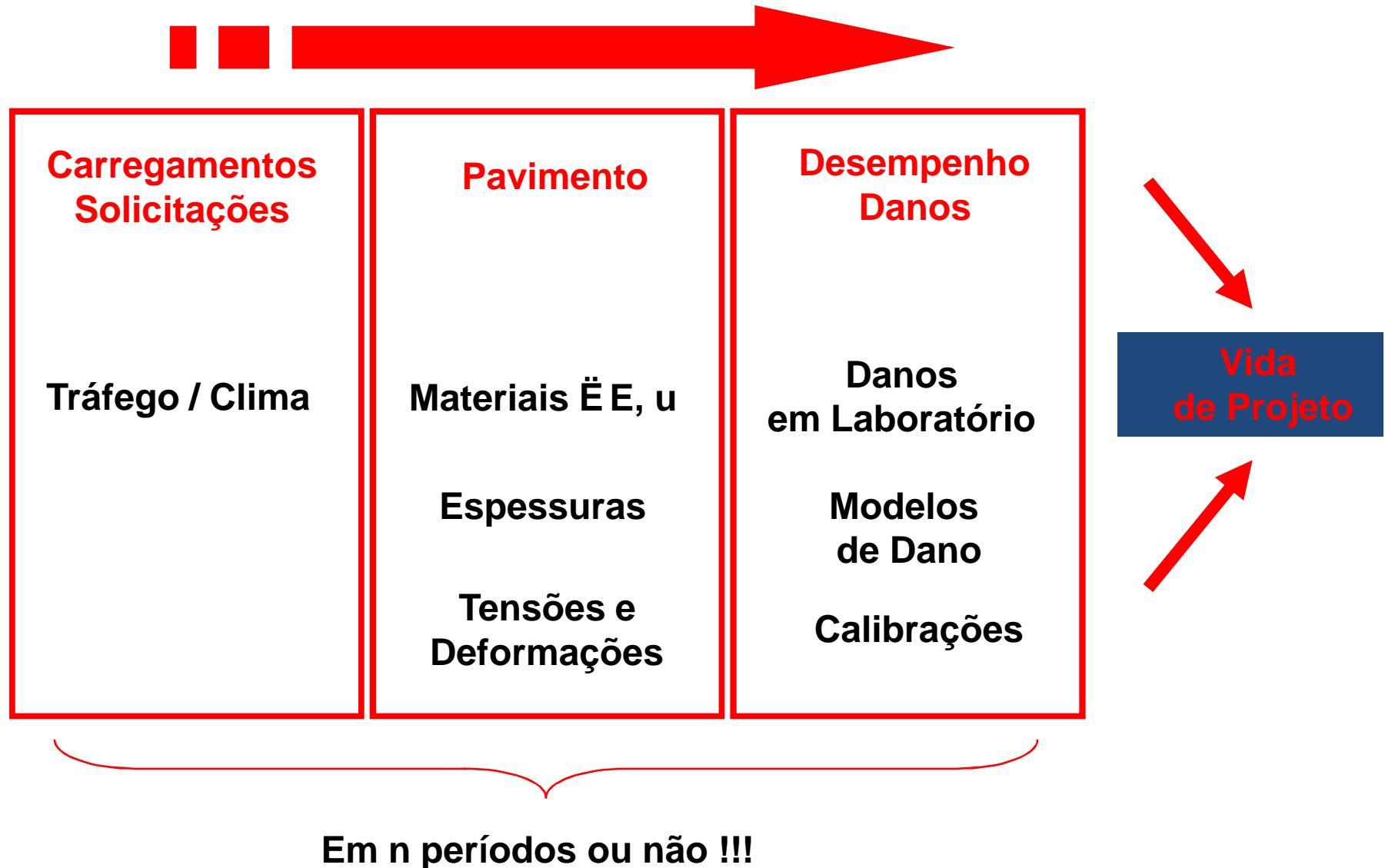
Conceitos Básicos

Luis A. Herrmann do Nascimento
Petrobras/Cenpes

Dimensionamento Mecanístico-Empírico



Dimensionamento Mecanístico-Empírico



Critérios de Ruptura - Exemplos

Cuidado!!!

- Dimensiona-se satisfazendo os seguintes critérios de ruptura estruturais:
 - Fadiga da camada de revestimento (misturas asfálticas)
 - Fadiga das camadas com materiais estabilizados com cimento
 - Deformação ou tensão limite no topo do subleito
 - Deflexão admissível na superfície do pavimento
- A deformação permanente é apenas estimada e comparada com valor de referência

Critérios de Ruptura - Exemplos

Cuidado!!!

- Modelos

- Deflexão admissível
(Preussler, 1983)
- Tensão limite no SL
(Heukelom e Klomp, 1962)
- Fadiga Mat tratados com cimento
(Trichêis, 1994)
- Fadiga Solo Cimento
(Ceratti, 1991)
- Fadiga de Misturas Asfálticas
(Vários modelos nacionais e internacionais)

Critérios de Ruptura - Exemplos

Cuidado!!!

- Fadiga de misturas asfálticas:

- Shell, 1978

$$N_f = 0,0685 \cdot \varepsilon_t^{-5,671} \cdot E^{-2,363}$$

- AASHTO, 2004

$$N_f = 0,00132 \cdot k'_I \cdot C \left(\frac{I}{\varepsilon_t} \right)^{3,9492} \left(\frac{I}{E} \right)^{1,281}$$

- Pinto, 1991

$$N_{lab} = 9,07 \cdot 10^{-9} \cdot \left(\frac{I}{\varepsilon_t} \right)^{2,65} \cdot \left(\frac{I}{MR} \right)^{-0,033}$$

- Cenpes, 2010

- Ensaios diametrais de controle misto
- Calibrado no Campo Experimental da Cidade Universitária
- Curva de Fadiga + Fator Campo Laboratório

Critérios de Ruptura - Exemplo

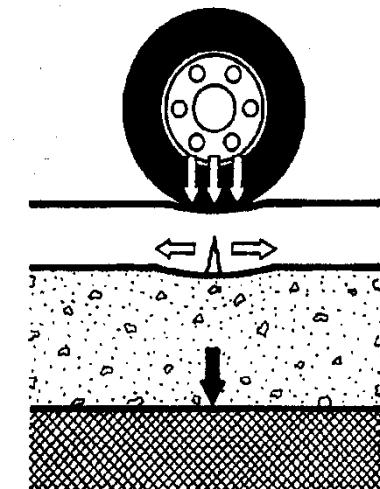
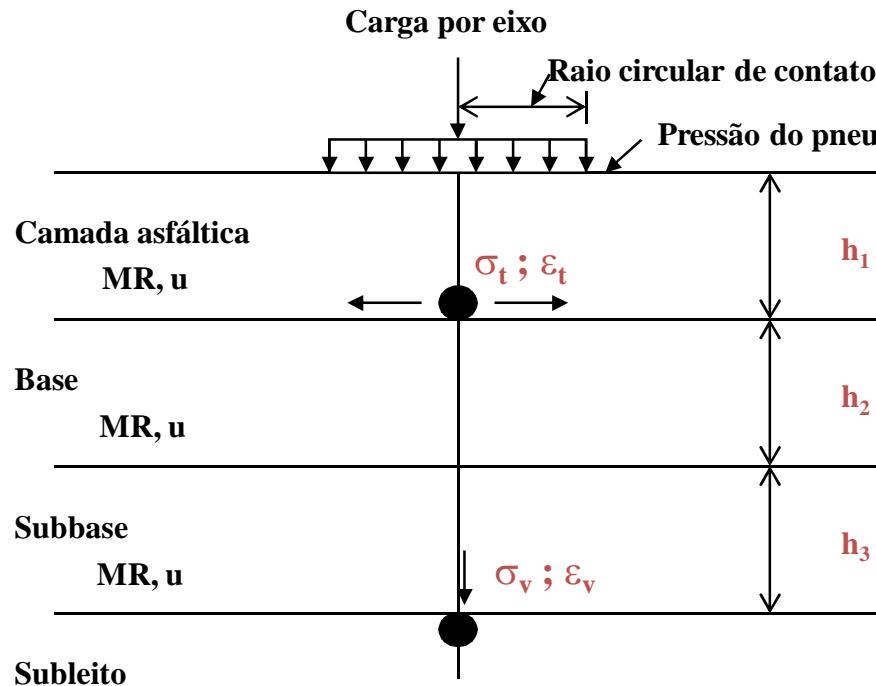
Cuidado!!!

- Tensão admissível no subleito:

MR (kgf/cm ²)	$\sigma_{v\text{adm}}$ (kgf/cm ²)			
	$N = 10^5$	$N = 10^6$	$N = 10^7$	$N = 10^8$
250	0,29	0,25	0,23	0,21
500	0,58	0,51	0,45	0,41
750	0,87	0,76	0,68	0,62
1000	1,15	1,02	0,91	0,82
2000	2,31	2,03	1,82	1,64
3000	3,46	3,05	2,73	2,47
5000	5,77	5,08	4,55	4,11

Tabela 1: Valores sugeridos para tensão vertical admissível ($\sigma_{v\text{adm}}$) no subleito (Motta,1991)

Tensões e Deformações Críticas



**Método racional considerando as propriedades
mecânicas dos materiais de cada camada.**

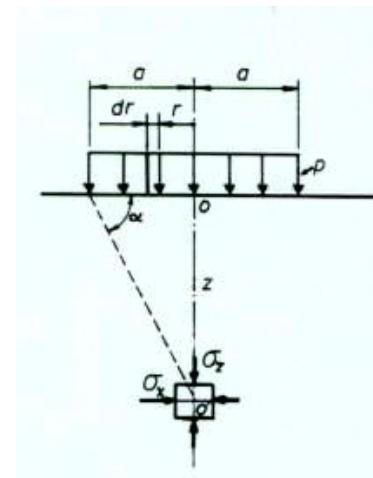
Clima, tráfego e drenagem devem ser considerados

Evolução das soluções matemáticas para pavimentos

1. Uma camada: Boussinesq (1885), Love(1929), Foster e Ahlvim(1954), Ahlvim e Ulery(1962), etc
2. Duas camadas: Burmister (1943), Sérgio Then de Barros (1966), etc
3. Três camadas: Burmister (1943) Sérgio Then de Barros (1966), Huang (1969),Acum e Fox (1951), Jones e Peattie(1962), etc

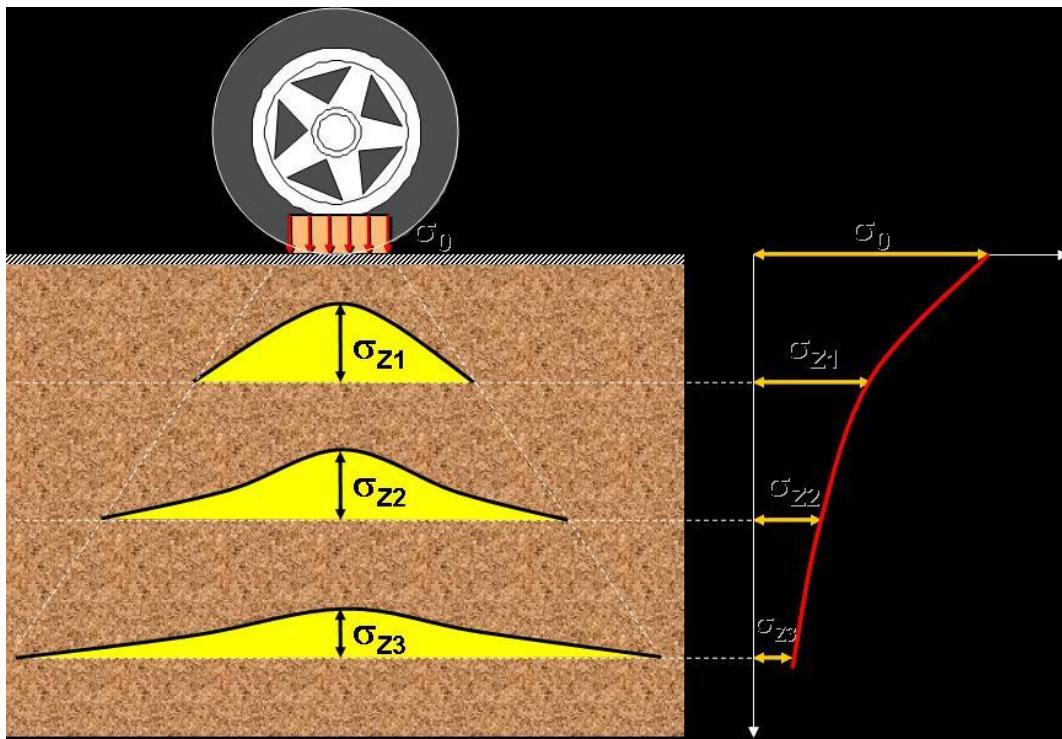
Boussinesq (1885): Uma camada

- ” Carga pontual
- ” Meio homogêneo, isotrópico, elástico
- ” Tensão vertical independe das propriedades do material, só depende da geometria

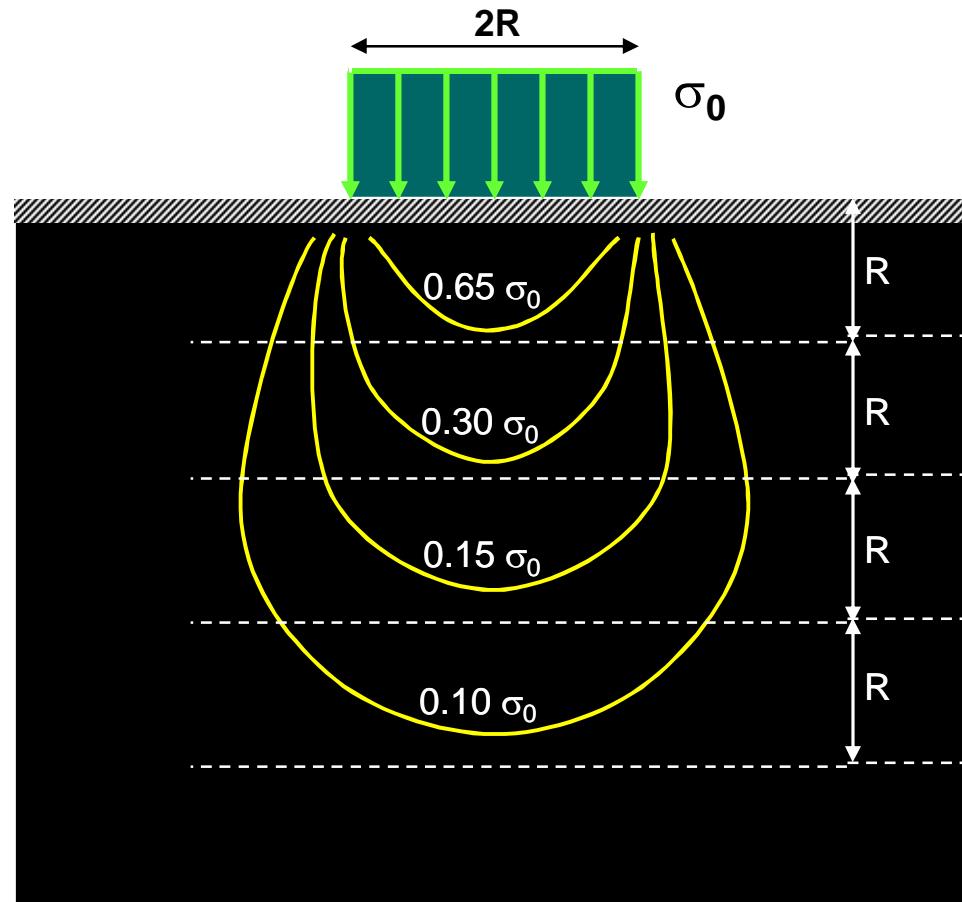


Distribuição da pressão vertical

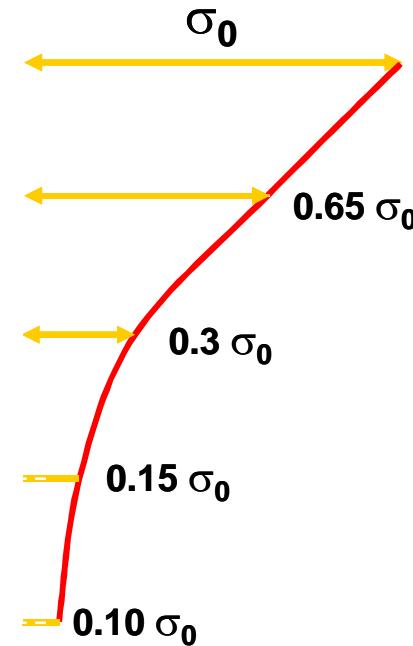
CAMADA ÚNICA



Distribuição da pressão vertical

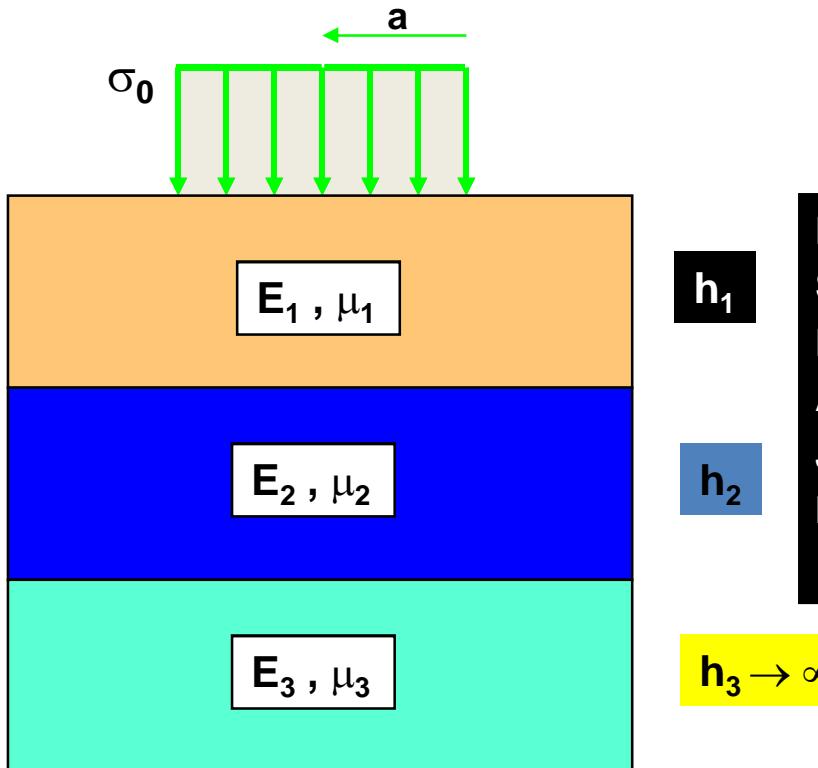


PRESSÕES VERTICais



$$\sigma_z = \sigma_0 \left[1 - \frac{z^3}{(a^2 + z^2)^{3/2}} \right]$$

Meios estratificados

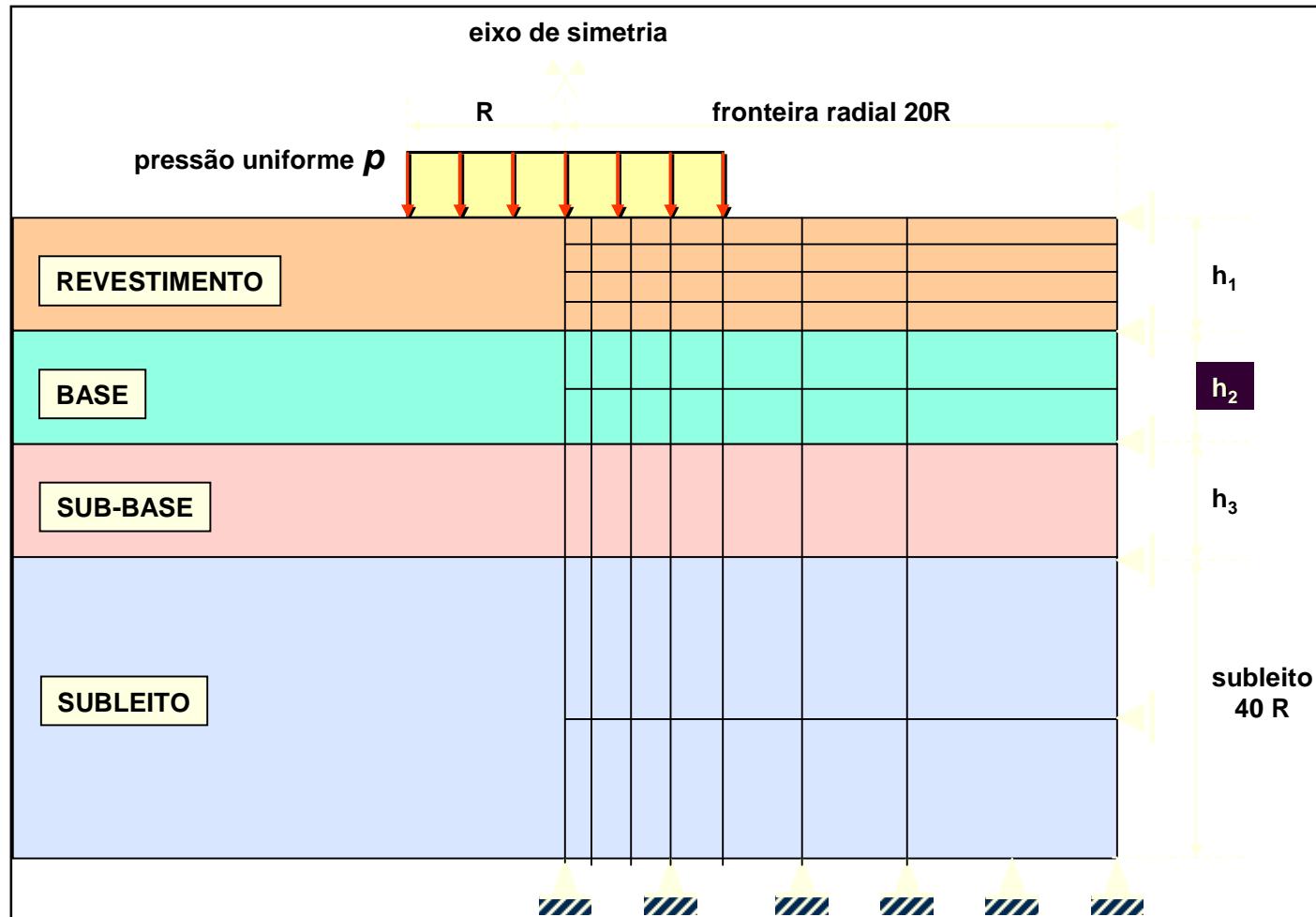


SOLUÇÕES



- | | |
|-----------------------------------|---------------------------|
| BURMISTER (1943) | → duas camadas |
| S. THEN DE BARROS (1966) | → Í Í |
| BURMISTER (1945) | → três camadas |
| ACUM & FOX (1951) | → Í Í |
| JONES & PEATTIE (1962) | → Í Í |
| HUANG (1968) | → N camadas
(KENLAYER) |

Métodos Numéricos E elementos finitos



Programas Computacionais

PROGRAMA	BASE TEÓRICA	MATERIAIS	Nº CAMADAS	Nº CARGAS
ELSYM 5	CEDF	EL	5	10
FEPAVE 2	MEFAX	ENL	10	1
CIRCLY 4	MEF3D	ENL	N	N
KENLAYER	MEF3D	ENL - VE	19	N
ILLI-PAV	MEFAX	ENL	N	1
BISAR	CEIN	EL	N	1
CHEVRON	CEIN	EL	N	1
VESYS II	CEIN	VE	N	1
DAMA 2	CEIN	ENL	4	2
ALIZE	CEIN	EL	N	N
SENOL	MEFAX	ENL	N	1
MPAVE	MEFAX	EL	2	1

Nº camadas

Nº cargas de roda

CEDF → camadas elásticas, diferenças finitas

MEFAX → método dos elementos finitos axi-simétrico

CEIN → camadas elásticas interação numérica

EL → elástico linear

ENL → elástico não linear

VE → visco elástico

Roteiro dimensionamento

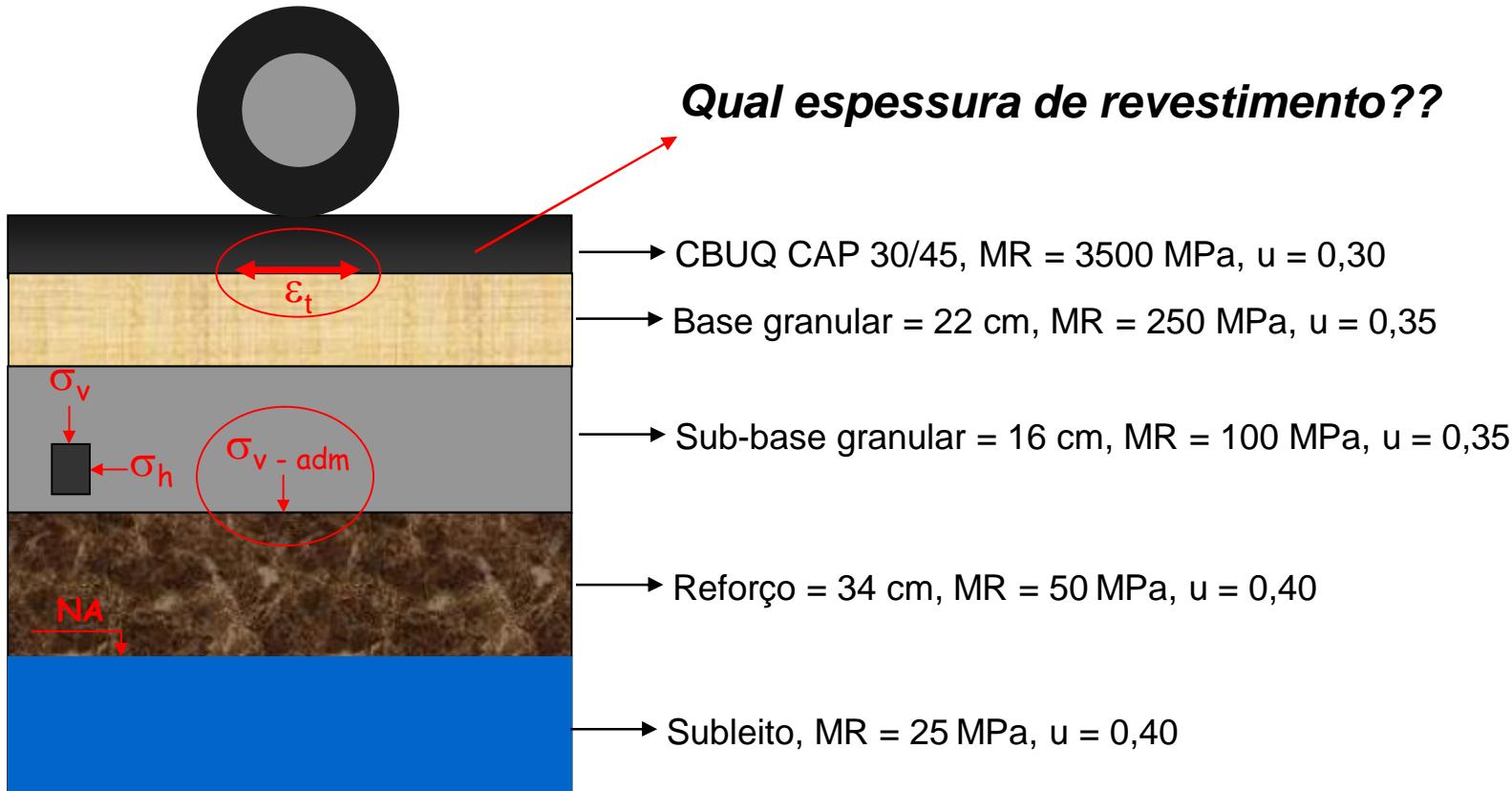
- 1) Ensaiar os materiais disponíveis → **Modelos tensão-deformação**
- 2) Definir um valor de MR para a mistura betuminosa (revestimento)
- 3) Adotar uma espessura inicial, definindo variabilidade
- 4) Calcular o estado de tensão-deformação atuante na estrutura composta com cada material disponível (caso exista várias opções de material)
- 5) Comparar as tensões-deformações com critérios de ruptura estabelecidos. Definir o grau de confiabilidade
- 6) Se as espessuras adotadas atendem aos valores admissíveis (critérios de fadiga e deformação permanente)

→ **fim do dimensionamento**

**caso contrário, alterar as
espessuras e refazer os
cálculos**

Exemplo / Aplicação

Pavimento dimensionado empiricamente (CBR): $N = 1 \times 10^6$



Avaliação Estrutural de Pavimentos

Retroanálise

Autoria

Esta aula contém material da seguinte equipe de professores:

- Liedi Légi Bariani Bernucci - *Universidade de São Paulo*
- Jorge Augusto Pereira Ceratti - *Universidade Federal do Rio Grande do Sul*
- Laura Maria Goretti da Motta - *Universidade Federal do Rio de Janeiro*
- Jorge Barbosa Soares - *Universidade Federal do Ceará*

Avaliação Estrutural

Conceitos associados

- Capacidade de carga
 - Deflexão
 - Deformada
 - Bacia de deflexão
 - Trincamento
-
- Afundamento de trilha de roda
- 
- ✓ Deformação elástica ou recuperável
 - ✓ Deformação plástica ou permanente

Conceitos

Deformação total - a cada passagem de roda o pavimento sofre um deslocamento que tem duas componentes:

1. Deformação elástica \Rightarrow deflexão (medida).
2. Deformação permanente \Rightarrow afundamento de trilha de roda (medida).

Quando se mede a deformação elástica em vários pontos a partir da carga:

\Rightarrow Bacia de deflexão ou Linha de influência

- ✓ DNER-ME 061/94 % Delineamento da linha de influência longitudinal da bacia de deformação por intermédio da Viga Benkelman+

Resultado da repetição da deformação elástica ⇒ trincamentos e fadiga

**Também acontece
em pavimentos
de concreto de
cimento portland**



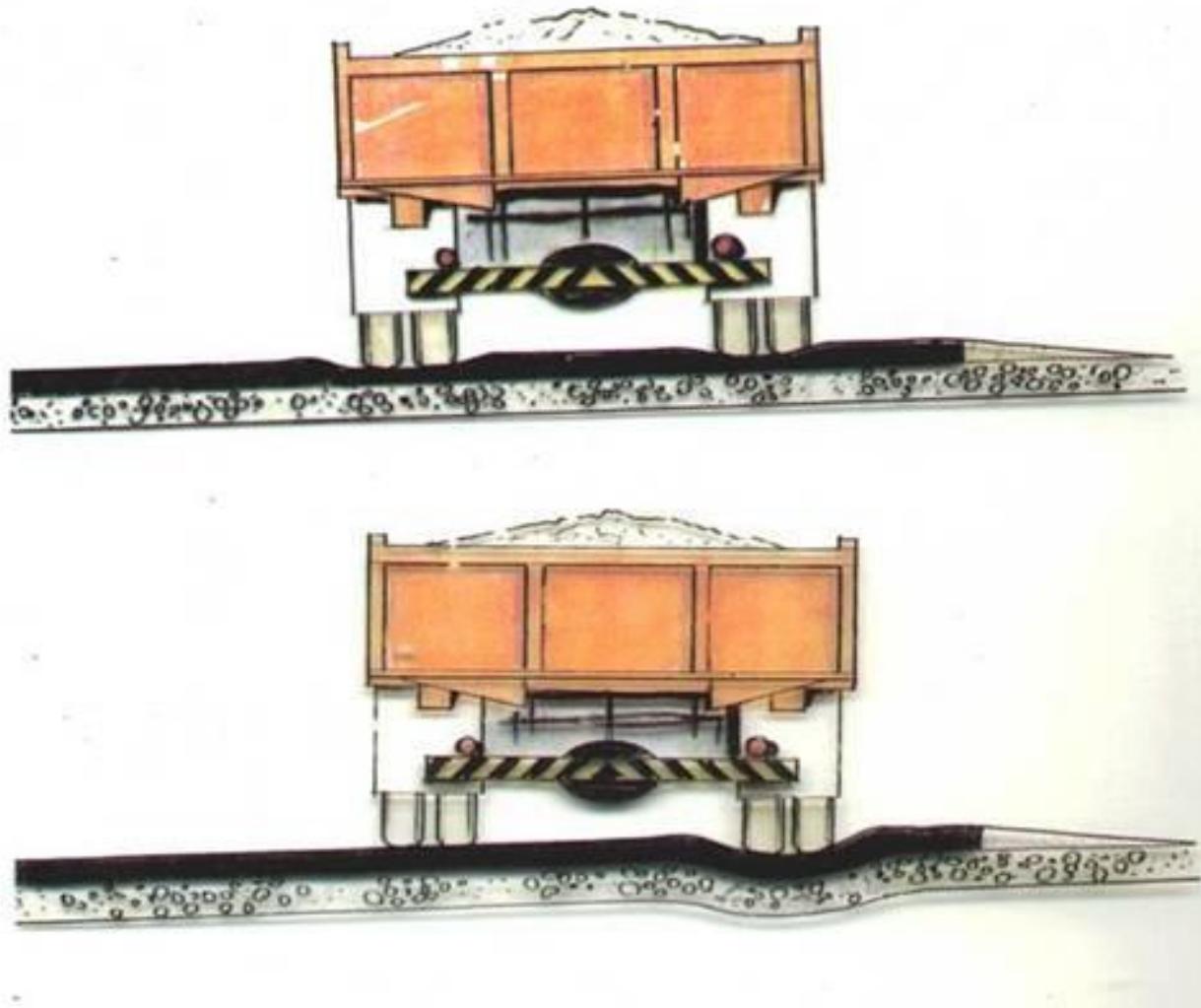
Resultado da repetição da deformação elástica (fadiga) - pavimento de concreto



Resultado da repetição da deformação elástica (fadiga) – pavimento asfáltico



Resultado do acúmulo de deformação permanente - afundamentos



Formas de Medida da Capacidade de Carga

Não destrutiva (NDT)

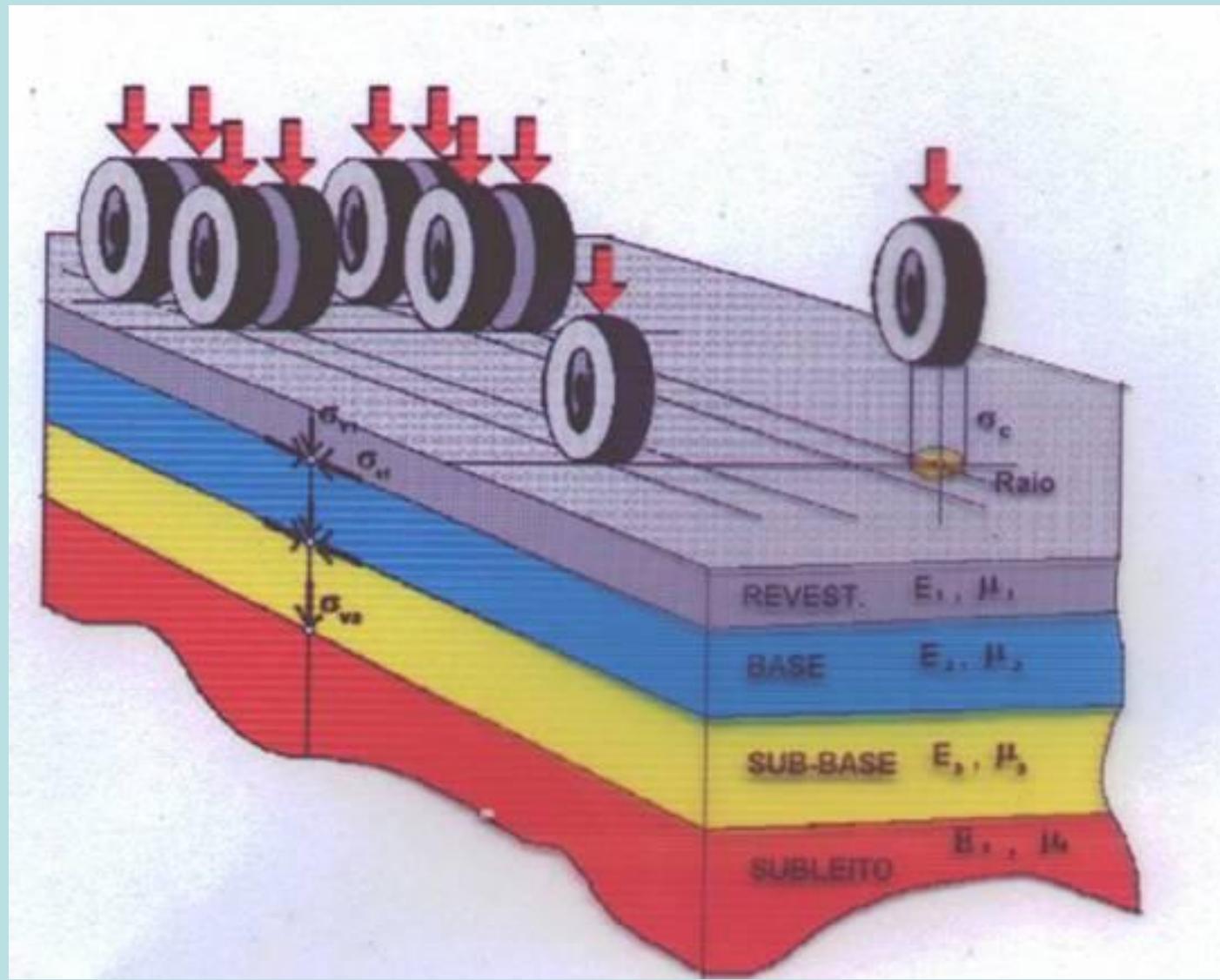
- a) Deformação elástica
 - Viga Benkelman (VB)
 - FWD

- b) Deformação permanente
 - Treliça

Destruativa

- Furos e poços de sondagem

Como se interpreta a capacidade de carga de um pavimento:
Mecânica dos Pavimentos \Rightarrow necessita conhecer os módulos
de resiliência das camadas e subleito



Formas de Obtenção do Módulo de Resiliência (MR)

Em projetos de pavimentos novos:

- amostras representativas dos materiais disponíveis serão submetidas a ensaios de laboratório:
 - ✓ triaxial dinâmico para solos e britas;
 - ✓ compressão diametral ou vigota para misturas asfálticas e cimentadas.

Em projetos de restauração:

- **Destrutiva:** amostras retiradas de poços de sondagem são levadas ao laboratório e ensaiadas.
- **Não destrutiva:** retroanálise de bacias de deformação (deformadas com FWD ou VB).

Avaliação Destruativa

- Como em geral não se conhece a estrutura dos pavimentos antigos, é necessário fazer furos e poços de sondagem para verificar as espessuras e determinar o tipo de materiais presentes nas camadas e subleito.
- Amostragem por segmento homogêneo.

Furos de Sondagem e Extração de Amostras de Revestimento Asfáltico



Ensaios Destruítivos: Extração de Amostras do Pavimento

Determinam-se:

- Tipos de materiais;
- Espessuras de camadas;
- Coleta de material para ensaios de laboratório.



Exemplo de furo de sondagem



Perfil de Sondagem

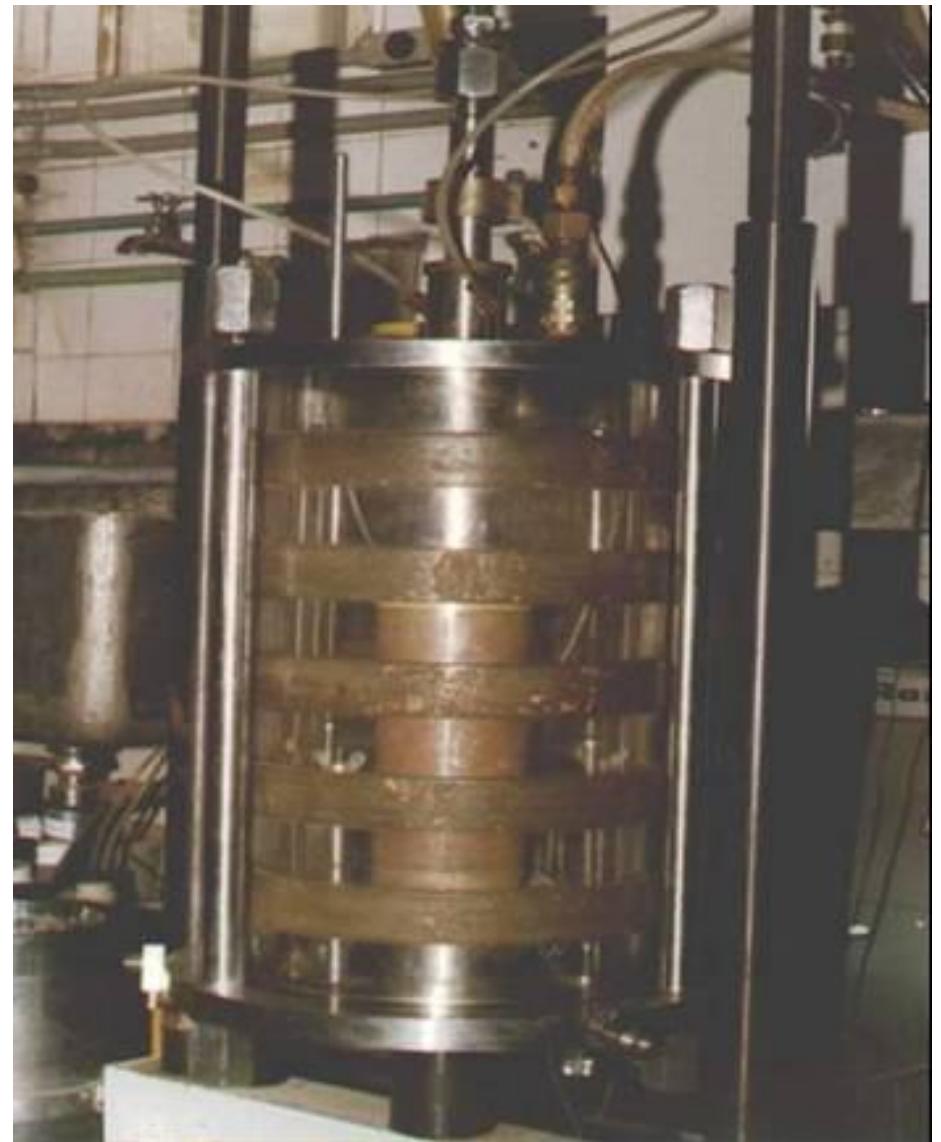


Poços de Sondagem com Medição de Densidade com Frasco de Areia



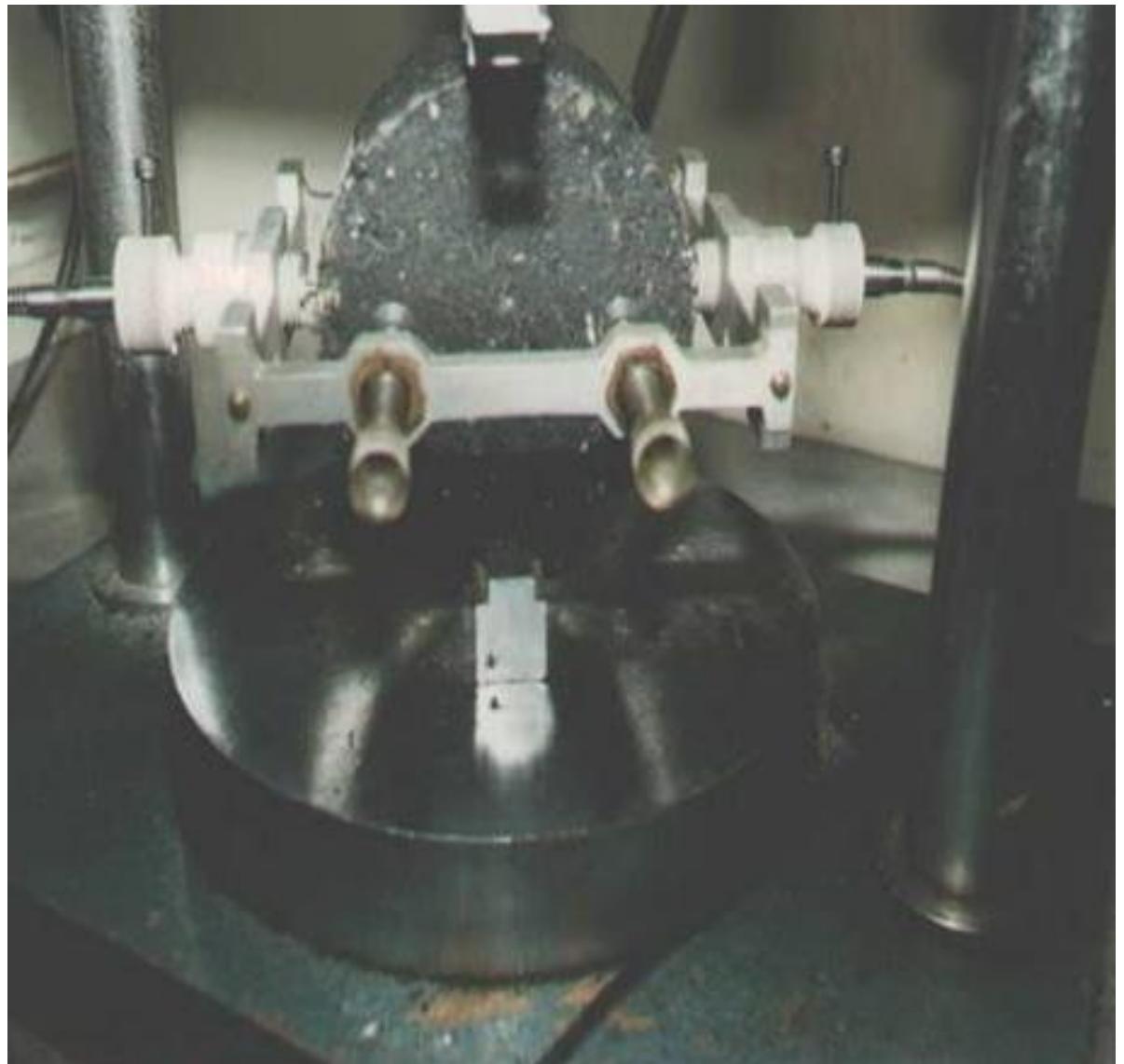
Com Amostras da avaliação destrutiva (poços):

**Equipamento triaxial
dinâmico para
ensaio de materiais
das camadas e do
subleito (MR)**



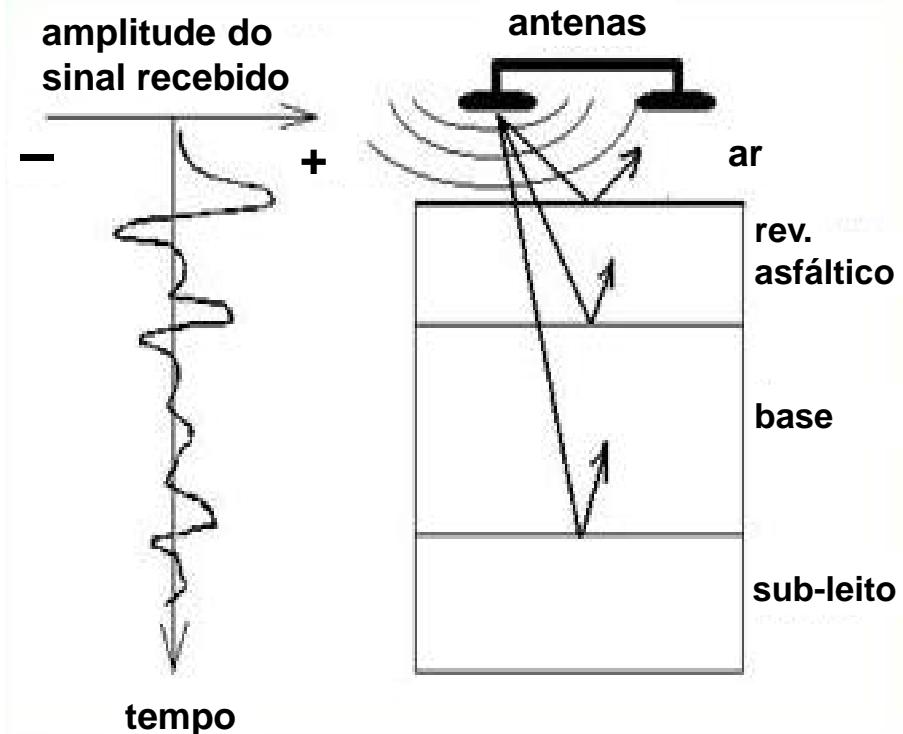
Com amostras retiradas com sonda rotativa:

**Equipamento
compressão
diametral
dinâmico para
ensaio de
amostras de
concreto
asfáltico (MR)**

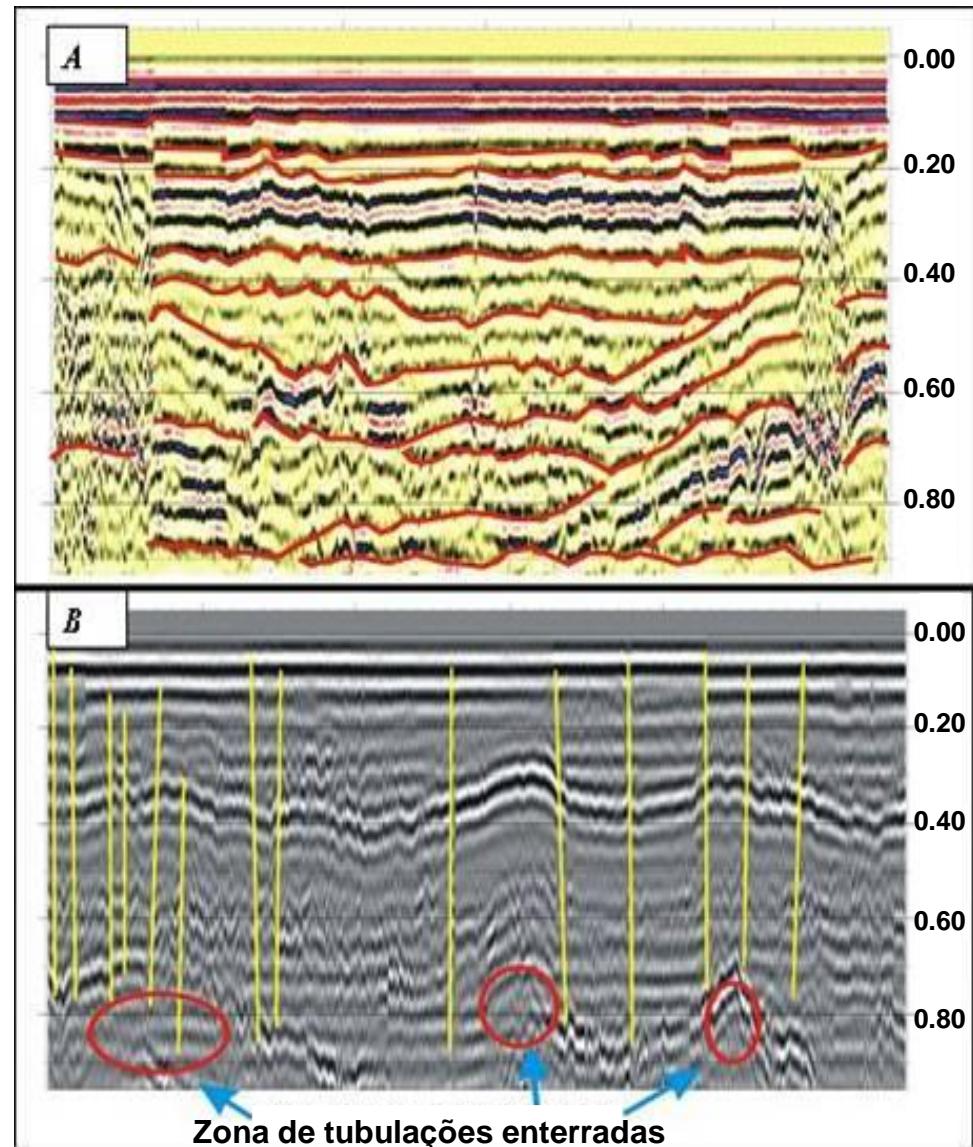


GPR (não destrutivo) Geo-Radar

Alternativa para avaliação de espessuras das camadas



Geo-Radar (GPR)



Avaliação Não Destruativa

Levantamento de deslocamentos recuperáveis:

- Viga Benkelman . VB;
- Deflectômetro de peso batente (falling weight deflectometer) . FWD.

Equipamentos Utilizados em Avaliações Não Destrutivas

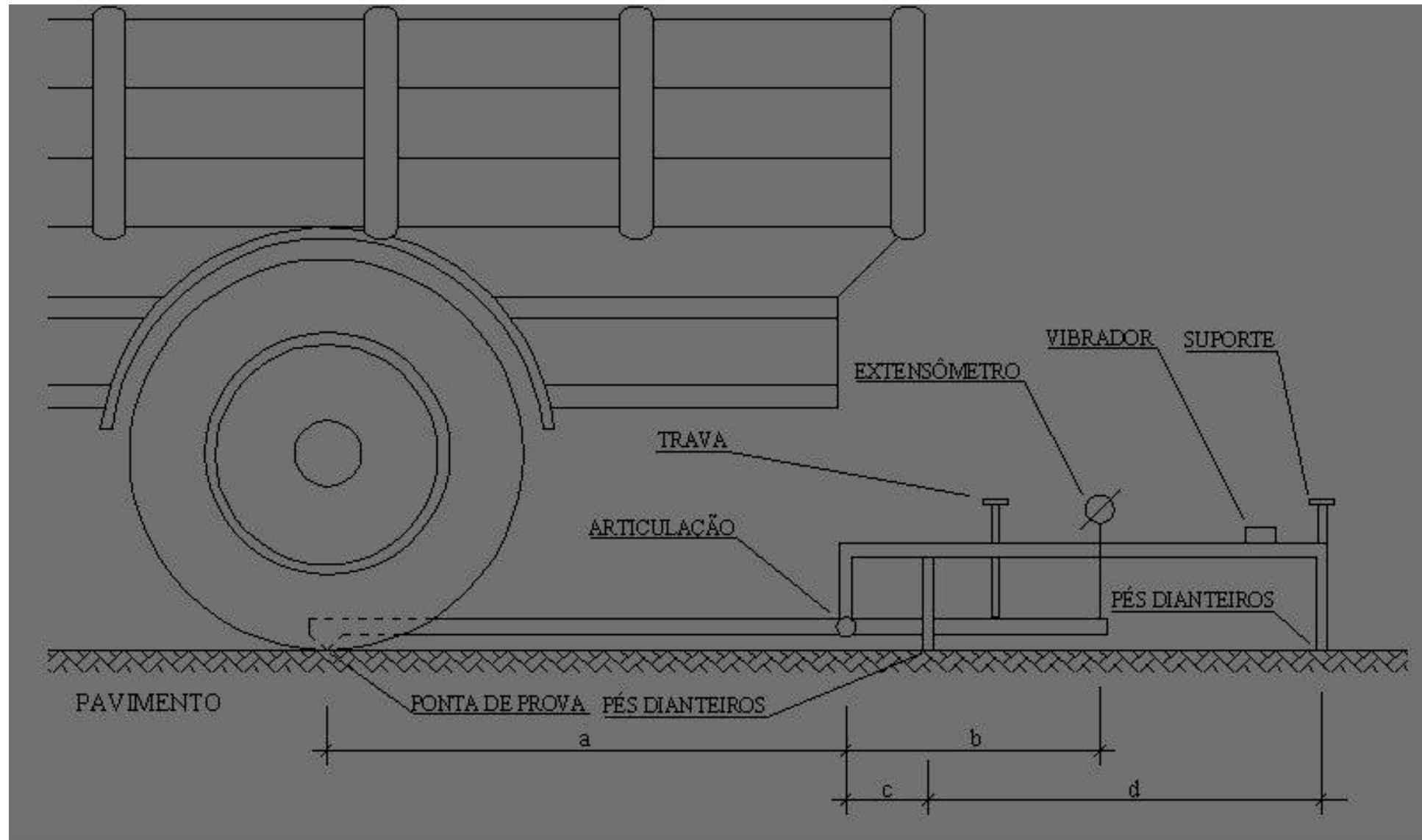
Típicos:

1. Carregamento quase-estático: ensaio de placa e viga Benkelman;
2. Carregamento vibratório: dynaflect;
3. Carregamento por impacto: falling weight deflectometer (FWD).

Equipamentos complementares:

1. Ground penetration radar (GPR);
2. Propagação de ondas sísmicas (seismic pavement analysis) . SPA.

VIGA BENKELMAN



Medição com VB



Fases de Execução VB

1- posiciona caminhão



2- posiciona VB



3- caminhão se afasta



4- leitura final



Exemplos VB Tradicional

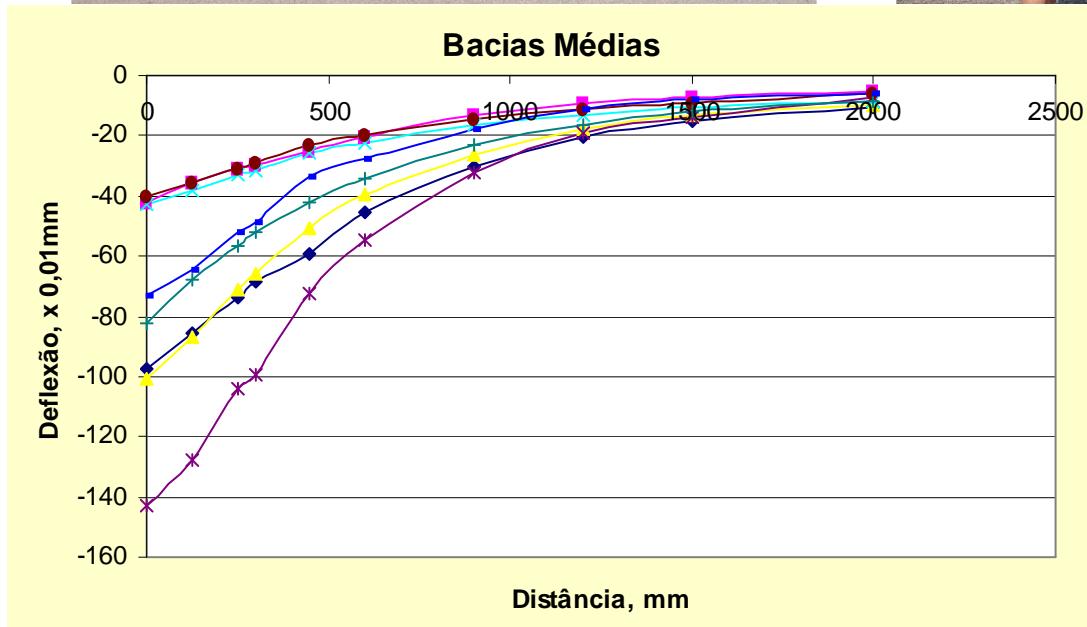


Levantamento de Deslocamentos Recuperáveis (não destrutivo)

Exemplo de Viga de Benkelman automatizada



Medições com VB automatizada



Levantamento de Deslocamentos Recuperáveis (não destrutivo)



Exemplo de Viga de Benkelman automatizada



Fotos M. Fritzen

Controle construtivo com VB

- “ Requisito para obter um pavimento durável
- “ Controle tradicional: umidade e densidade (frasco de areia)
- “ Controle moderno: deformabilidade
 - EX: Desde 1999 . Prefeitura Rio de Janeiro usa medida com Viga Benkelman para liberar camadas de pavimento
 - várias obras rodoviárias já utilizam.

Controle reforço, sub-base e base : frasco de areia



Controle Tradicional : frasco areia



Controle tradicional: frasco de areia



Controle construtivo atual: Viga Benkelman (VB)



VB sendo transportada próximo ponto de controle



VB posicionada embaixo roda e leitura inicial (L0)



25 3 2006

VB: leitura final (Lf) após caminhão se deslocar 10 metros



VB sendo transportada próximo ponto de medida



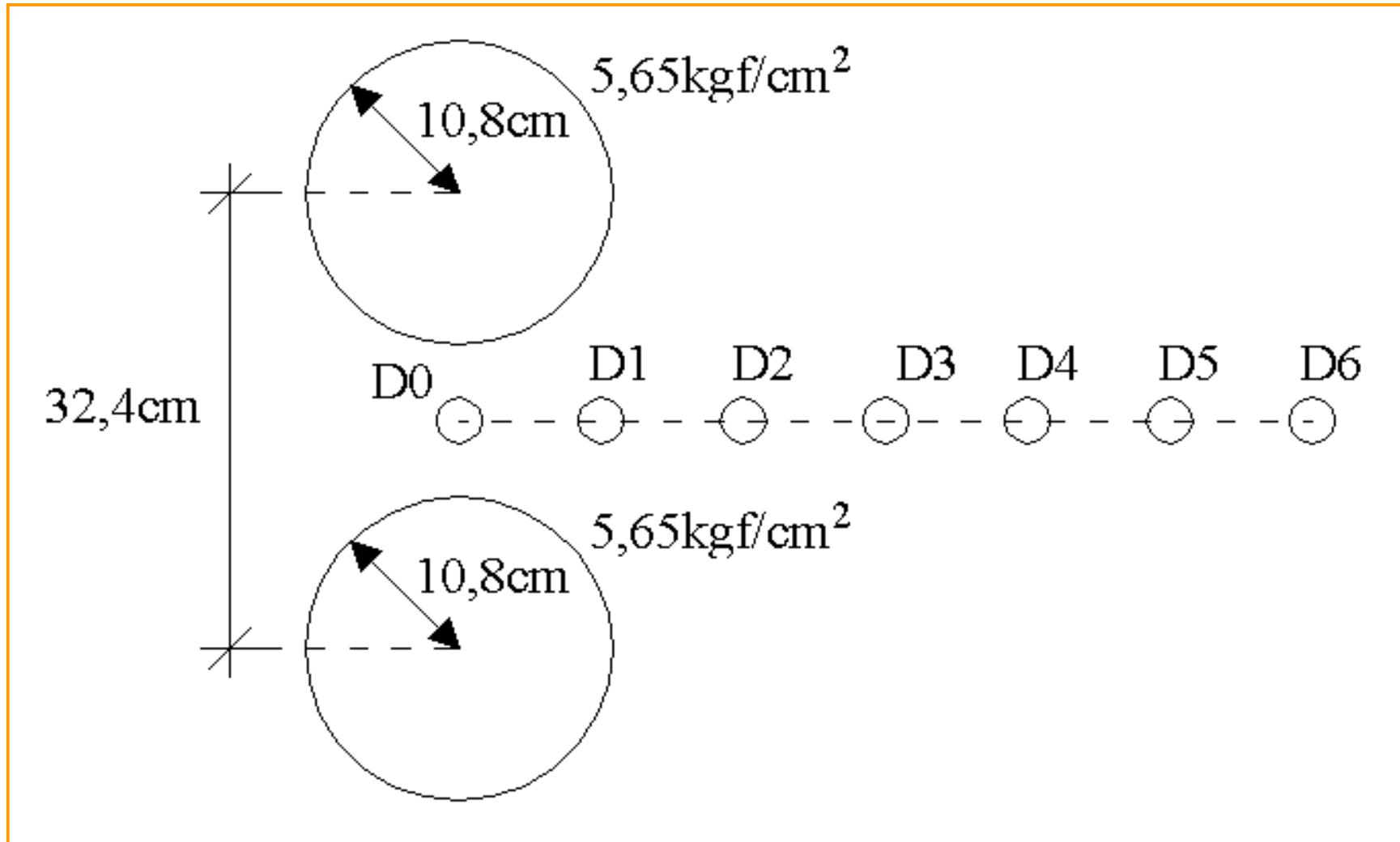
Medidas de Deslocamentos Elásticos

O que se mede:

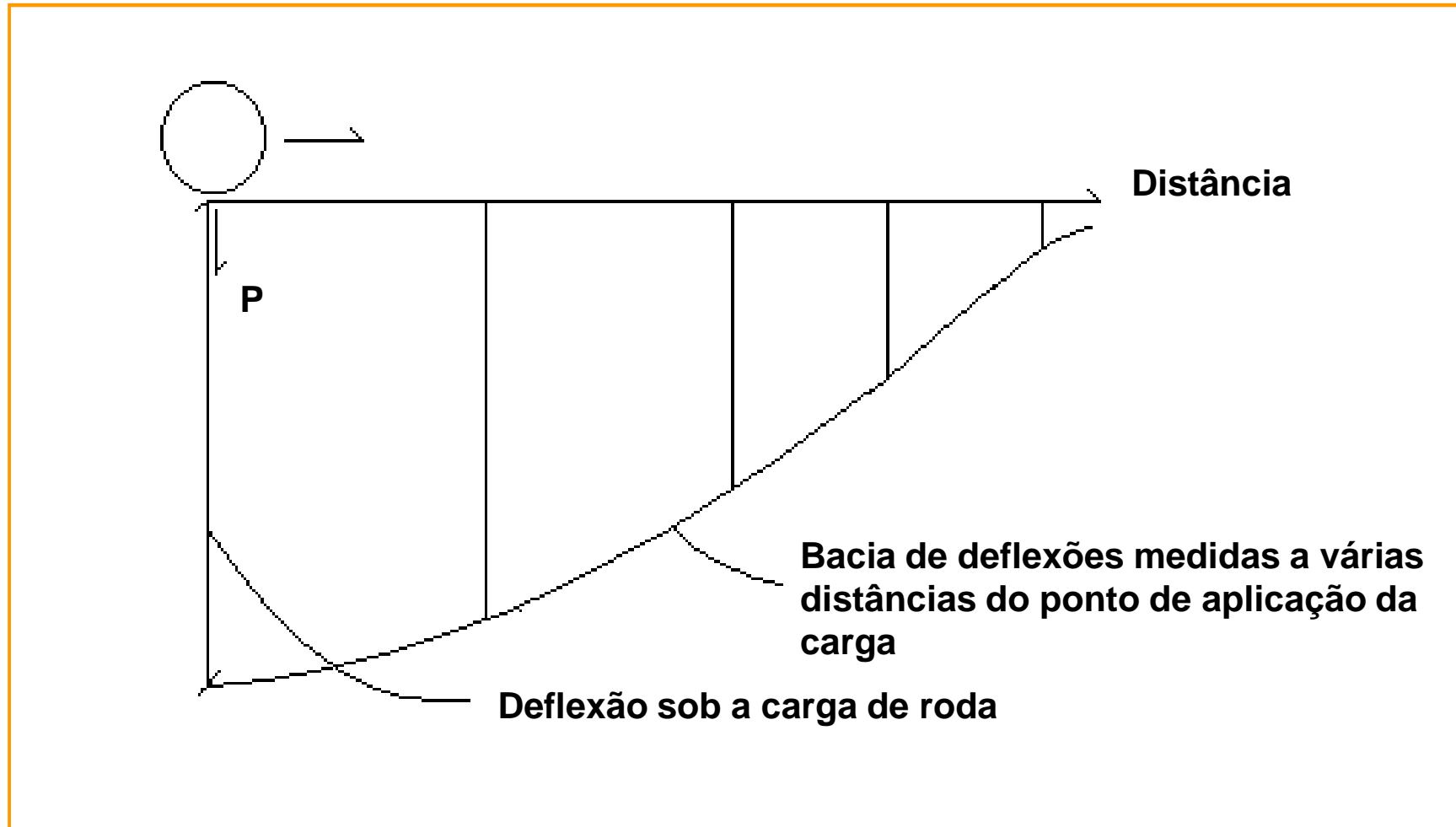
1. Deflexão máxima: deslocamento sob o centro da carga (FWD) ou sob o centro das rodas duplas de um eixo simples - 10^{-2}mm (d_0);
2. Raio de curvatura: círculo ou arco de parábola que passa por dois pontos da deformada (d_0 e d_{25});
3. Deformada ou bacia de deformação (d_0 , d_{25} , d_{50} , etc.).

Viga Benkelman

Esquema para Medir Deformada

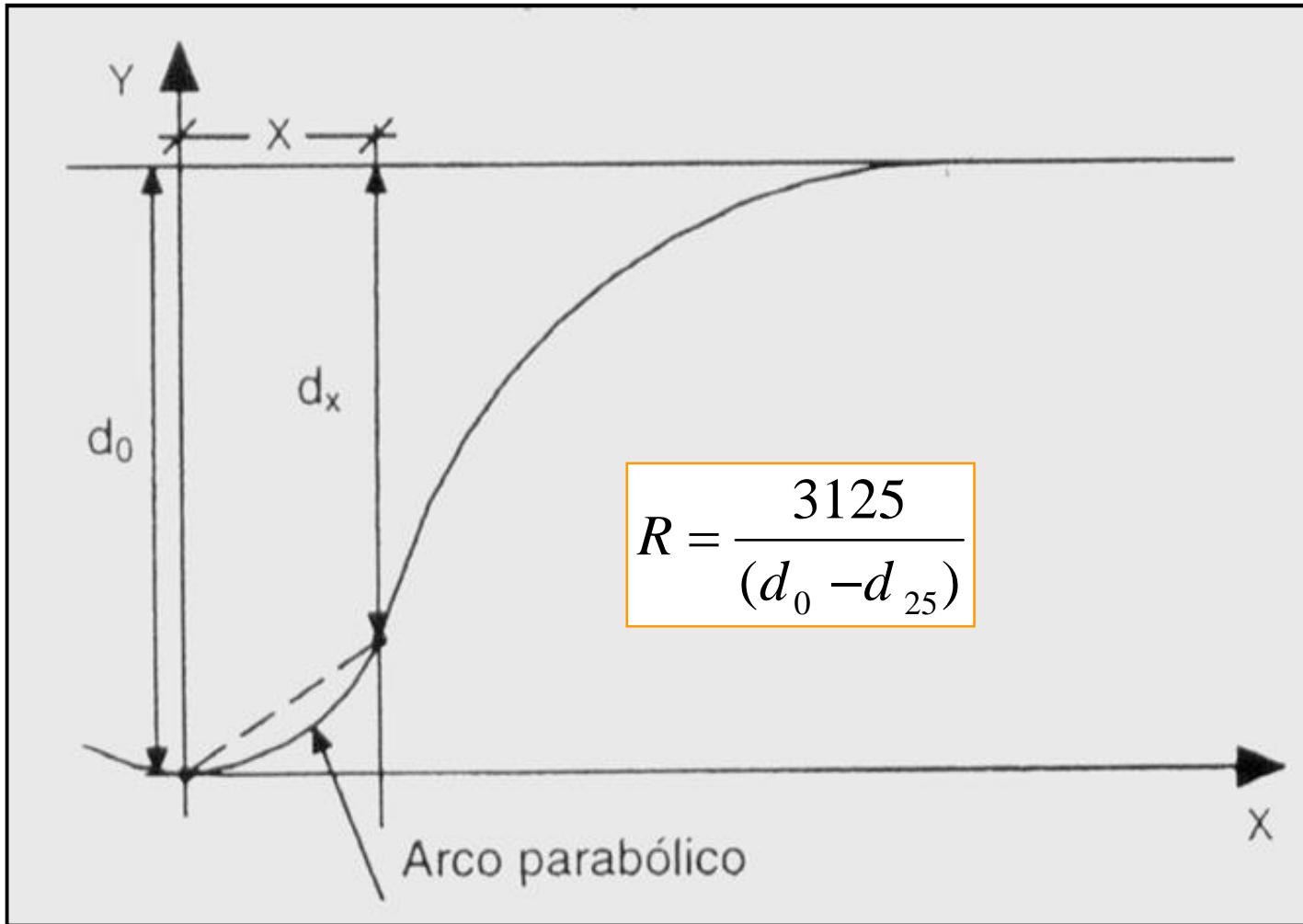


Levantamento de Deslocamentos Recuperáveis em Vários Pontos



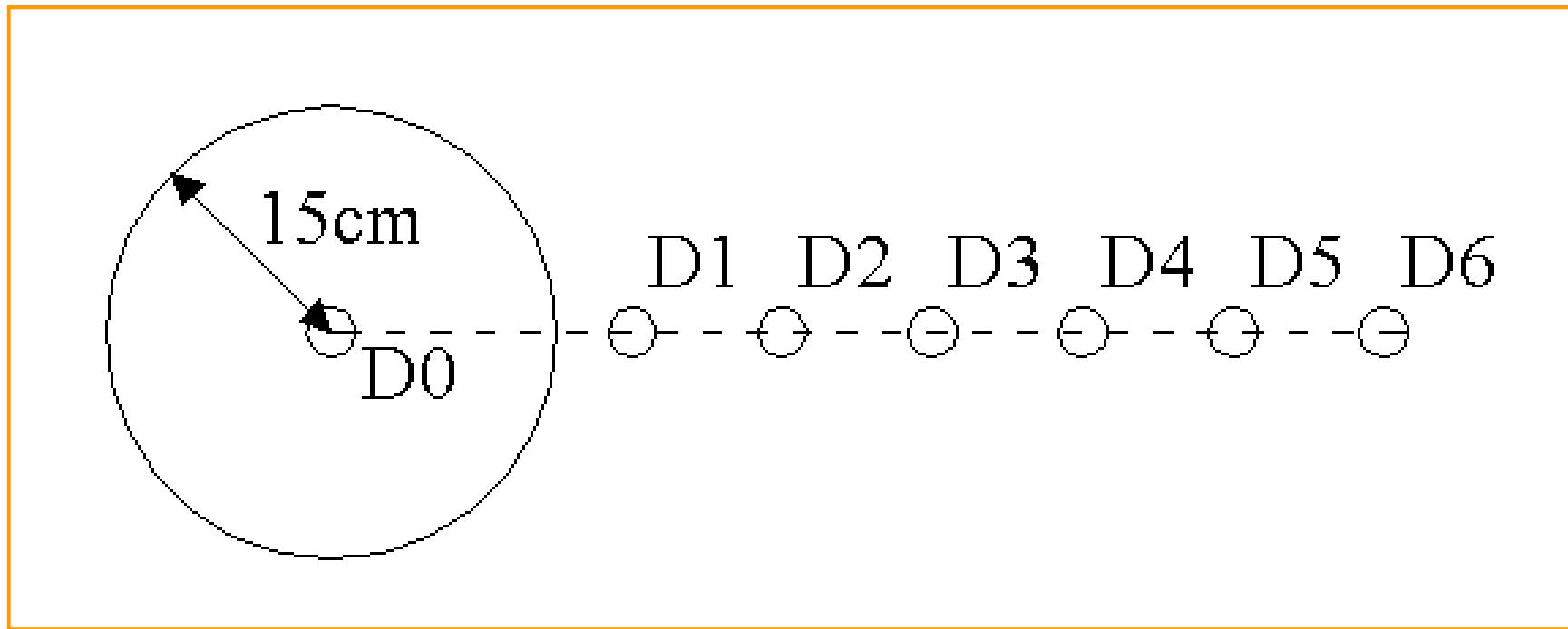
Viga de Benkelman

Levantamento de Deslocamentos Recuperáveis VB - Raio de Curvatura (m)



Viga de Benkelman

FWD - Esquema de Medida de Deformada



Levantamento de Deslocamentos Recuperáveis (não destrutivo)

FWD



Placa e geofones



Fotos: Abdou

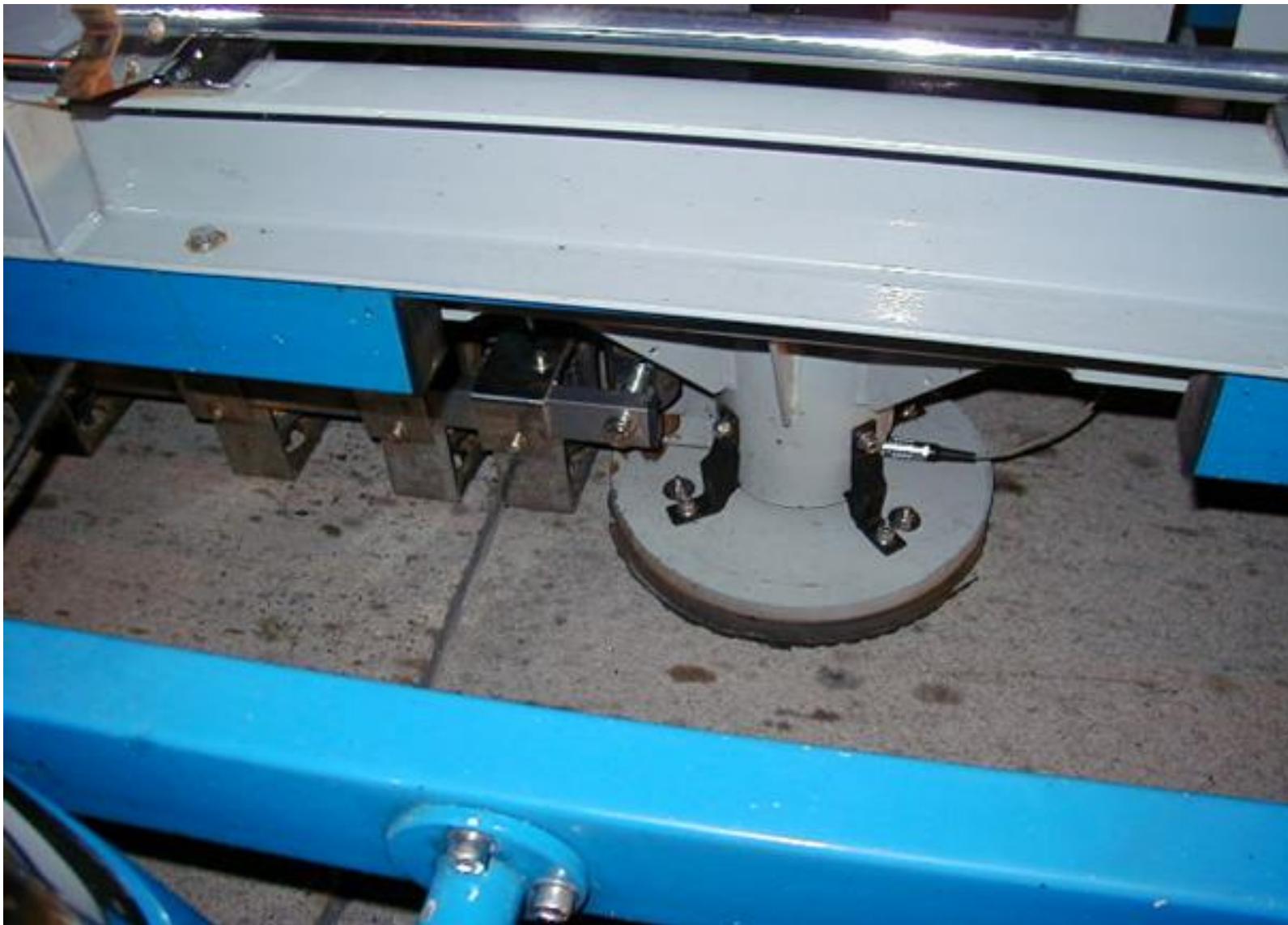
FALLING WEIGHT DEFLECTOMETER (FWD)

Placa de Aplicação de Carga



FALLING WEIGHT DEFLECTOMETER (FWD)

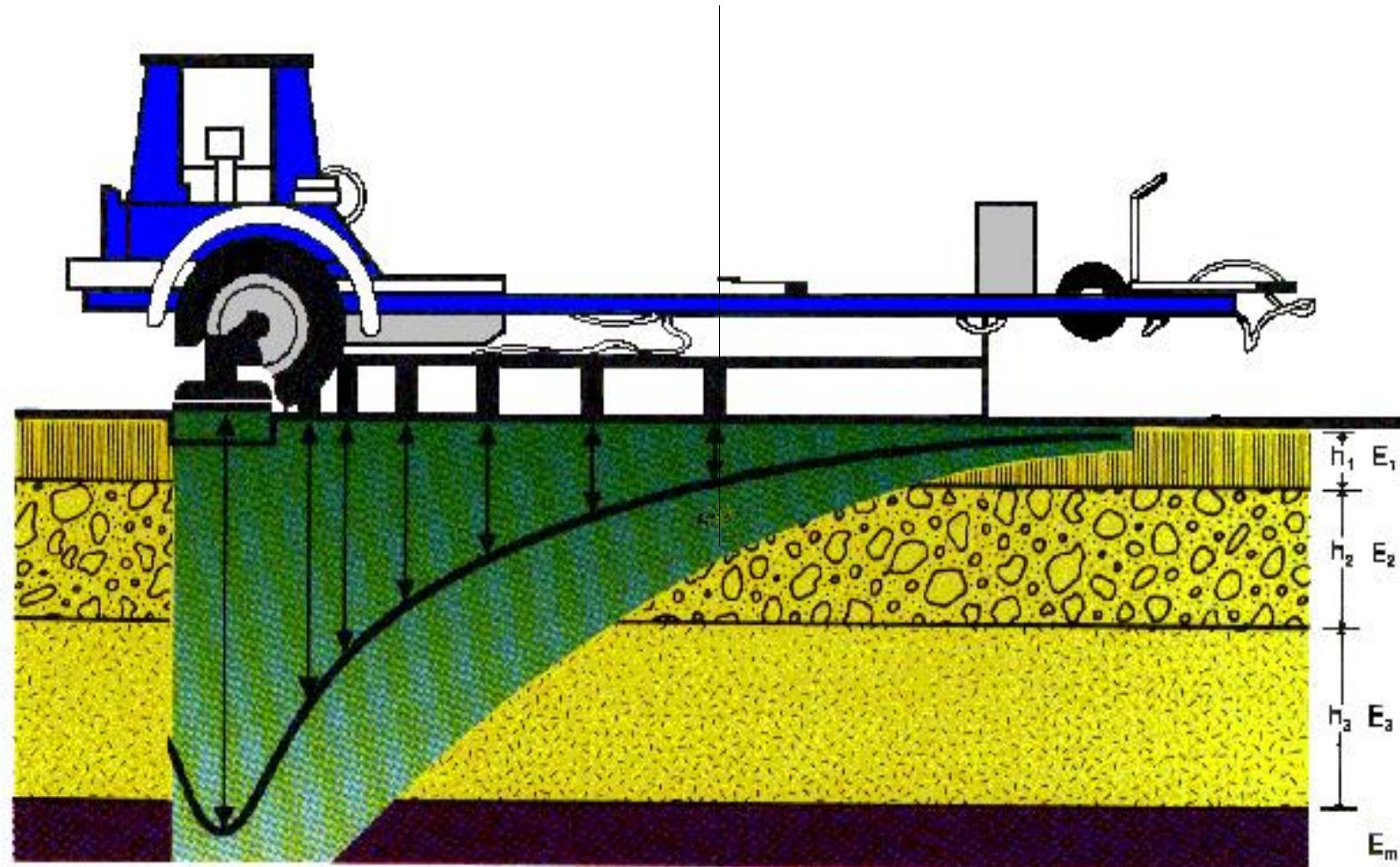
Placa de Aplicação de Carga e Geofones



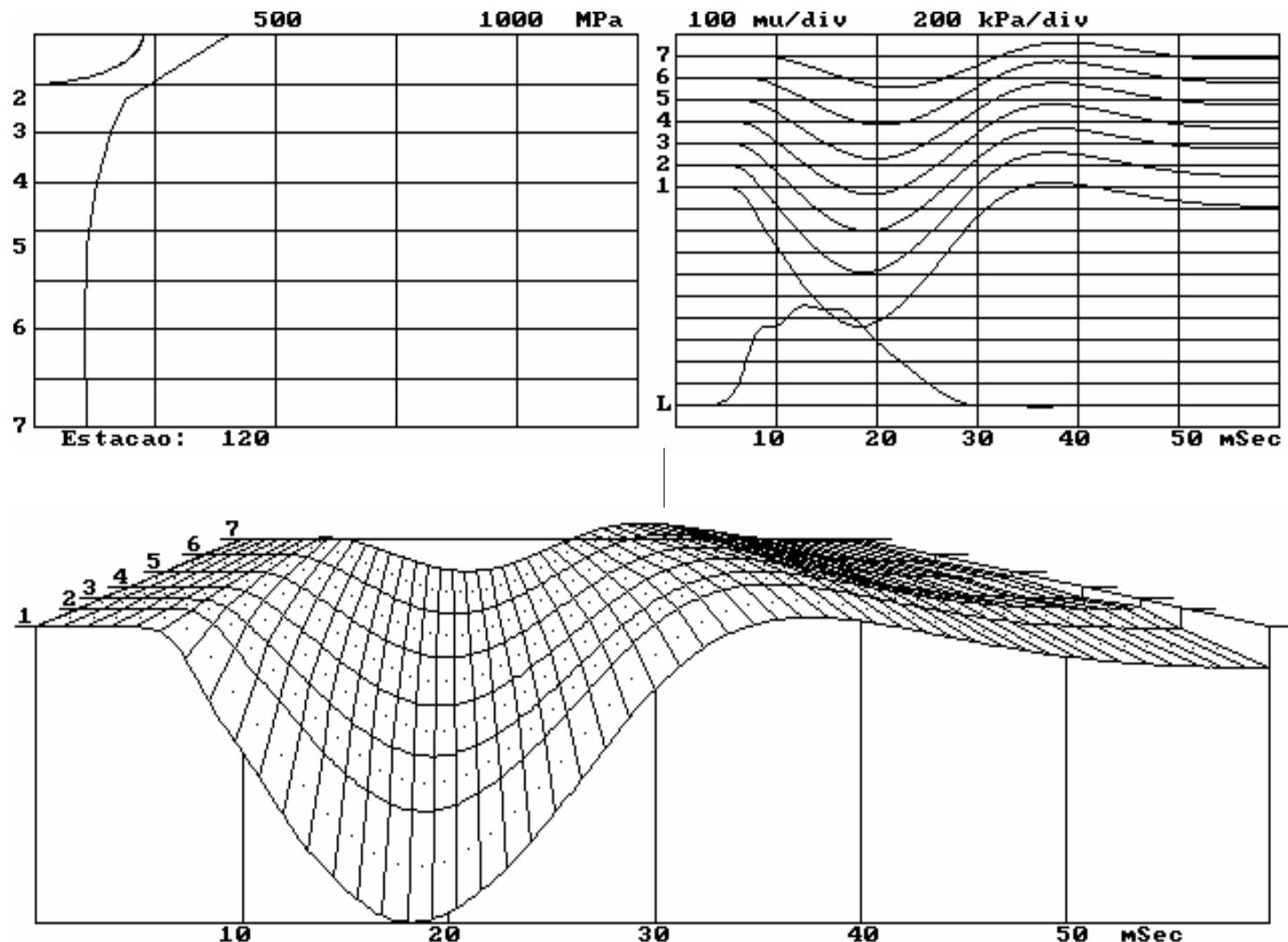
Detalhe do Sistema de Aplicação de Carga FWD



FWD - Esquema de Aplicação da Carga e Leituras



FWD - Esquema de Aplicação da Carga e Leituras



FWD numa Estrada do Sul

(Foto: L. Pivotto)



Modelos de FWD

Dynatest



KUAB



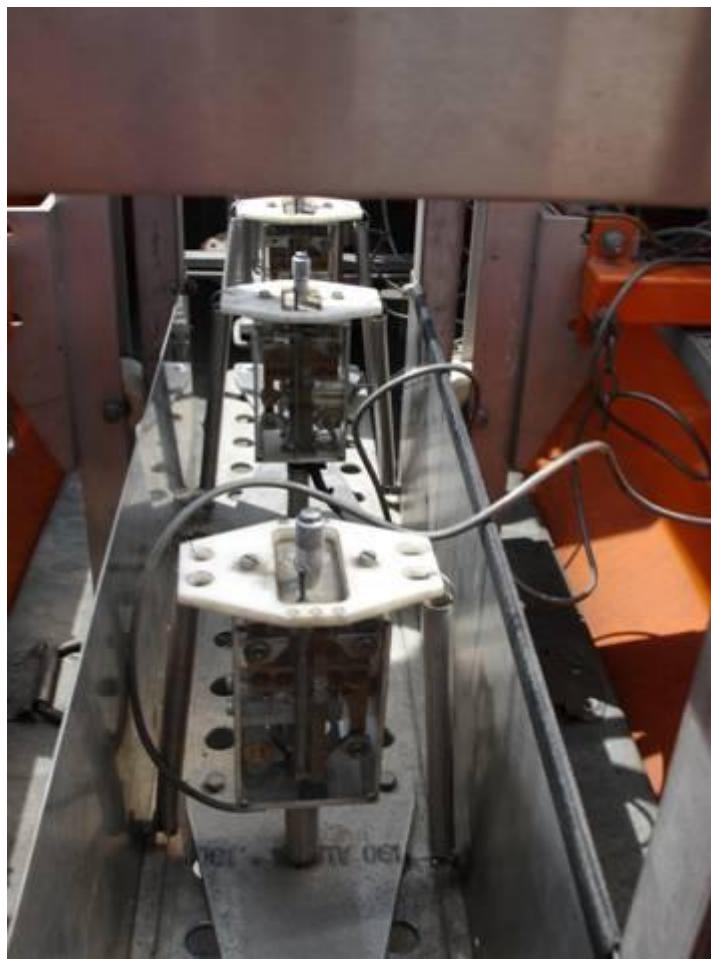
Vista geral FWD aberto



Sistema de aplicação de carga



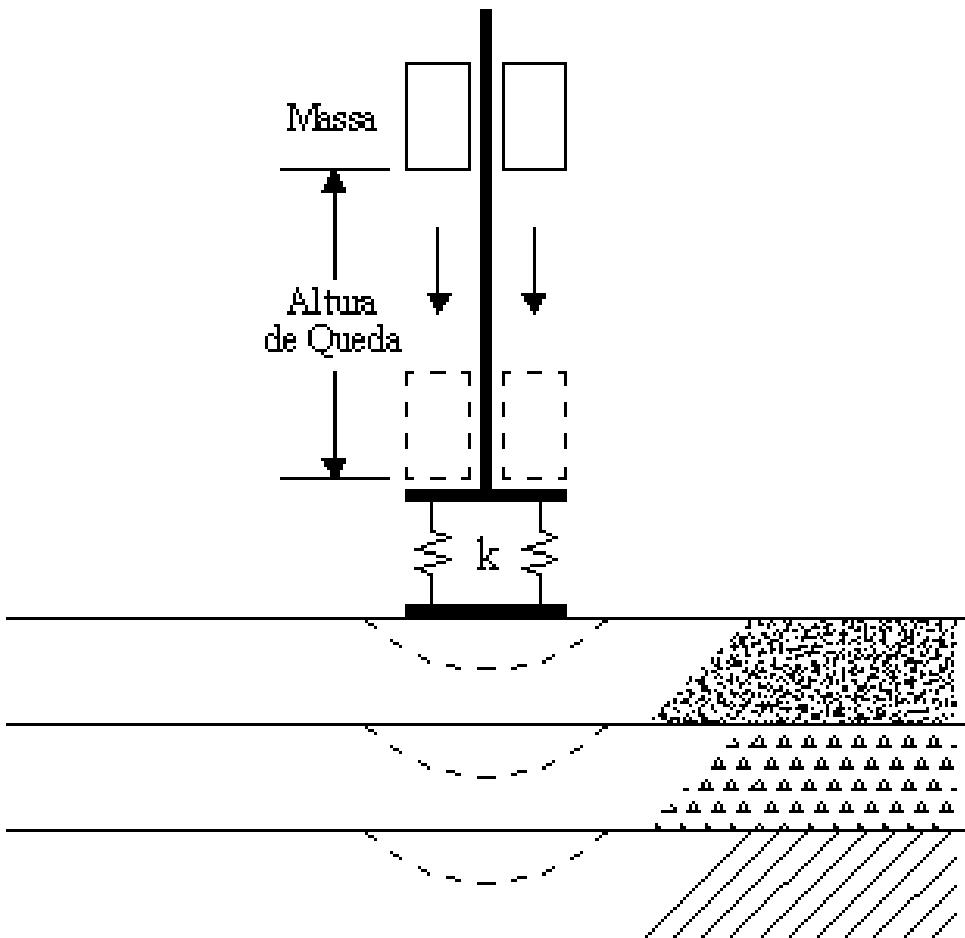
Sistema de leitura das deflexões



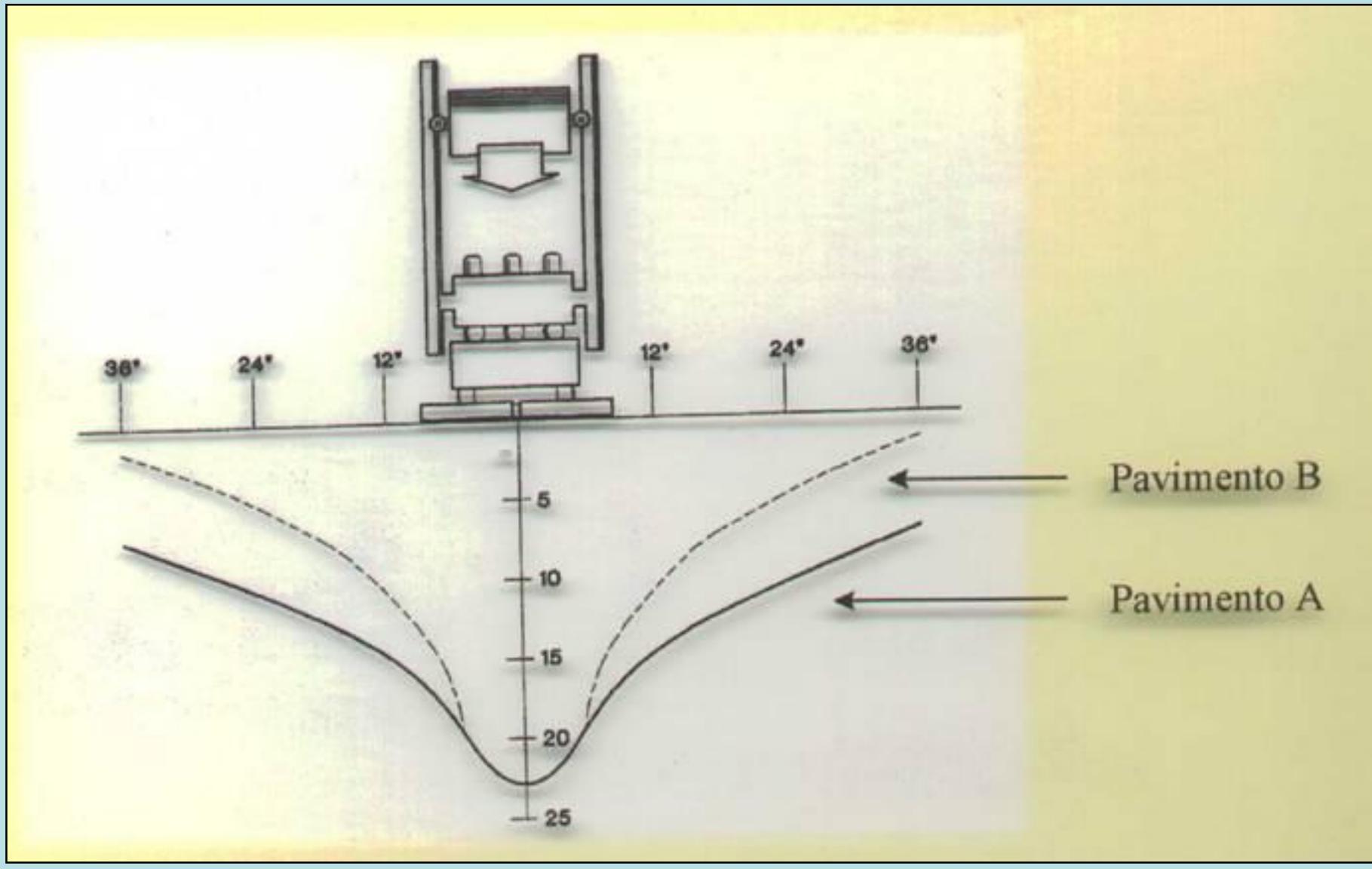
Defletômetro de Impacto Tipo FWD

Vantagens em relação à VB:

1. Acurácia nas medições;
2. Aplicação de vários níveis de carga;
3. Maior produtividade (+pontos levantados / dia);
4. Ensaio não influenciado pelo operador;
5. Registro automático de T°C e distâncias dos pontos de ensaio.



Estruturas com deflexões máximas iguais e comportamentos estruturais diferentes: importância da medida da deformada



Comparação entre VB e FWD

Viga Benkelman	FWD
■ Início: década de 1950	■ Início: década de 1980
■ No Brasil, chegou na década de 1960	■ No Brasil, chegou na década de 1990
■ Há no Brasil centenas de equipamentos em uso	■ Há no Brasil cerca de 20 equipamentos em uso (duas marcas: Kuab e Dynatest)
■ No mundo tem várias versões automatizadas	■ Faltam centros de calibração (quando serão implantados?)

Técnica da Retroanálise

- Conceitos básicos
- Técnicas
- Programas

Retroanálise em Pavimentação - Conceito

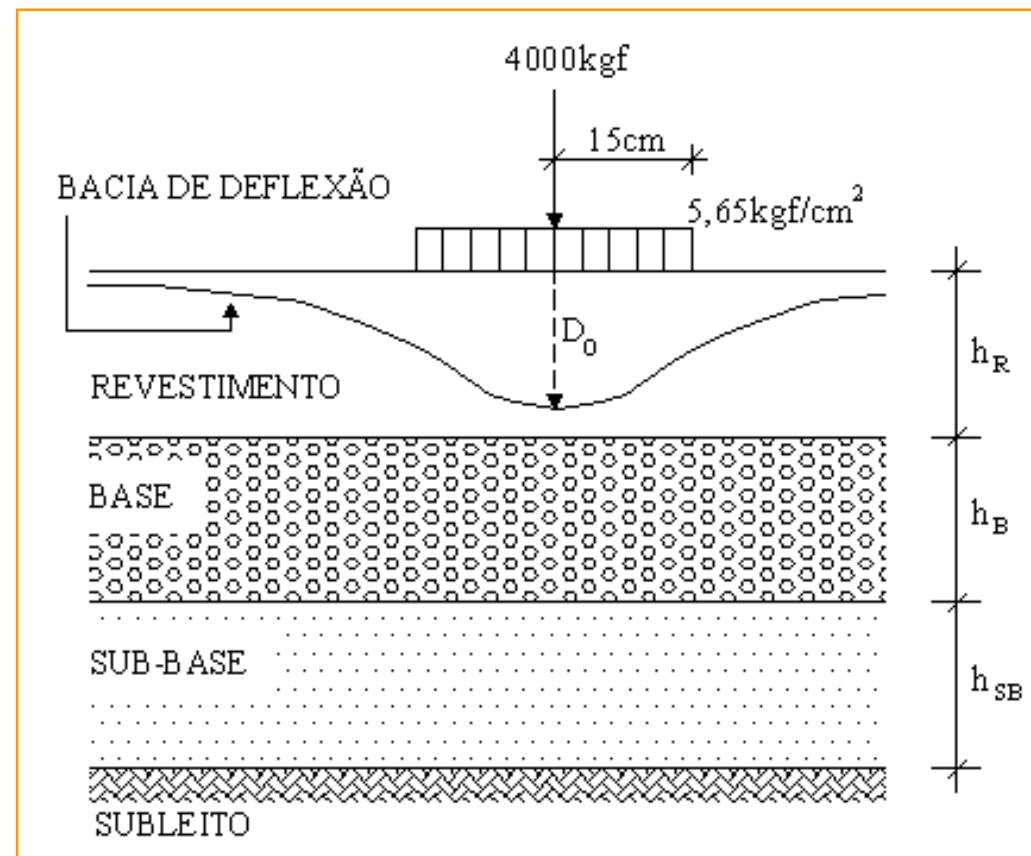
- É o procedimento analítico que permite estimar os módulos de elasticidade *in situ* das camadas do pavimento e do subleito (nas condições de trabalho), a partir da interpretação da forma e da magnitude da bacia de deflexão da superfície do pavimento, causada por uma carga externa conhecida.
- O objetivo é propiciar uma avaliação estrutural detalhada do trecho em estudo e possibilitar o dimensionamento mecanístico de reforço da estrutura, quando necessário.

O que é Retroanálise de Módulos de Resiliência?

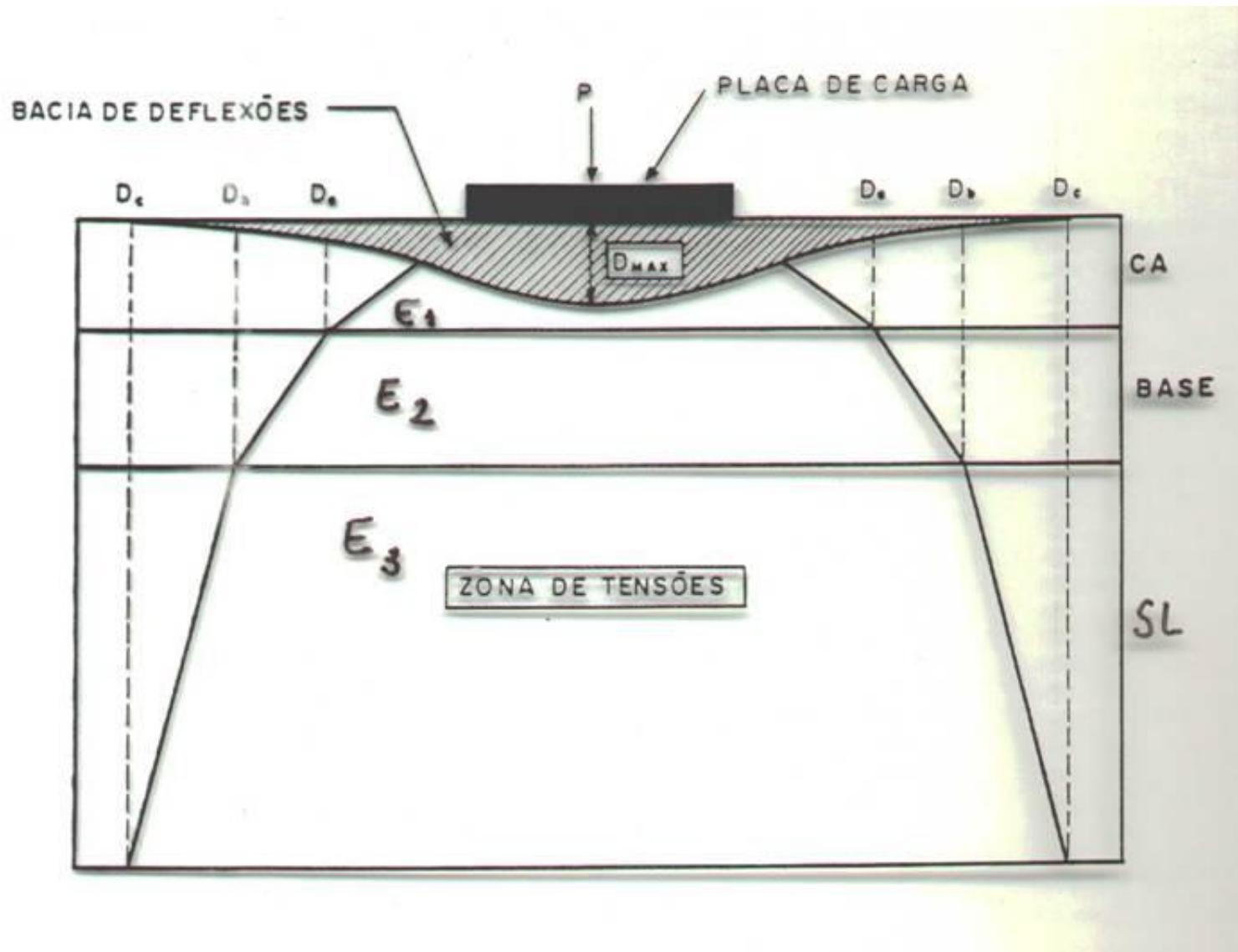
Processo que permite a determinação de módulos de resiliência das camadas, a partir das bacias de deflexão medidas na superfície do pavimento quando submetido a ensaios não destrutivos (NDT).

Dados de entrada:

- Dados sobre o carregamento;
- Bacia deflectométrica;
- Seção-tipo do pavimento;
- Faixas de valores modulares.

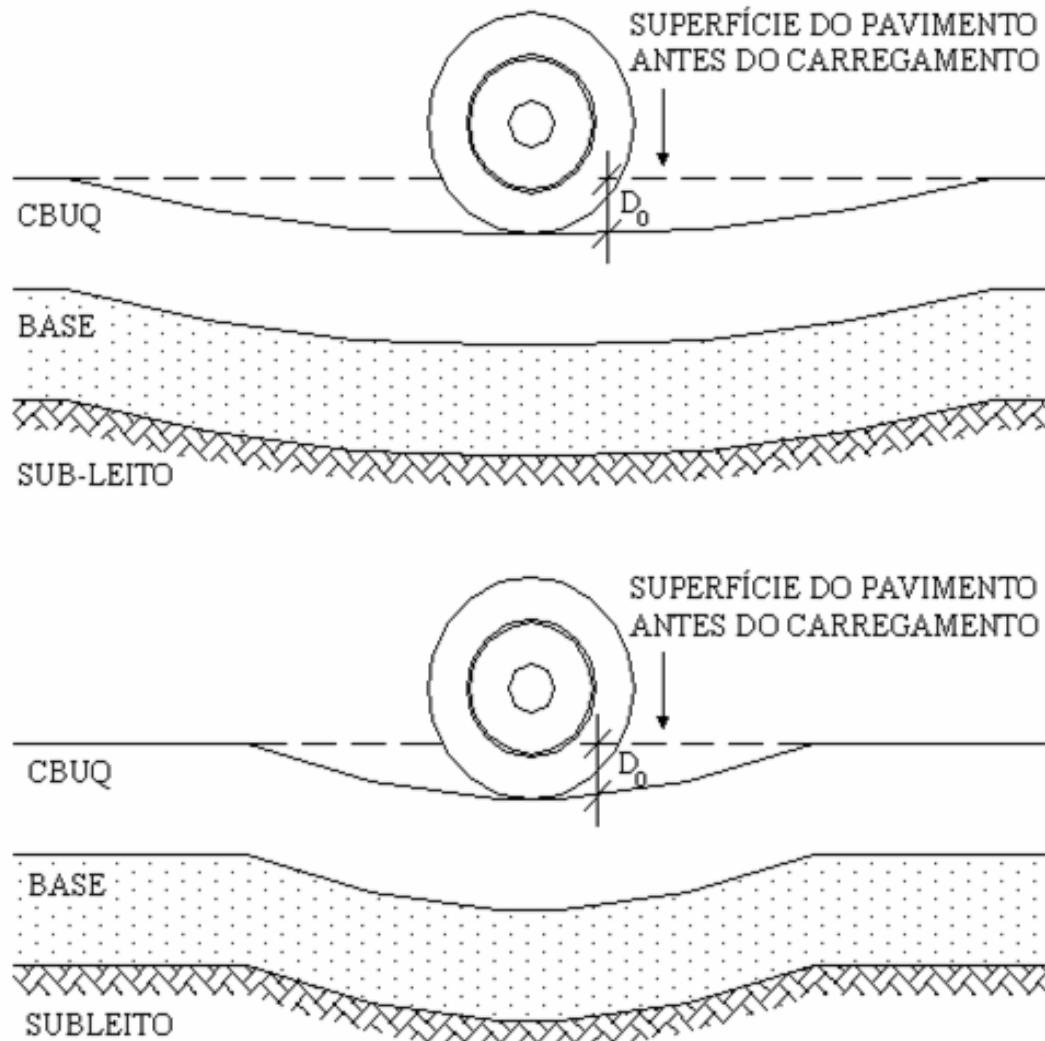


Esquema



Quais as Vantagens em Relação às Outras Técnicas de Avaliação?

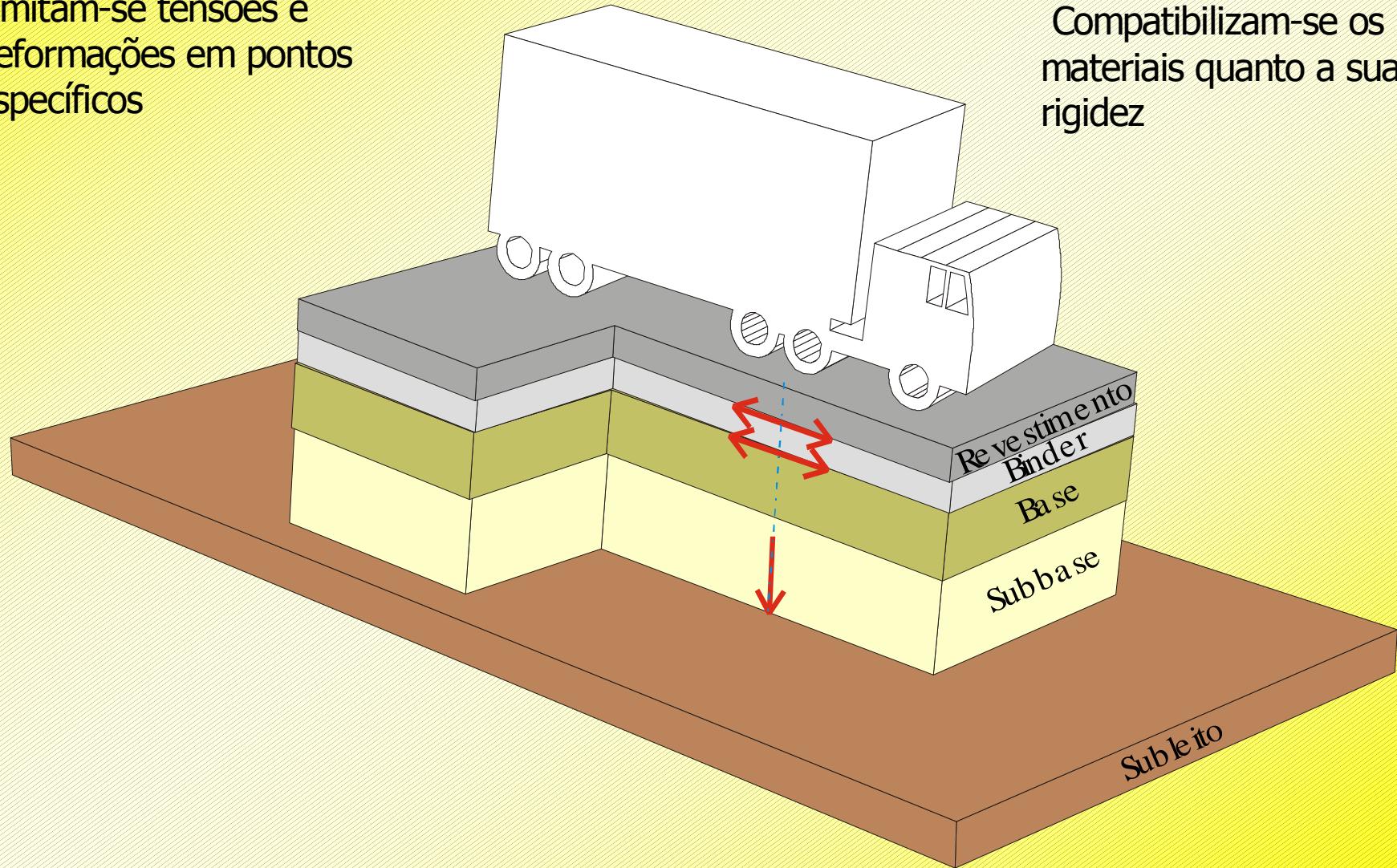
1. MR nas condições de campo;
2. Evita muita coleta de amostras para determinar o estado do pavimento;
3. NDT: menos onerosos e menos demorados;
4. Uso pleno da bacia de deflexões, não só D0.



Análise Mecânica do Pavimento

Limitam-se tensões e deformações em pontos específicos

Compatibilizam-se os materiais quanto a sua rigidez



Retroanálise

- Interpretação da forma e magnitude da deformação da superfície do pavimento quando submetido a um determinado carregamento → obtenção dos módulos elásticos das camadas e do subleito.
- Métodos de dimensionamento mecanísticos → teoria da Elasticidade → Módulo (MR) e coeficiente de Poisson (μ).
- Sistemática de retroanálise se justifica :
 - ✓ obter os E nas condições de campo;
 - ✓ eliminar ou minimizar coleta de amostras;
 - ✓ caracterizar com rapidez as camadas em termos de elasticidade;
 - ✓ verificar a condição estrutural de cada camada e SL.

Retroanálise

- Os dados da retroanálise podem contribuir para a elaboração de projetos mais confiáveis e, portanto, de obras mais duráveis, representando um ganho de tempo nos projetos e minimizando a coleta de amostras.
- A retroanálise é o procedimento de projeto de reforço que mais evolui atualmente no mundo.
- É fundamental que os procedimentos de retroanálise de bacias de deflexão sejam claramente compreendidos para que o projetista e o contratante conheçam as vantagens e as limitações da modelagem utilizada.
- Há ainda a necessidade de balizar os programas e procedimentos de retroanálise pelos ensaios de laboratório ou valores de módulos consistentes.

Métodos Iterativos

Dados de entrada:

- bacia de deformação;
- número de camadas e espessuras;
- intervalo de variação dos módulos (provável);
- profundidade da camada rígida;
- valores iniciais de módulos;
- carregamento solicitante (eixo padrão, carga atuante, etc.).

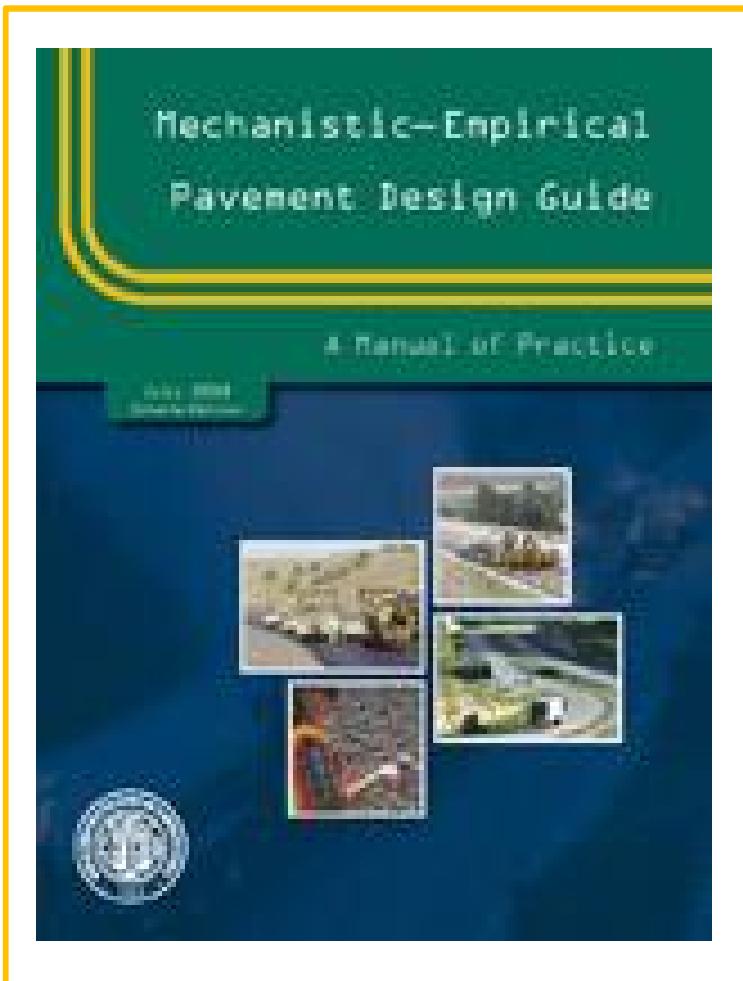
Programa iterativo:

- várias iterações \Rightarrow resultados.

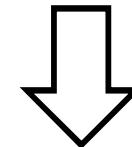
Métodos Iterativos

- Resultados:
 - ✓ bacia estimada;
 - ✓ módulos estimados;
 - ✓ erro associado.
- Estes resultados são influenciados por alguns parâmetros de entrada, em especial pelos valores iniciais de módulo e espessuras.

(BAKFAA)



Guide for Design of Pavement Structures.
(1993, dados de 1966).



O MEPDG - Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide (2008)



Novo método de dimensionamento e reabilitação de pavimentos rígidos e flexíveis americano.

Razões para substituir o antigo método

- ✓ Equações de tráfego obtidas à época não correspondem aos carregamentos de tráfego atuais;
- ✓ Não considera procedimentos de reabilitação de pavimentos;
- ✓ Não estão inclusos os efeitos de diferentes condições climáticas;
- ✓ Mesmo tipo de subleito nos levantamentos do AASHTO *Road Test*;
- ✓ Envelhecimento de materiais e efeitos do clima foram pouco avaliados (período e avaliação = 2 anos).

Qual o suporte?

- ✓ Amplo Banco de Dados do LTTP e outros programas de coleta em todo o país.



- ✓ Evolução no processo de caracterização dos materiais de pavimentação.



- ✓ Disponibilidade de dados de tráfego e de clima.

Níveis de Análise

Uma abordagem hierárquica para determinação dos dados de entrada do projeto.

<i>Nível Dados</i>	<i>Determinação dos Valores de Entrada</i>	<i>Conhecimento do Parâmetro</i>
1	Projeto/Medidas Específicas do Trecho	Bom
2	Correlações/Regressões, Valores Regionais	Razoável
3	Sugestões, Estimativas	Ruim

Níveis de Análise e Calibração

Três níveis de análise
(↑ custo/benefício)

- ✓ Nível 1: O mais acurado;
- ✓ Nível 2: O mais próximo do antigo método;
- ✓ Nível 3: Os dados de entrada são “*default*”.

Grande Esforço de calibração!

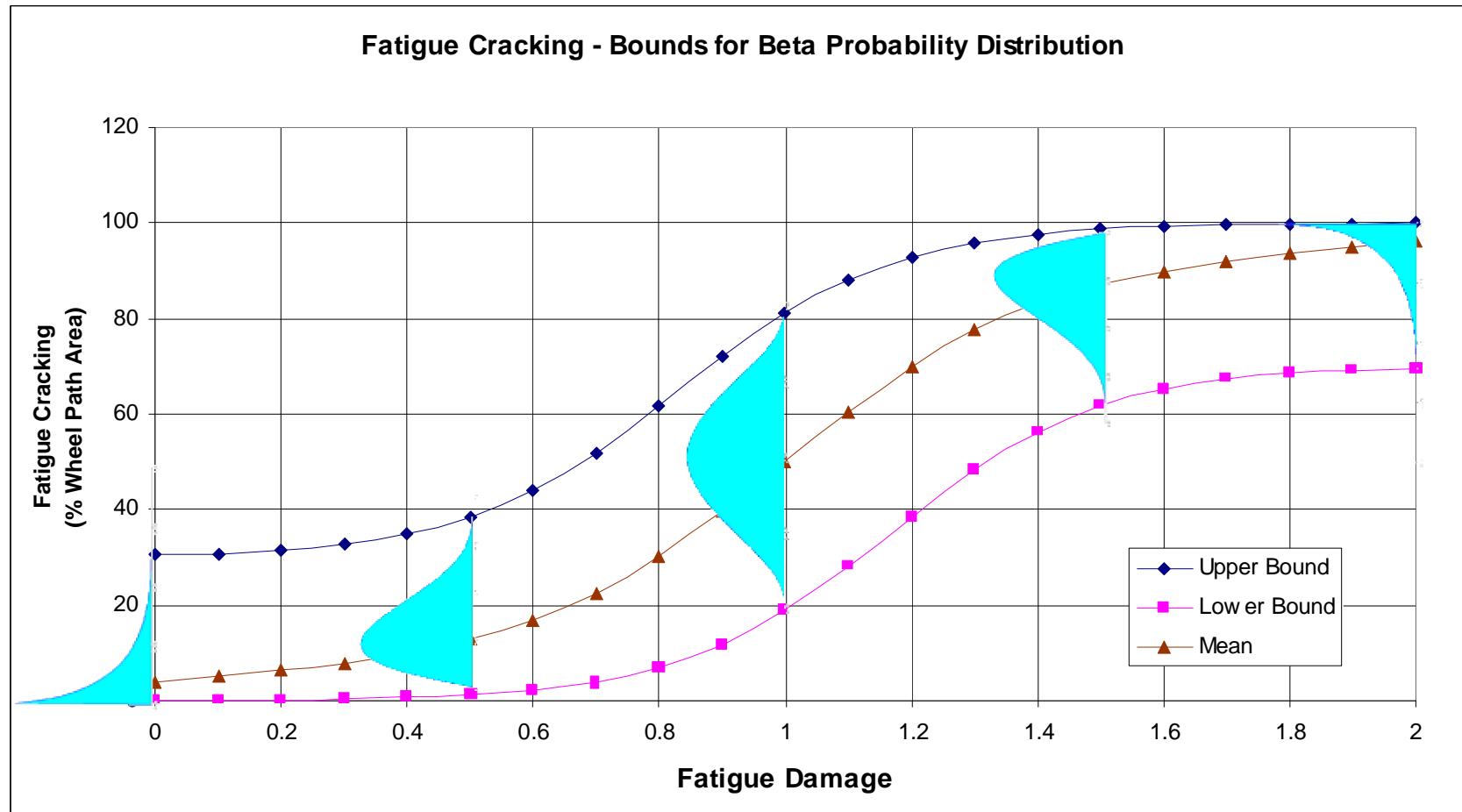
“o conjunto de dados utilizados para calibrar os modelos de previsão (a que se refere a calibração global) é, portanto, considerado abrangente e sem precedentes”



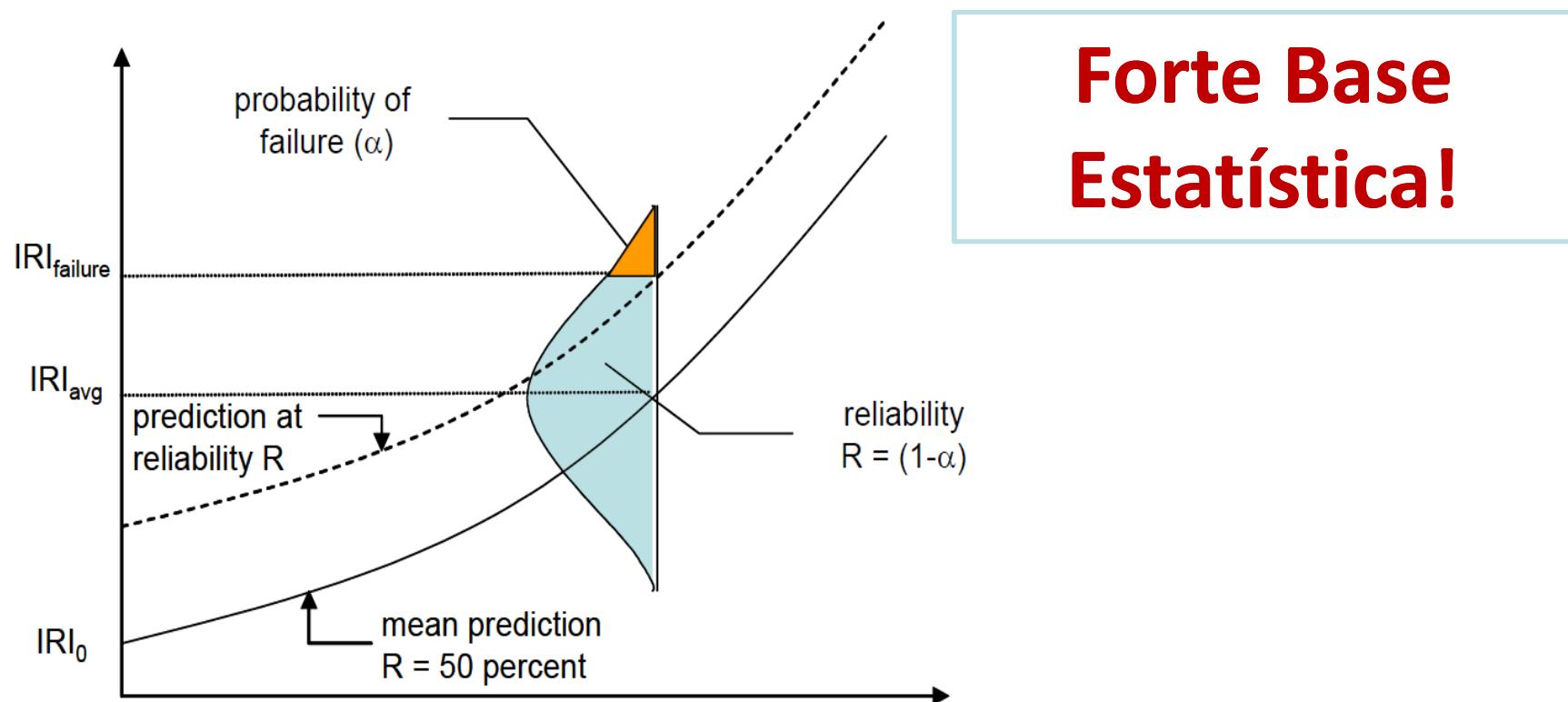
Possibilidade de calibração regional/local

Níveis de Análise e Calibração

Exemplo: trincamento por fadiga

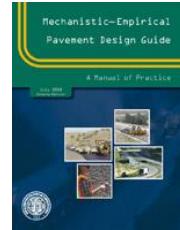


Níveis de Confiança



Classificação Funcional da Via	Nível de Confiança	
	Urbana	Rural
Interestadual/ Freeway	95	95
Arteriais Principais	90	85
Coletoras	80	75
Locais	75	70

Constituição Geral do Modelo



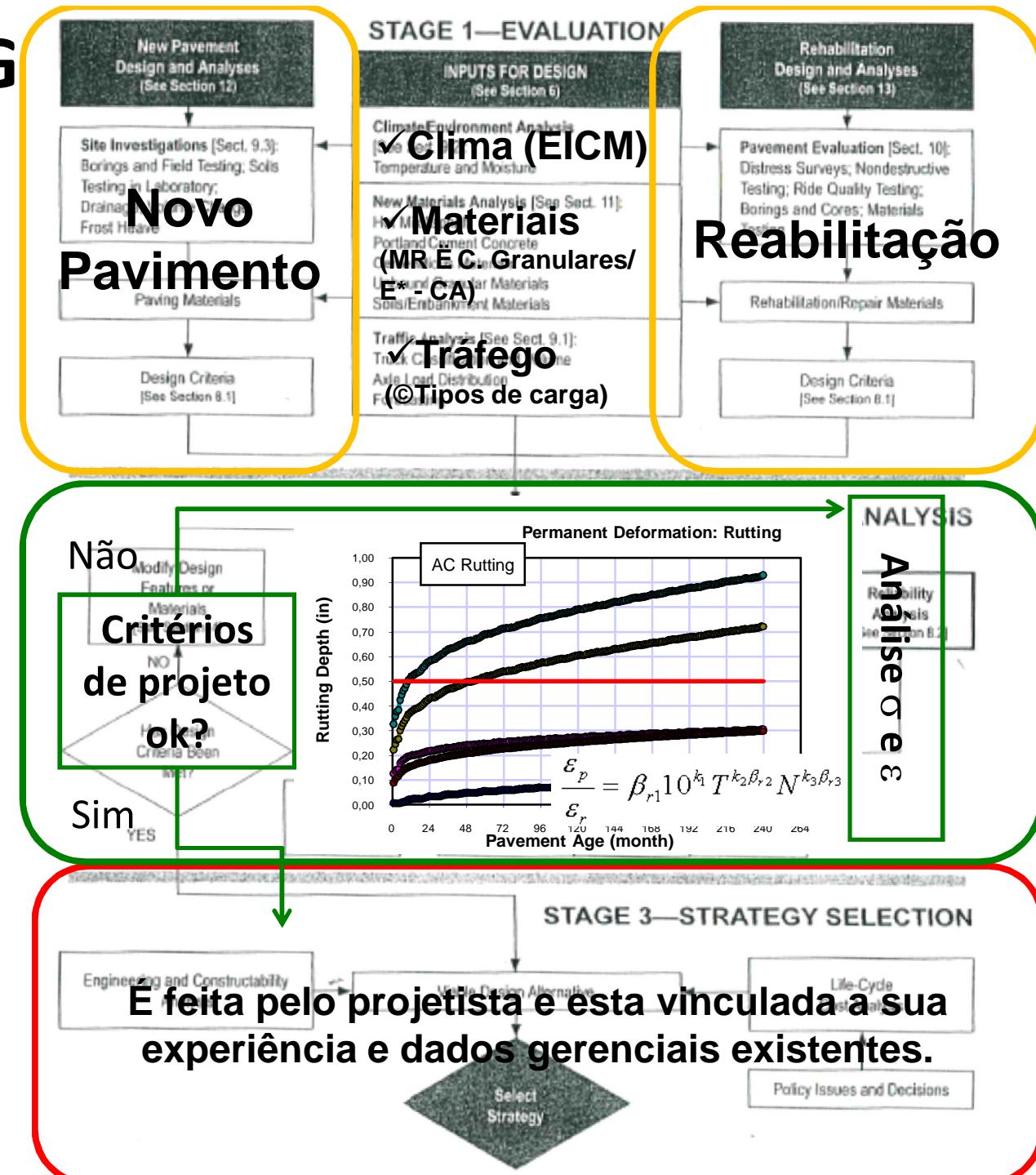
O MEPDG

INPUTS

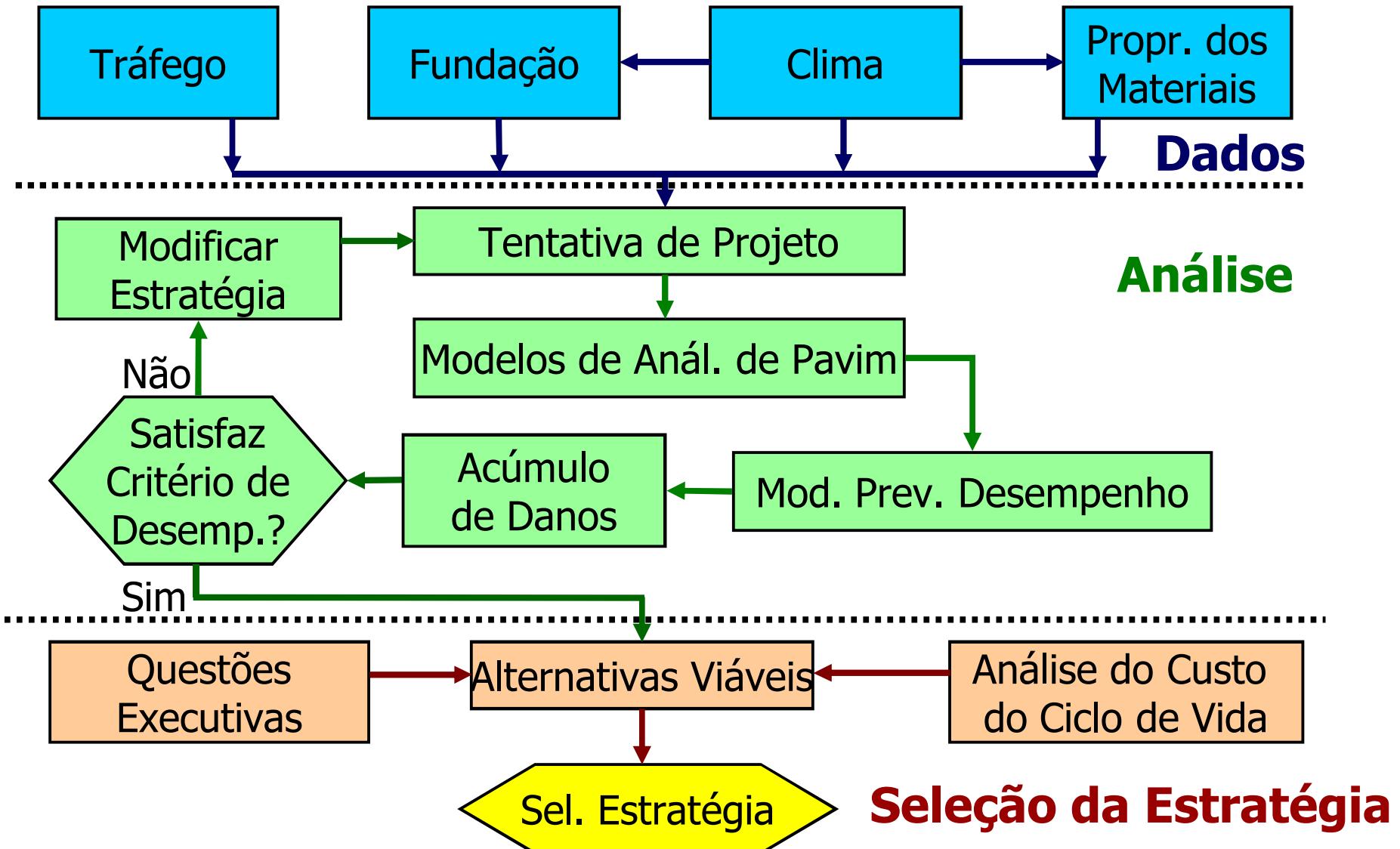
OUTPUTS

Escolha da alternativa - Esta fora do software!

Fonte: Adaptado de AASHTO (2008)



Framework de Projeto



INPUTS

Dados de Tráfego

Espectro de carga
WIN - Weighing-in-motion

Dados de Clima

EICM . *Enhanced Integrated Climatic Model*
850 Estações

Dados do Material

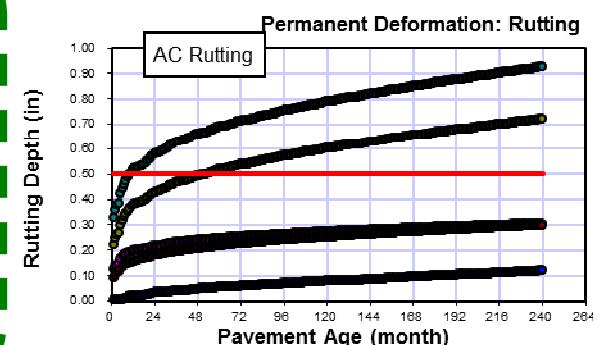
CBR (Previsão em campo)
E* - CA

Análise/ OUTPUTS

Análise

JULEA (, , e)
MEF (Pesquisa . Nível 1)

Modelos de Desempenho



INPUTS de Tráfego

<i>Dados p/ o Ano Base</i>	<i>Nível de Dados</i>		
	1	2	3
AADTT	√	√	
Dist. de Tipos de Caminhões	√	√	
Dist de Carga de Eixo por Caminhão e Tipo de Eixo	√	√	
AADT			√
% Caminhões			√
<i>Classificação de Tráfego de Caminhões</i>			√

Variações anuais, sazonais e horária !!!

INPUTS de Clima

Parâmetro	Nível 1	Nível 2	Nível 3
Dados Climát. Automáticos	Área Específica		
Localização Geográfica		Dados Climát. Virtuais	Dados Climát. Virtuais

Em todos os níveis:

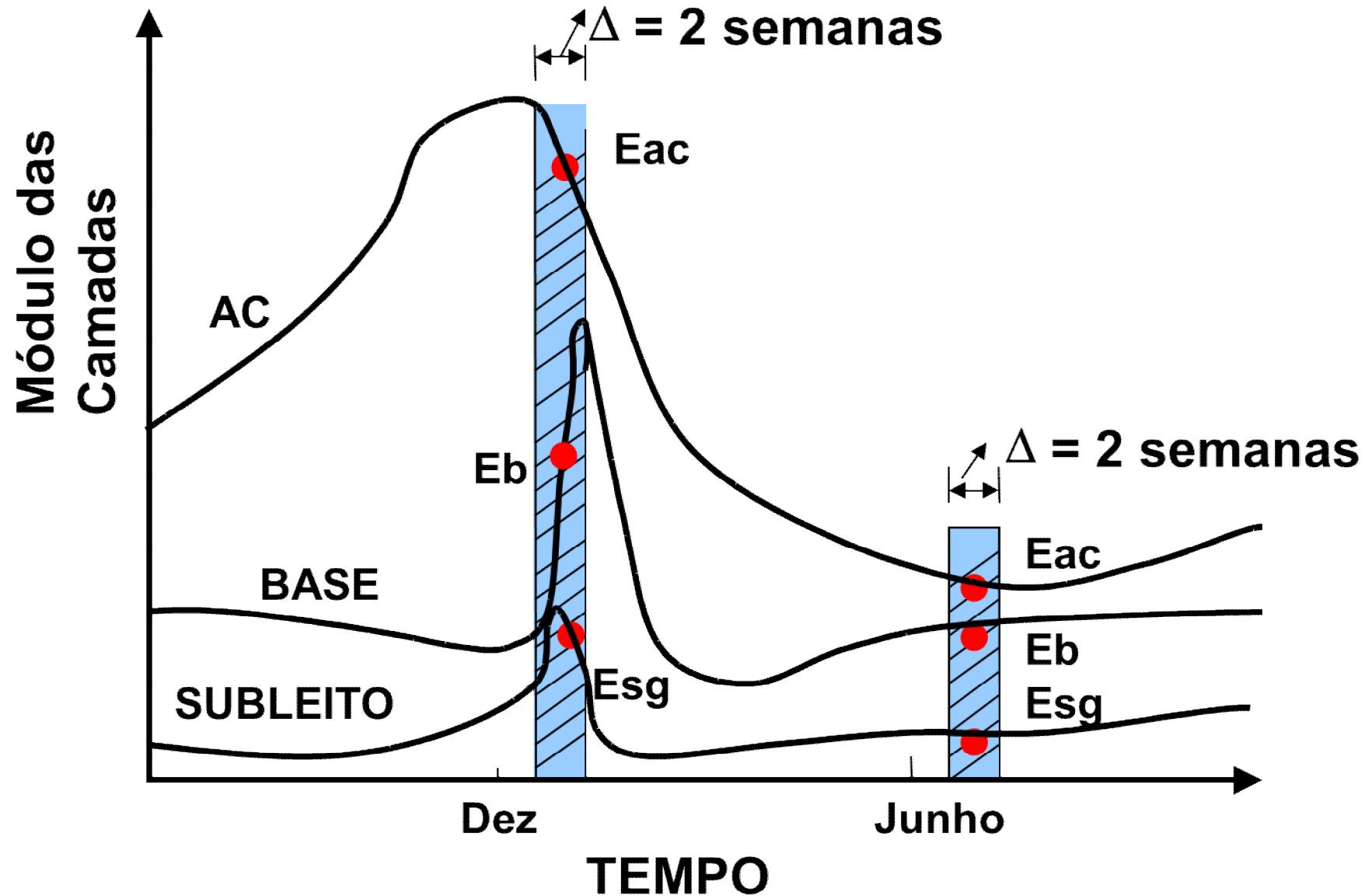
- ” Temps média diária máx., min., média mensal
- ” Precipitação média diária (chuva ou neve)
- ” Velocidade média do vento
- ” Radiação solar
- ” Cobertura de nuvens

(EICM)

Efeitos do Clima na Análise

- ” Temperatura nas propriedades da mistura asfáltica
- ” Temperatura no comportamento da camada asfáltica (trincamento térmico)
- ” Gradientes de temperatura no comportamento da placa de CCP
- ” Umidade nas propriedades das camadas não-estabilizadas
- ” Congelamento nas propriedades das camadas não-estabilizadas

Variabilidade Sazonal das Propriedades



Cálculo de Tensões e Deformações

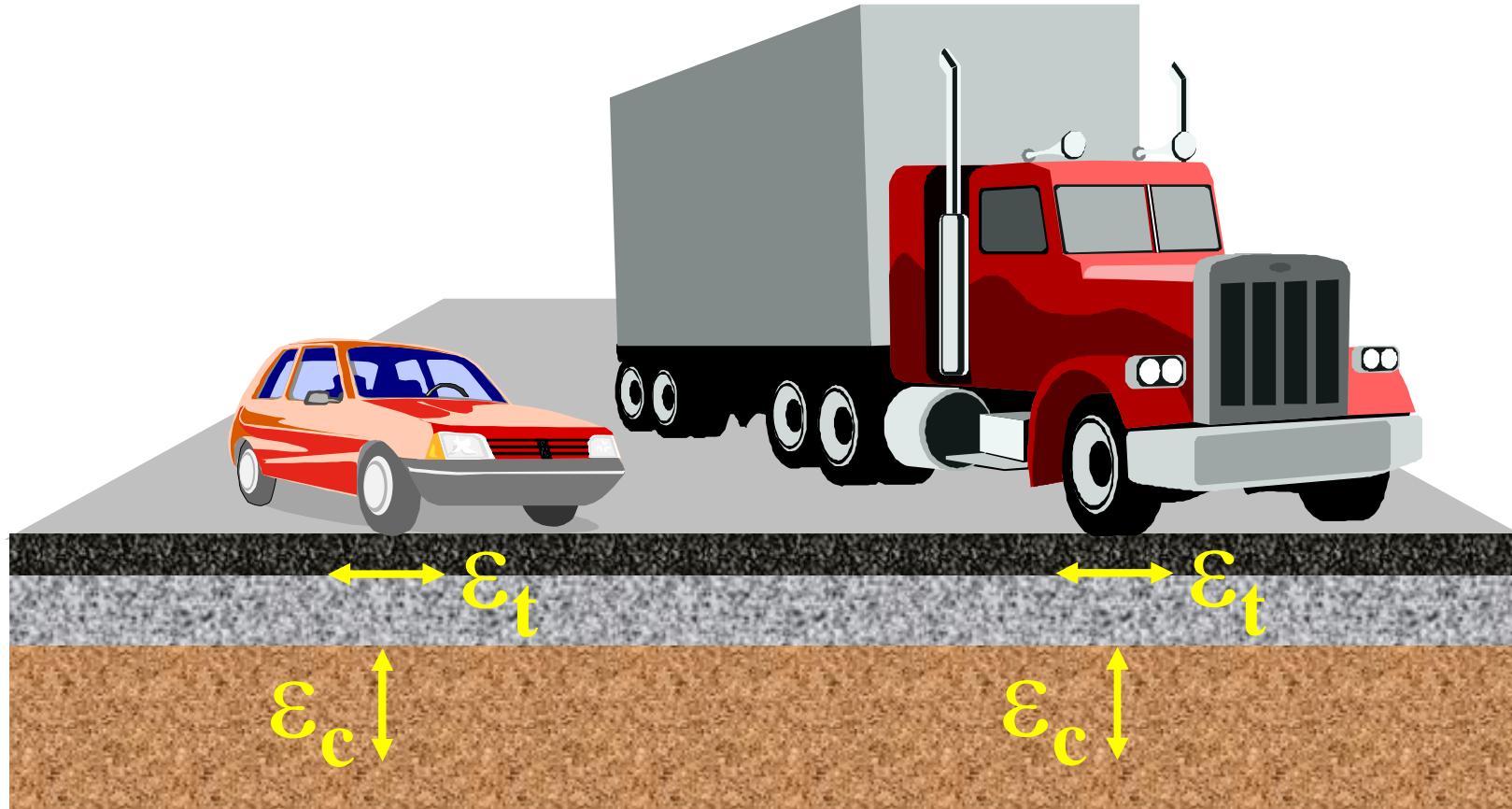
” Teoria Elástica (MLET)

- . Programa JULEA
- . Opção padrão de análise
- . Simetria c/ superposição

” Análise N-Linear por Elem. Fin. (FEM)

- . Programa DSC2D
- . Opção avançada de cálculo
- . Simetria c/ superposição

Respostas Estruturais Críticas

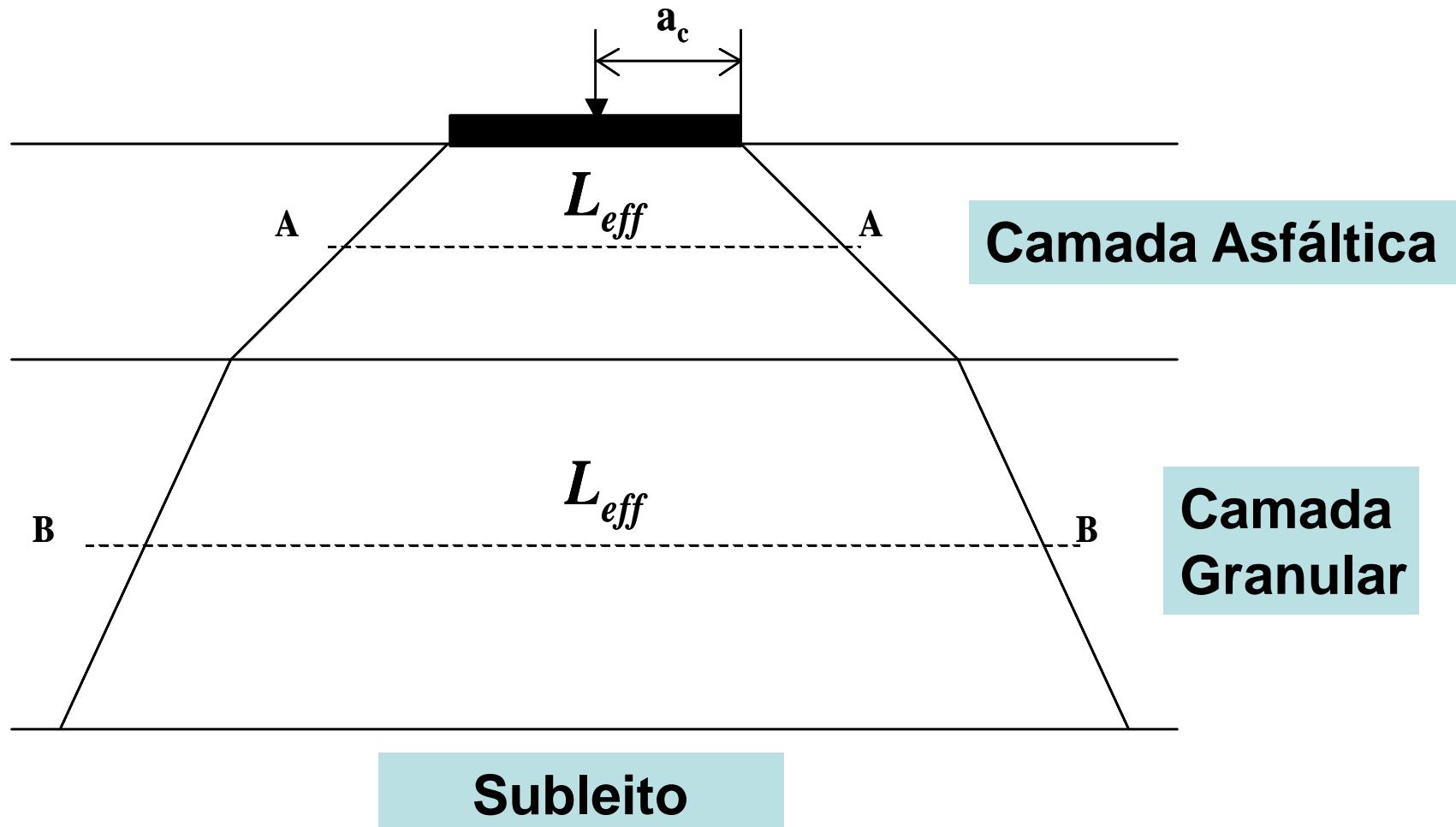


ε_t na superf. + fibra inferior de todas camadas estab. (trinc.)

ε_c no meio das sub-camadas + topo do subleito (trilha rodas)

Consideração da velocidade

Comprimento equivalente



Subleito

Barksdale & Hicks

Consideração da velocidade

Comprimento equivalente

$$t = \frac{L_{eff}}{17.6 v_s} \quad f = \frac{1}{t}$$

Onde

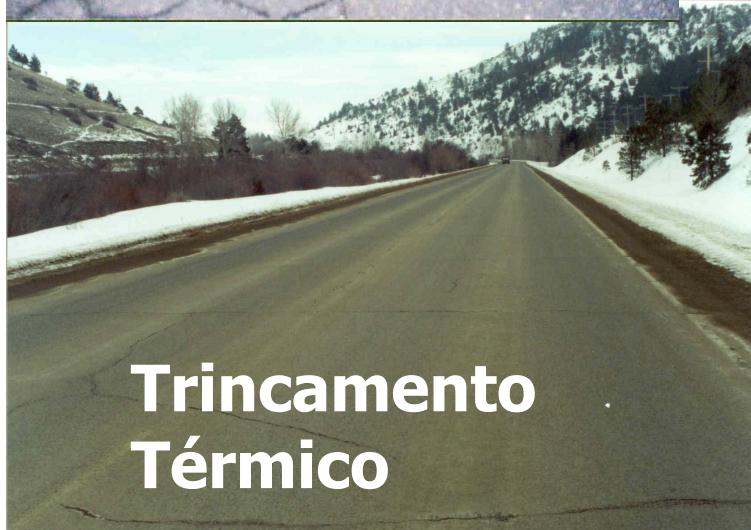
t = duração da carga (sec)

L_{eff} = comprimento efetivo (pol)

v_s = velocidade do veículo (mph)

f = freqüência (Hz)

Danos Considerados



Modelo Def. Permanente no Revestimento Asfáltico

$$\frac{\varepsilon_p}{\varepsilon_r} = \beta_{r1} 10^{k_1} T^{k_2 \beta_{r2}} N^{k_3 \beta_{r3}}$$

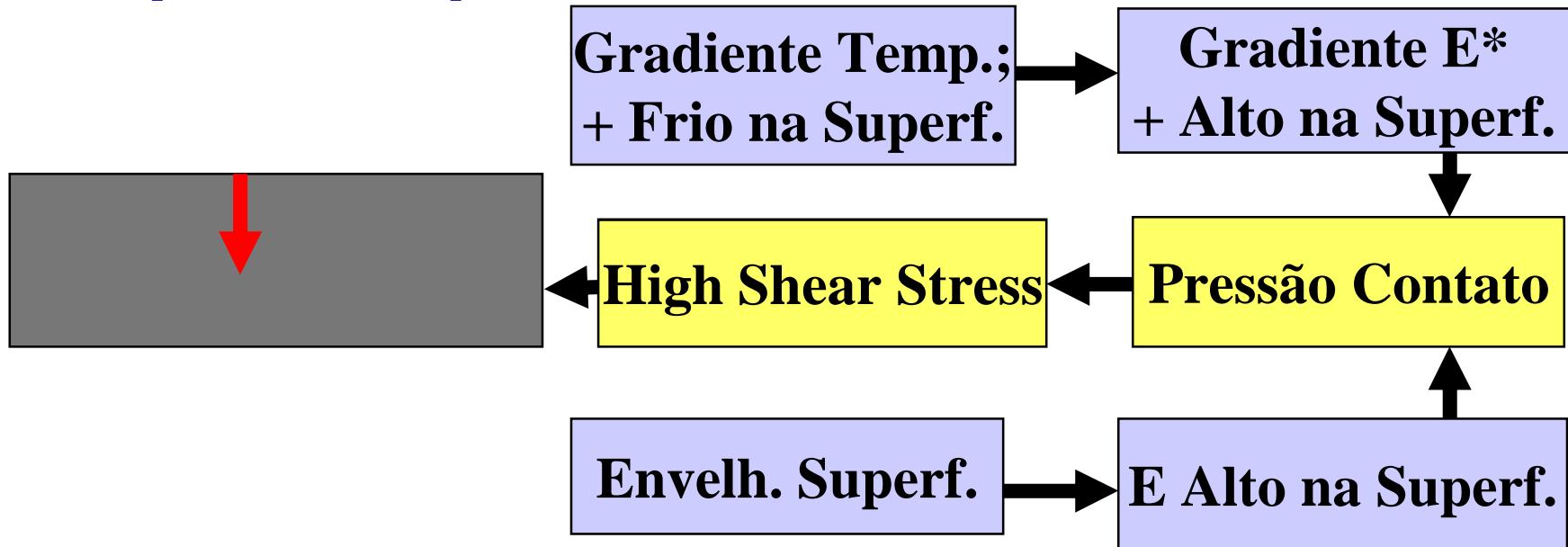
Modelo de Fadiga das Camadas Asfálticas

“Prop. Baixo p/ Cima



Mecanismo Clássico de Fadiga

“Prop. Cima p/ Baixo

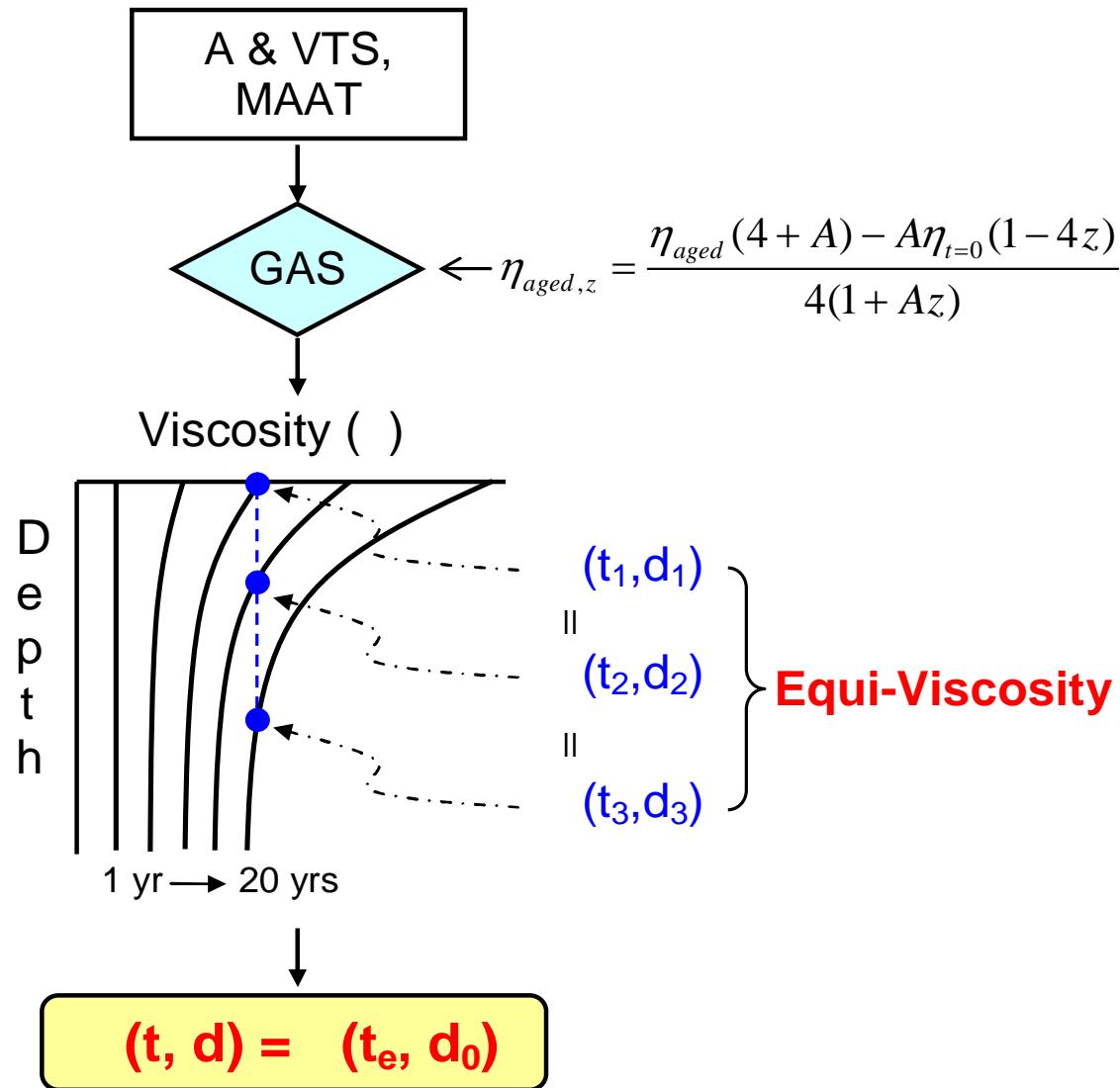


Modelo de Fadiga das Camadas Asfálticas

$$N_f = \beta_{f1} k_1 \left(\frac{1}{\varepsilon_t} \right)^{k_2 \beta_{f2}} \left(\frac{1}{E} \right)^{k_3 \beta_{f3}}$$

$\beta_{f1}; \beta_{f2}; \beta_{f3}$  Fatores de Calibração

Envelhecimento . GAS model



Outros Modelos de Dano

- ” Def. permanente materiais não estabilizados
- ” Evolução do IRI
- ” Trincamento Térmico
- ” Consideração da reflexão de trincas (reabilitação)
- ” Semi-rígidos

Acúmulo dos Danos

Trinca:

$$\Delta DI = \sum_{k=1}^m \sum_{i=1}^j \left[\frac{n_i}{N_{(\varepsilon_t)i}} \right]_k$$

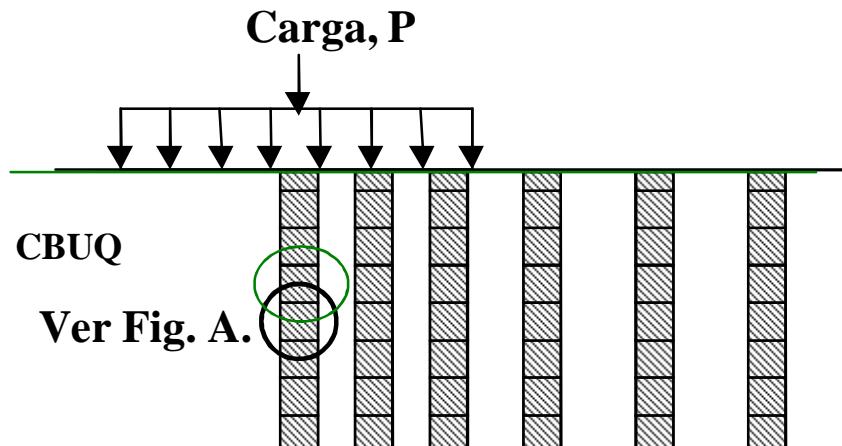
Trilha:

$$\Delta RD = \sum_{k=1}^m \sum_{i=1}^j \sum_{d=1}^l [\varepsilon_{P(d)}(h_d)]_{k,i}$$

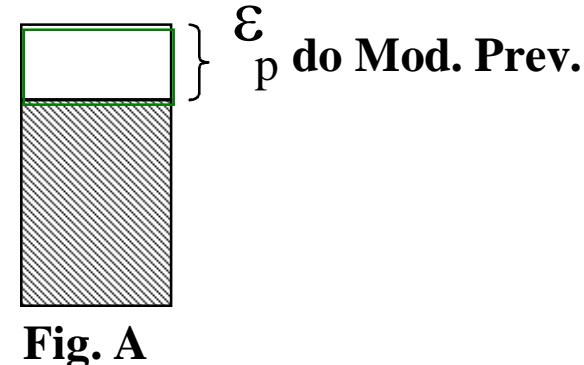
k = nível carga
i = tempo/periodo
d = sub-camada

Acúmulo dos Danos

Deformação Permanente



Sub-camada



Base

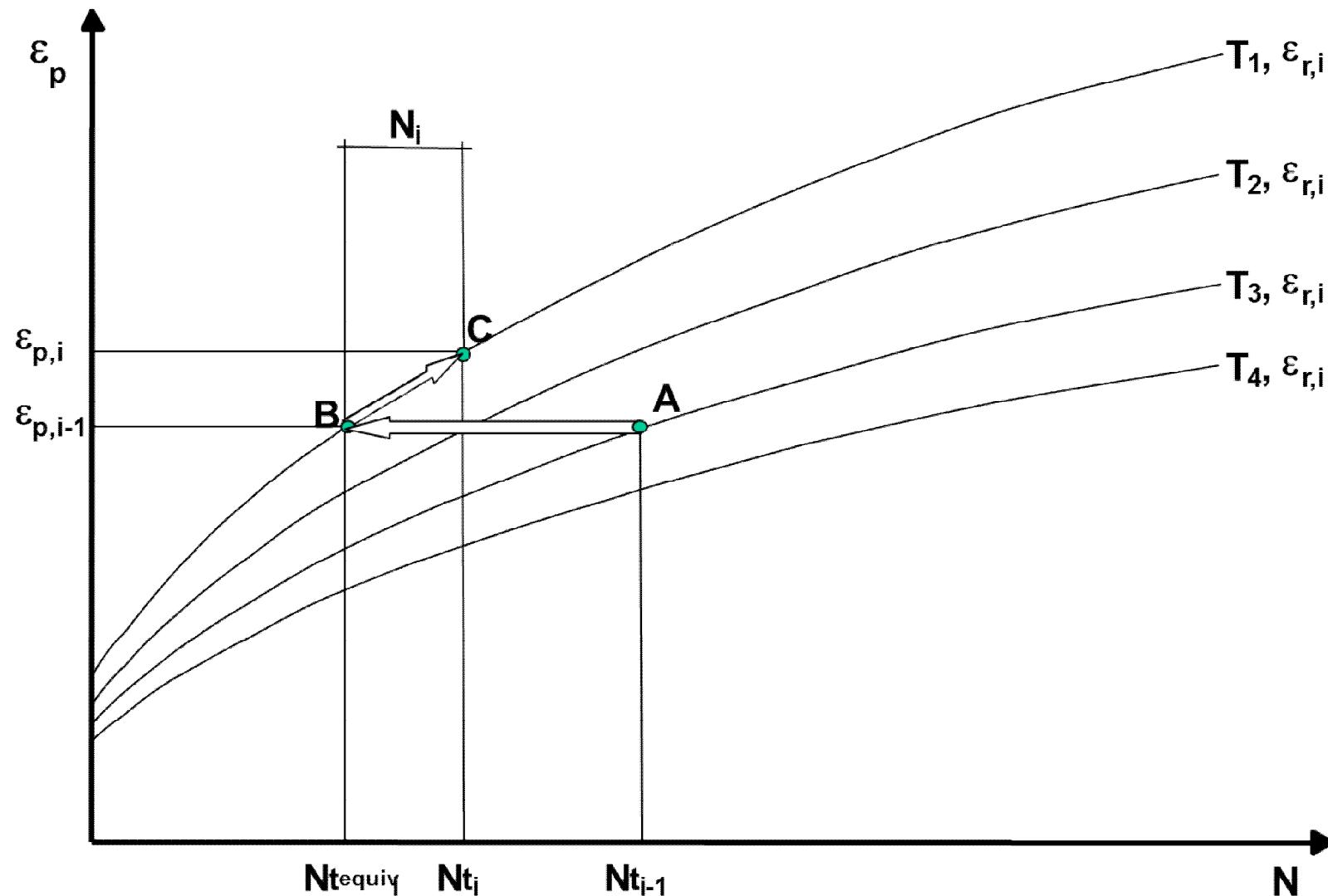
Subleito

$$PD = \sum_{i=1}^{N \text{ sub-camadas}} \varepsilon_p^i \cdot h^i$$

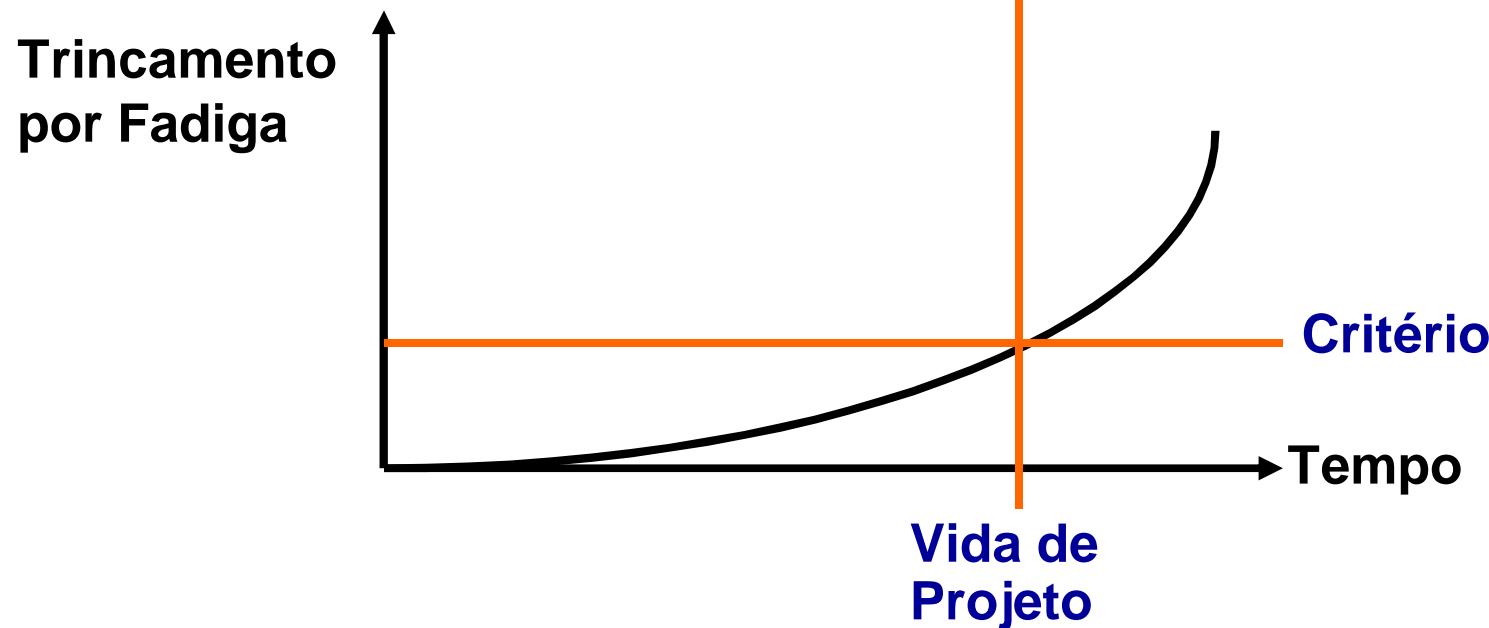
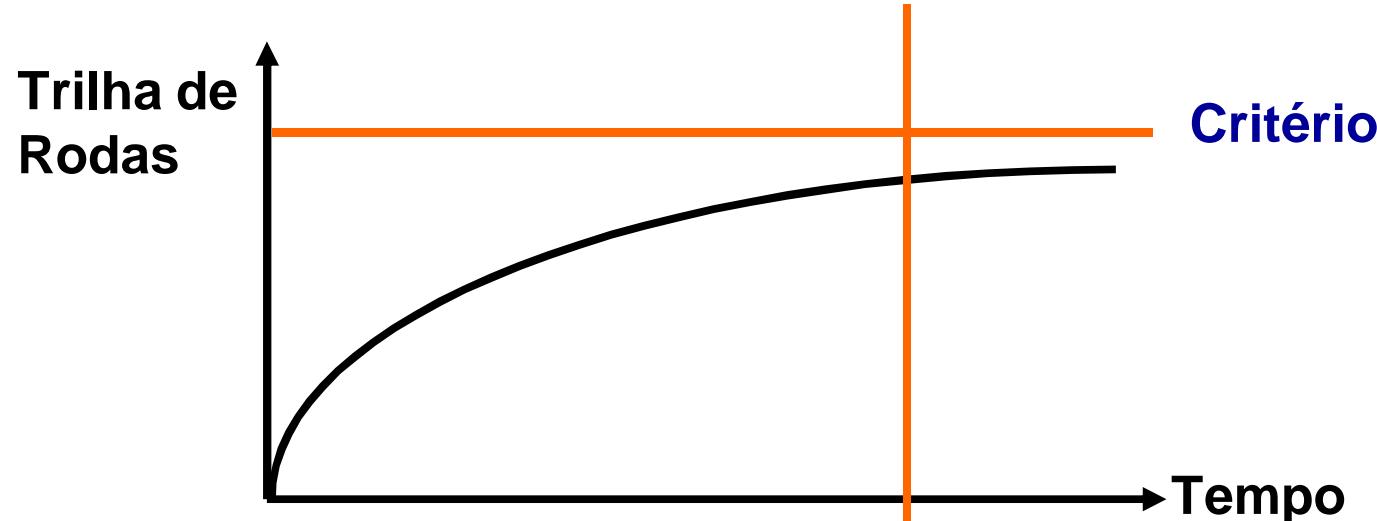
Trat. similar p/ deform. permanente de camadas não-estabilizadas

Acúmulo dos Danos

Deformação Permanente - Hardening

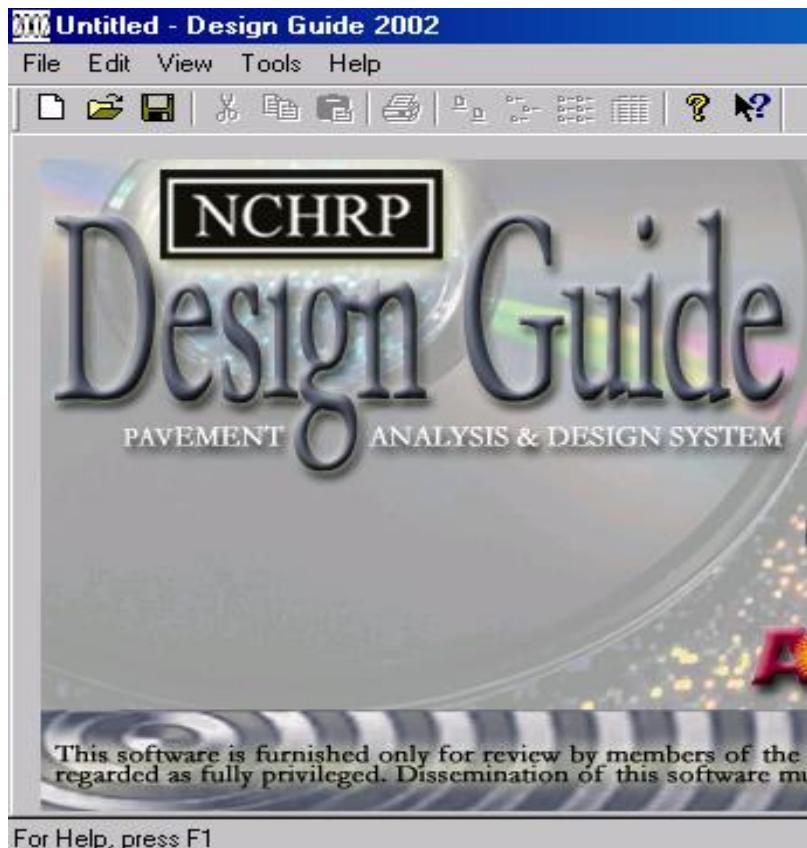


Critérios de Projeto



O Software

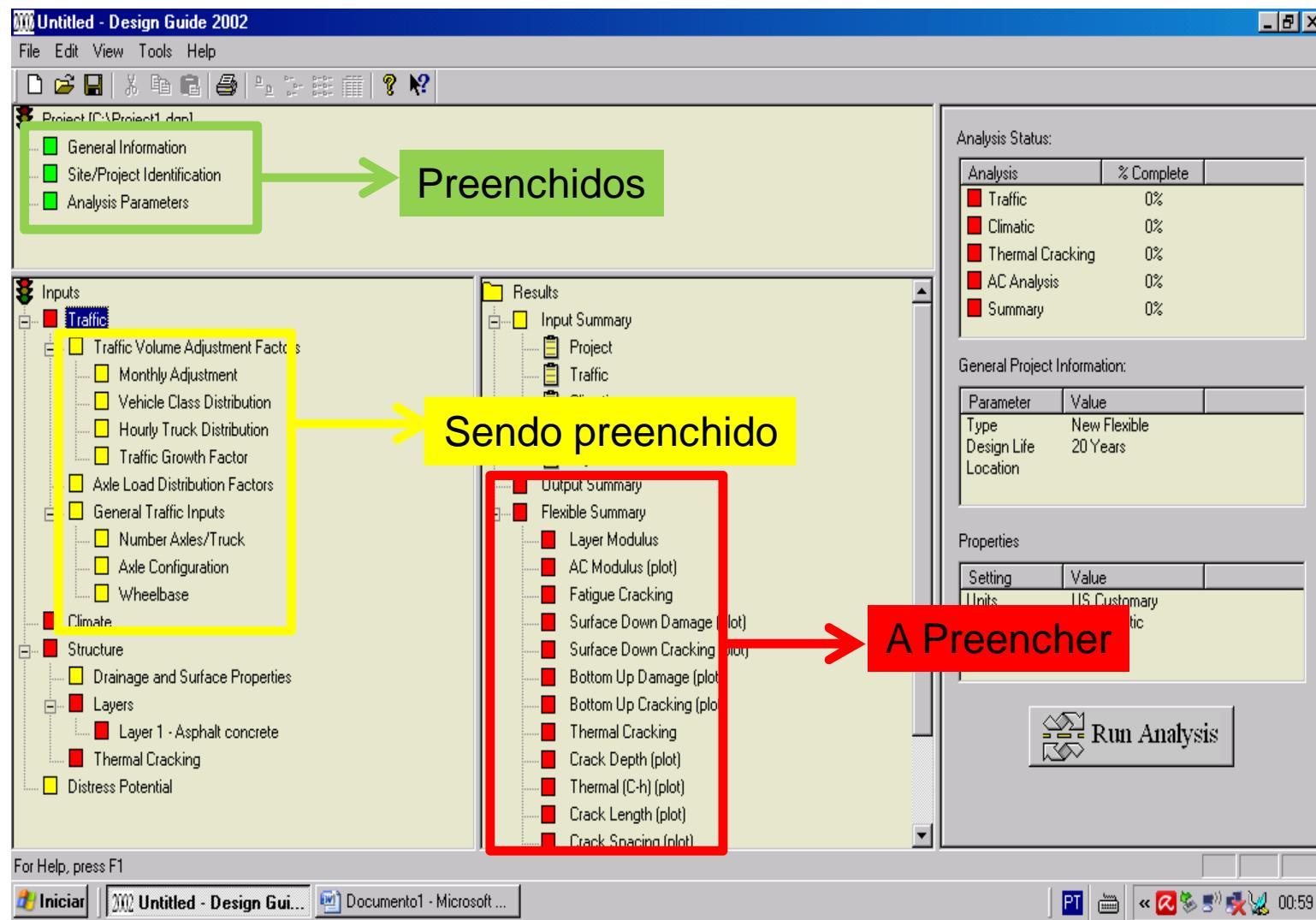
Versão 2002



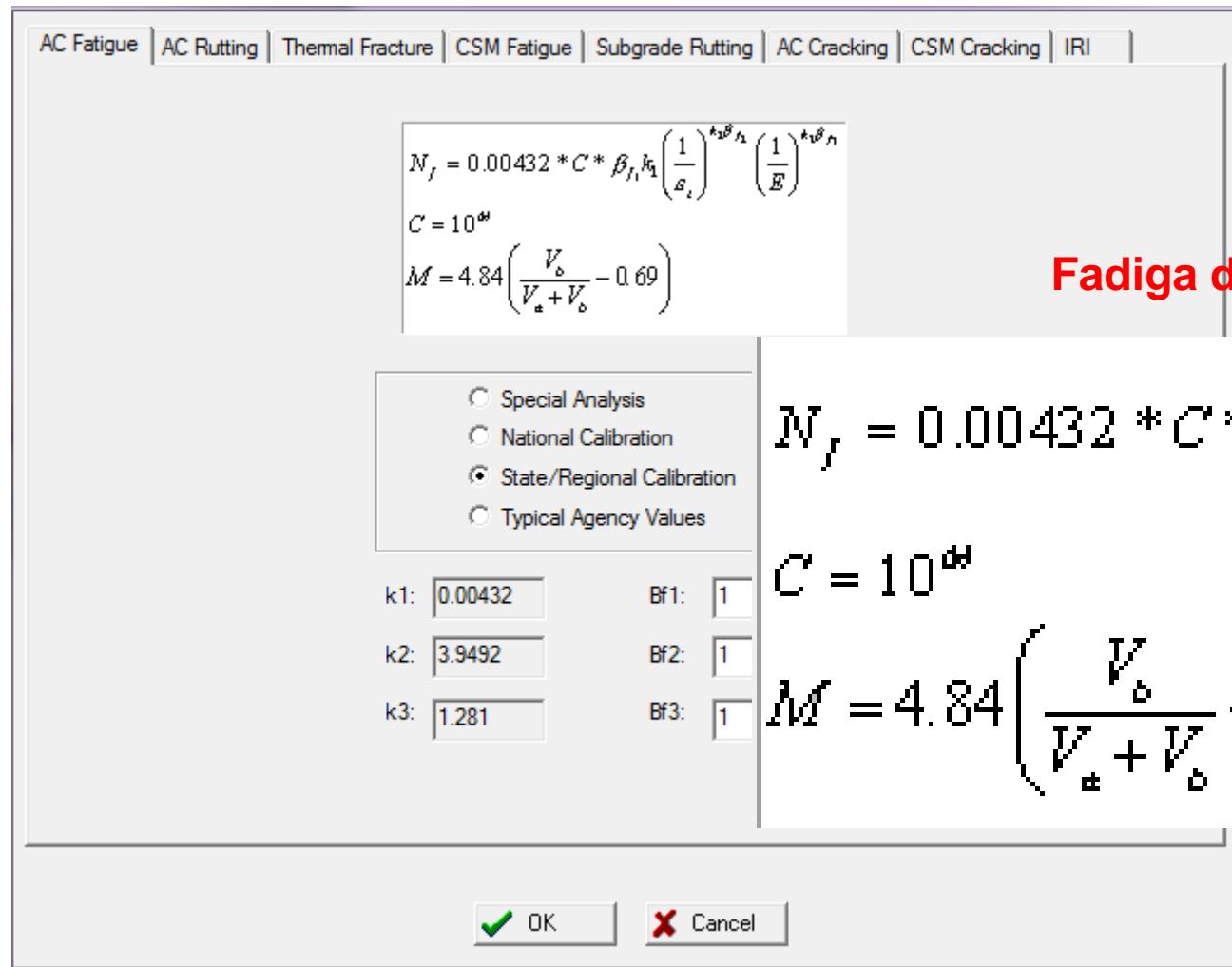
Versão Atual



O Software



Os Modelos de Desempenho



Fadiga do Concreto Asfáltico

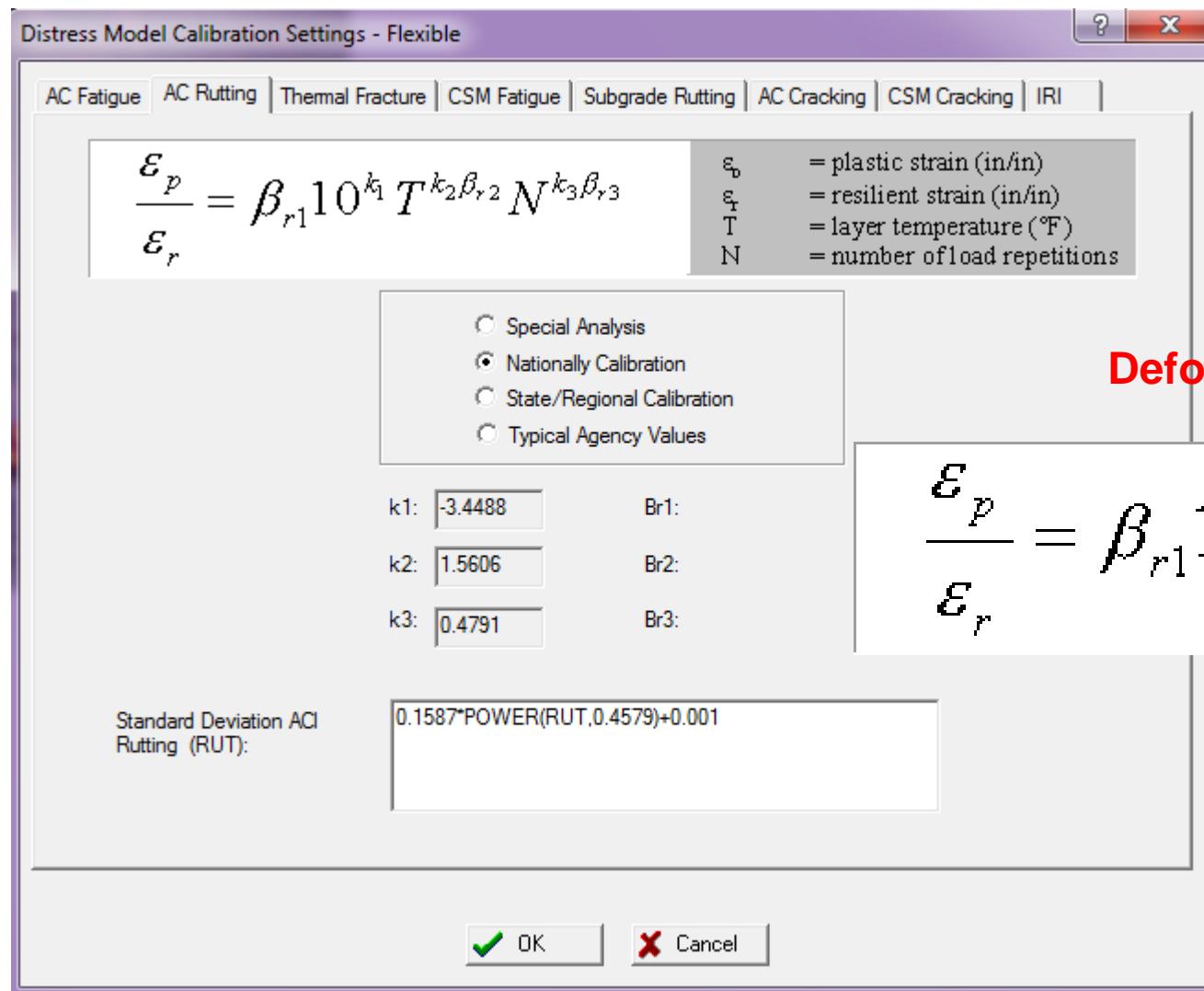
$$N_f = 0.00432 * C * \beta_{f1} k_1 \left(\frac{1}{S_i} \right)^{k_2 \beta_{f1}} \left(\frac{1}{E} \right)^{k_3 \beta_{f1}}$$

$$C = 10^{44}$$

$$M = 4.84 \left(\frac{V_b}{V_a + V_b} - 0.69 \right)$$

Esses modelos diferem dos inclusos no Manual de 2008.

Os Modelos de Desempenho



Deformação Permanente

$$\frac{\epsilon_p}{\epsilon_r} = \beta_{r1} 10^{k_1} T^{k_2 \beta_{r2}} N^{k_3 \beta_{r3}}$$

Esses modelos diferem
dos inclusos no Manual
de 2008.

Passos do Dimensionamento

Pavimento Flexível

Untitled - Design Guide 2002

File Edit View Tools Help

Dados Gerais do Projeto

Analysis Status:

Analysis	% Complete
Traffic	0%
Climatic	0%
Thermal Cracking	0%
AC Analysis	0%
Summary	0%

Status da Análise

Parameter	Value
Type	New Flexible
Design Life	20 Years
Location	

Properties

Setting	Value
Units	US Customary
Analysis Type	Probabilistic
Default Input	Level 3

Run Analysis

Inputs

- Traffic
 - Traffic Volume Adjustment Factors
 - Monthly Adjustment
 - Vehicle Class Distribution
 - Hourly Truck Distribution
 - Traffic Growth Factor
 - Axle Load Distribution Factors
 - General Traffic Inputs
 - Number Axles/Truck
 - Axle Configuration
 - Wheelbase
- Climate
- Structure
 - Drainage and Surface Properties
 - Layers
 - Layer 1 - Asphalt concrete
 - Thermal Cracking

Dados de Entrada

Results

- Input Summary
 - Project
 - Traffic
 - Climatic
 - Design
 - Layer
- Output Summary
- Flexible Summary
 - Layer Modulus
 - AC Modulus (plot)
 - Fatigue Cracking
 - Surface Down Damage (plot)
 - Surface Down Cracking (plot)
 - Bottom Up Damage (plot)
 - Bottom Up Cracking (plot)
 - Thermal Cracking
 - Crack Depth (plot)
 - Thermal (C, k) (plot)

Dados de Saída - Excel

For Help, press F1

Iniciar Untitled - Design Gui... Document1 - Microsoft ... PT 00:59

Pavimento Flexível

AC Conventional Example - teste - Design Guide 2002

File Edit View Tools Help

General Information

Project Name: AC Conventional Example - teste

Description:

Design Life (years): 20

Base/Subgrade Construction Month: August Year: 2003

Pavement Construction Month: September Year: 2003

Traffic open month: October Year: 2003

Informações Gerais

Type of Design

New Pavement

Flexible Pavement Jointed Plain Concrete Pavement (JPCP) Continuously Reinforced Concrete Pavement (CRCP)

Restoration

Jointed Plain Concrete Pavement (JPCP)

Overlay

Asphalt Concrete Overlay PCC Overlay

OK Cancel

Project [C:\DG2002\Projects\AC Conv

- General Information
- Site/Project Identification
- Analysis Parameters
- Traffic Volume Adjustment Factors
 - Monthly Adjustment
 - Vehicle Class Distribution
 - Hourly Truck Distribution
 - Traffic Growth Factor
 - Axle Load Distribution Factors
 - General Traffic Inputs
 - Number Axles/Truck
 - Axle Configuration
 - Wheelbase
- Climate
- Structure
 - Drainage and Surface Properties
 - Layers
 - Layer 1 - Asphalt concrete
 - Layer 2 - A-1-a
 - Layer 3 - A-2-5
 - Layer 4 - A-7-6
 - Thermal Cracking
 - Distress Potential

Information:

Value

New Flexible
20 Years
C:\DG2002\Proje...

Value

US Customary
Probabilistic
Level 3

Run Analysis

For Help, press F1

Iniciar AC Conventional Example... AC_on_AC [Modo de Co... 2002 AC Conventional Exa... 0 MEPDG 2002- Figuras... PT 03:50

Pavimento Flexível

AC Conventional Example - teste - Design Guide 2002

File Edit View Tools Help

Project [C:\DG2002\Projects\AC Conventional Example - teste]

- General Information
- Site/Project Identification
- Analysis Parameters

Inputs

- Traffic
 - Traffic Volume Adjustment Factors
 - Monthly Adjustment
 - Vehicle Class Distribution
 - Hourly Truck Distribution
 - Traffic Growth Factor
 - Axle Load Distribution Factors
 - General Traffic Inputs
 - Number Axles/Truck
 - Axle Configuration
 - Wheelbase
- Climate
- Structure
 - Drainage and Surface Properties
 - Layers
 - Layer 1 - Asphalt concrete
 - Layer 2 - A-1-a
 - Layer 3 - A-2-5
 - Layer 4 - A-7-6
 - Thermal Cracking

Analysis Parameters

Project Name: AC Conventional Example - test

Initial IRI (in/mi): 63

Performance Criteria

Rigid Pavement Flexible Pavement

Critérios de projeto

	Limit	Reliability
<input checked="" type="checkbox"/> Terminal IRI (in/mile)	179.5	95
<input checked="" type="checkbox"/> AC Surface Down Cracking Long. Cracking (ft/mi)	5000	95
<input checked="" type="checkbox"/> AC Bottom Up Cracking Alligator Cracking (%)	25	95
<input checked="" type="checkbox"/> AC Thermal Fracture (ft/mi)	1000	95
<input checked="" type="checkbox"/> Chemically Stabilized Layer Fatigue Fracture(%)	25	95
<input checked="" type="checkbox"/> Permanent Deformation - Total Pavement (in)	0.50	95
<input checked="" type="checkbox"/> Permanent Deformation - AC Only (in)	0.20	95

OK Cancel

Crack Spacing (ft/ft)

Project Information:

- Value: New Flexible Pavement, 20 Years, C:\DG2002\Projects\AC Conventional Example - teste
- Value: US Customary, Probabilistic, Level 3

Run Analysis

For Help, press F1

Iniciar AC Conventional Example... AC_on_AC [Modo de Co... AC Conventional Example... O MEPDG 2002- Figuras... PT 03:50

Pavimento Flexível

Dados de Tráfego!!!

Design Life (years):	20	...
Opening Date:	October, 2003	
Initial two-way AADTT:	1500	...
Number of lanes in design direction:	2	
Percent of trucks in design direction (%):	50.0	
Percent of trucks in design lane (%):	90.0	
Operational speed (mph):	60	
<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 10px;"> Traffic Volume Adjustment: <input style="border: 1px solid black; padding: 2px 10px; margin-right: 10px;" type="button" value="Edit"/> Axle load distribution factor: <input style="border: 1px solid black; padding: 2px 10px; margin-right: 10px;" type="button" value="Edit"/> General Traffic Inputs <input style="border: 1px solid black; padding: 2px 10px;" type="button" value="Edit"/> </div>		
Traffic Growth	Compound, 4%	...
<input checked="" style="border: 1px solid black; padding: 5px 20px; margin-right: 20px;" type="button" value="OK"/> <input style="border: 1px solid black; padding: 5px 20px;" type="button" value="Cancel"/>		

Pavimento Flexível

Dados de Tráfego!!!

Axle Load Distribution Factors

Axle Load Distribution

- Level 1: Site Specific
- Level 2: Regional
- Level 3: Default

View

- Cumulative Distribution
- Distribution

Axle Types

- Single Axle
- Tandem Axle
- Tridem Axle
- Quad Axle

Axle Factors by Axle Type

	Season	Veh. Class	Total	3000	4000	5000	6000	700
	January	4	100.00	1.8	0.96	2.91	3.99	6.8
	January	5	100.00	10.05	13.21	16.42	10.61	9.22
	January	6	100.00	2.47	1.78	3.45	3.95	6.7
	January	7	100.00	2.14	0.55	2.42	2.7	3.21
	January	8	100.00	11.65	5.37	7.84	6.99	7.99
	January	9	100.00	1.74	1.37	2.84	3.53	4.93
	January	10	100.00	3.64	1.24	2.36	3.38	5.18
	January	11	100.00	3.55	2.91	5.19	5.27	6.32
	January	12	100.00	6.68	2.29	4.87	5.86	5.97
	January	13	100.00	8.88	2.67	3.81	5.23	6.03
	Estimated	4	100.00	4.0	0.00	0.04	0.00	0.0

OK Cancel

Pavimento Flexível

Dados de Tráfego!!!

General Traffic Inputs

Lateral Traffic Wander

Mean wheel location (inches from the lane marking):

Traffic wander standard deviation (in):

Design lane width (ft): (Note: This is not slab width)

Number Axles/Truck Axle Configuration

	Single
Class 4	1.62
Class 5	2
Class 6	1.02
Class 7	1
Class 8	2.38
Class 9	1.13
Class 10	1.19
Class 11	4.29
Class 12	3.52
Class 13	2.15

Axle Configuration

Average axle width (edge-to-edge outside dimensions,ft):

Dual tire spacing (in):

Tire Pressure (psi):

Single Tire :

Dual Tire :

Wheelbase

Wheelbase distribution information for JPCP top-down cracking. The wheelbase refers to the spacing between the steering and the first device axle of the truck-tractors or heavy single units.

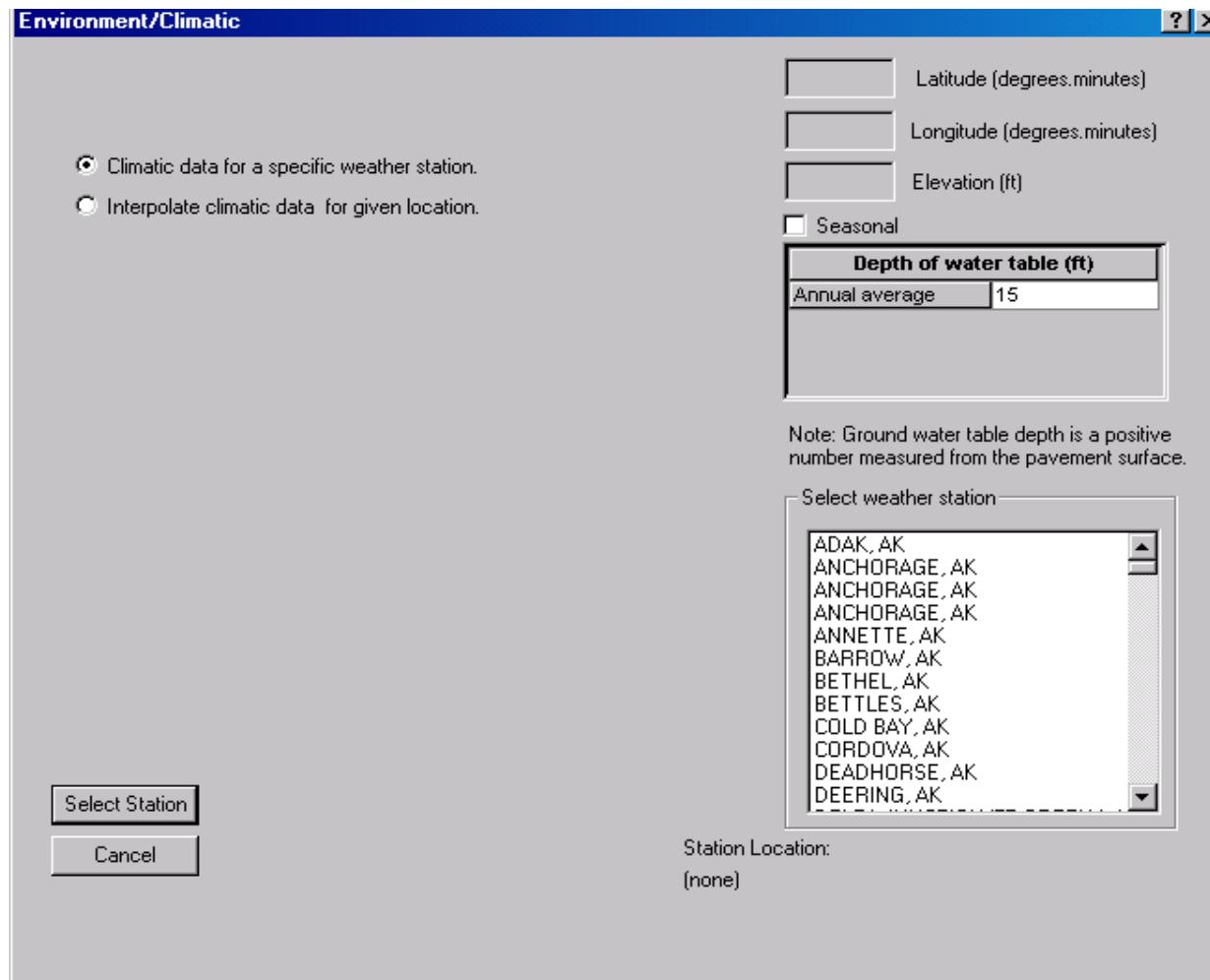
	Short	Medium	Long
Average Axle Spacing (ft)	<input type="text" value="12"/>	<input type="text" value="15"/>	<input type="text" value="18"/>
Percent of trucks (%):	<input type="text" value="33.0"/>	<input type="text" value="33.0"/>	<input type="text" value="34.0"/>

OK

OK Cancel

Pavimento Flexível

Dados de Clima!



Pavimento Flexível

Estrutura É Camada de Revestimento!

Structure

Layers

Layer	Type	Material	Thickness (in)	Interface
1	Asphalt	Asphalt concrete	10.0	1
2	Granular Base	A-1-a	0.0	1
3	Granular Base	Asphalt Material Properties	10.0	1
4	Subgrade			

Asphalt Material Properties

Asphalt material type: Asphalt concrete

Level: 3

Asphalt Mix | Asphalt Binder

Aggregate Gradation

Cumulative %

Cumulative %

Cumulative %

% Passing #2

Options

Superpave binder grading

Conventional viscosity grade

Conventional penetration grade

High Temp (°C)	Low Temp (°C)				
	-10	-16	-22	-28	-34
46					
52					
58					
64					
70					
76					
82					

A: 9.4610 VTS: -3.1340

OK Cancel

Asphalt Material Properties

Asphalt material type: Asphalt concrete

Level: 3

Asphalt Mix | Asphalt Binder

Layer thickness (in): 10

Asphalt Material Properties

Asphalt material type: Asphalt concrete

Level: 3

Asphalt Mix | Asphalt Binder

Layer thickness (in): 10

General

Reference temperature (F): 70

Poisson's Ratio

Use predictive model to calculate Poisson's ratio:

Poisson's ratio: 0.35

Volumetric Properties as Built

Effective binder content (%): 12

Air voids (%): 6

Total unit weight (pcf): 143

Parameter a:

Parameter b:

Thermal Properties

Thermal conductivity asphalt (BTU/hr-ft-F): 0.67

Heat capacity asphalt (BTU/lb-F): 0.23

OK Cancel

Pavimento Flexível

Estrutura È Camada Granular!

Structure

Layers

Layer	Type	Material	Thickness (in)	Interface
1	Asphalt	Asphalt concrete	10.0	1
2	Granular Base	A-1-a	6.0	1
3	Granular Base	A-2.5	9.0	1
4	Subgrade	A-7-6	Semi-infinite	n/a

Unbound Layer - Layer #4

Unbound Material: A-7-6 Thickness(in): Last layer

Strength Properties ICM

Input Level

Level 1:
 Level 2:
 Level 3:

Poisson's ratio: 0.35
Coefficient of lateral pressure, K_0 : 0.5

Analysis Type

ICM Calculated Modulus
 ICM Inputs
 User Input Modulus
 Seasonal input (design value)
 Representative value (design v.)

Material Property

Modulus (psi)
 CBR
 R - Value
 Layer Coefficient - a_l
 Penetration (DCP)
 Based upon PI and Gradation

View Equation

Unbound Layer - Layer #4

Unbound Material: A-7-6 Thickness(in): Last layer

Strength Properties ICM

Gradation and Plasticity Index

Plasticity Index, PI: 40
Passing #200 sieve (%): 90
Passing #4 sieve (%): 99
D60 (mm): 0.01

Compacted unbound material
 Uncompacted/natural unbound material

Calculated/Derived Parameters

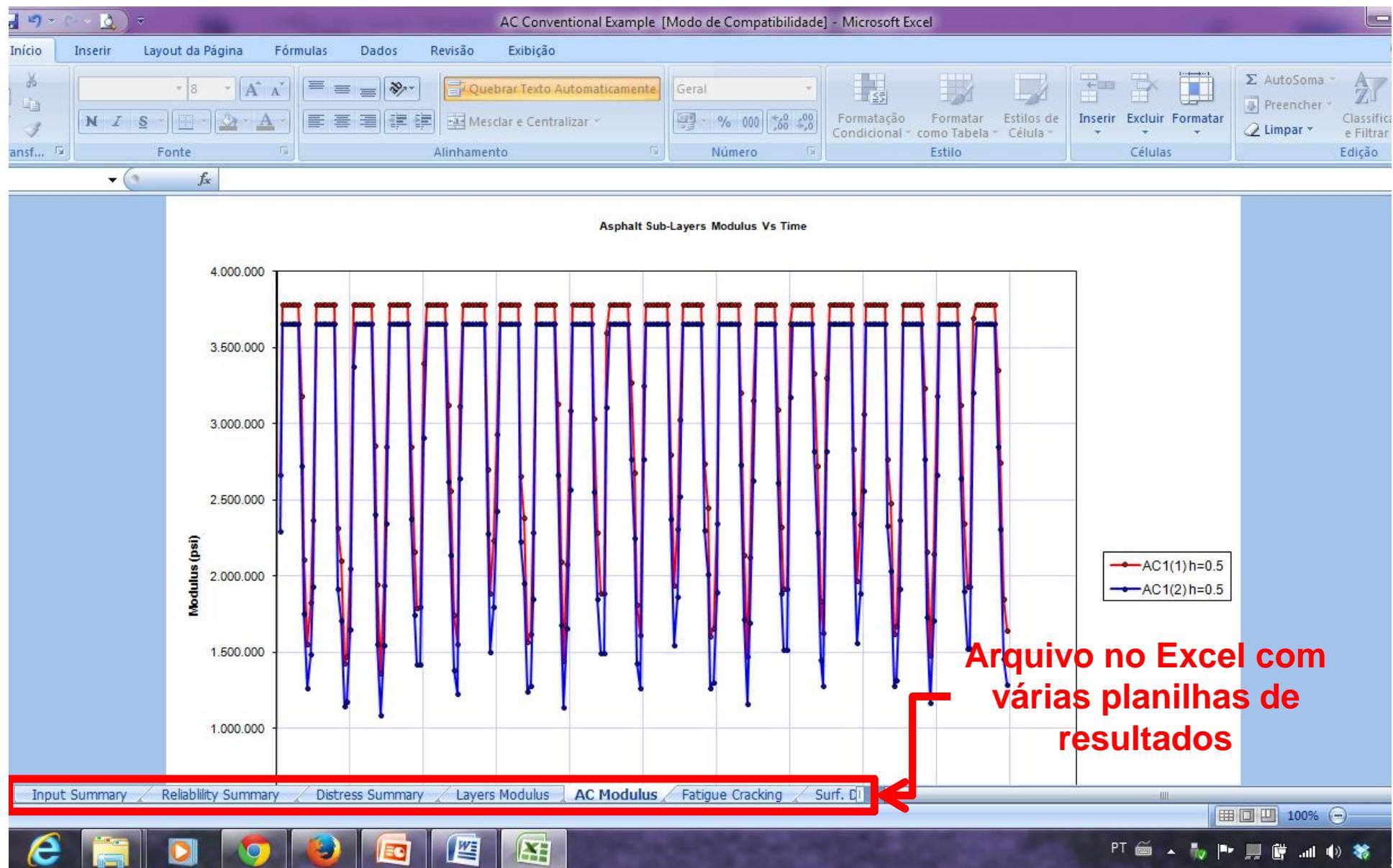
Maximum dry unit weight (pcf): 82.2
 Specific gravity of solids, G_s : 2.77
 Saturated hydraulic conductivity (ft/hr): 4.86e-008
 Optimum gravimetric water content (%): 28.8
 Calculated degree of saturation (%): 89.4

Soil water characteristic curve parameters

Parameter	Value
a_f	750
b_f	0.911
c_f	0.772
h_r	4.75e+004

Resultados

Os resultados



Os resultados

Planilha: Resumo dos desgastes

Predicted distress: Project AC Conventional Example.dgp

Pavement age		Month	Logitudinal Cracking (ft/mi)	Alligator Cracking (%)	Transverse Cracking (ft/mi)	Subtotal AC Rutting (in)	Total Rutting (in)	IRI (in/mi)	Heavy Trucks (cumulative)	IRI at Reliability (in/mi)
mo	yr									
1	0,08	October	7010	0	0	0,006	0,221	75,1	20545	115,64
2	0,17	November	8270	0,0004	0	0,006	0,246	75,7	41091	116,21
3	0,25	December	8760	0,0013	0	0,006	0,261	76,2	61636	116,71
4	0,33	January	8810	0,0014	0	0,006	0,267	76,4	82181	116,95
5	0,42	February	9120	0,0057	0	0,007	0,299	77,1	102727	117,64
6	0,5	March	9500	0,016	0	0,008	0,317	77,8	123272	118,37
7	0,58	April	9820	0,0304	0	0,009	0,331	78,4	143817	118,99
8	0,67	May	10000	0,0466	0	0,011	0,341	79	164363	119,52
9	0,75	June	10100	0,0596	0	0,014	0,352	79,4	184908	119,95
10	0,83	July	10200	0,0707	0	0,018	0,363	79,8	205453	120,33
11	0,92	August	10300	0,087	0	0,02	0,371	80,2	225998	120,73
12	1	September	10300	0,109	0	0,021	0,377	80,6	246544	121,19
13	1,08	October	10400	0,146	0	0,022	0,381	81,2	267911	121,71
14	1,17	November	10400	0,201	0	0,022	0,384	81,8	289278	122,32

i

i

i

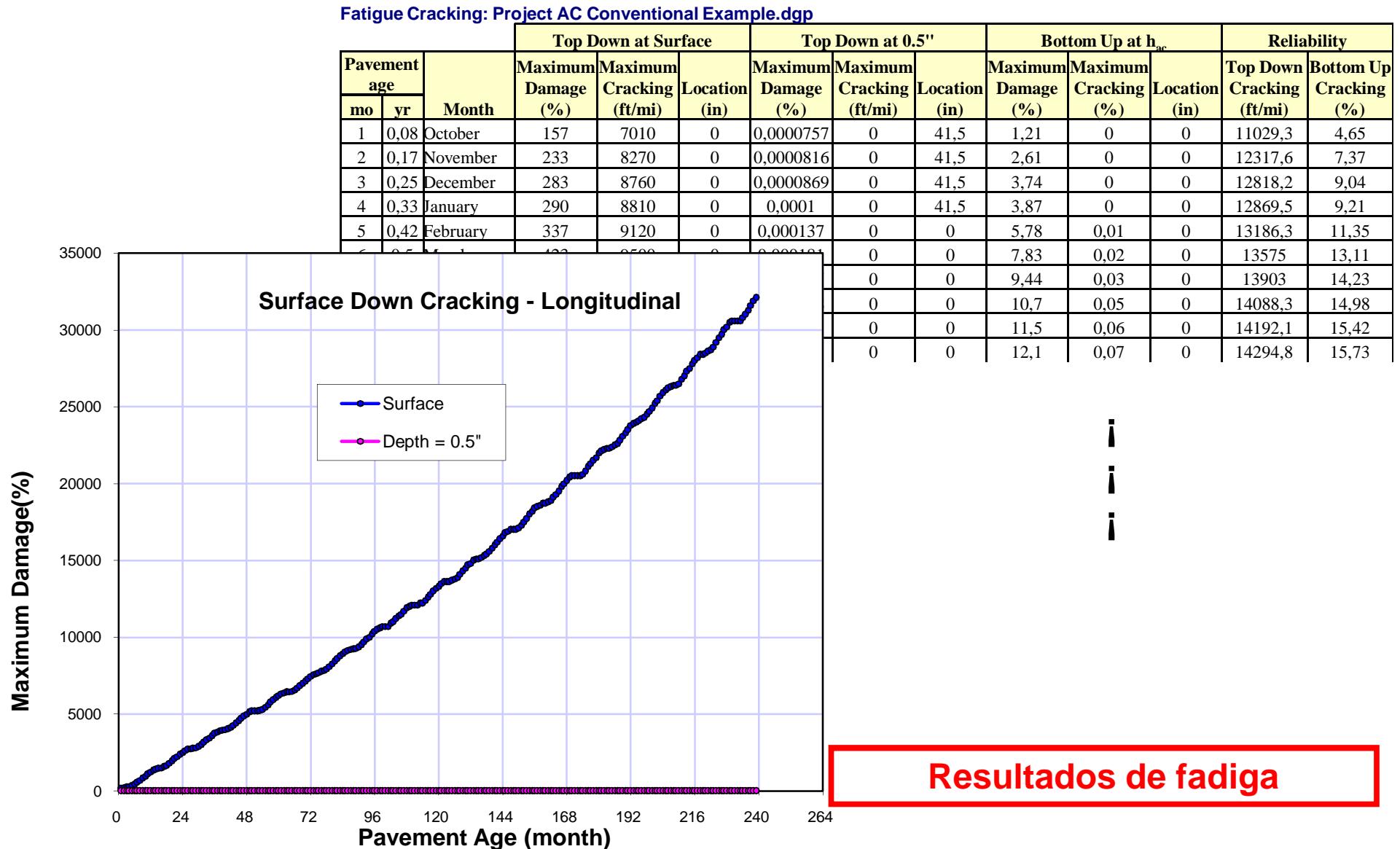
Os resultados

Planilha: Módulos das camadas

Subseason Layer Modulus: Project AC Conventional Example.dgp

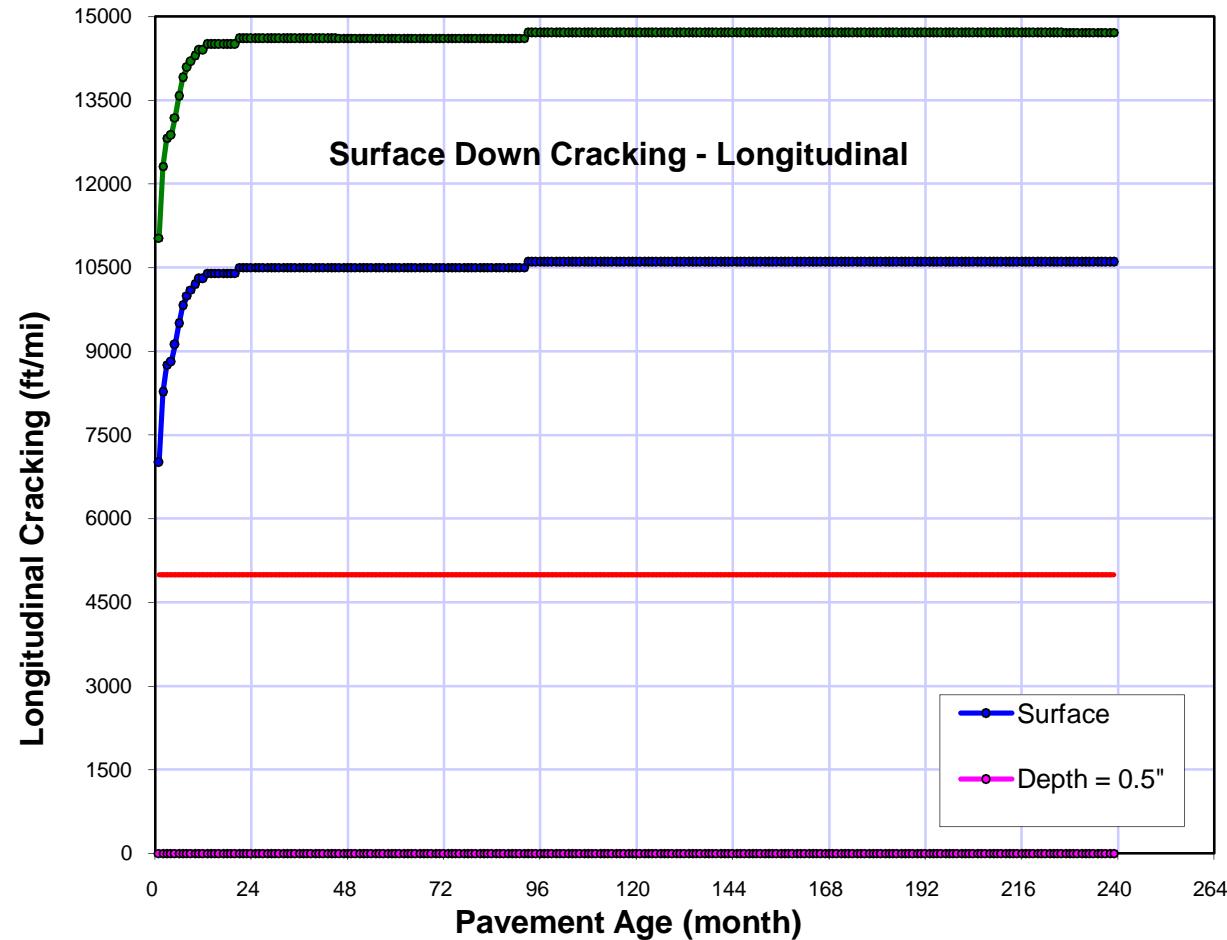
Pavement age	Month	Modulus (psi)																			
		AC1 (1) h=0.5					AC1 (2) h=0.5					GB2 (3) h=2.0	GB2 (4) h=4.0	GB3 (5) h=4.5	GB3 (6) h=4.5	NSG4 (7) h=24.1	NSG4 (8) h=24.1	NSG4 (9) h=24.1	NSG4 (10) h=24.1	NSG4 (11) h=24.14	
		1	2	3	4	5	1	2	3	4	5										
1	0.08	October	2663480	1999820	1675870	1340730	788005	2294390	1731650	1459660	1191810	732195	41560	41200	28700	30352	6200	6200	6190	6180	6150
2	0.17	November	3786640	3786640	3476920	2656770	1819530	3661020	3661020	3100630	2334590	1618650	41840	41520	28756	30016	6200	6200	6190	6180	6150
3	0.25	December	3786640	3786640	3786640	3255860	2285720	3661020	3661020	3437530	2900780	2025620	39120	41800	28756	29680	6200	6200	6190	6180	6150
4	0.33	January	3786640	3786640	3786640	3786640	2258440	3661020	3661020	3661020	3661020	1964400	84200	72800	33852	36120	6200	6200	6190	6180	6150
5	0.42	February	3786640	3786640	3786640	3786640	3376570	3661020	3661020	3661020	3661020	3101250	42200	39520	15820	16464	5320	6200	6190	6180	6150
6	0.5	March	3786640	3786640	3694080	2923060	1632290	3661020	3661020	3326870	2569750	1434460	38400	38360	18732	19572	5560	6200	6190	6180	6150
7	0.58	April	3786640	3565290	2412120	1675000	883786	3661020	3151990	2051820	1430190	805343	39120	40360	22456	23184	5790	6200	6190	6180	6150
8	0.67	May	3185100	2402310	1842570	1319950	793479	2726750	2014680	1546170	1136800	710201	41960	42760	26936	27524	6020	6200	6190	6180	6150
9	0.75	June	2108870	1467890	1120300	765651	465312	1759020	1221700	941000	666517	413344	43280	43120	28700	28700	6170	6200	6190	6180	6150
10	0.83	July	1559100	1122730	849565	579126	395648	1268960	930938	718068	509263	349189	43520	43240	28700	28616	6200	6200	6190	6180	6150
11	0.92	August	1831090	1378610	1101060	792906	517403	1491740	1139950	927217	686595	457301	43560	43280	28672	28560	6200	6200	6190	6180	6150
12	1	September	2366790	1674730	1274140	915126	582949	1931330	1367060	1061750	786350	517621	43600	43280	28672	28504	6200	6200	6190	6180	6150

Os resultados



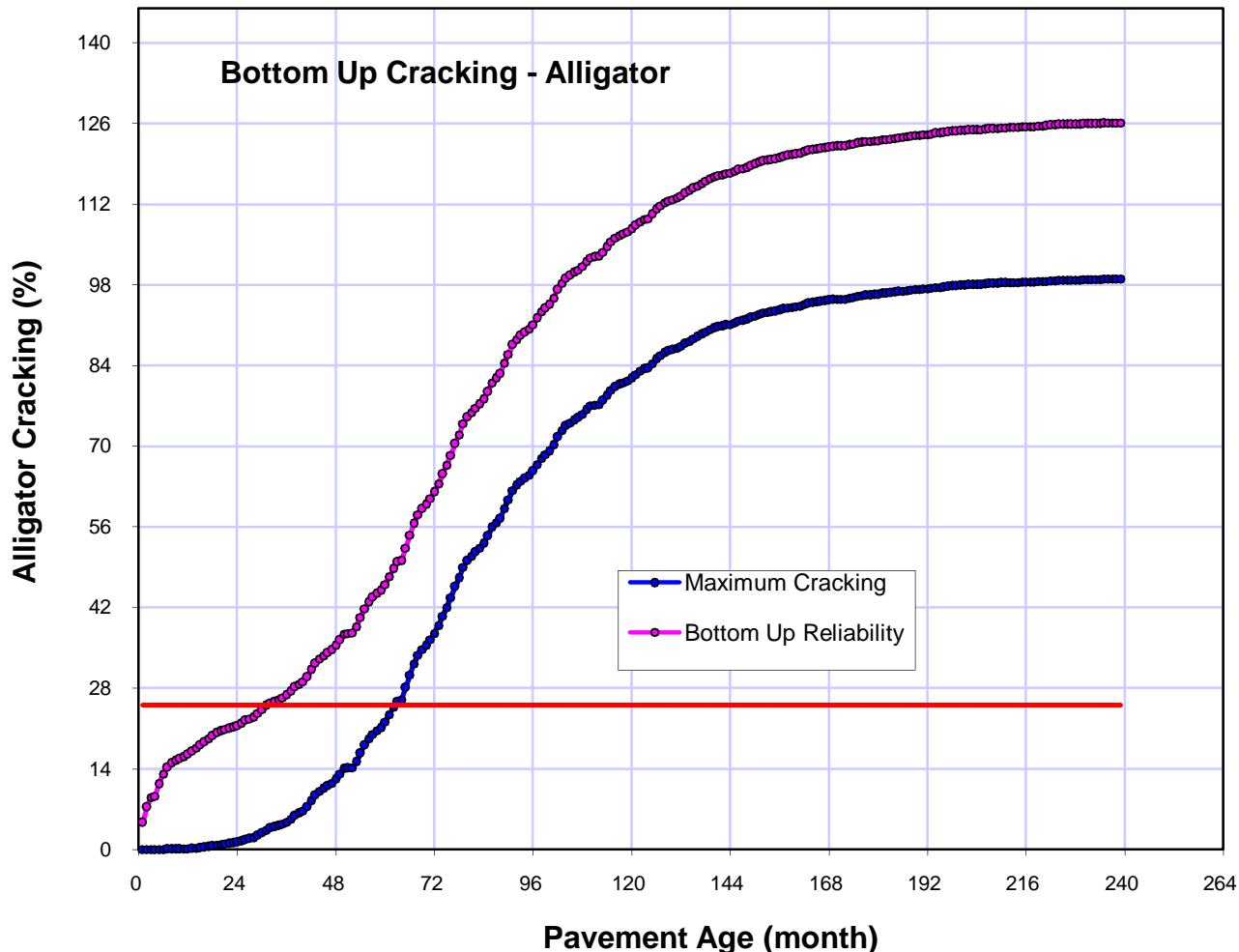
Os resultados

Resultados de fadiga



Os resultados

Resultados de fadiga



Os resultados

Resultados de Deformação Permanente

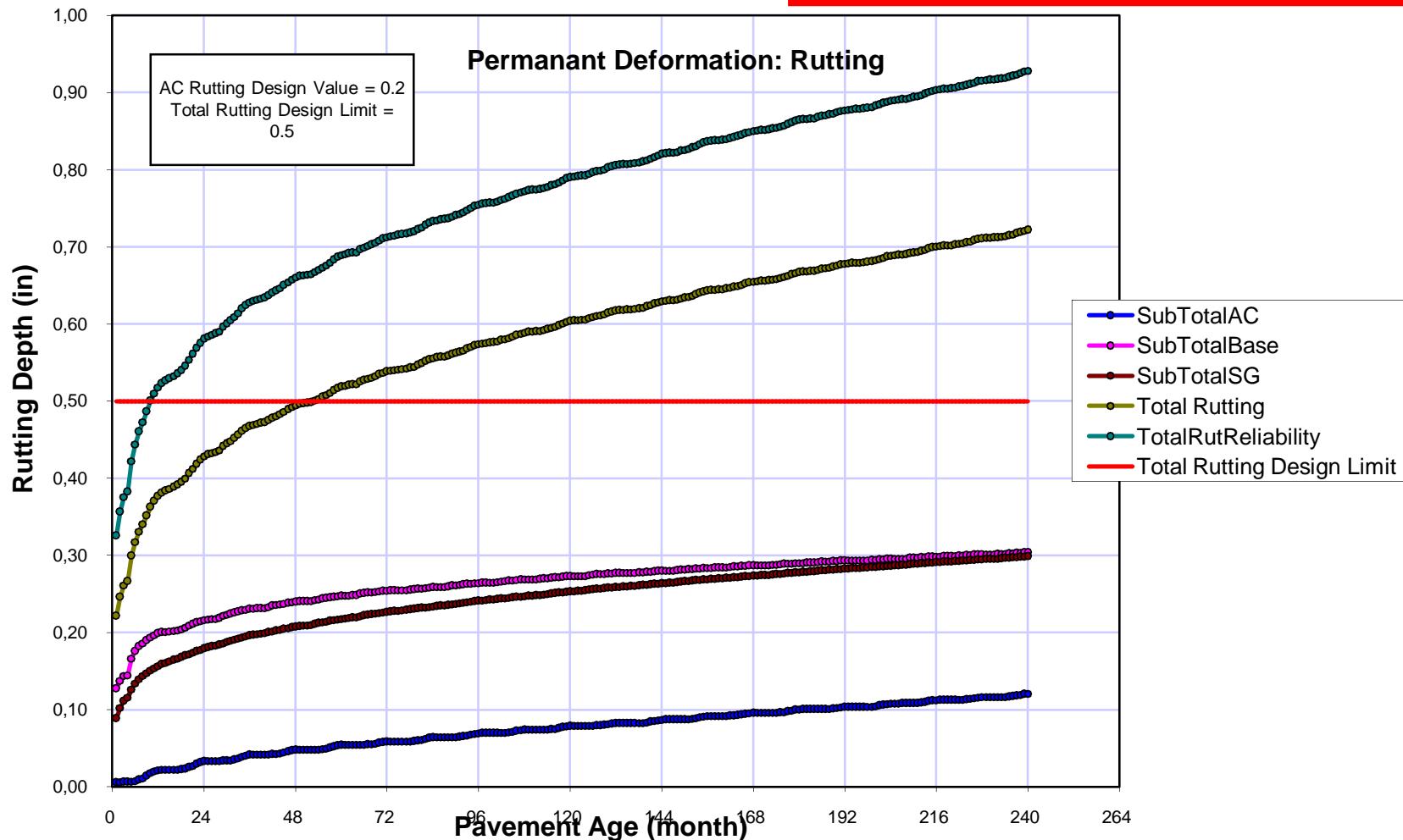
Fatigue Cracking: Project AC Conventional Example.dgp

Pavement age		Month	Top Down at Surface			Top Down at 0.5"			Bottom Up at h_{ac}			Reliability	
mo	yr		Maximum Damage (%)	Maximum Cracking (ft/mi)	Location (in)	Maximum Damage (%)	Maximum Cracking (ft/mi)	Location (in)	Maximum Damage (%)	Maximum Cracking (ft/mi)	Location (in)	Top Down Cracking (ft/mi)	Bottom Up Cracking (%)
1	0,08	October	157	7010	0	0,0000757	0	41,5	1,21	0	0	11029,3	4,65
2	0,17	November	233	8270	0	0,0000816	0	41,5	2,61	0	0	12317,6	7,37
3	0,25	December	283	8760	0	0,0000869	0	41,5	3,74	0	0	12818,2	9,04
4	0,33	January	290	8810	0	0,0001	0	41,5	3,87	0	0	12869,5	9,21
5	0,42	February	337	9120	0	0,000137	0	0	5,78	0,01	0	13186,3	11,35
6	0,5	March	423	9500	0	0,000181	0	0	7,83	0,02	0	13575	13,11
7	0,58	April	549	9820	0	0,000267	0	0	9,44	0,03	0	13903	14,23
8	0,67	May	681	10000	0	0,000348	0	0	10,7	0,05	0	14088,3	14,98
9	0,75	June	820	10100	0	0,00124	0	0	11,5	0,06	0	14192,1	15,42
10	0,83	July	956	10200	0	0,00324	0	0	12,1	0,07	0	14294,8	15,73

i
i
i

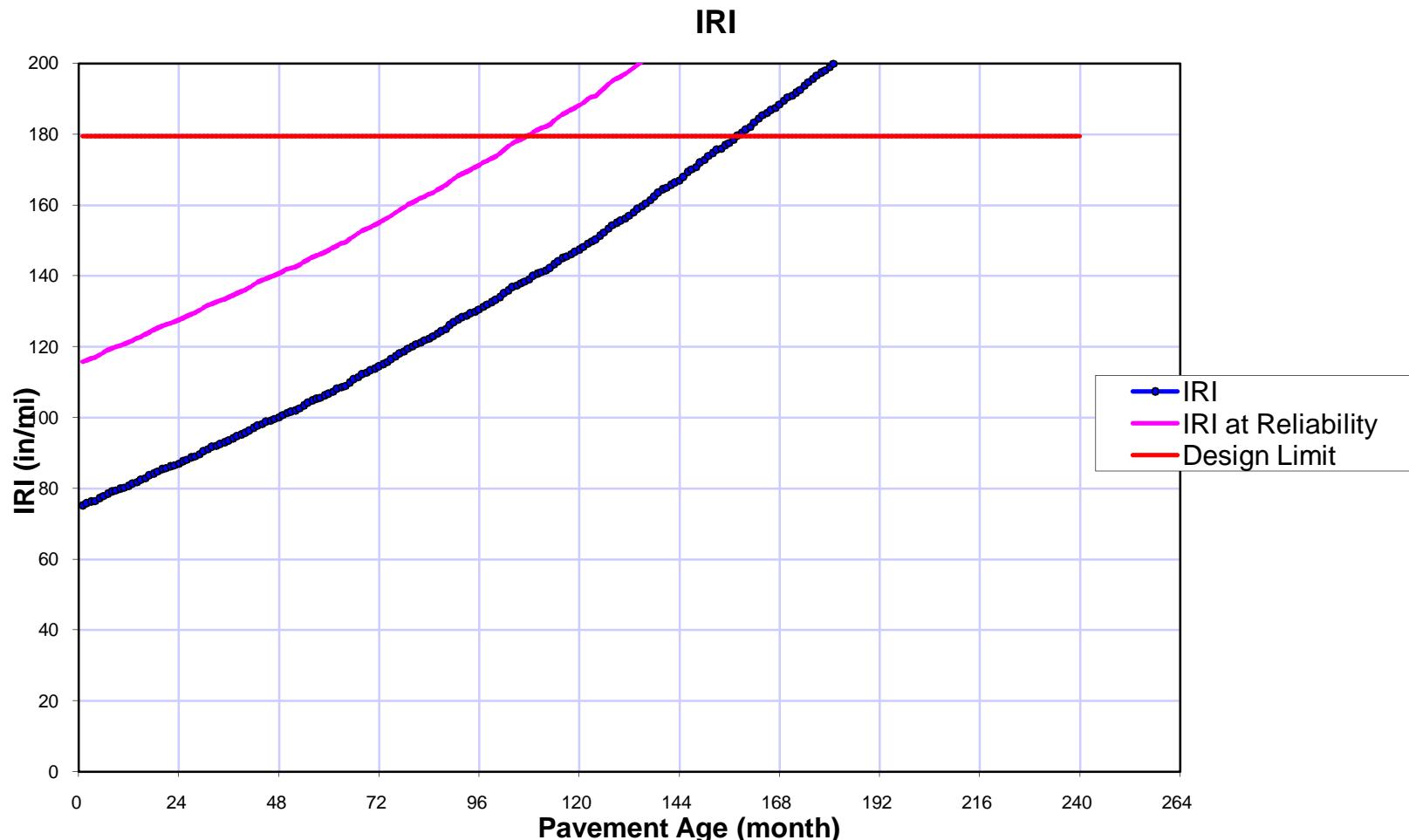
Os resultados

Resultados de Deformação Permanente



Os resultados

Resultados de IRI



Exemplos de calibrações - Iowa

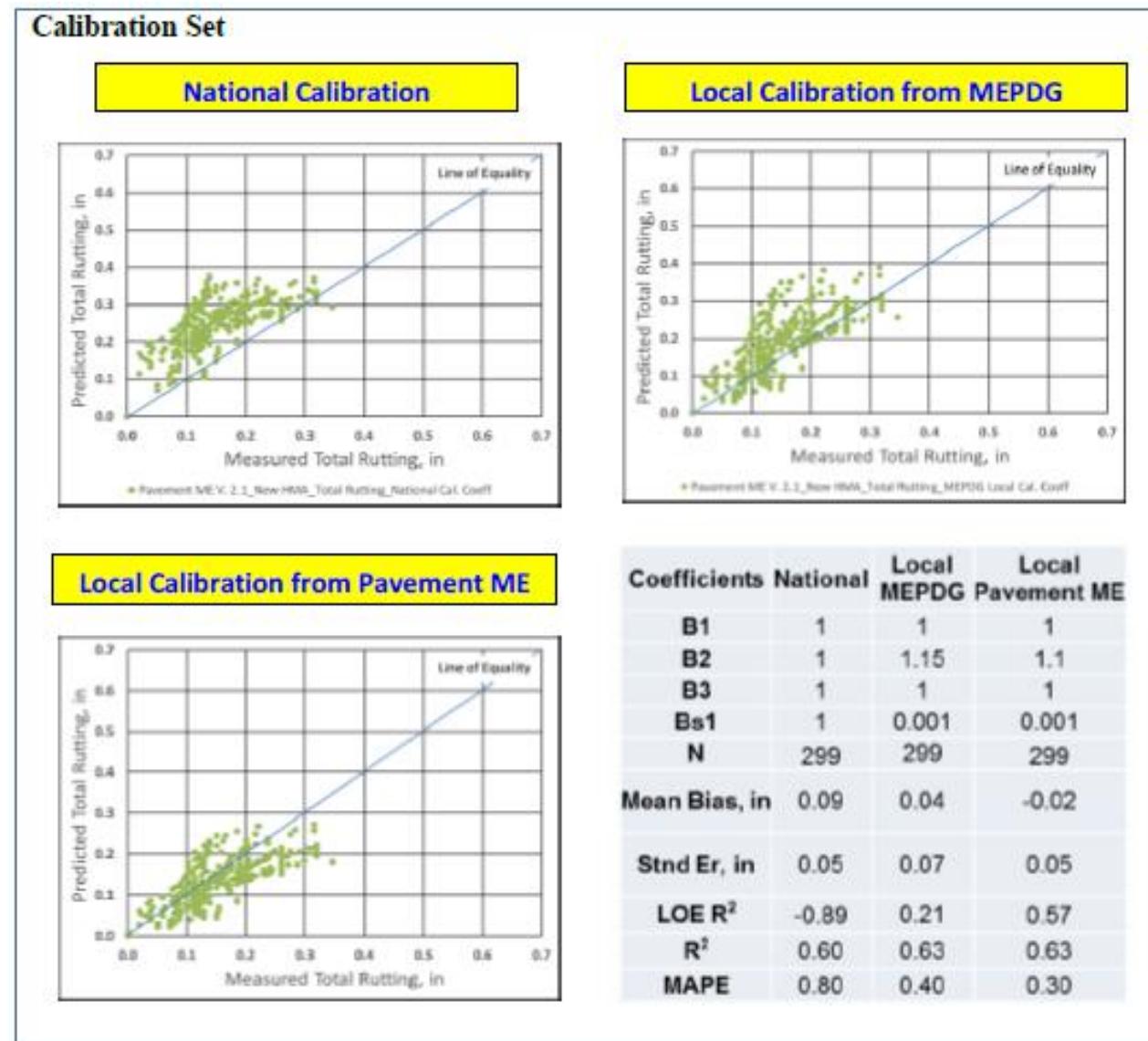


Figure 22. Overall accuracy summary of HMA rutting model using calibration set

Exemplos de calibrações - Iowa

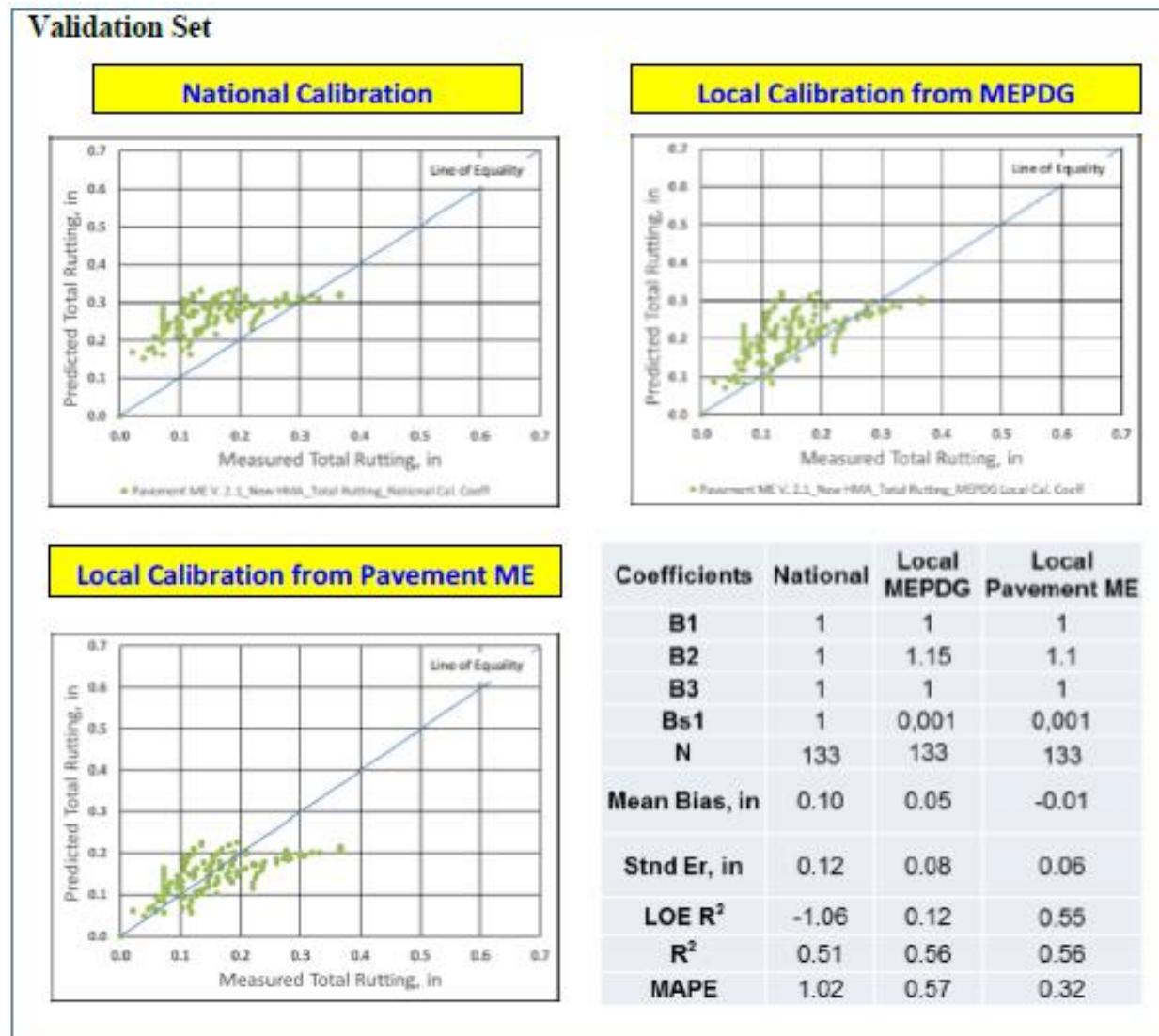


Figure 23. Overall accuracy summary of HMA rutting model using validation set

Exemplos de calibrações - Iowa

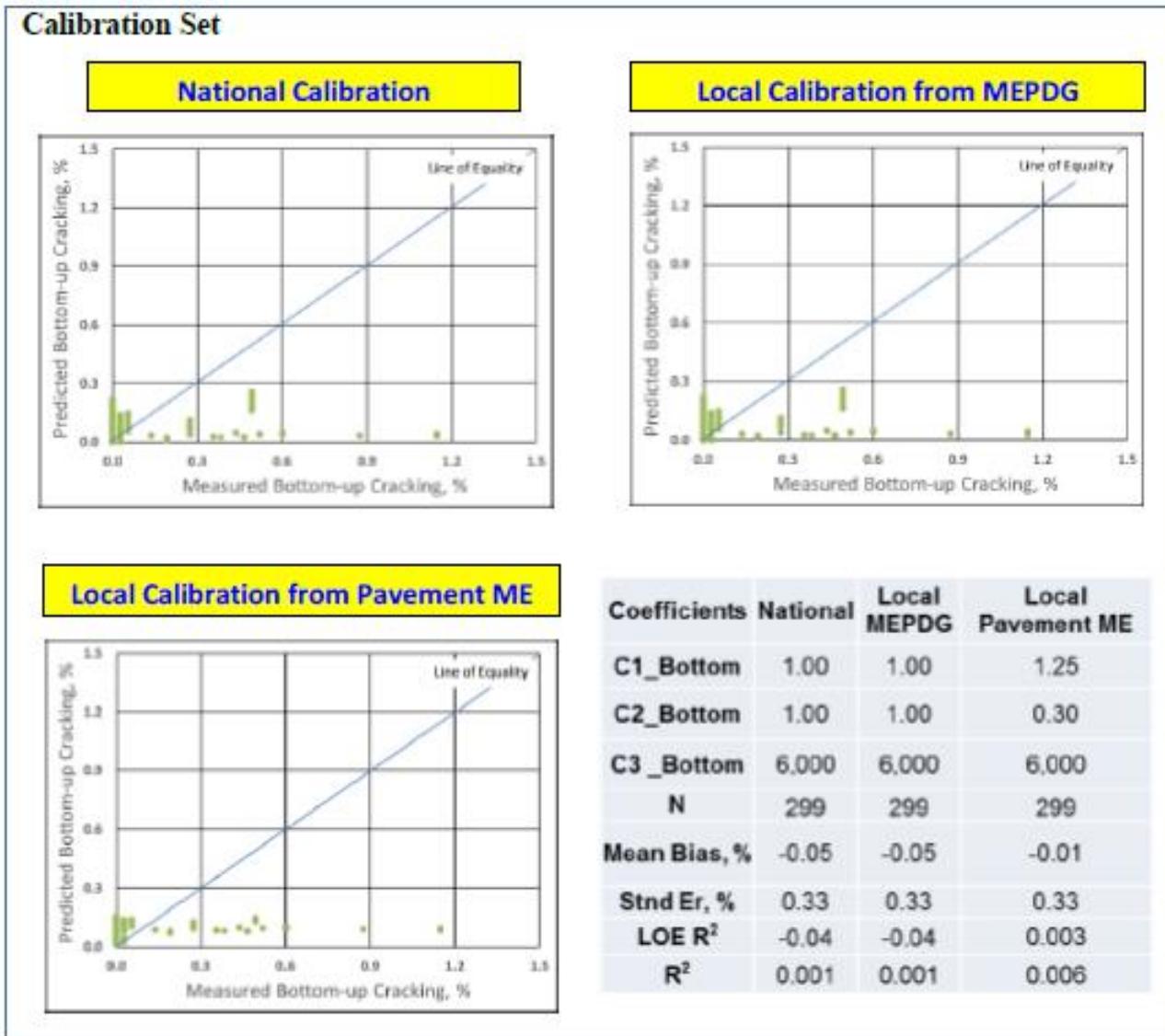


Figure 24. Overall accuracy summary of HMA alligator (bottom-up) cracking model using calibration set

Exemplos de calibrações - Iowa

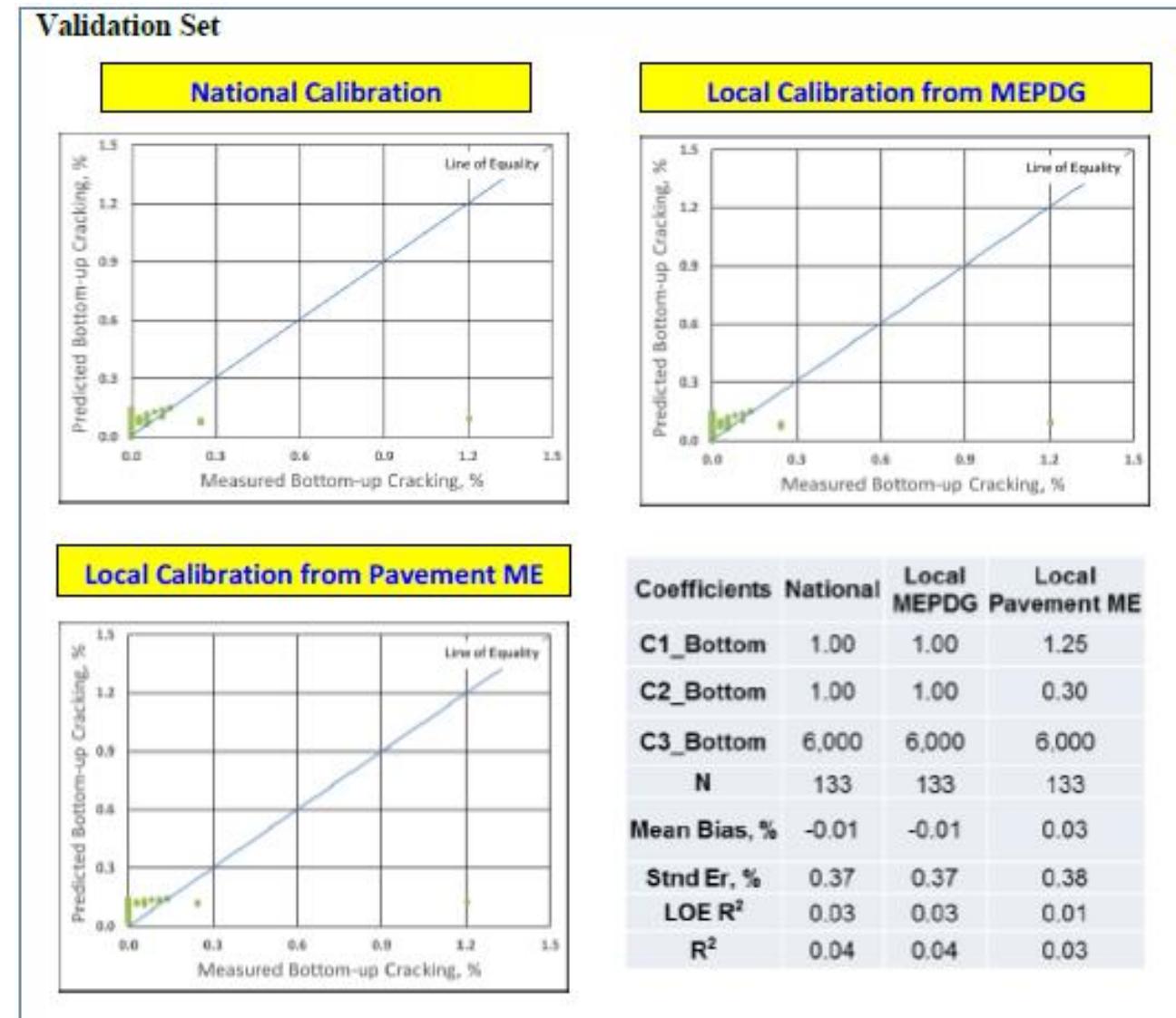


Figure 25. Overall accuracy summary of HMA alligator (bottom-up) cracking model using validation set

Exemplos de calibrações - Iowa

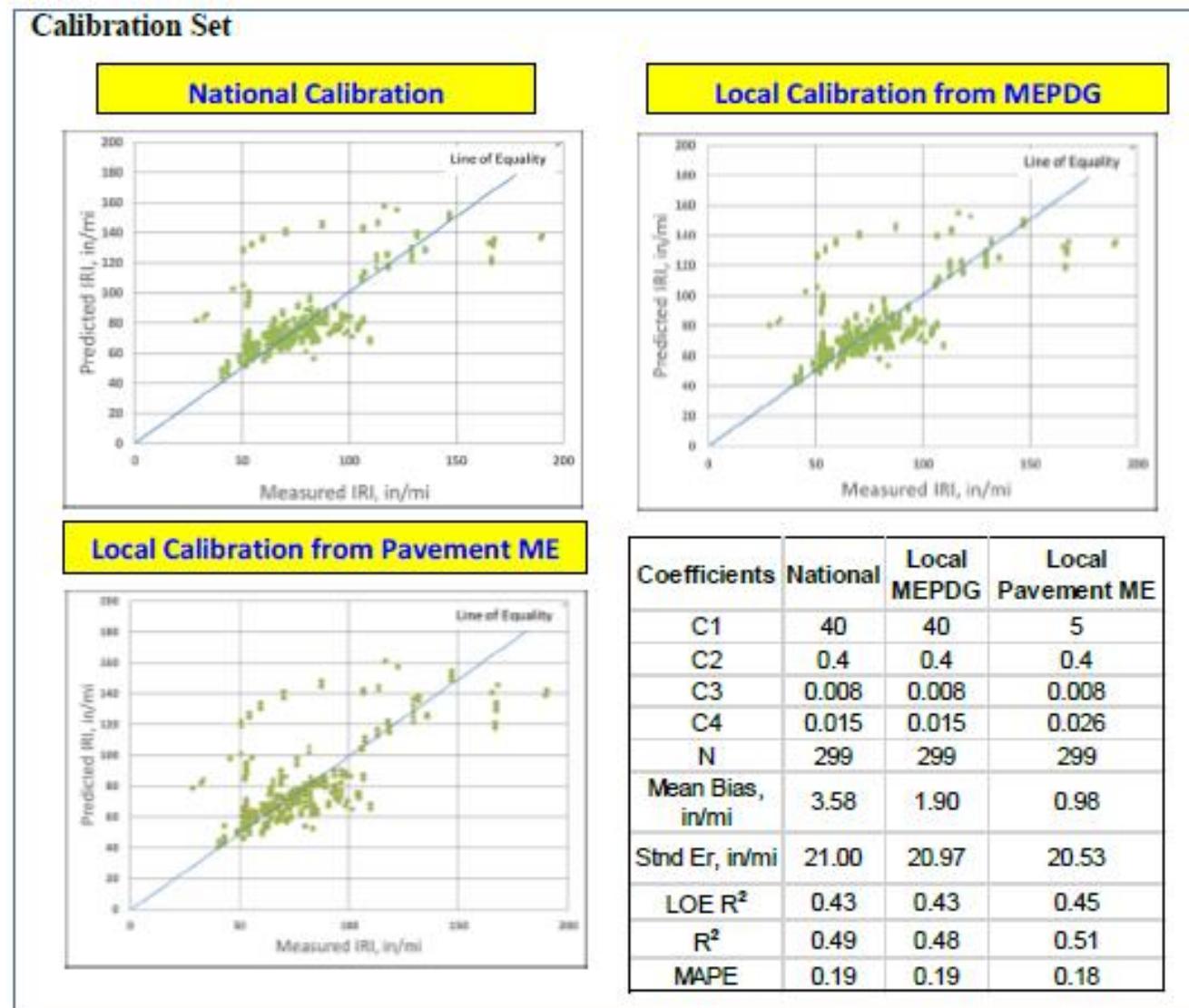


Figure 30. Overall accuracy summary of HMA IRI model using calibration set (Approach 1)

Exemplos de calibrações - Iowa

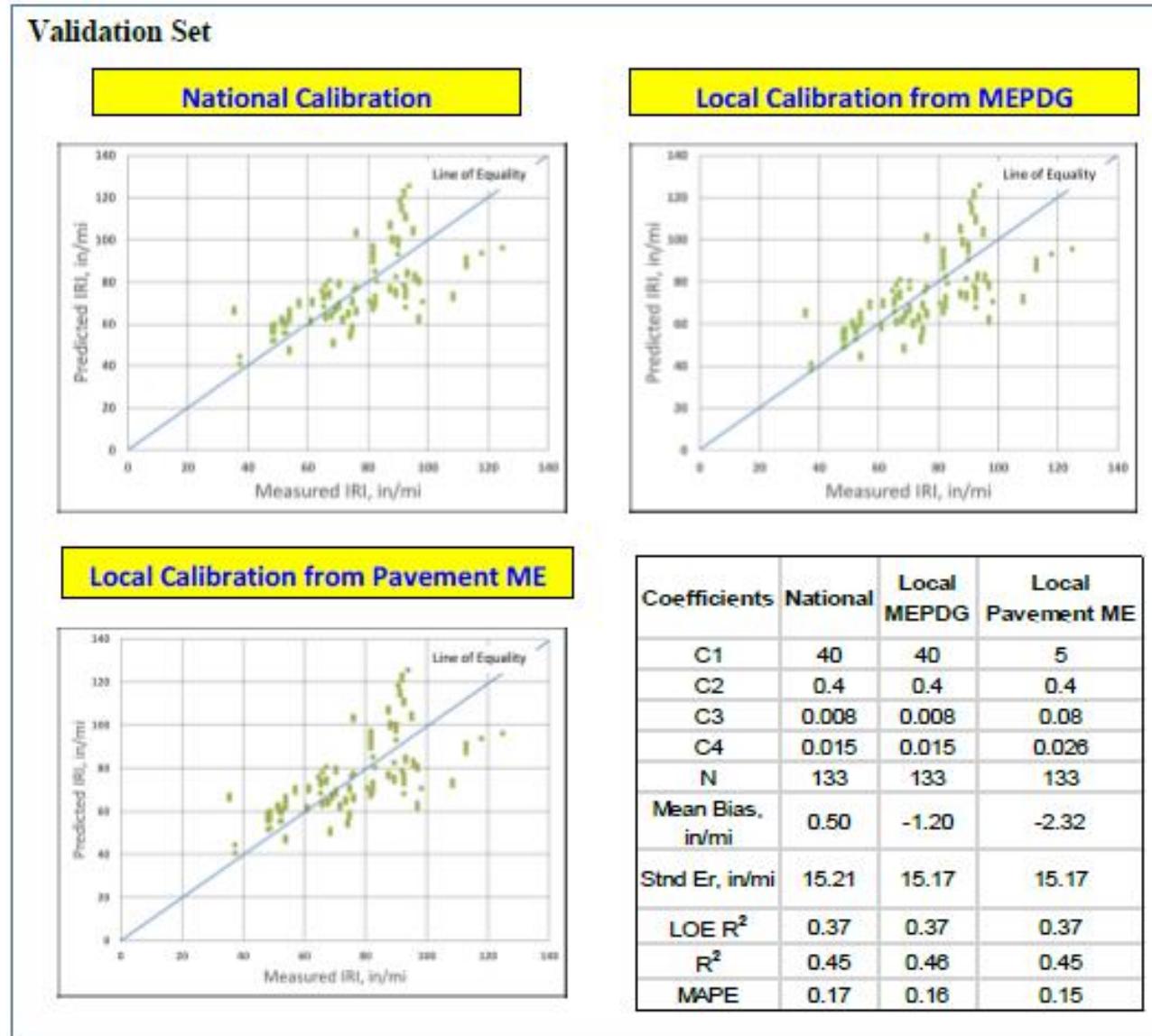
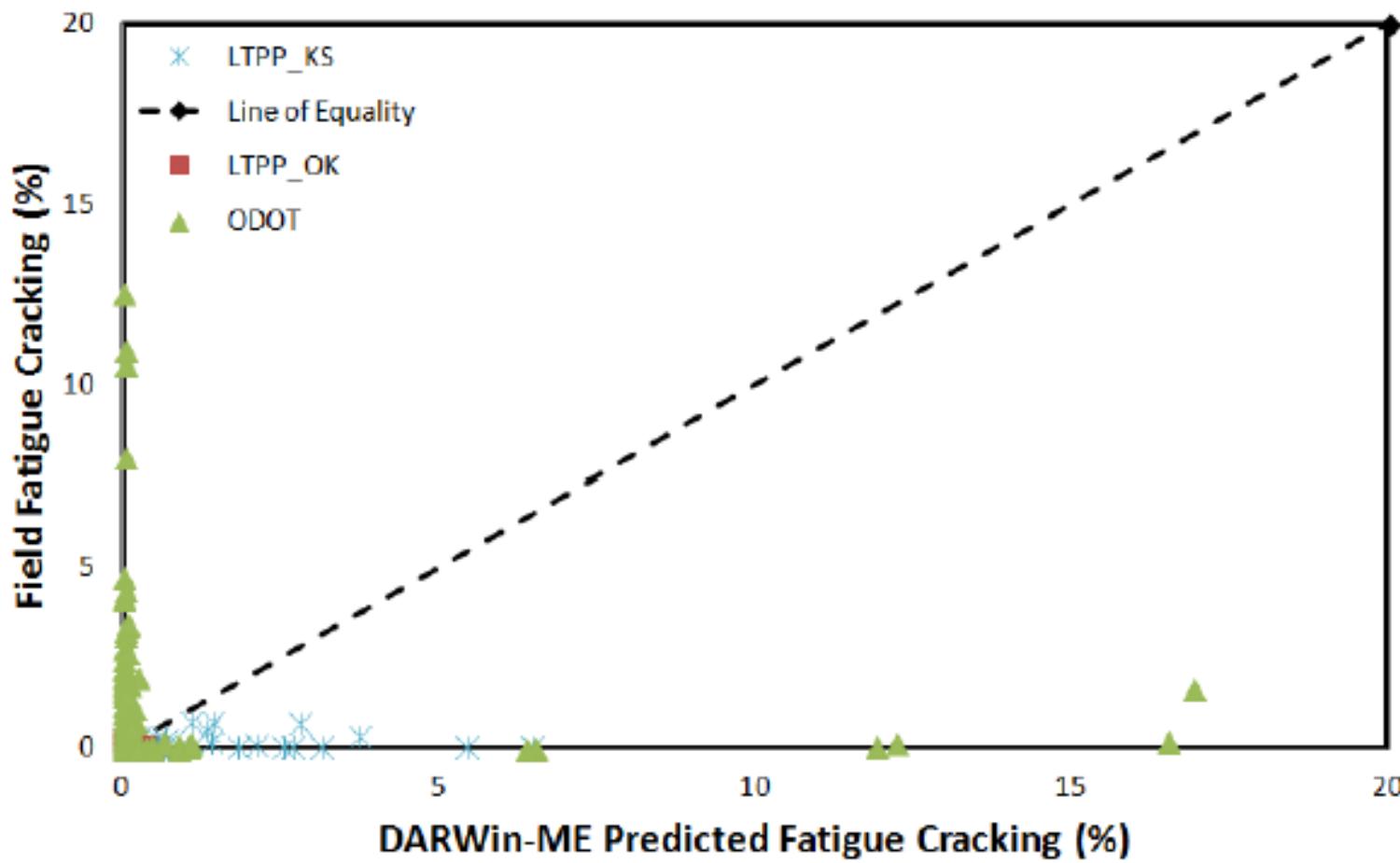


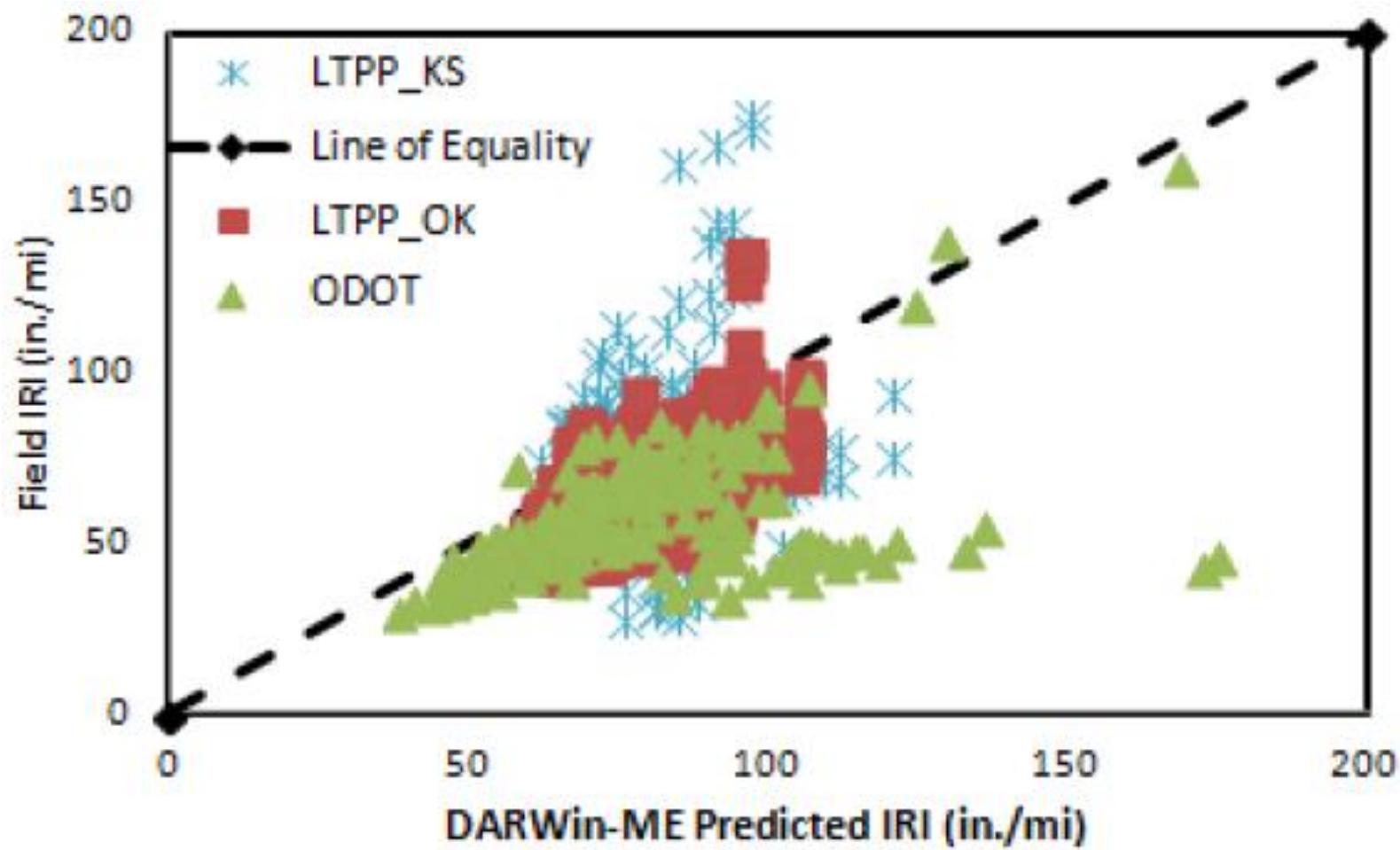
Figure 31. Overall accuracy summary of HMA IRI model using validation set (Approach 1)

Exemplos de calibrações . Oklahoma e Kansas



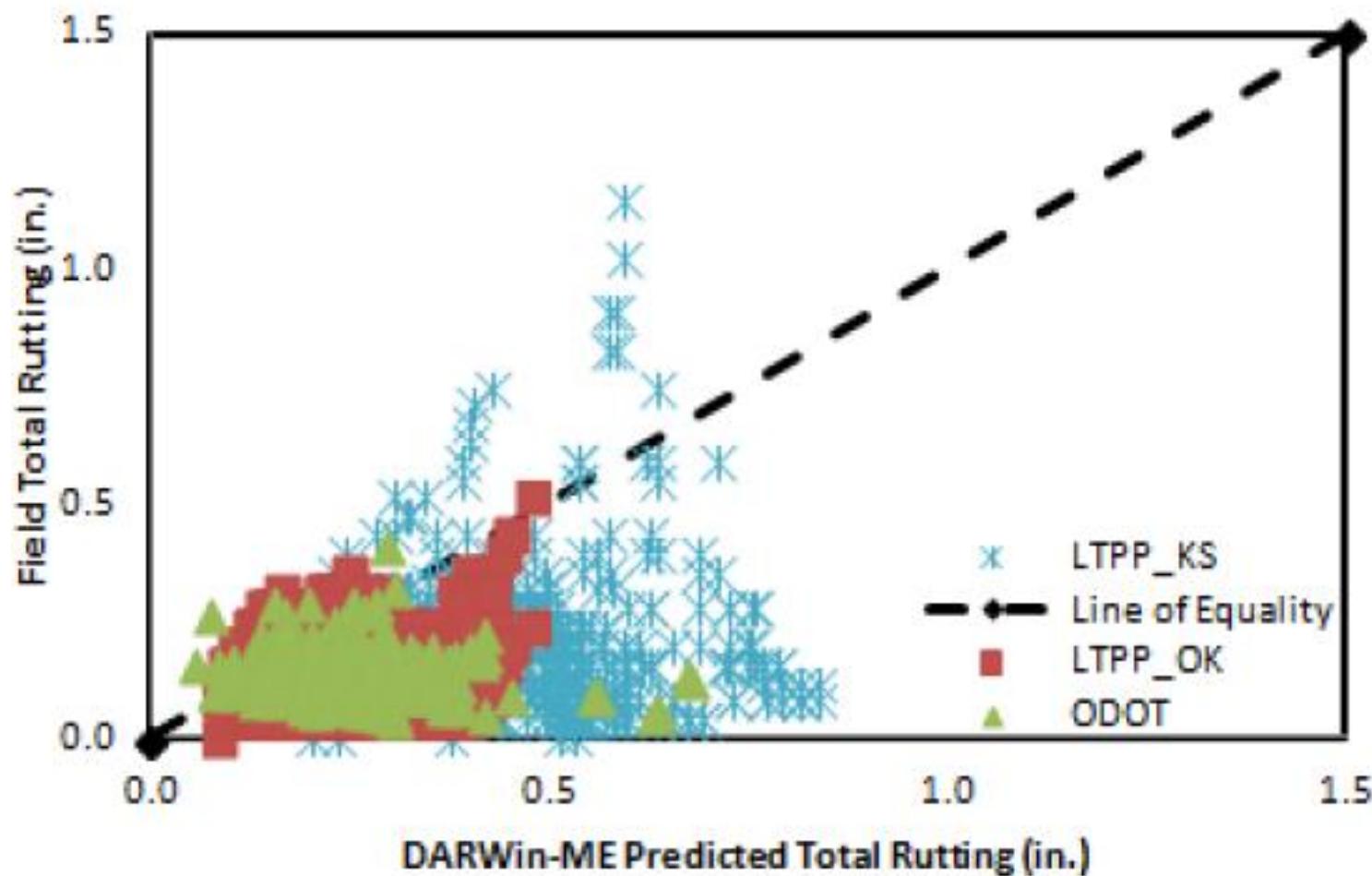
(a) Fatigue cracking comparisons of all sites

Exemplos de calibrações . Oklahoma e Kansas



(a) IRI comparisons of all sites

Exemplos de calibrações . Oklahoma e Kansas



(a) Rutting comparisons of all sites