



# OS ENSAIOS DE CARGA EM PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS E O DESAFIO DA MODERNIDADE

**Paulo Gontijo**

**PALESTRA 3**

Brasília, 27/NOV/2019

# Robert Hooke

Cientista Inglês (18/07/1635 – 03/03/1703)

1678

UT TENSIO, SIC VIS

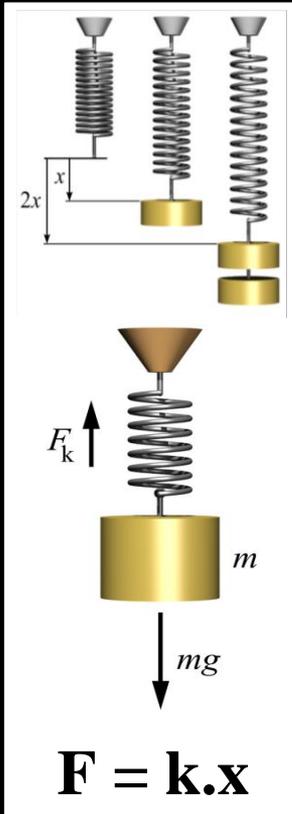
\*AS THE EXTENSION, SO THE FORCE\*

“A VERDADEIRA TEORIA DA ELASTICIDADE”

“A força em qualquer mola é proporcional à tensão na mesma”

$\sigma = G \cdot \varepsilon$  ou (stress = G x strain)  
(G é o MÓDULO DE RIGIDEZ)

$$\sigma = E \cdot \varepsilon$$



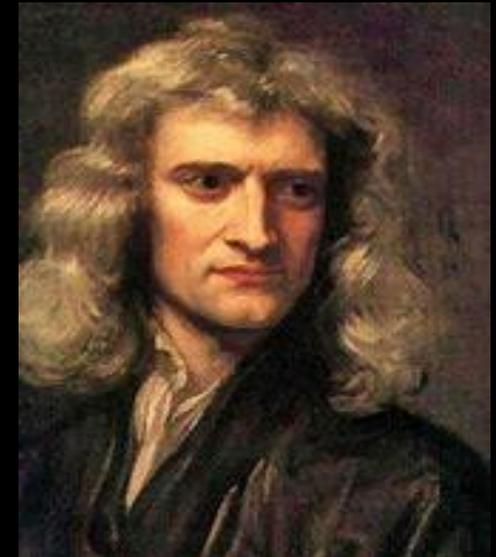
O módulo de elasticidade E uma homenagem ao cientista **Thomas Young** (1773-1829).

# Isaac Newton

Cientista Inglês (25/12/1642 – 31/03/ 1727)

**“PHILOSOPHIAE NATURALIS PRINCIPIA MATHEMATICA” - 1687**

Enunciou as “Leis do Movimento”  
“Lei da gravitação universal”  
e desenvolveu o **cálculo diferencial e integral**,  
importante ferramenta matemática  
utilizada em diversas áreas do saber.



# *Joseph Valentin Boussinesq*

(França - 13/03/1842 - 19/02/1929)

Deformações de corpos elásticos - sujeitos a uma carga exercida - nas três direções principais

*“Sólido de Boussinesq”*



Meio homogêneo, semi-infinito, elástico e isótropo atuado em sua superfície por uma carga concentrada

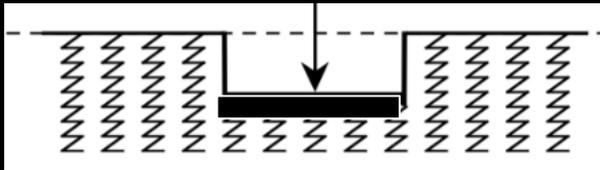


# *Harald Malcolm Westergaard*

*(Dinamarca – 09/10/1888 – 22/06/1950)*

*Teoria do líquido denso:  
Deslocamento proporcional à  
pressão exercida*

$$P_c = k \times d \quad \Rightarrow \quad k = P_c / d$$



*“Moments and Stress in Slabs”  
(1921)*

*“Stress in Concrete Pavements  
Computed by Theoretical Analysis  
(1926)*

# *Donald M Burmister*

(EUA - 1895 - 15/05/1981)

“The theory of stresses and displacements in layered systems and applications to the design of airport runways”

1943

Proc. Highways Research  
Board - Vol. 23



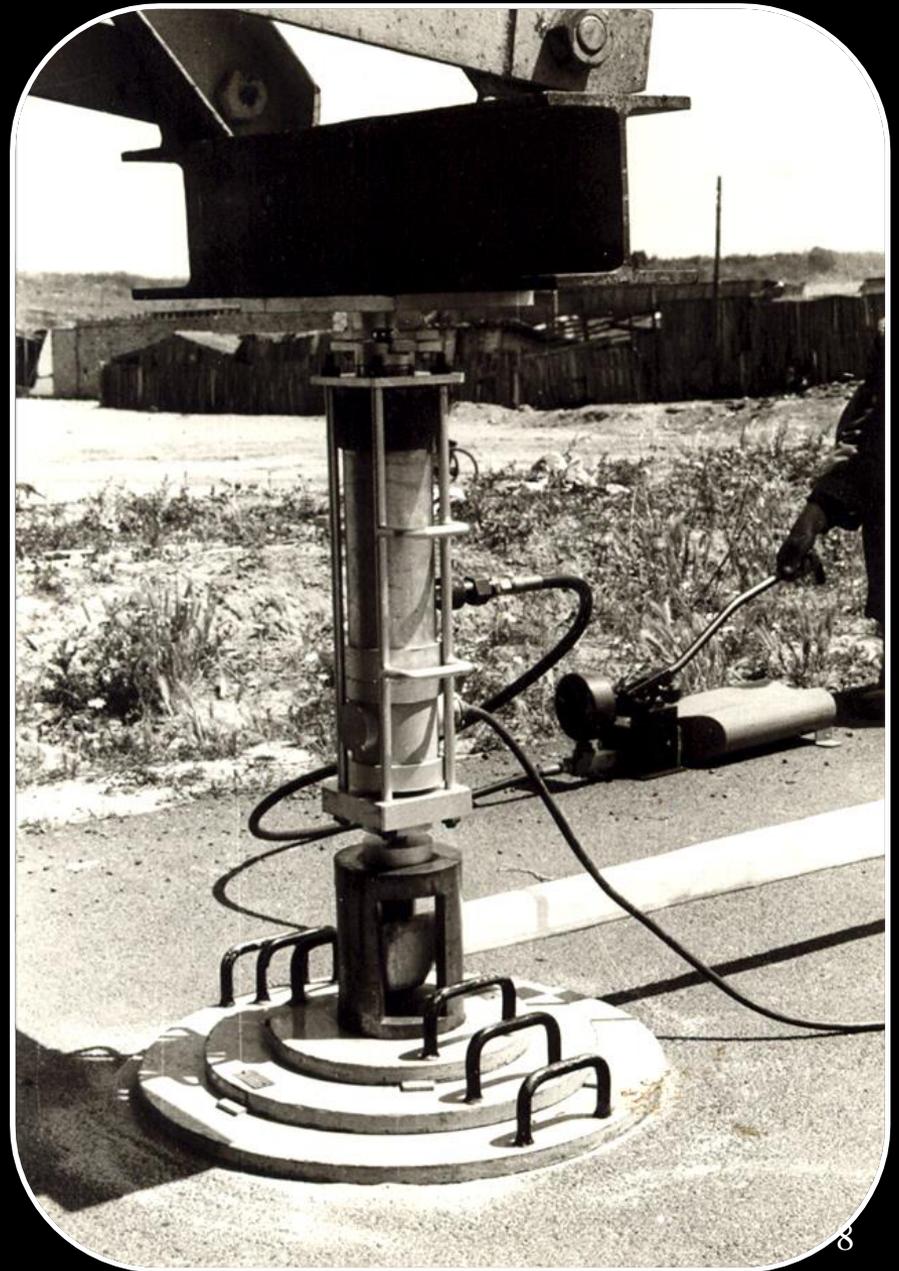
# SAGA DOS PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS

SISTEMAS ESTRATIFICADOS ELÁSTICOS



Módulos de Elasticidade

# ENSAIOS DE CARGA COM PLACA (ESTÁTICO)



# **ENSAIO COM PLACA** *(Corpo Estático)*

**ET (energia total) = EP (energia potencial)**

**Equação matricial da estrutura representativa:**

$$\mathbf{F} = [\mathbf{K}]\{\mathbf{u}\} \text{ (carga estática)}$$

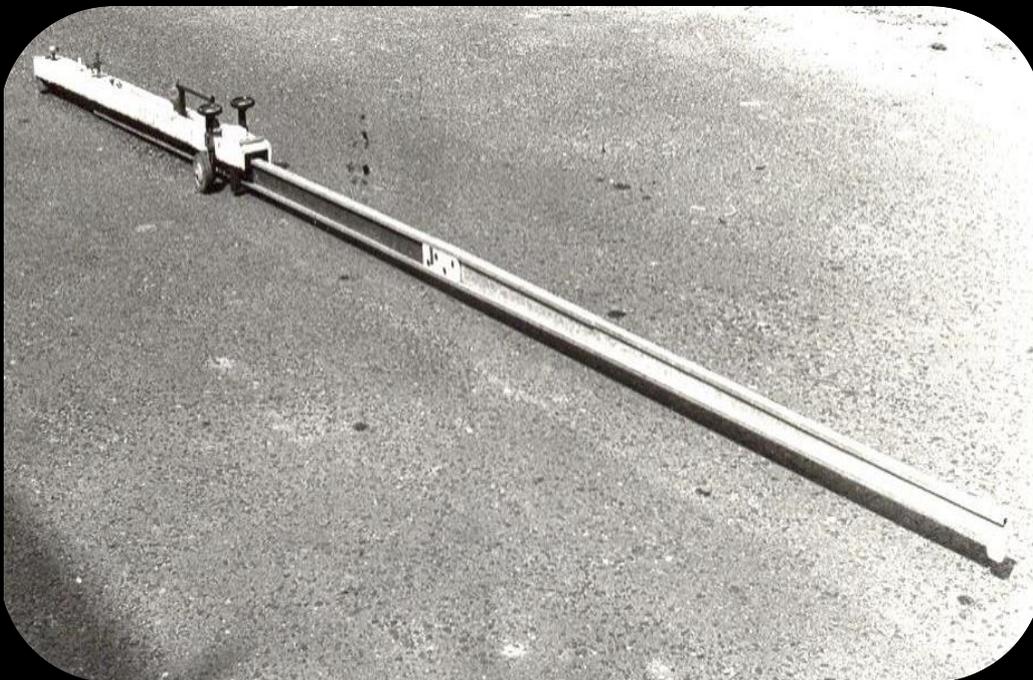
**[K] = matriz de rigidez**

**{u} = vetor deslocamento**

**Western Association of State Highway Officials (WASHO)  
1952 a 1954**

**Eng.º A.C. Benkelman**

**Equipamento para medir a deflexão imposta  
a um pavimento solicitado por um conjunto  
de rodas gêmeas de um veículo pesado (18 kips)**



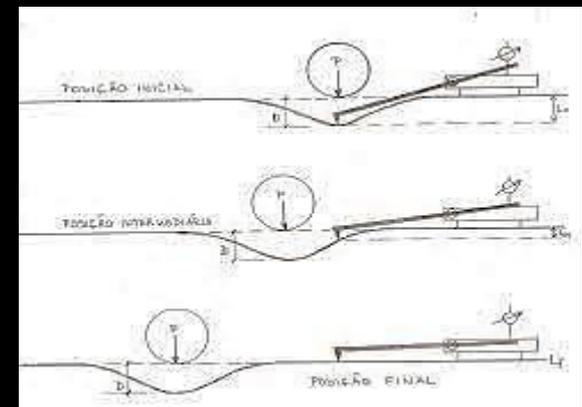
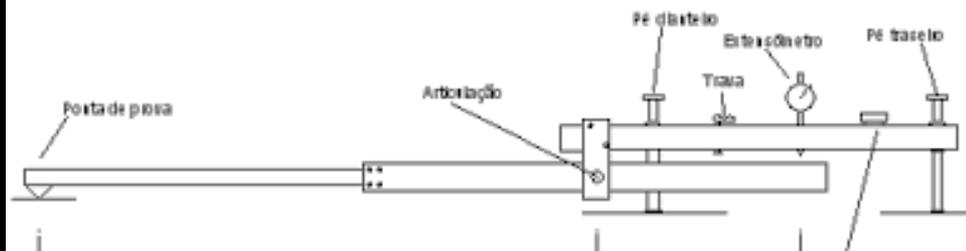
**VIGA  
BENKELMAN**

**1953**

# VIGA BENKELMAN



VIGA BENKELMAN



# TRELIÇA NESTOR ARATANGY



1985

# **ENSAIO COM VIGA BENKELMAN** *(Corpo Quase Estático)*

**ET (energia total) = EP (energia potencial)**

**Equação matricial da estrutura representativa:**

$$\mathbf{F} = [\mathbf{K}]\{\mathbf{u}\} \text{ (carga estática)}$$

**[K] = matriz de rigidez**

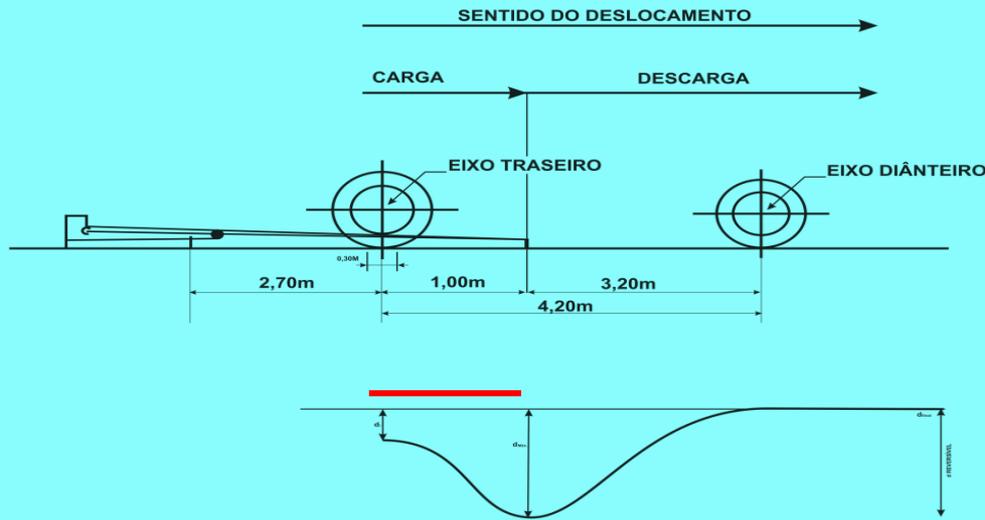
**{u} = vetor deslocamento**

# 1º DEFLECTÓGRAFO DE PAVIMENTOS

1967



LNEC



DIMENSÕES BÁSICAS DO DEFLECTÓGRAFO DE PAVIMENTOS

# Tese de Especialista LNEC (1969)

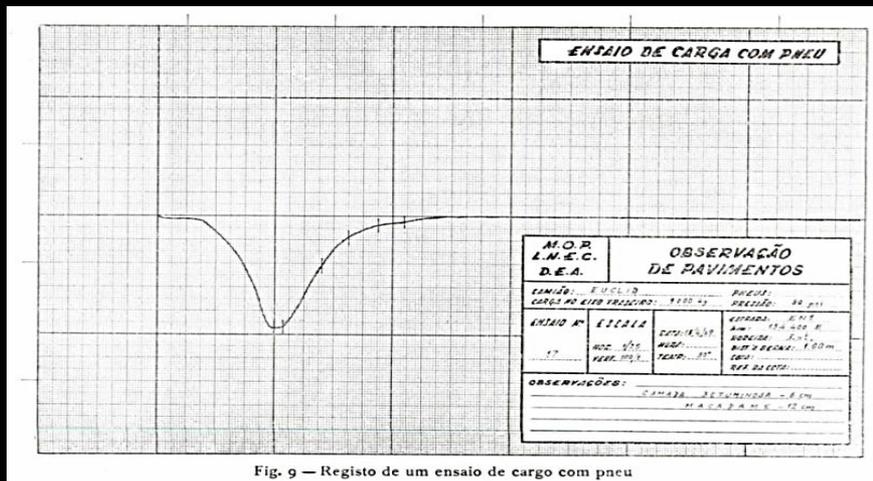
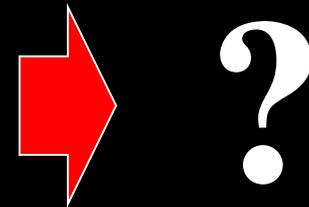
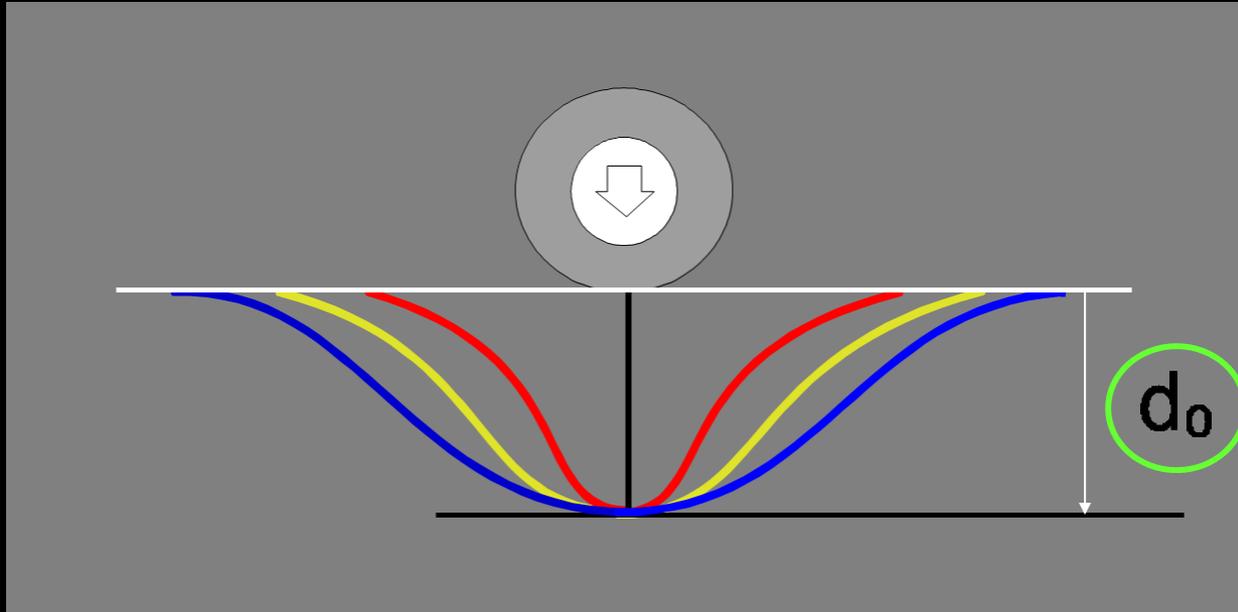


Fig. 9 — Registo de um ensaio de carga com pneu



# CRIADOR DA “RETROANÁLISE”

# DEFORMABILIDADE ELÁSTICA



**ORLANDO D'ALMEIDA  
PEREIRA**

Laboratório de Engenharia Civil – LNEC



# FALLING WEIGHT DEFLECTOMETER - FWD

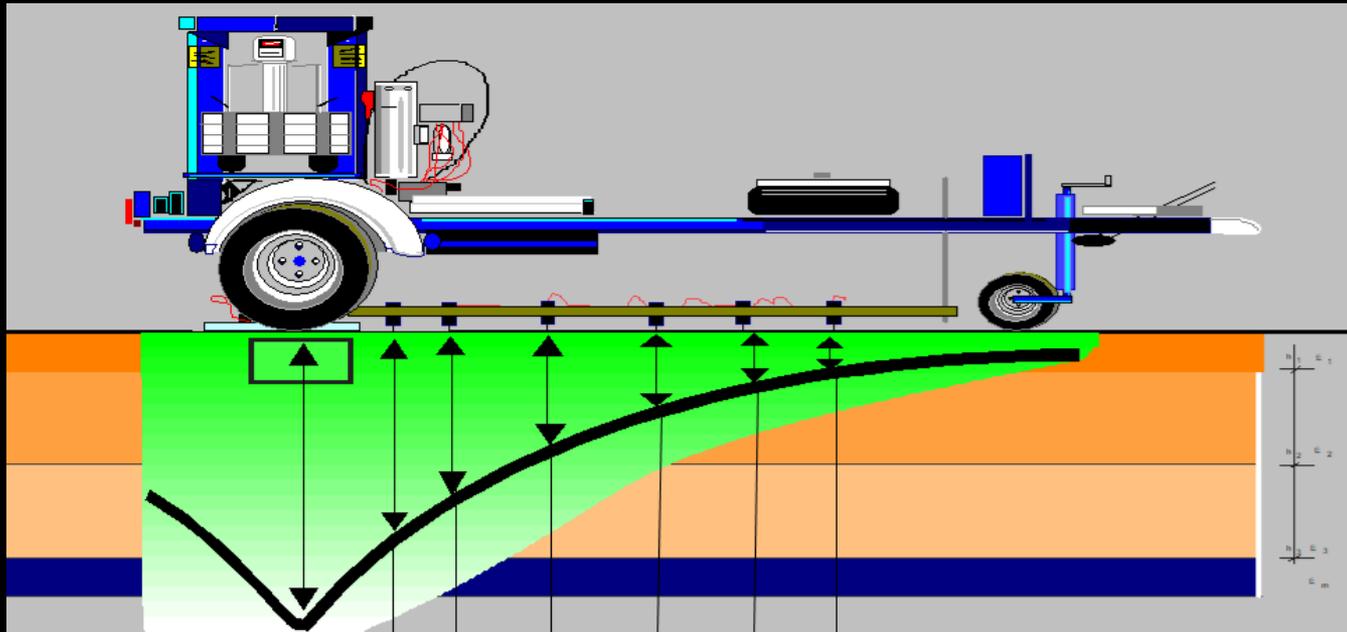


**O primeiro FWD do Brasil - 1989**

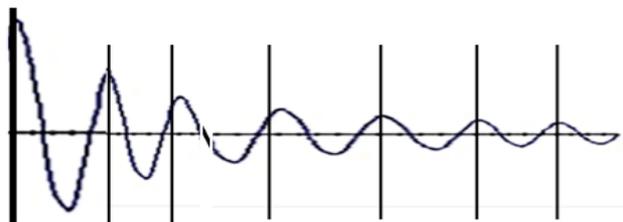
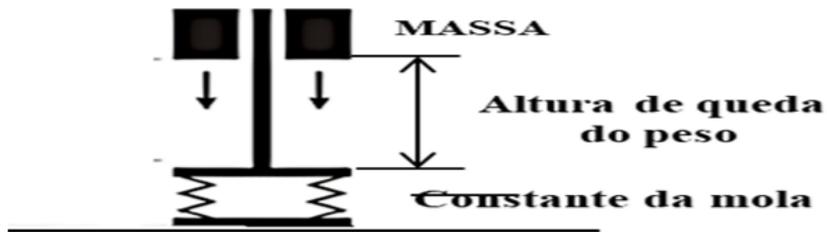


**PER ULLIDTZ**  
**Dinamarca (Dynatest)**

# FWD → Registra a velocidade de vibração imposta à estrutura por uma carga dinâmica



→ 7 Geofones  
(1,20m)

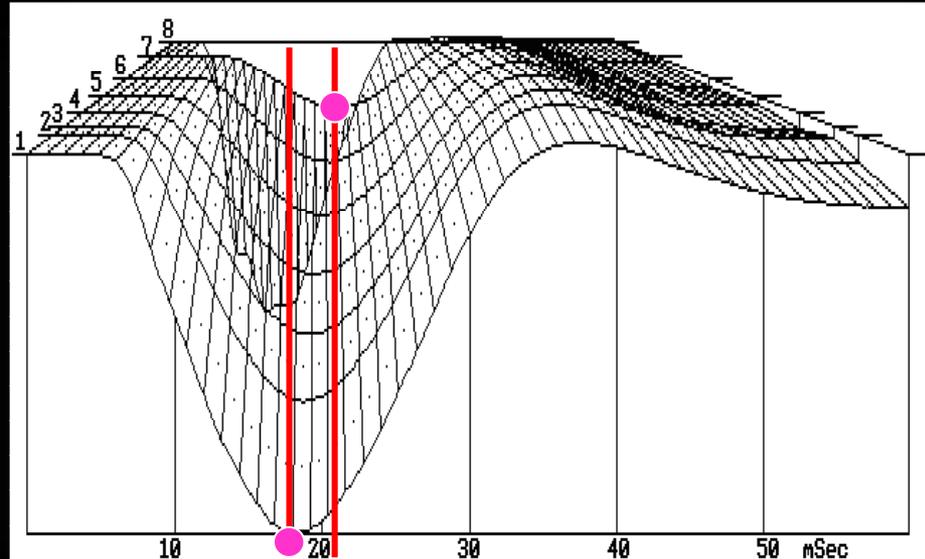


→ Medida dos picos máximos da onda gerada à distintas distâncias do centro de aplicação de carga

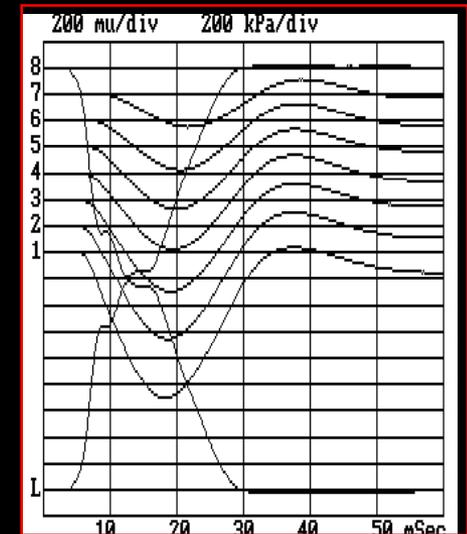
**Os geofones registram as velocidades vibratórias geradas no pavimento quando uma massa em queda livre cai sobre um sistema de amortecedores de borracha. A proposição básica é que o pulso de carga gerado – pelo choque da carga solicitante – se propague através de ondas aproximadamente senoidais e seja medido no pavimento em distintos pontos.**



## REGISTROS DOS 7 GEOFONES



O cálculo efeito dinâmico se limita portanto na determinação de uma força de pico obtida ao se igualar a energia potencial da massa, antes da sua queda, com o trabalho desenvolvido pelos amortecedores de borracha, depois da queda.



## ENSAIO FWD

*(Corpo em queda livre)*

**ET = EPG (Energia Potencial Gravitacional)**

A energia é medida pelo trabalho realizado por um corpo para ir de uma posição inicial a outra, final. Embora o ensaio resulte da queda livre de uma massa sobre um sistema de amortecedores de borracha, a intenção é de se gerar uma vibração no pavimento cujo pulso de carga se propague através de onda (tipo senoidal).

**A força de pico da senóide (pulso de carga) é dada por:**

$$F = \sqrt{2mghk}$$

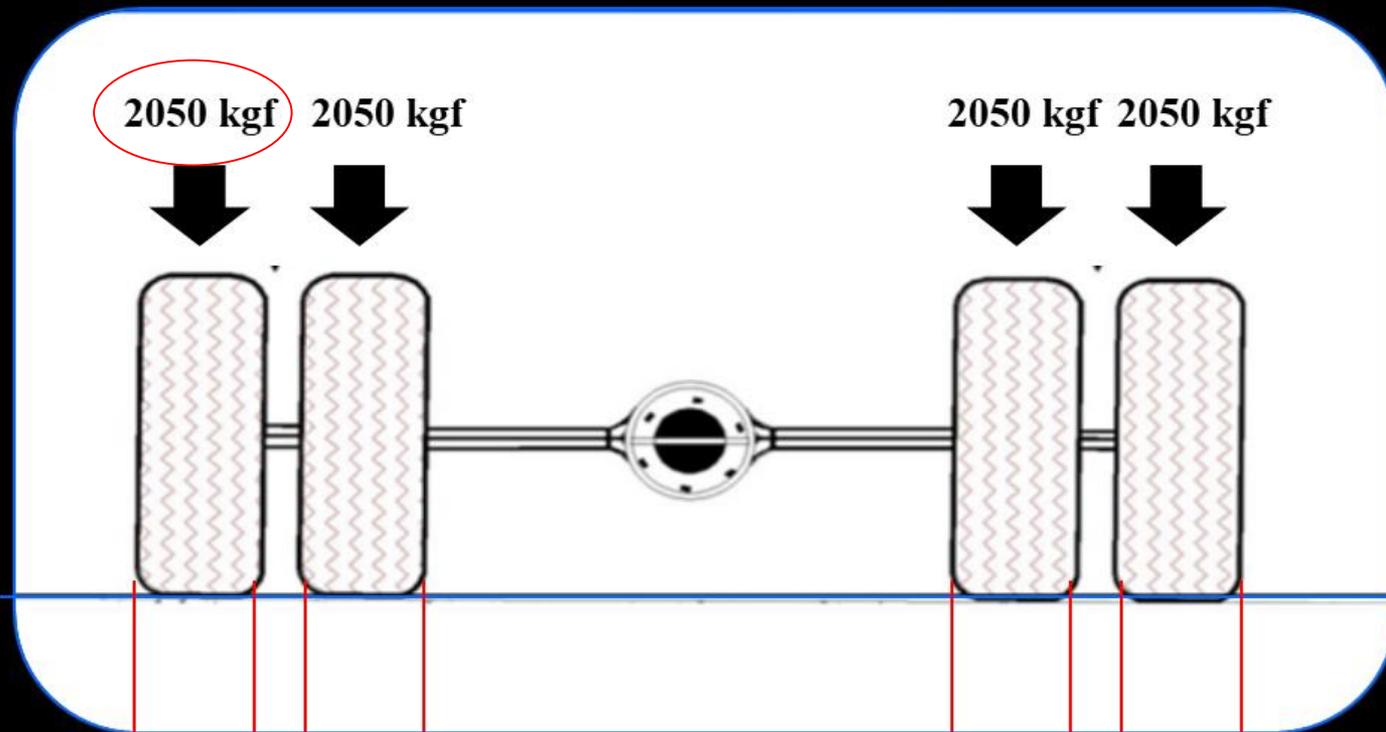
**m = massa; g = aceleração da gravidade; h = altura de queda e  
k = constante de mola do sistema de amortecedores**

# STRATA: 4 FWD

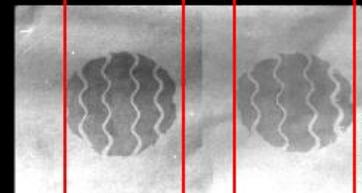
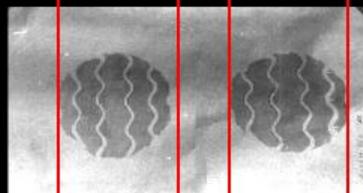


# COMPARAÇÃO ENTRE AS CONDIÇÕES DE CARREGAMENTO

# CONTATO EXERCICIDO POR UM EIXO DE RODAS GÊMEAS DE UM CAMINHÃO



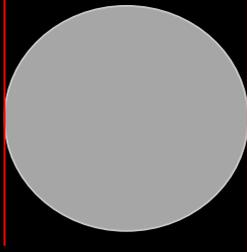
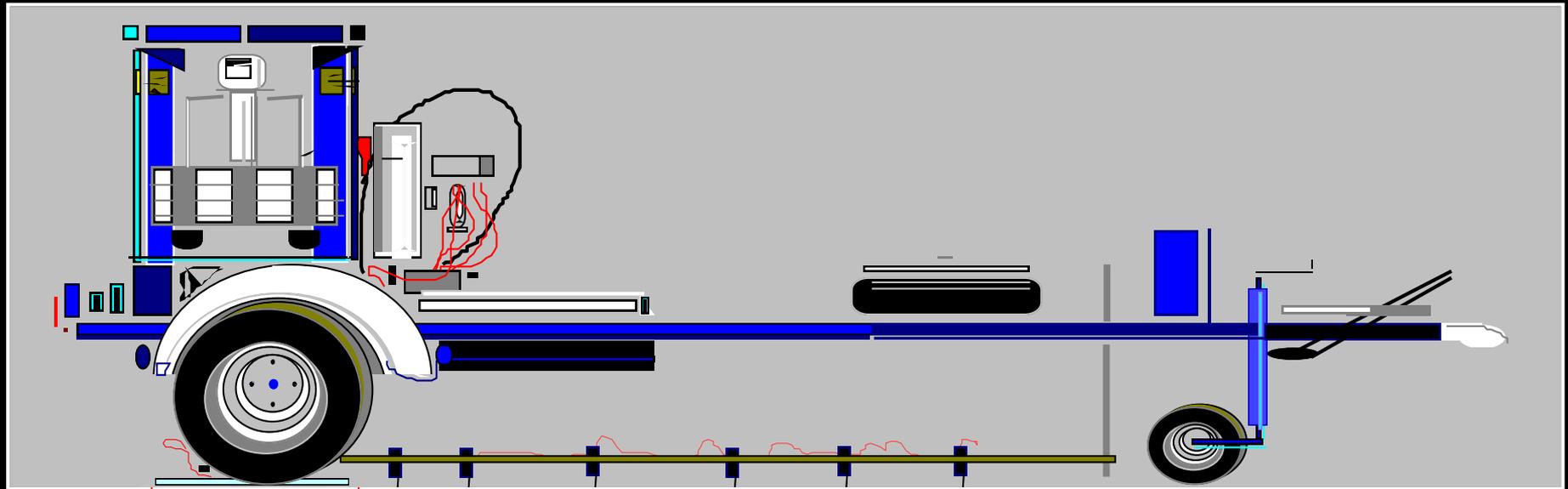
**IMPRESSÕES DE CONTATO** →



$\Phi = 21,6 \text{ cm}$

$\sigma = 5,6 \text{ kgf/cm}^2$

# CONTATO EXERCICIDO PELO FWD



Carga = 4.100 kgf

IMPRESSÃO  
DE CONTATO

????



$$\phi = 30,5 \text{ cm}$$



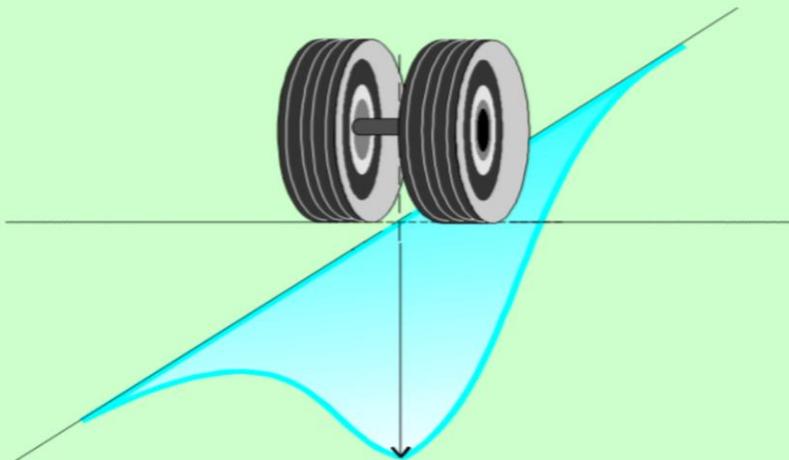
$$\sigma = 5,6 \text{ kgf/cm}^2$$

# PROPOSIÇÃO BÁSICA

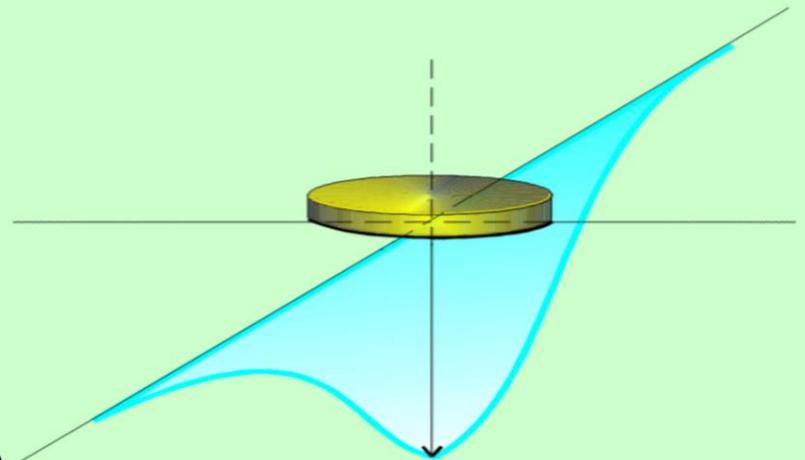


## LINHAS DE INFLUÊNCIA / DISTRIBUIÇÃO DAS CARGAS CAMINHÃO (SEMI-EIXO SIMPLES) X FWD

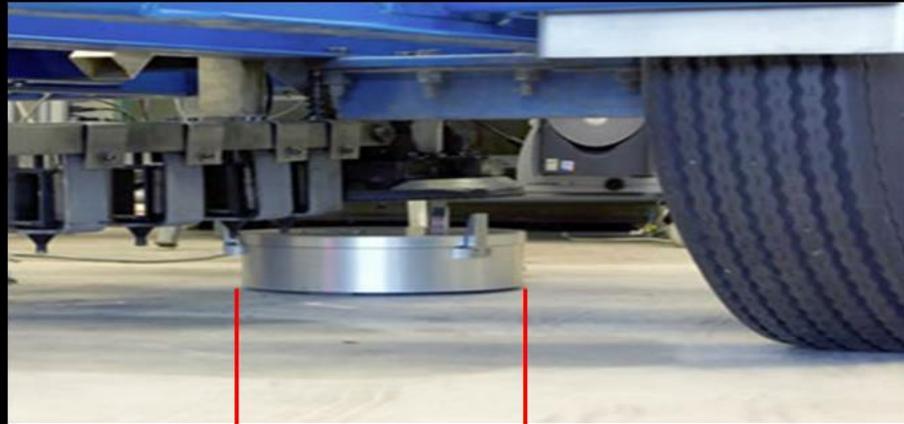
2.050 kgf  
2.050 kgf  
 $r = 10,6 \text{ cm}$   
 $\sigma_c = 5,6 \text{ kgf/cm}^2$



4.100 kgf  
 $r = 15,25 \text{ cm}$   
 $\sigma_c = 5,6 \text{ kgf/cm}^2$

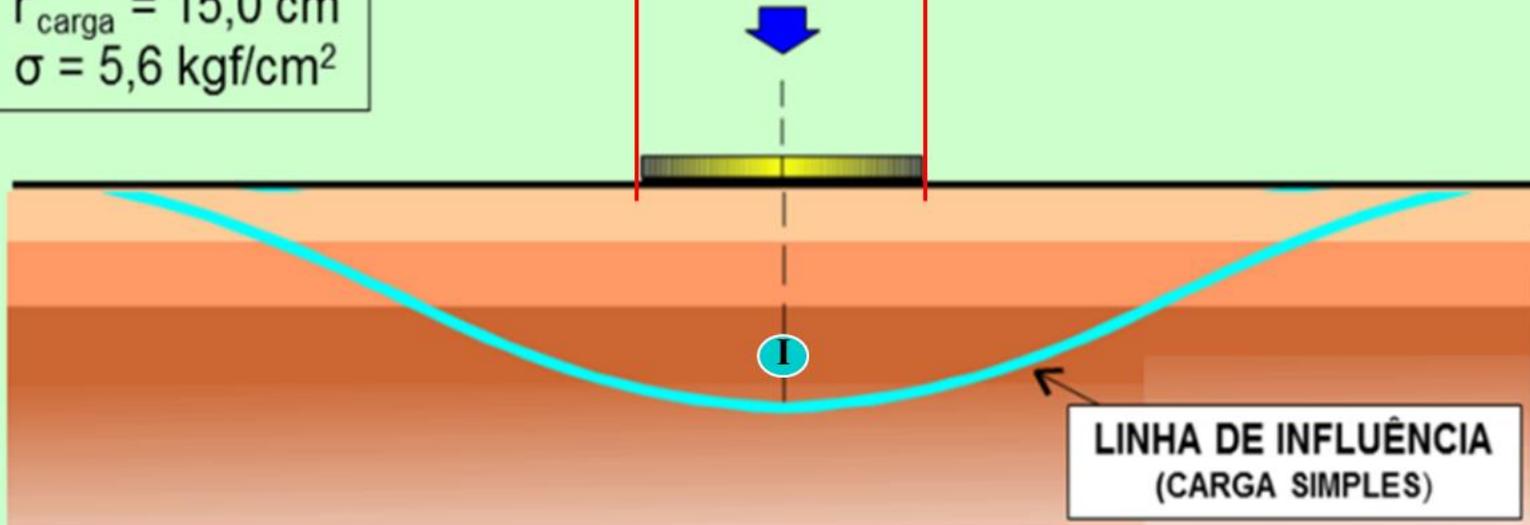


# LINHA DE INFLUÊNCIA DECORRENTE DA APLICAÇÃO DE UMA CARGA ÚNICA

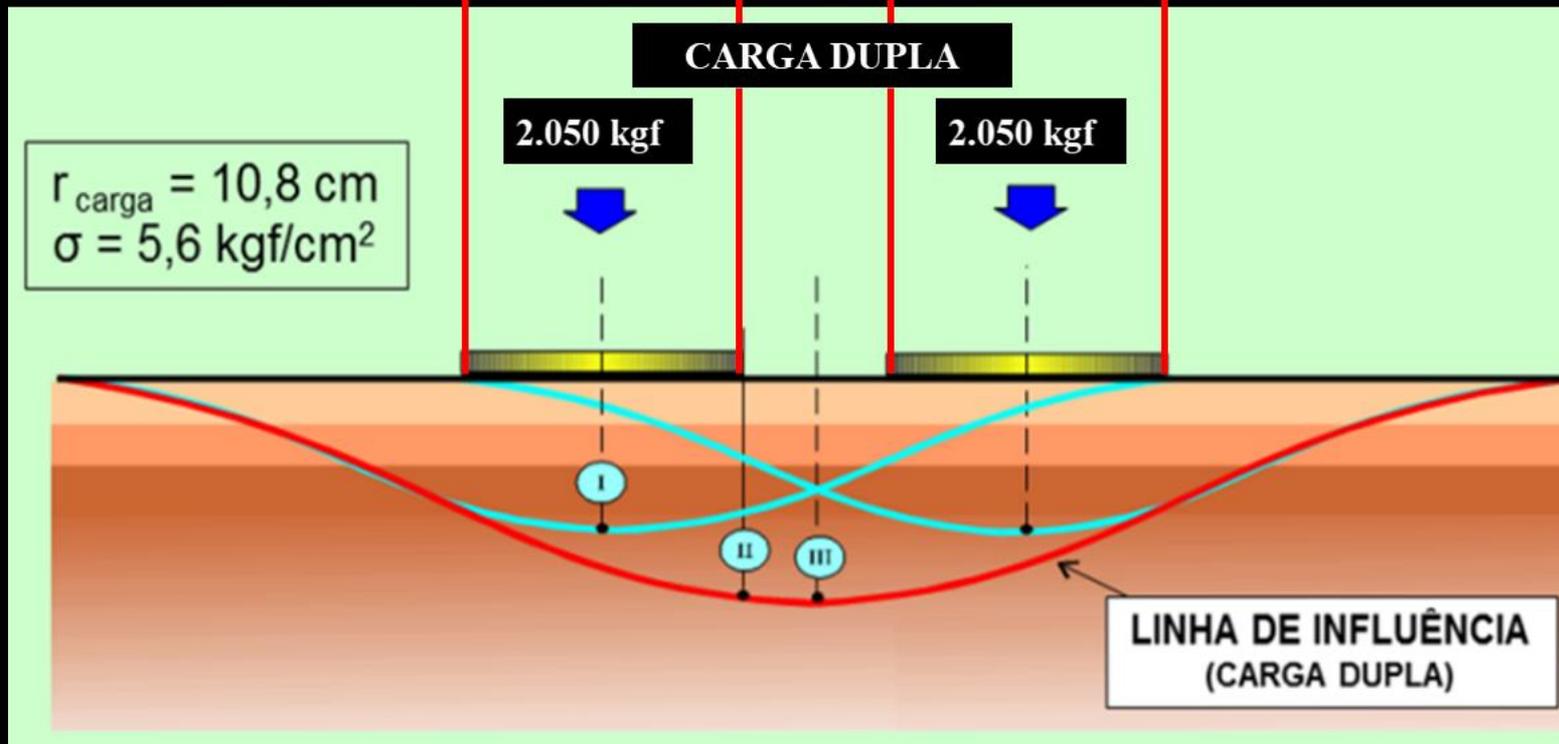


**CARGA ÚNICA: 4.100 kgf**

$r_{\text{carga}} = 15,0 \text{ cm}$   
 $\sigma = 5,6 \text{ kgf/cm}^2$



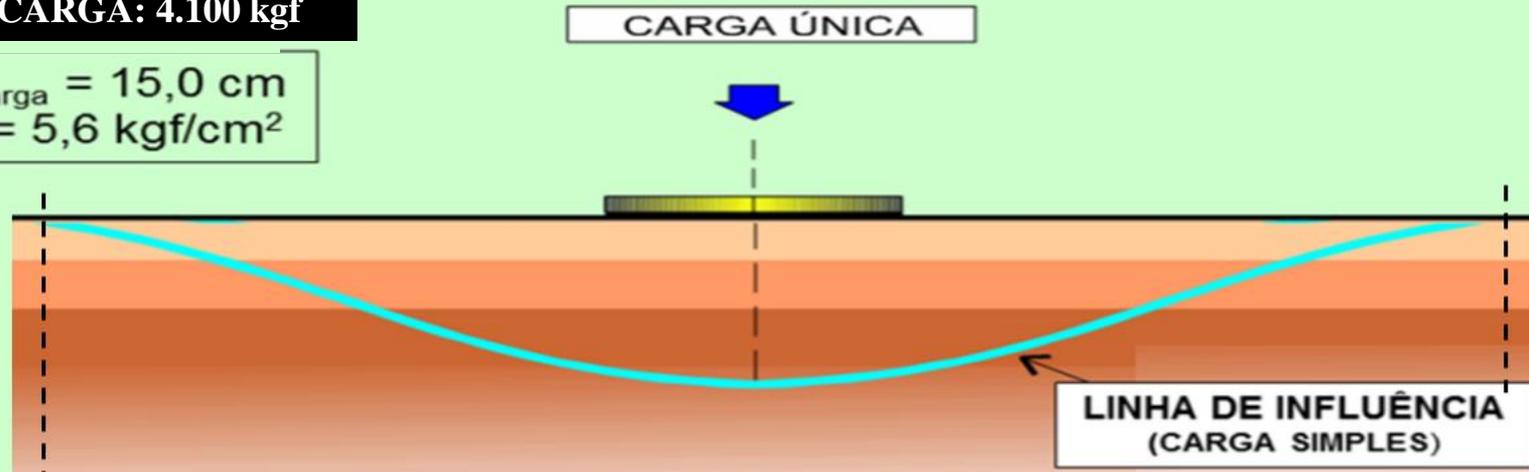
# LINHA DE INFLUÊNCIA DECORRENTE DA APLICAÇÃO DE UMA CARGA DUPLA



# COTEJAMENTO ENTRE AS LINHAS DE INFLUÊNCIA DECORRENTE DA APLICAÇÃO DE CARGA ÚNICA (FWD) E CARGA DUPLA (CURVIÂMETRO)

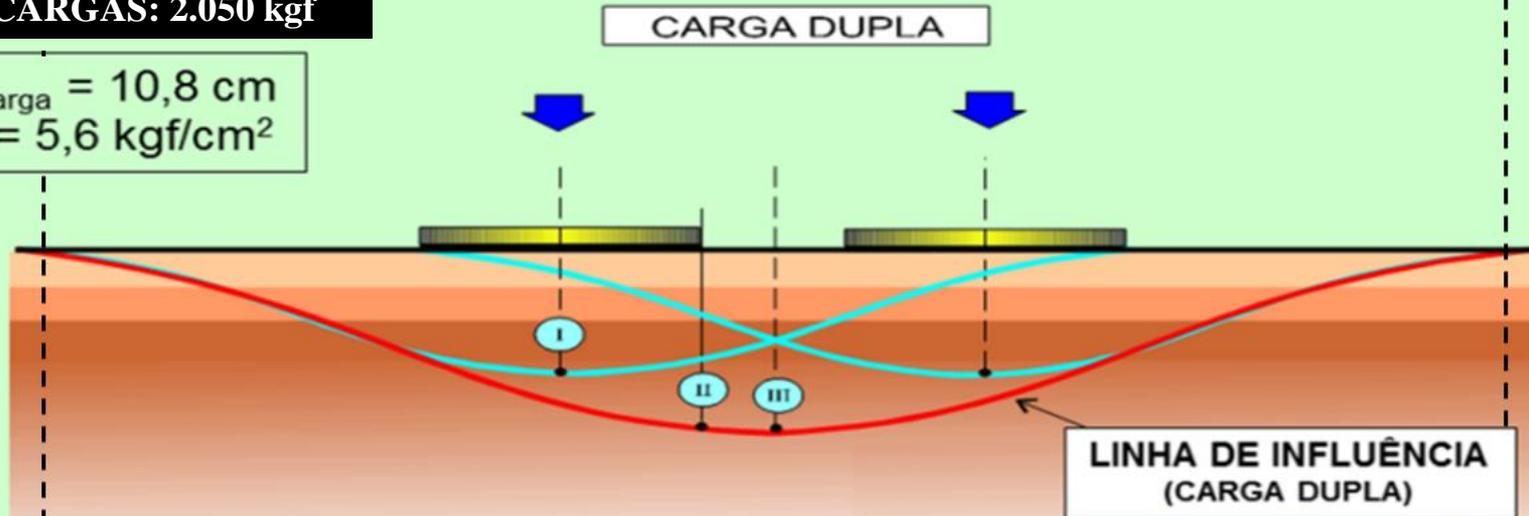
01 CARGA: 4.100 kgf

$$r_{\text{carga}} = 15,0 \text{ cm}$$
$$\sigma = 5,6 \text{ kgf/cm}^2$$



02 CARGAS: 2.050 kgf

$$r_{\text{carga}} = 10,8 \text{ cm}$$
$$\sigma = 5,6 \text{ kgf/cm}^2$$



**LINHA DE INFLUÊNCIA OBTIDA COM O FWD**  
(ensaio dinâmico)



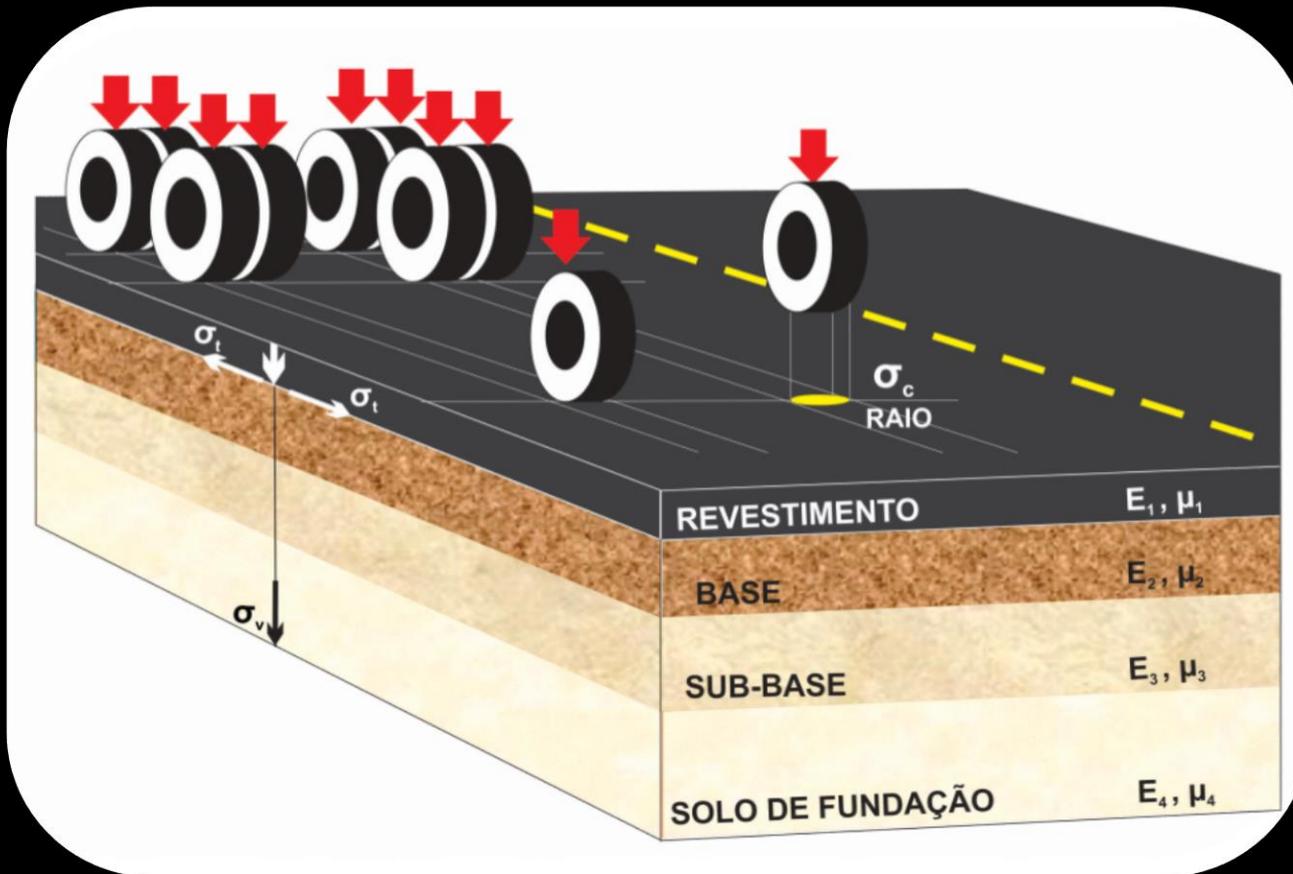
**RETROANÁLISE**



CARREGAMENTO **ESTÁTICO** COM CARGA ÚNICA  
CARREGAMENTO **ESTÁTICO** COM CARGA DUPLA

# PROGRAMAS DE CÁLCULO MECANÍSTICOS

## CARGAS ESTÁTICAS aplicadas na estrutura (até 10 cargas)

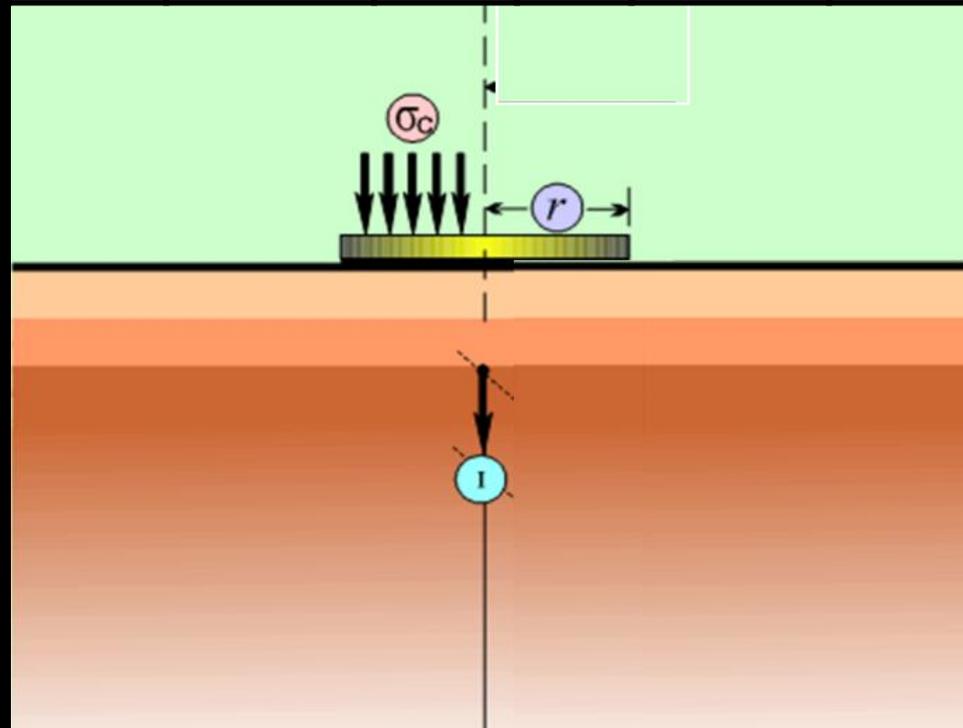


**Elsym5**  
**Everstress**  
**Bistro**  
**Alizé 3**  
**MeDiNa**  
**etc.**

Faz-se o ensaio com carga única e, para “valorizar” a “precisão dos cálculos”, consideram até 10 cargas

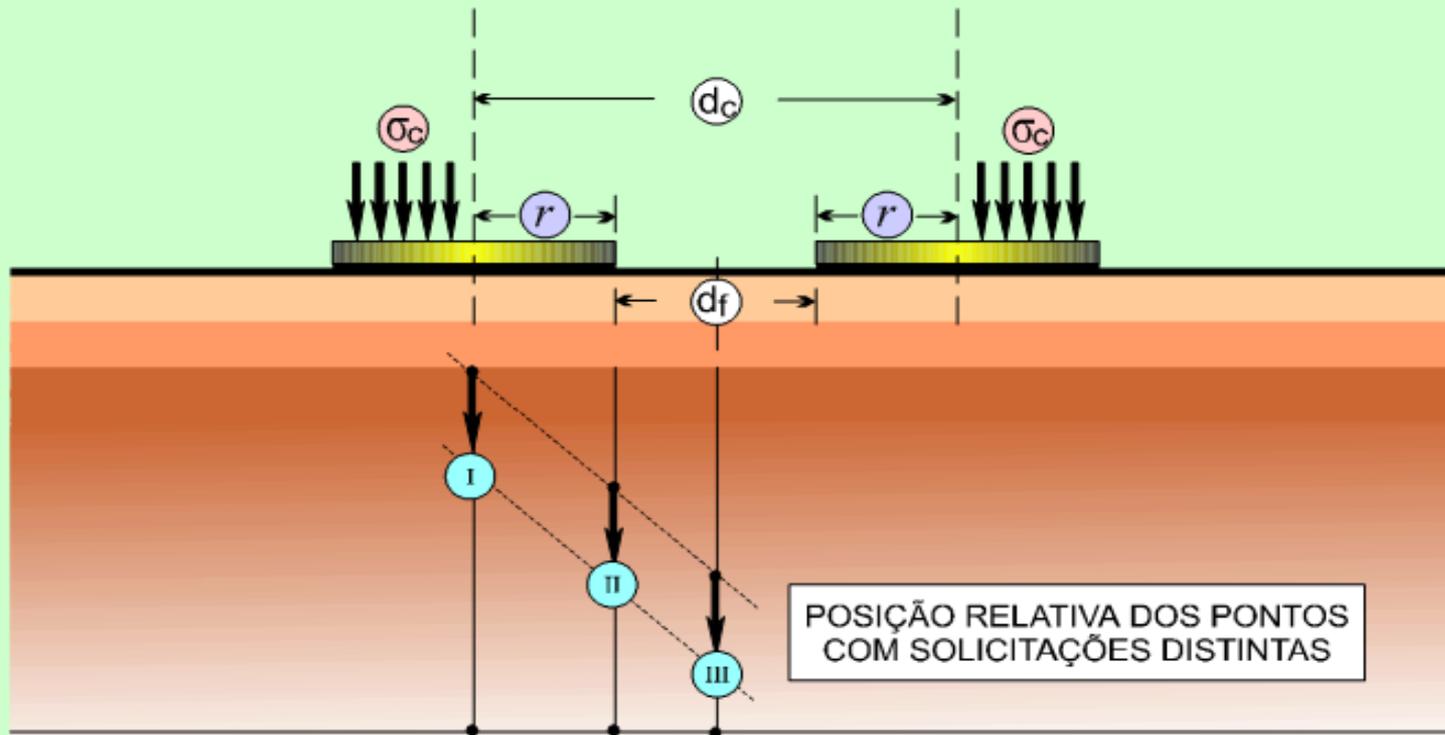
# CONDIÇÕES DE SOLICITAÇÃO (Carga Simples - FWD)

CARGA REPRESENTATIVA (SEMIEIXO PADRÃO) W		RAIO DAS ÁREAS DE CONTATO r		PRESSÃO DE CONTATO $\sigma_c = \frac{P}{\pi r^2}$	
kgf	lb	cm	In	kgf/cm <sup>2</sup>	lb/in <sup>2</sup>
4082,3	9.000	30,48	12"	5,595	79,58



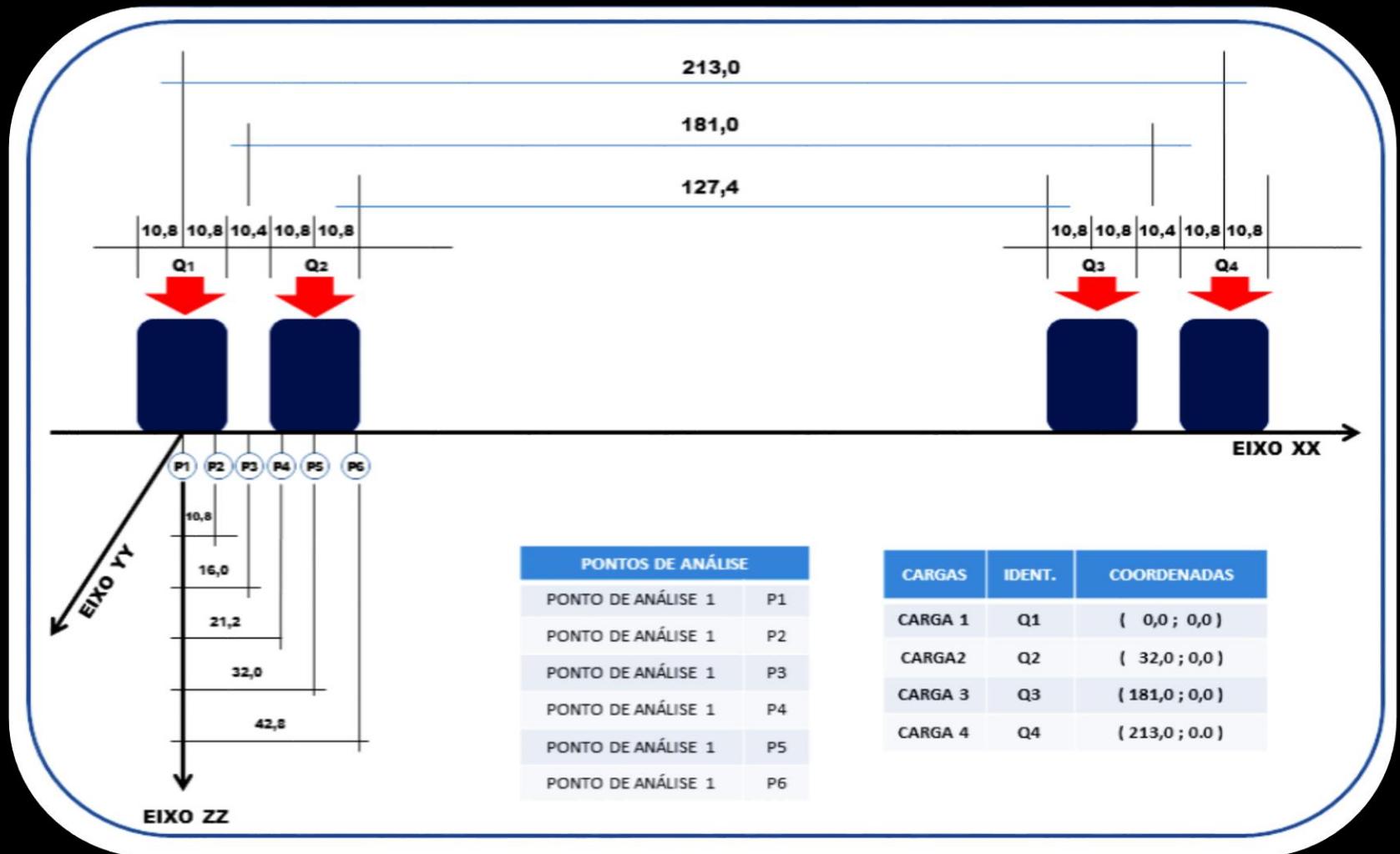
# CONDIÇÕES DE SOLICITAÇÃO (Cargas Gêmeas - Curviâmetro)

CARGA POR EIXO $W$		CARGA POR RODA $P = \frac{W}{4}$		RAIO DAS ÁREAS DE CONTATO $r$		DISTÂNCIA ENTRE OS FLANCOS DOS PNEUS $d_f$		DISTÂNCIA ENTRE OS CENTROS DE APLICAÇÃO DE CARGAS $d_c$		PRESSÃO DE CONTATO $\sigma_c = \frac{P}{\pi r^2}$	
kgf	lb	kgf	lb	cm	in	cm	in	cm	in	kgf/cm <sup>2</sup>	lb/in <sup>2</sup>
4082,3	9.000	2041,2	4500	10,8	4,26	10,4	4,094	32,0	12,6	5,570	79,22



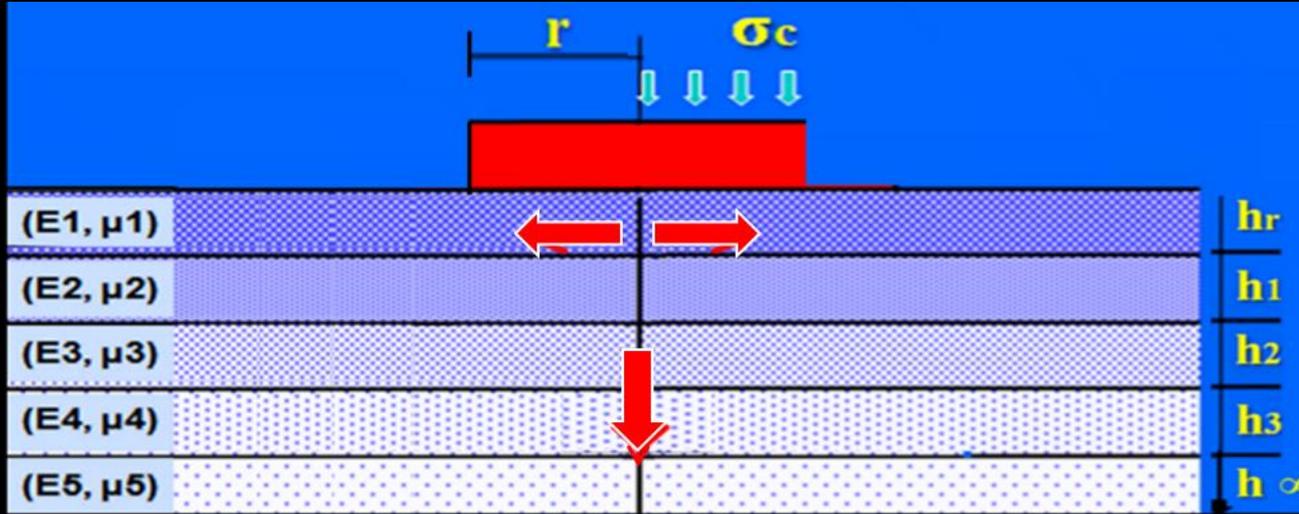
# PROCEDIMENTO STRATA

(Consideração dos esforços desenvolvidos sob as cargas e entre as cargas gêmeas)

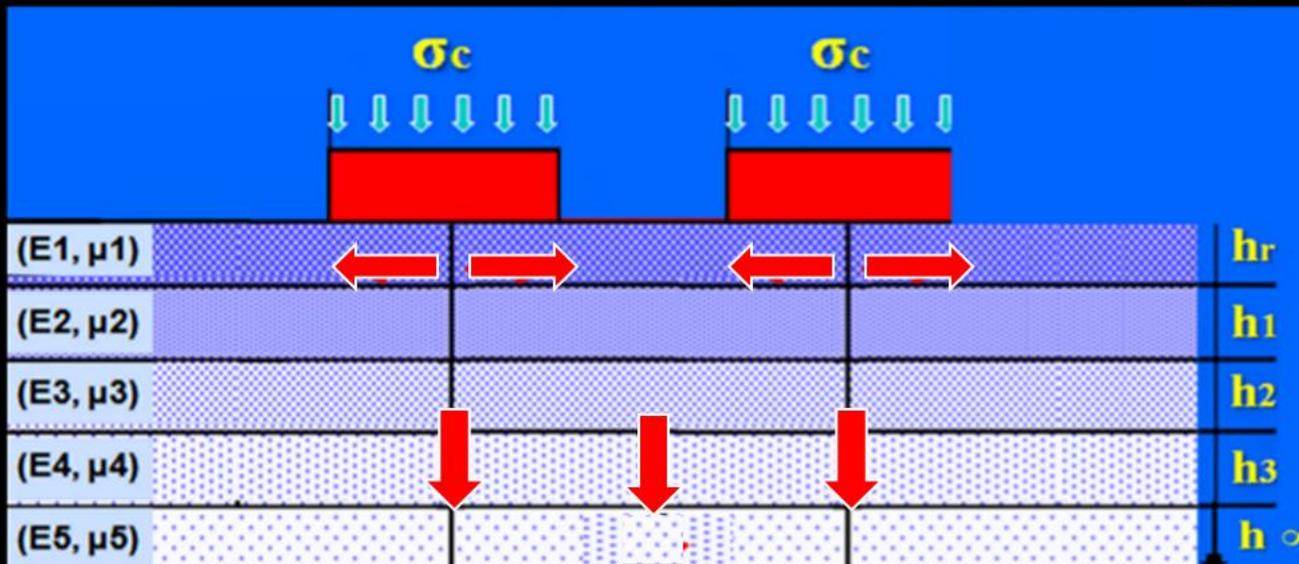


Carregamento duplo

# Em tese...



**CARGA  
ESTÁTICA  
ÚNICA**



**CARGA  
ESTÁTICA  
DUPLA**

**E aí, vem um sonho!!!!!!**

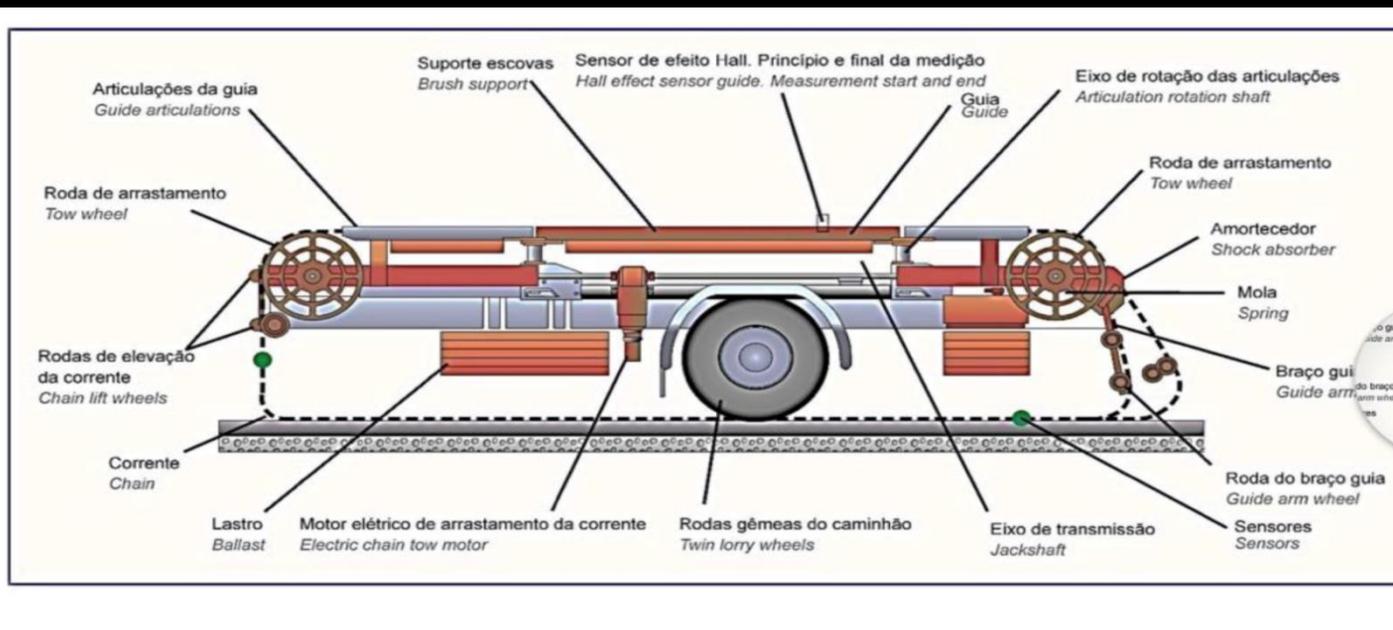
# CURVIÂMETRO (Vídeo)



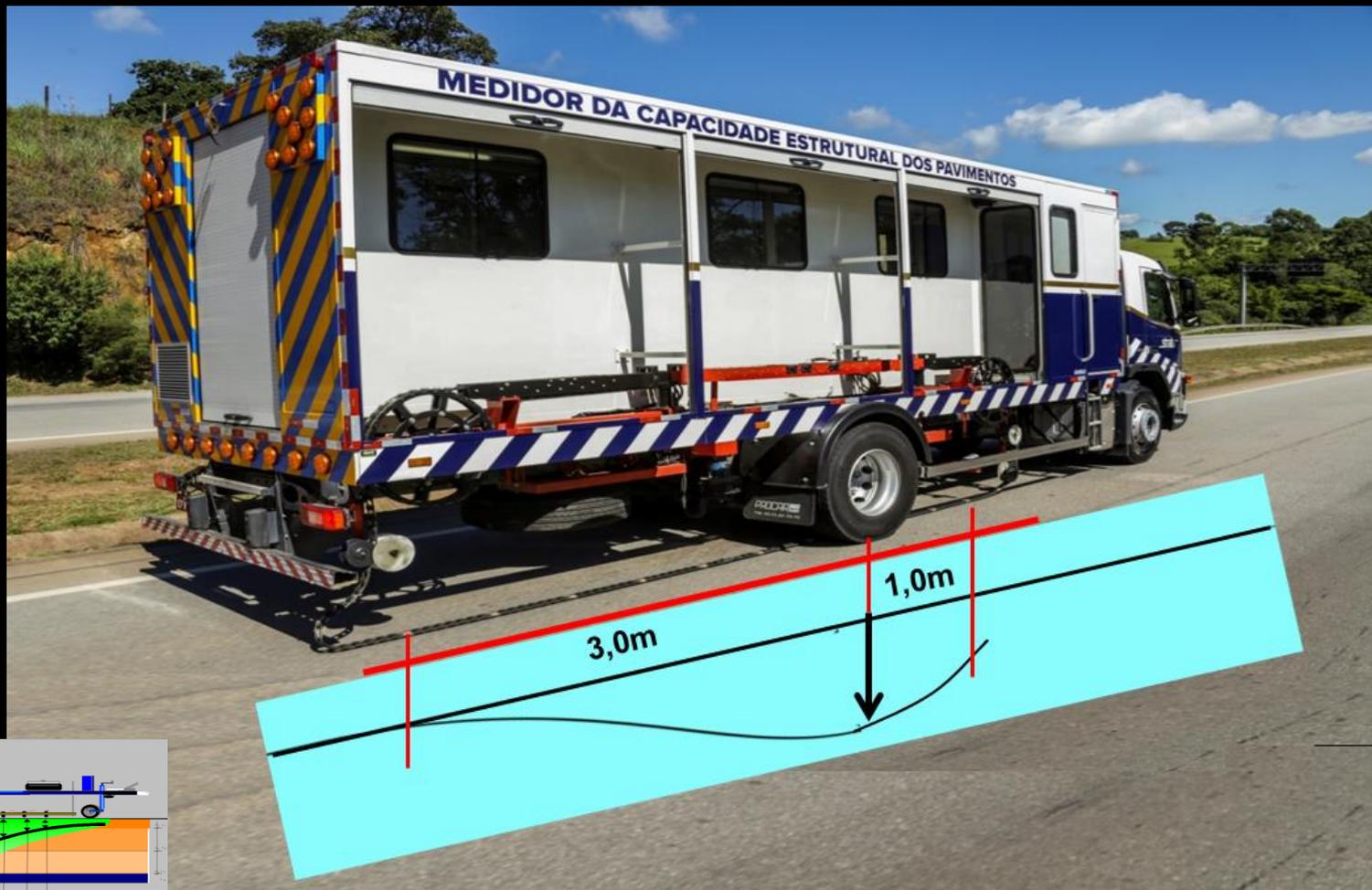
# CURVIÂMETRO



***NORMA DNIT 170/2016 – PRO – Determinação de deflexões utilizando o Curviâmetro***  
***NORMA DNIT 171/2016 – PRO – Calibração dos sensores do deflectógrafo Curviâmetro***



# CURVIÂMETRO



**DEFINIÇÃO DA LINHA DE INFLUÊNCIA = 4,0 m**

**400 LEITURAS**

1,0 m  
3,0 m



**NO RAMO DE CARGA  
NO RAMO DE DESCARGA**

**01 linha de influência a cada 5,0 m ; 01 linha de influência / Seg.**

# ENSAIO COM O CURVIÂMETRO

*(Corpo em movimento retilíneo sobre pneumáticos)*

$$ET = EP \text{ (energia potencial)} + EC \text{ (energia cinética)}$$

A energia cinética está intrinsicamente ligada ao valor da massa do corpo e à velocidade de seu movimento, neste caso, movimento harmônico.

**Equação matricial da estrutural representativa:**

$$F(t) = [M]\{\ddot{u}\} + [D]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} \text{ (Carga dinâmica)}$$

[M] = matriz massa

[D] = matriz amortecimento

[K] = matriz rigidez

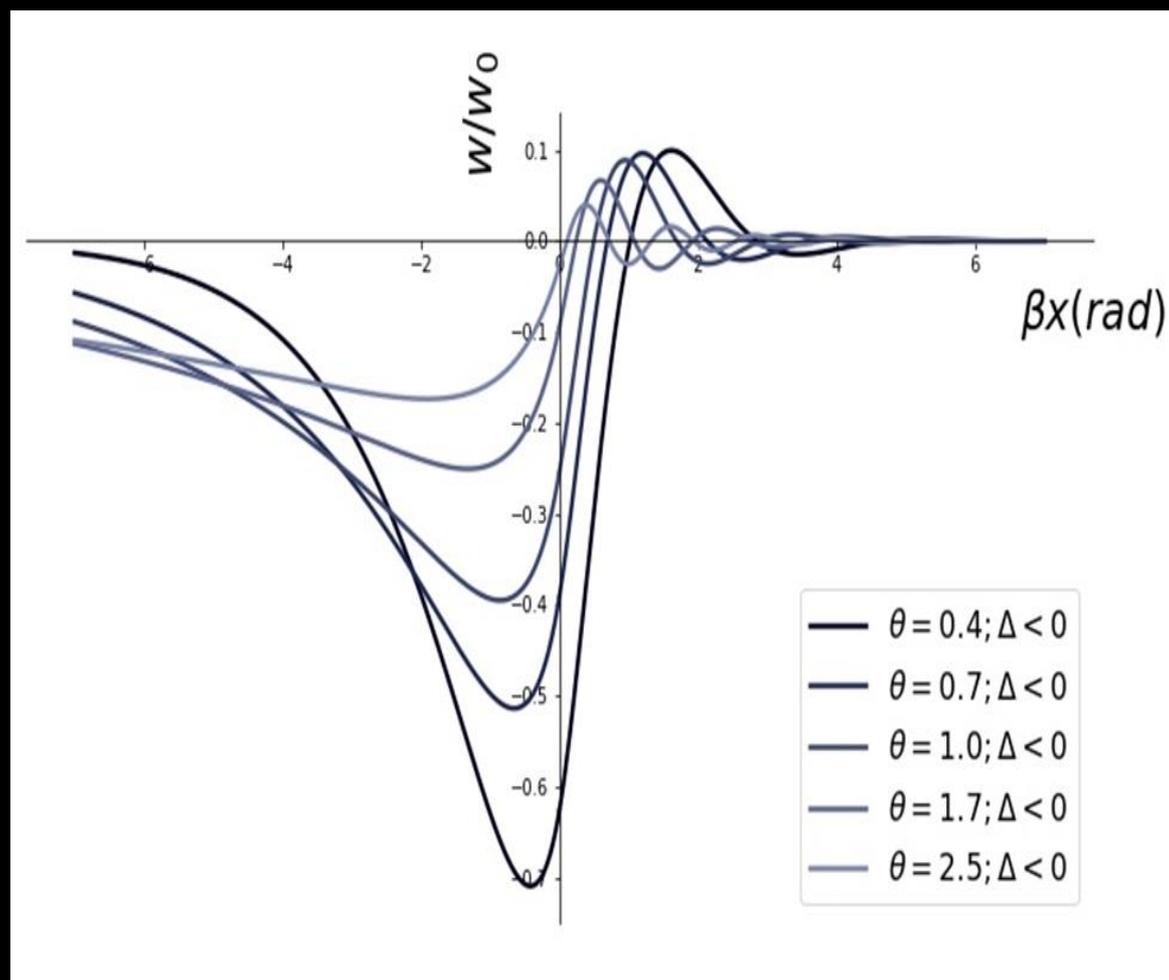
{ $\ddot{u}$ } = vetor aceleração

{ $\dot{u}$ } = vetor velocidade

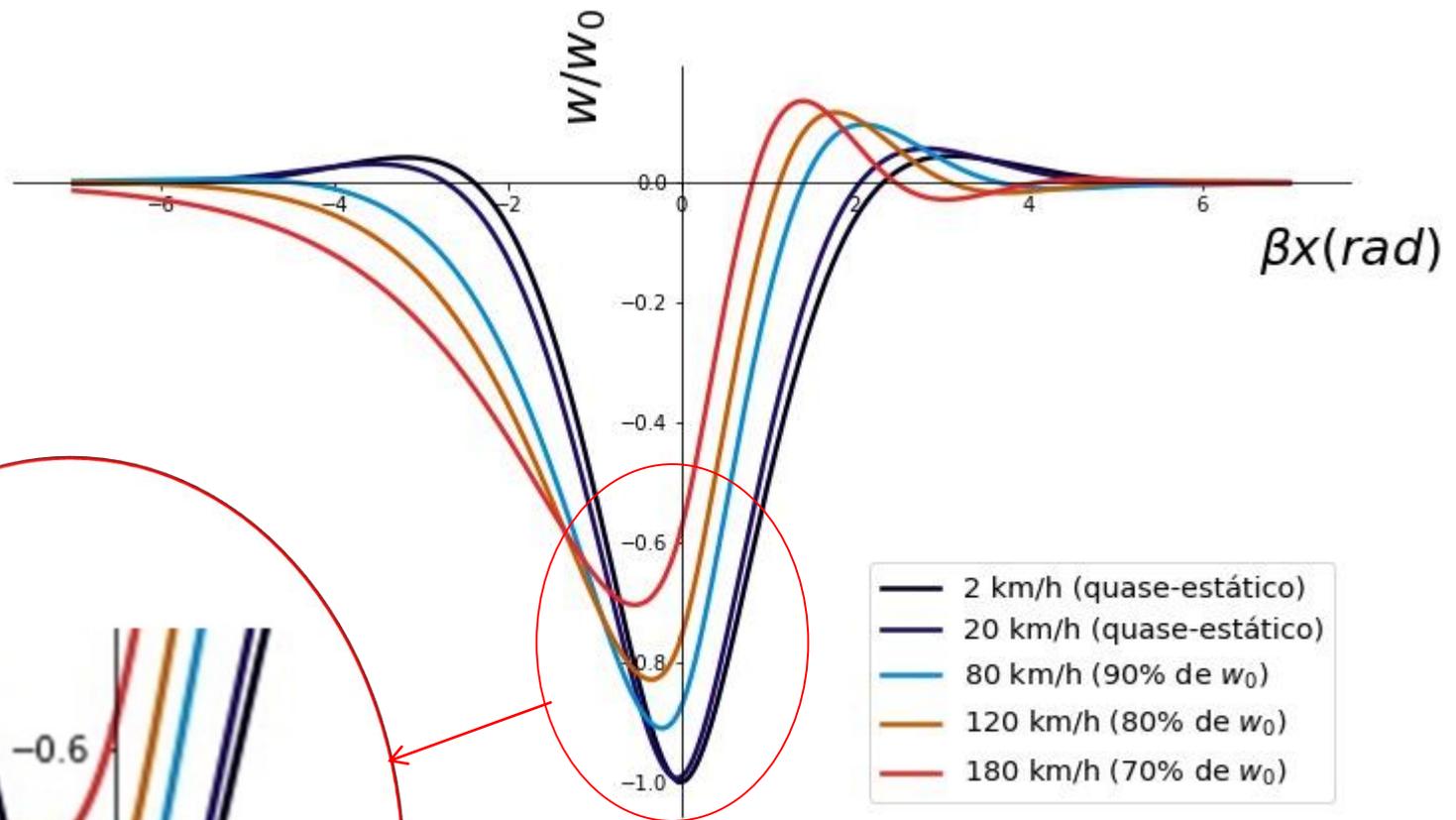
{u} = vetor deslocamento

# ANALISE MATEMÁTICA DO COMPORTAMENTO DINÂMICO DE PAVIMENTOS SUJEITOS A CARGAS EM MOVIMENTO LONGITUDINAL

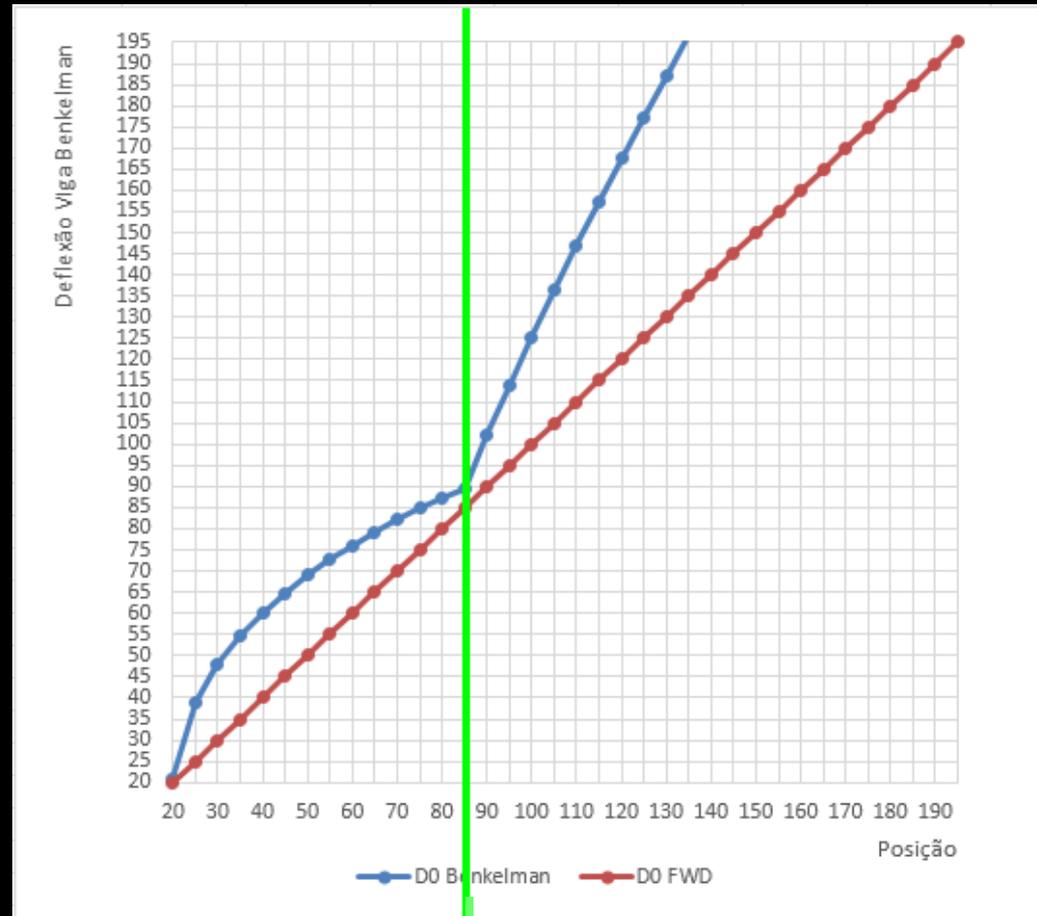
Comportamento geral dos deslocamentos verticais à superfície do pavimento considerando distintas velocidades de deslocamento (sob condições características de amortecimento do subleito)



<b>V (Km/h)</b>	<b>26.84</b>	<b>67.11</b>	<b>107.37</b>	<b>147.64</b>	<b>187.90</b>
<b><math>\theta</math> (<math>V/V_{cr}</math>)</b>	<b>0.10</b>	<b>0.25</b>	<b>0.40</b>	<b>0.55</b>	<b>0.70</b>



# CORREÇÃO DAS DEFLEXÕES MEDIDAS COM O FWD PARA A VIGA BEMKELMAN



**Deflexão ( $D_{FWD}$ )  
>  $85 \times 10^{-2}$  mm:**

$$D_B = 20,645(D_{FWD} - 19)^{0,351}$$

**Deflexão ( $D_{FWD}$ )  
>  $85 \times 10^{-2}$  mm:**

$$D_B = 8,964(D_{FWD} - 60)^{0,715}$$

# QUESTIONAMENTO PRINCIPAL



Critério de medição das deflexões  
reversíveis para aplicação dos  
métodos de dimensionamento???

# Métodos de dimensionamento Oficiais do DNIT



e também de outros  
métodos empíricos – experimentais  
(exemplo: MeDiNa)

***DNER-PRO 159-85***

***DNER-PRO 264-94***

***PESQUISA BANCO MUNDIAL***

***1976 – 1982***

***GEIPOT***

***RONALD HUDSON – JAIR LAGE***

***ALEX VISSER – W. PATTERSON – CESAR QUEIROZ***

# ***EQUIPE HDM-III***



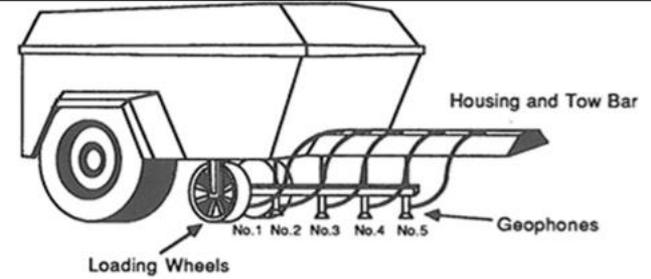
# DYNAFLECT



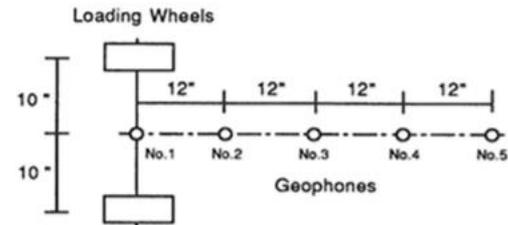
1977



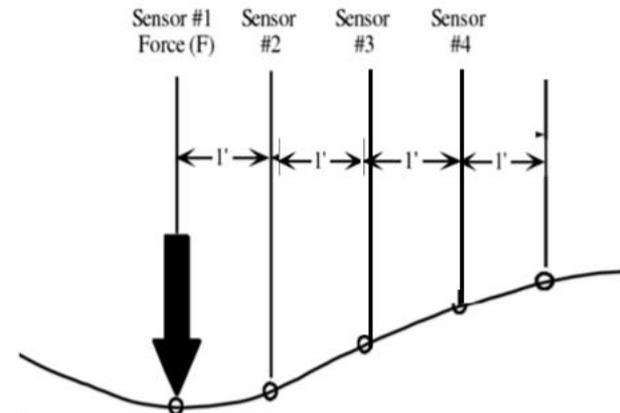
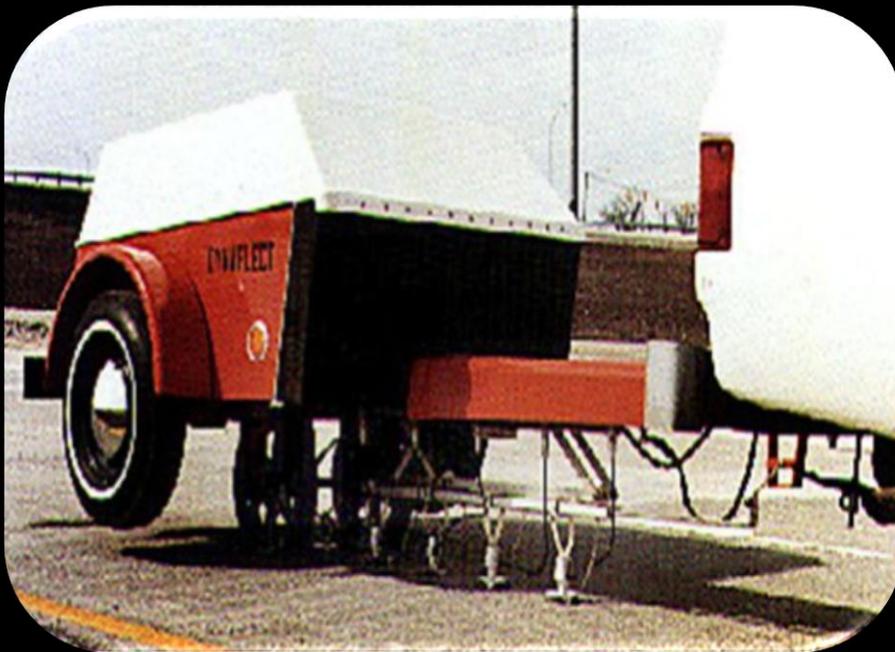
# DYNAFLECT



(a) The Dynaflect with Load Wheels in the Test Position



(b) Configuration of Dynaflect Load Wheels and Geophones

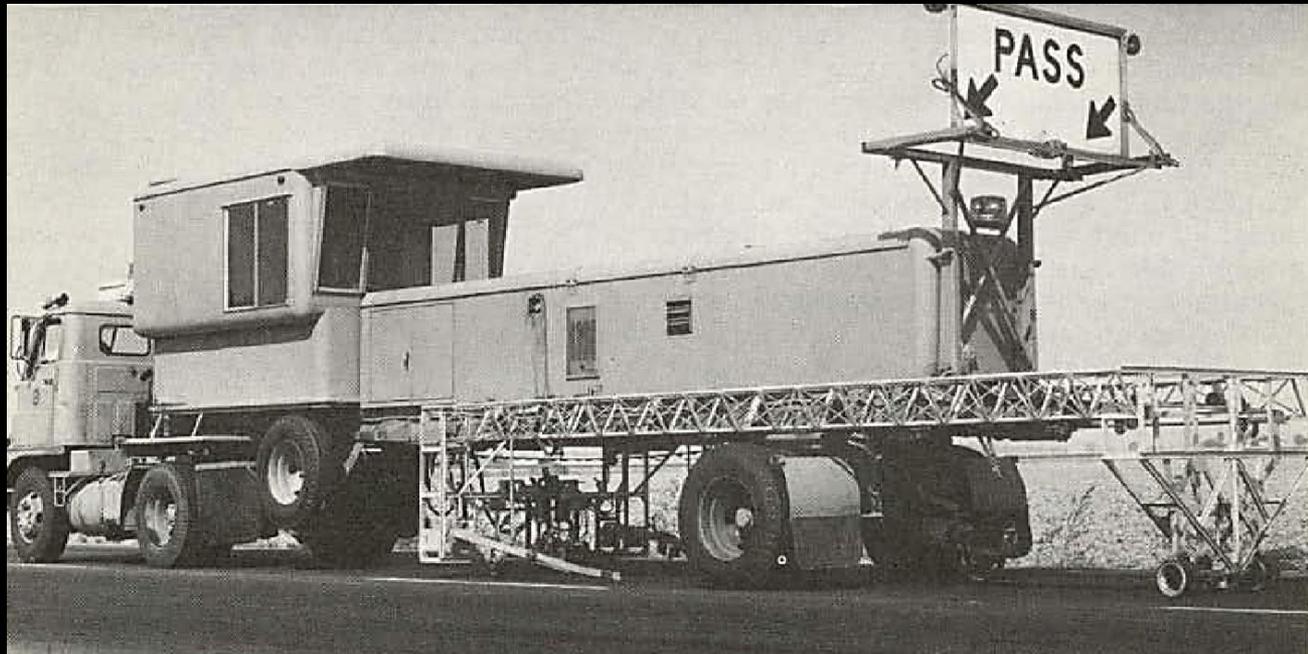


***DNER-PRO 10-79***

# ORIGEM DO PRO-10/79

## CALIFORNIA DIVISION OF HIGHWAY

“In 1954 the California Division of Highways began using the Benkelman beam, which greatly simplified the task of measuring pavement deflections under wheel loadings. An automatic deflection measuring device known as the *California Traveling Deflectometer* was later developed by the Materials and Research Department and put into operation in 1960. A newer version was introduced in 1967 and is shown in Figure 1.”



# TRAVELLING DEFLECTOMETER

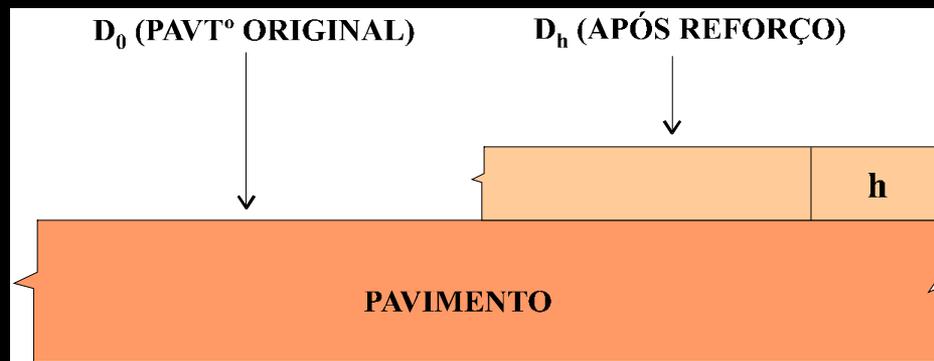


***DNER-PRO 11-79***

# ORIGEM DO PRO 11/79

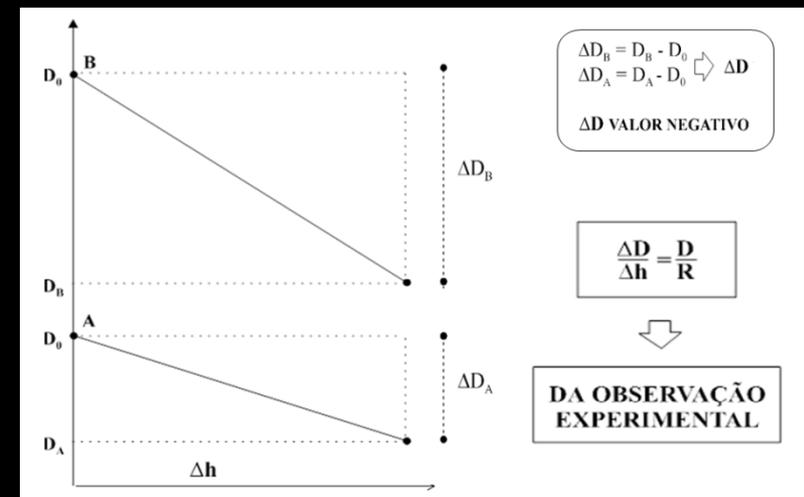
## ENGENHEIRO CELESTINO RUIZ

### EXPERIMENTAÇÕES DE CAMPO



### CONSTATAÇÃO BÁSICA

**“QUANTO MENOR A DEFLEXÃO VIGENTE NO PAVIMENTO ORIGINAL, TANTO MENOR É A CONTRIBUIÇÃO ESTRUTURAL QUE SE APORTA AO PAVIMENTO PELA SOBREPOSIÇÃO DE UMA CAMADA DE REFORÇO”**



$$\ln \frac{D_0}{D} = \frac{h}{R}$$



$$h = R \cdot \ln \frac{D_0}{D}$$

EXPRESSÃO DA FÓRMULA EM TERMOS DE LOGARÍTMO DECIMAL:

$$RUIZ \Rightarrow h = \frac{R}{0,434} \times \log \frac{D_0}{D_h}$$

DOMÍNIO DE VARIAÇÃO DE R CONSTATADO



$$9 < R < 49$$

$$K = \frac{R}{0,434}$$



$$h = K \times \log \frac{d_0}{d_n}$$

DOMÍNIO DE VARIAÇÃO DE K CONSTATADO



$$21 < K < 113$$

VALOR ADOTADO PELO DNIT

$$K = 40$$

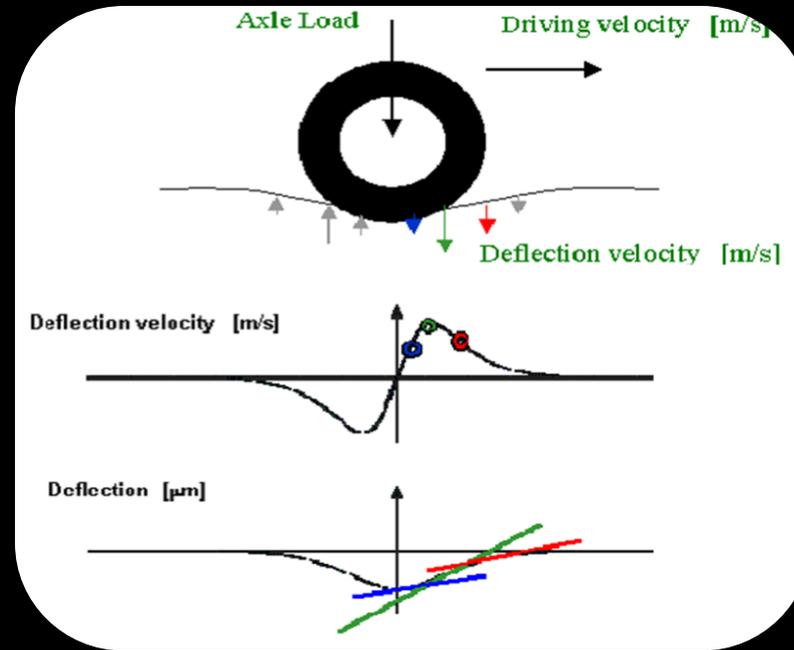
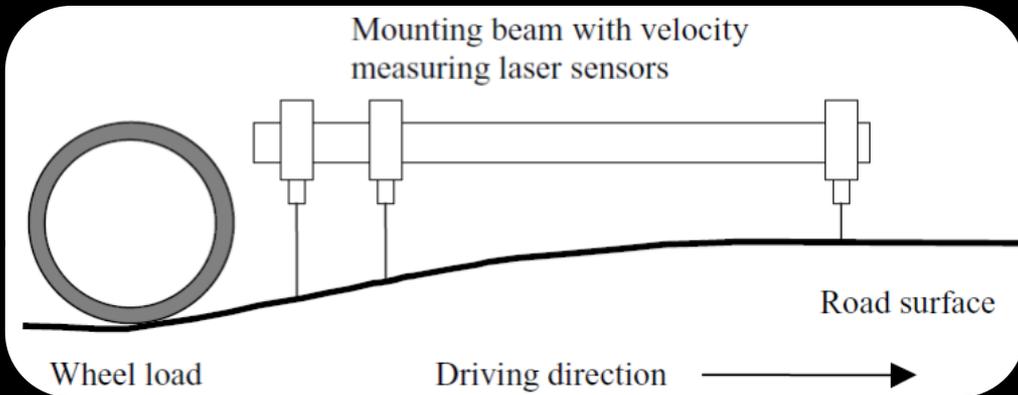
## **ALERTA DE RUIZ**

**“A redução de deflexão é atribuída somente à influência da camada de reforço, não se tendo considerado quaisquer outros fatores tais como as contribuições das demais camadas do pavimento , o estado de degradação, as condições do subleito, as variações de umidade, etc.”.**

**Mas se é para assustar ...**

**DEFLECTÓGRAFOS  
DE ÚLTIMA GERAÇÃO**

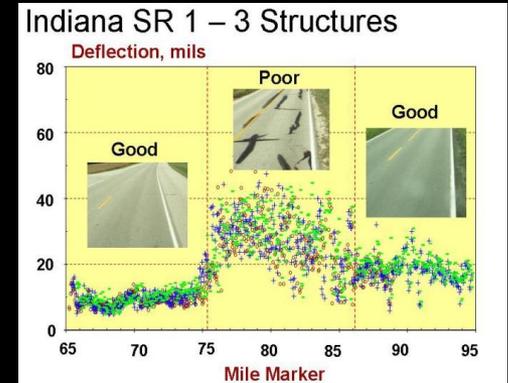
# TRAFFIC SPEED DEFLECTOMETER - TSD



# TSD – TRAFFIC SPEED DEFLECTOMETER



# HIGH SPEED DEFLECTOMETER - HSD

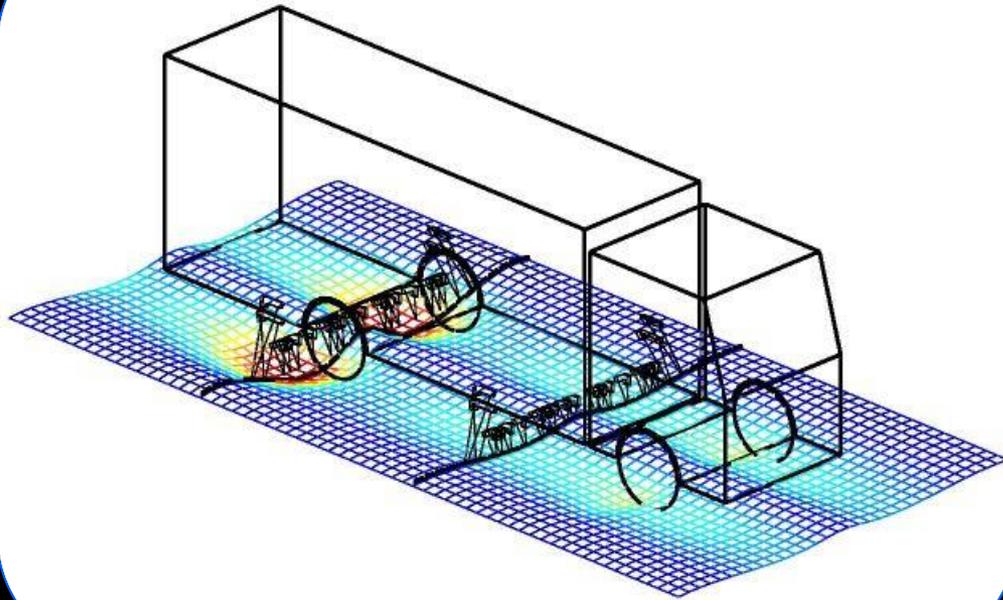


Unidades laser



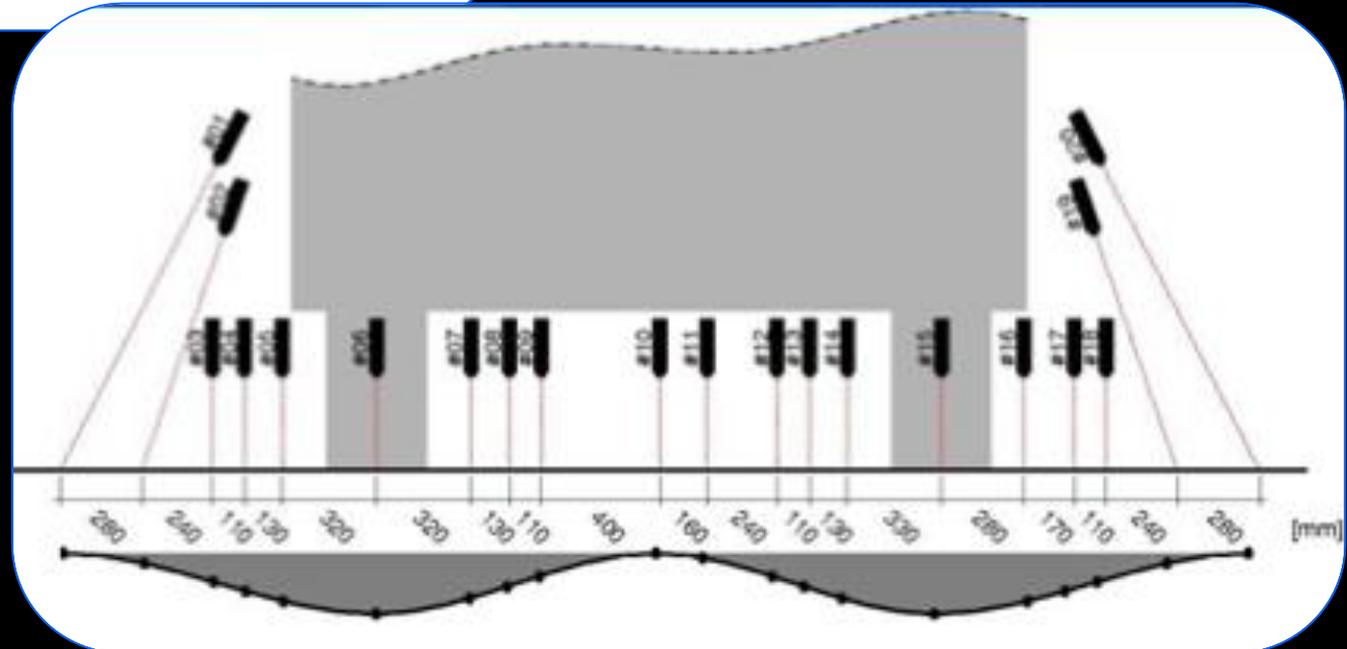
# ROAD DEFLECTION TESTER RDT (SWEDISH)



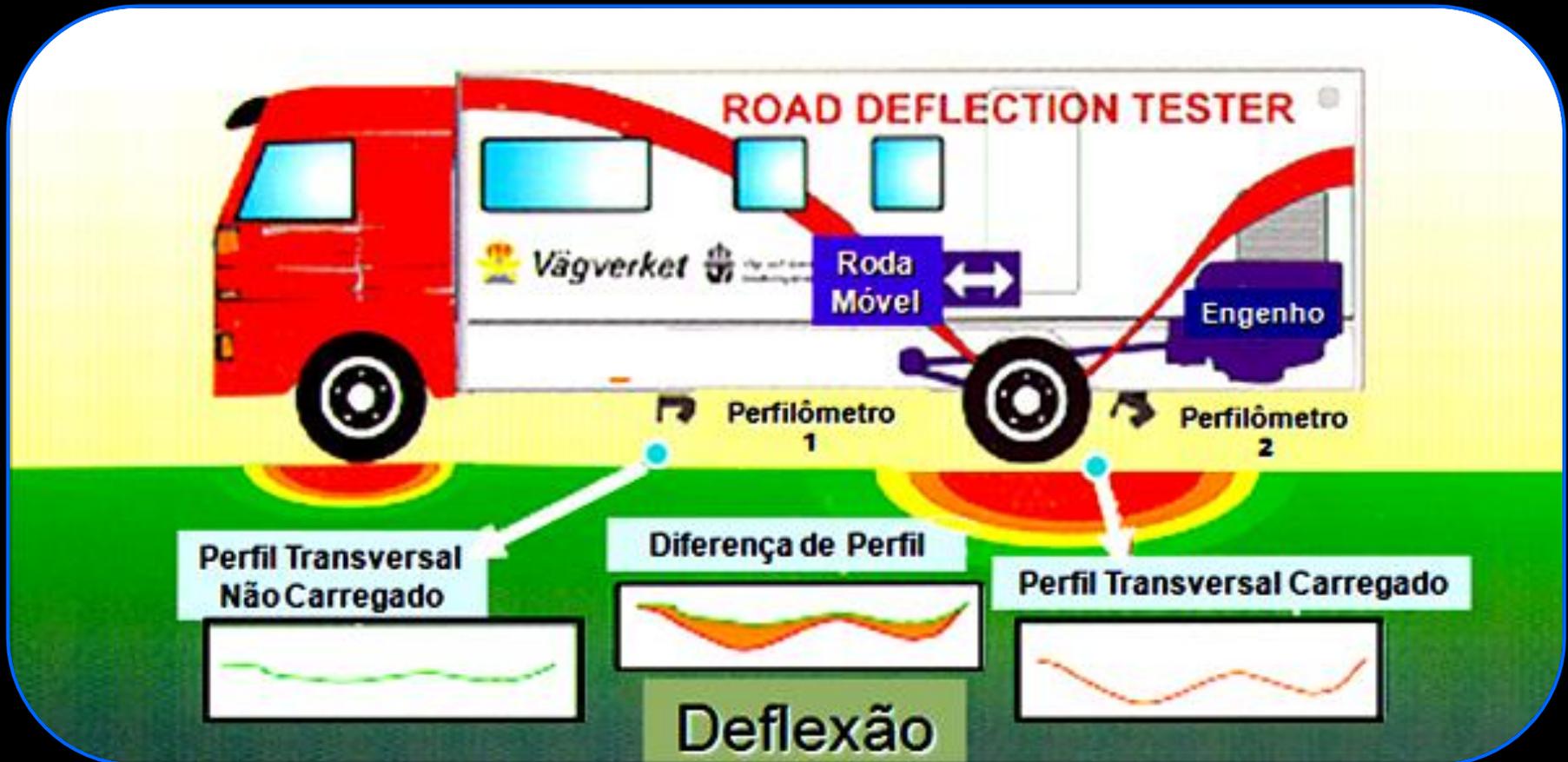


**Feixe de sensores  
a laser medem os perfis  
transversais (carregado  
e não carregado)  
da deflexão**

**20 LASERS  
TRANSVERSAIS**

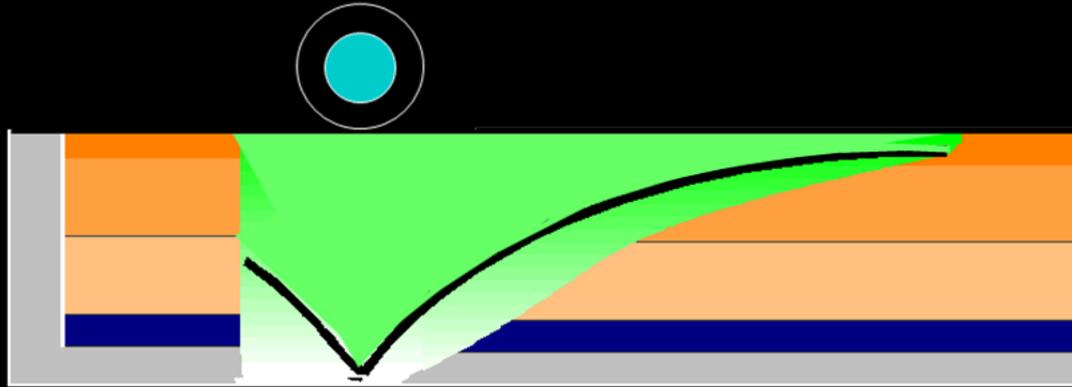


# ROAD DEFLECTION TESTER – RDT



Princípio : Comparação de perfis transversais

# RETROANÁLISE



Infinidade de linhas de influência



**TRABALHO MOROSO**  
(10 retroanálises / dia)

**strata**<sup>™</sup>  
E N G E N H A R I A





Os softwares de cálculo de pavimentos atuais se fundamentam na consideração apenas da parcela referente à **energia Potencial** através da matriz de rigidez dos materiais de cada camada, ou seja:

$$[K].\{u\} = \{F\}$$

O ideal é se considerar um modelo matemático que considera tanto a **energia Potencial** como a **energia Cinética**, traduzido pela equação diferencial geral de um corpo em movimento, ou seja:

$$[K].\{u\} + [D].\{\dot{u}\} + [M].\{\ddot{u}\} = \{F(t)\}$$

## **Premissa para o hoje**



**Modelos de elementos finitos aplicados a sistemas submetidos a carregamentos dinâmicos**

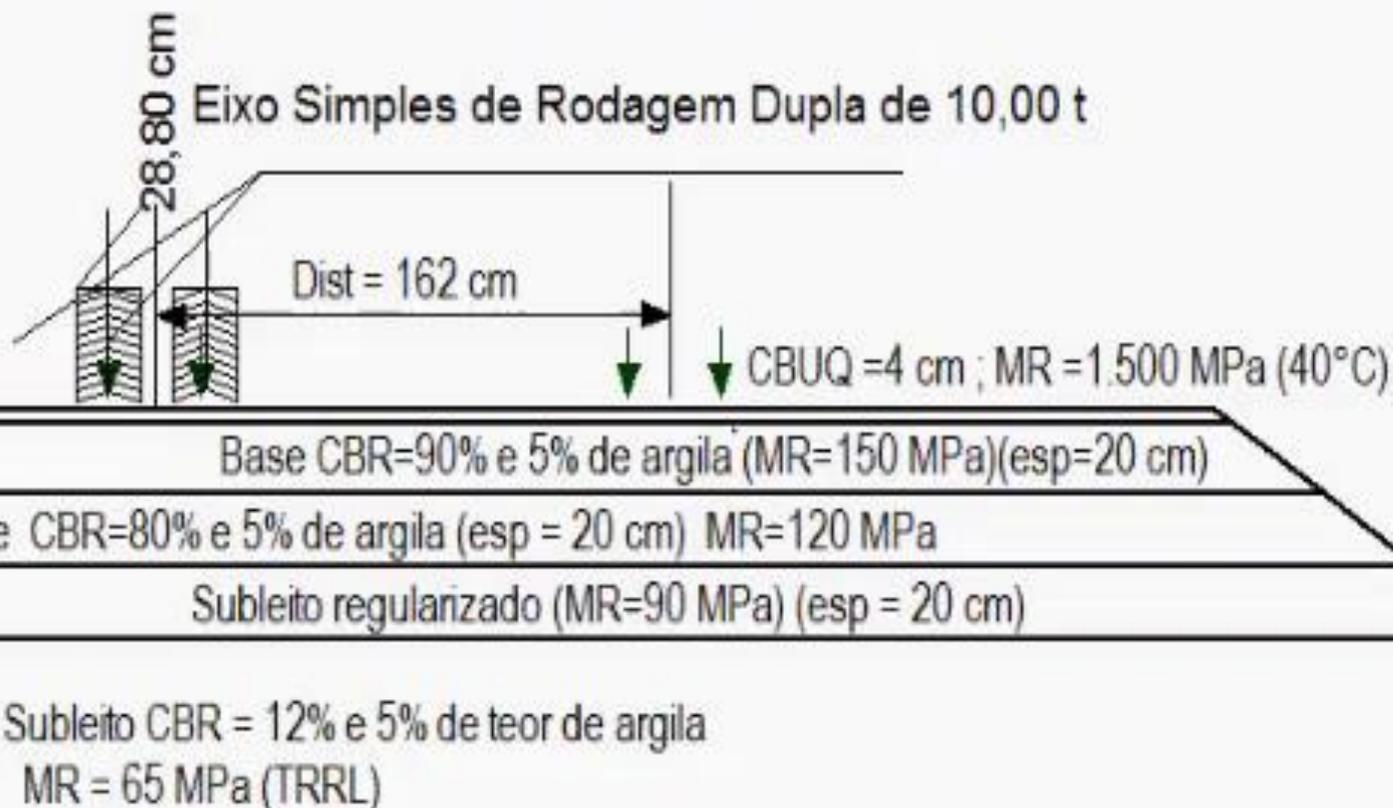
# Seção tipo: MG-352 (Trecho 3): Estaca 432+11,50

Semi-eixo Simples de Rodas (Aro 22,50 pol) Dupla de 10,00 t - Velocidade de 18 km/h

Geofones



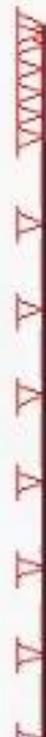
MA - 034 (Greide Colado e Corte)  
S J dos Patos x P Franca



# Seção tipo: MG-352 (Trecho 3): Estaca 432+11,50

Semi-eixo Simples de Rodas (Aro 22,50 pol) Dupla de 10,00 t - Velocidade de 18 km/h

Geofones Virtuais



GOD SAVE THE “ENACOR”

**PALESTRA 3**

Brasília, 27/NOV/2019