



Paulo Gontijo

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
solicitado à superfície por uma carga concentrada

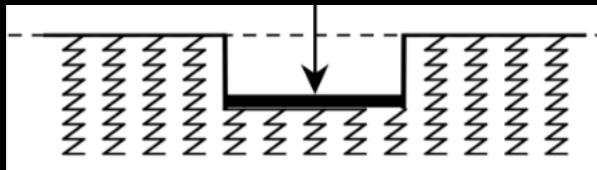


Harald Malcolm Westergaard

(Dinamarca – 09/10/1888 – 22/06/1950)

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

$$Pc = k \times d \quad \rightarrow \quad k = \frac{Pc}{d}$$



*“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 of
displacements in layered systems
and applications to the design of
airport runways”

Proc. Highways Research
Board - Vol. 23 (1943)

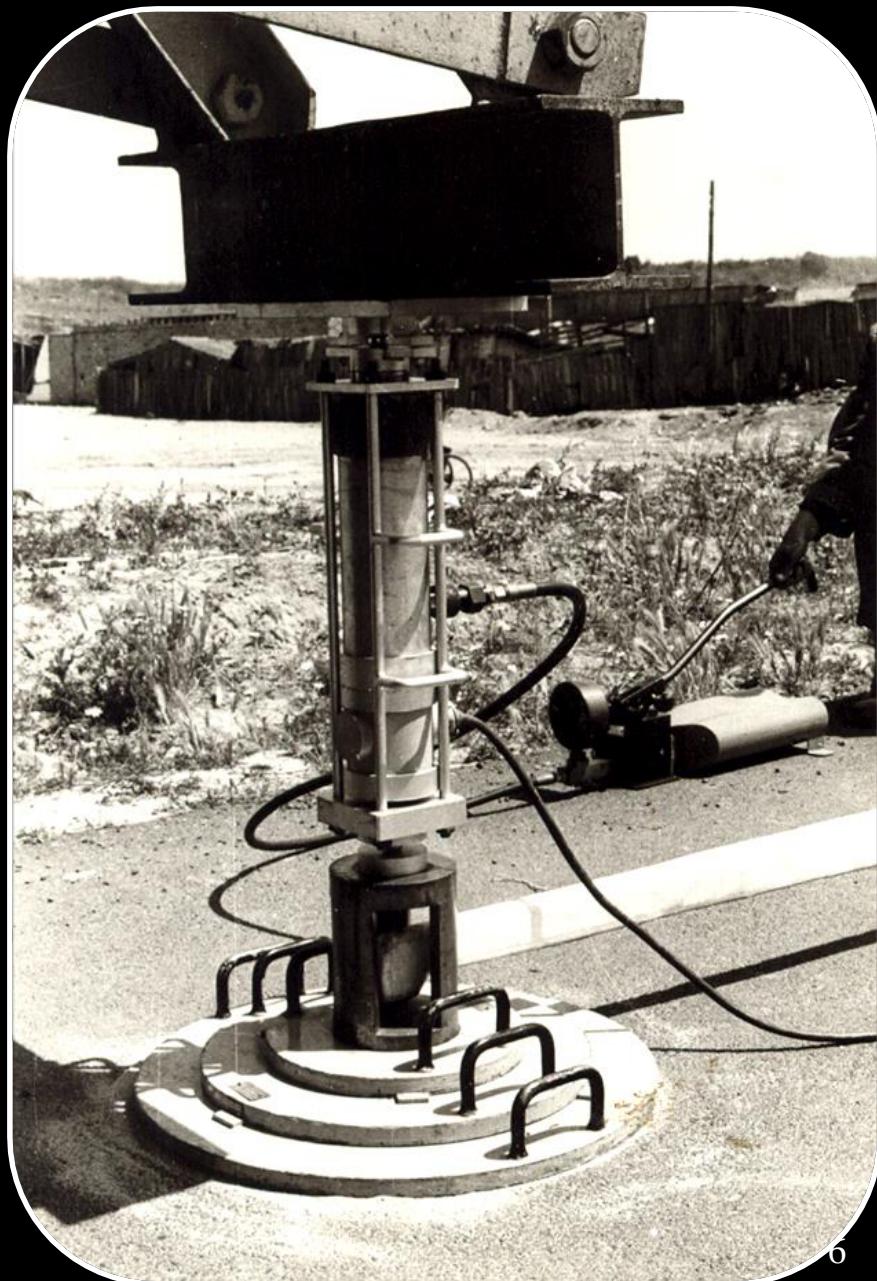


SISTEMAS ELÁSTICOS ESTRATIFICADOS



Módulos de Elasticidade
Coeficientes de Poisson

ENSAIOS DE CARGA COM PLACA (ESTÁTICO)



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

ET (energia total) = EP (energia potencial)

Equação matricial estrutural representativa:

$F = [K]\{u\}$ (carga estática)

$[K]$ = matriz de rigidez

$\{u\}$ = vetor deslocamento

Alvin Carlton Benkelman

EUA - 1895-1987

Western Association of State Highway Officials - **WASHO**

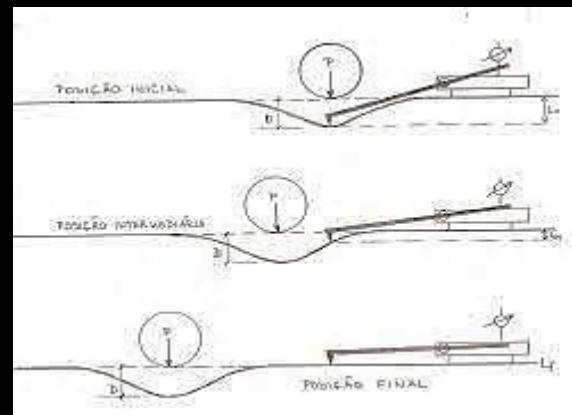
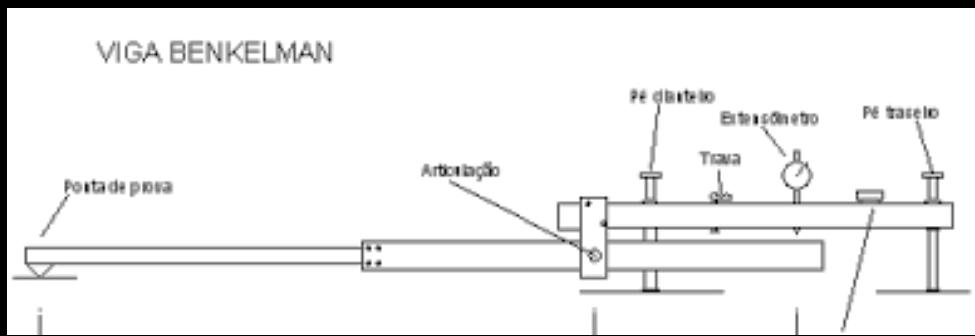
**Desenvolvimento de um equipamento para
medir a deflexão imposta a um pavimento
solicitado por um conjunto de rodas gêmeas
de um caminhão pesado (18 kips)**



VIGA BENKELMAN - 1953



VIGA BENKELMAN



TRELIÇA ARATANGY



1985

ENSAIO COM VIGA BENKELMAN

(Corpo Quase Estático)

ET (energia total) = EP (energia potencial)

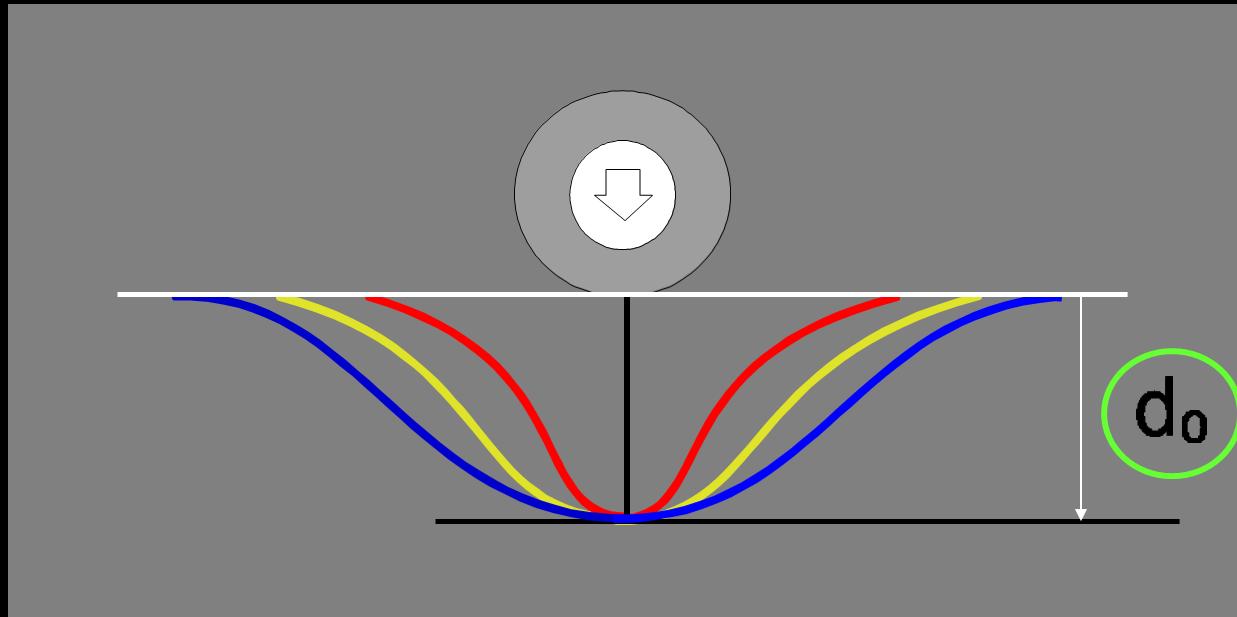
Equação matricial estrutural representativa:

F=[K]{u} (carga estática)

[K] = matriz de rigidez

{u} = vetor deslocamento

DEFORMABILIDADE ELÁSTICA



**ORLANDO D'ALMEIDA
PEREIRA**

Laboratório de Engenharia Civil – LNEC

1º DEFLECTÓGRAFO DE PAVIMENTOS

1967



LNEC

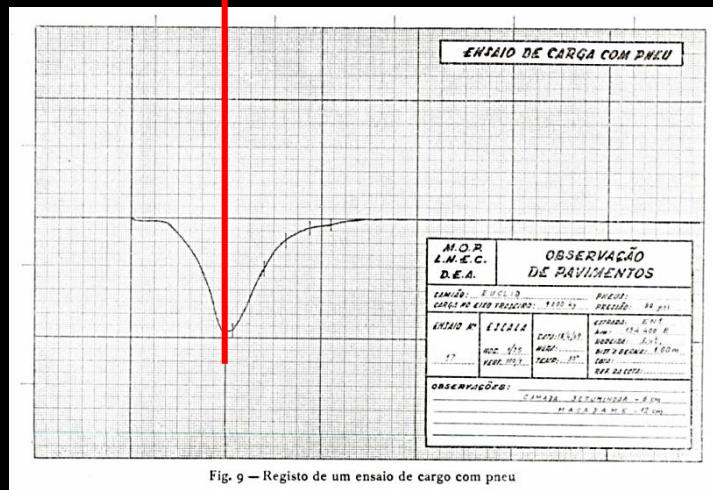
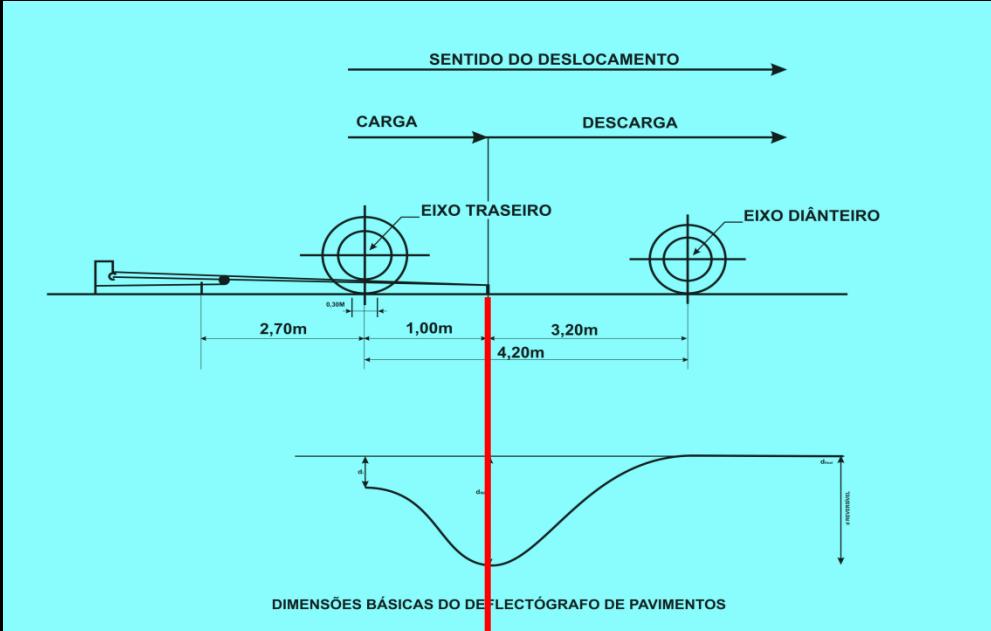


Fig. 9 — Registro de um ensaio de cargo com pneu

Tese de
Especialista
LNEC
(1969)



CRIADOR DA “RETROANÁLISE”

..strata'
ENGENHARIA



FWD

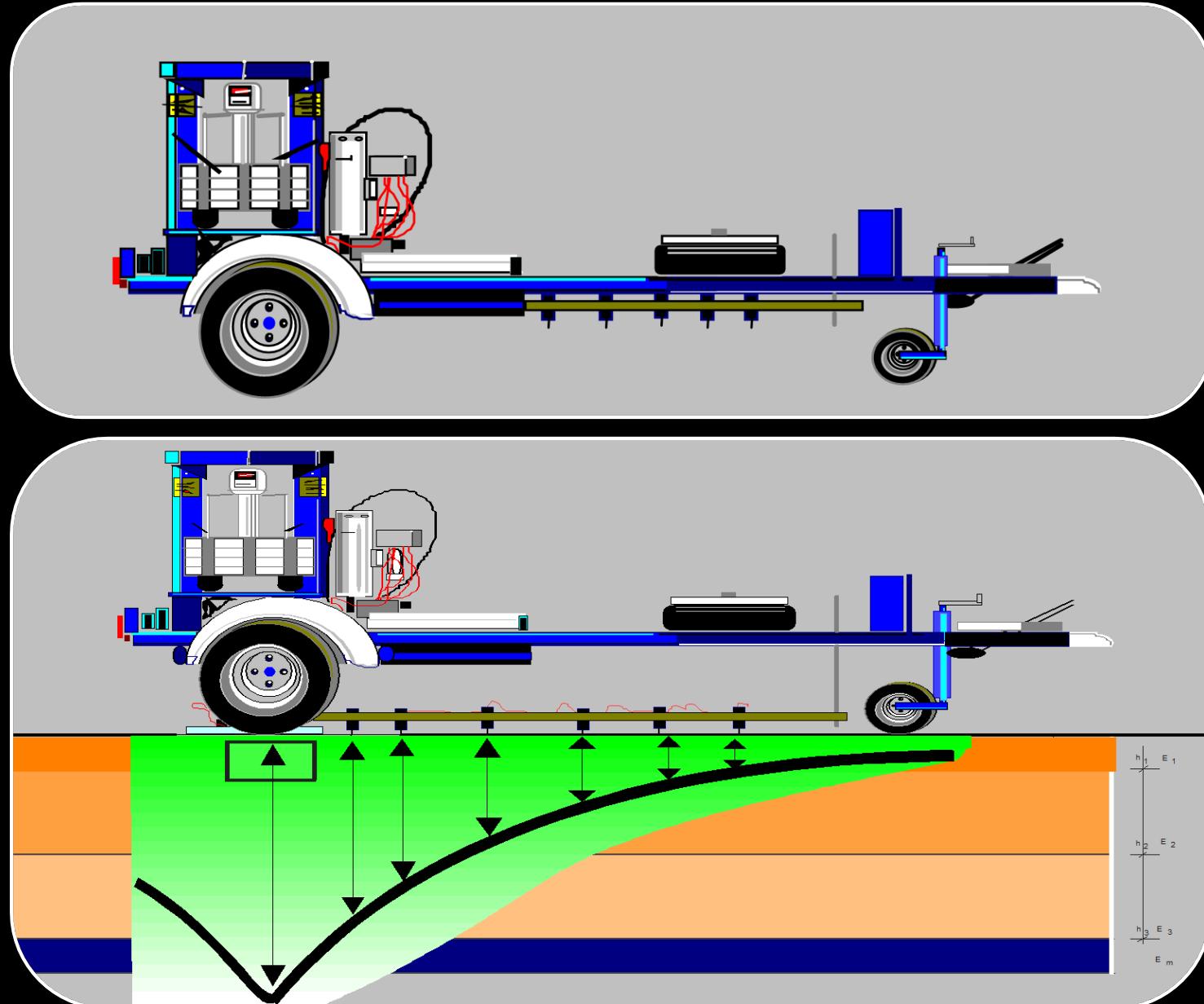
FALLING WEIGHT DEFLECTOMETER

PER ULLIDTZ – Dinamarca (Dynatest)



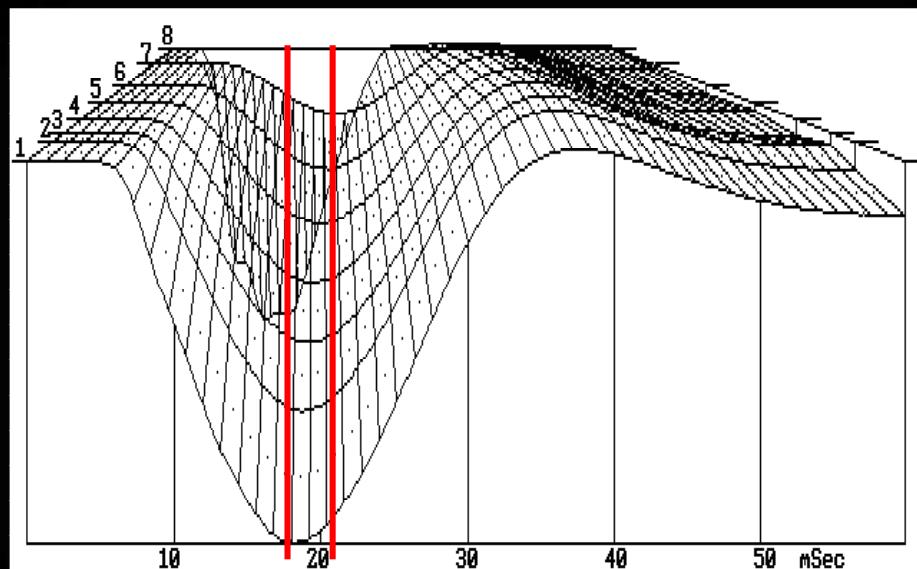
O primeiro FWD do Brasil

Representação esquemática da linha de influência dos assentamentos reversíveis

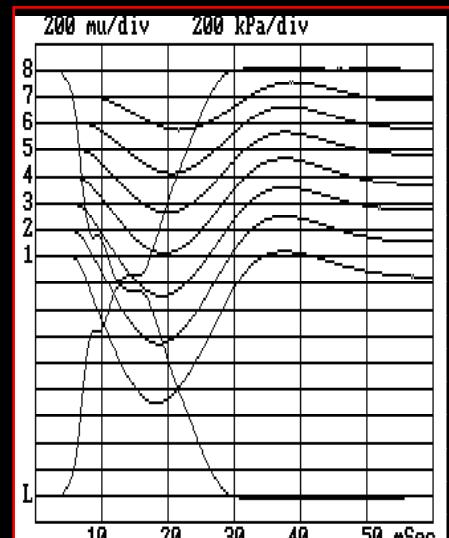


Os geofones registram as velocidades vibratórias geradas e recebidas pelo pavimento em distintos pontos quando uma massa em queda livre cai sobre um sistema de amortecedores de borracha. A proposição básica é que o pulso de carga gerado - pela carga fixa solicitante - se propague através de ondas aproximadamente senoidais

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 um pulso de carga que, ao ser recebido pelo pavimento, se propague através de ondas.

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



CURVIÂMETRO



CURVIÂMETRO (Vídeo)



CURVIÂMETRO



CURVIÂMETRO



ENSAIO COM O CURVIÂMETRO

(Corpo em movimento retilíneo sobre pneumáticos - movimento angular)

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

A energia cinética está intrinsecamente ligada ao valor da massa do corpo e à velocidade de seu movimento.

Equação matricial estrutural representativa:

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

[M] = matriz massa

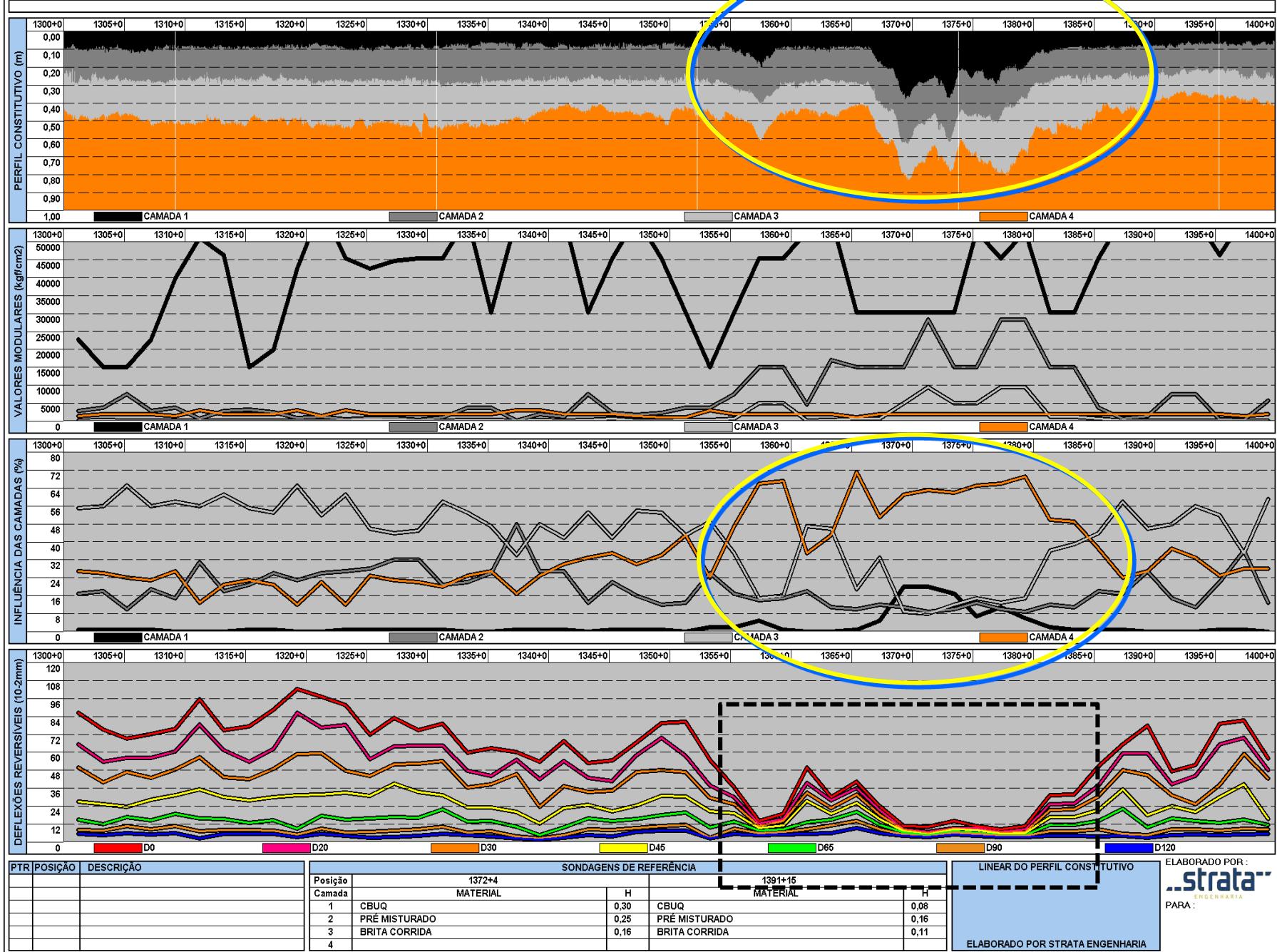
[D] = matriz amortecimento

[K] = matriz rigidez

{ \ddot{u} } = vetor aceleração

{ \dot{v} } = vetor velocidade

{u} = vetor deslocamento



Os softwares de cálculo de pavimento rodoviário 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 amanhã



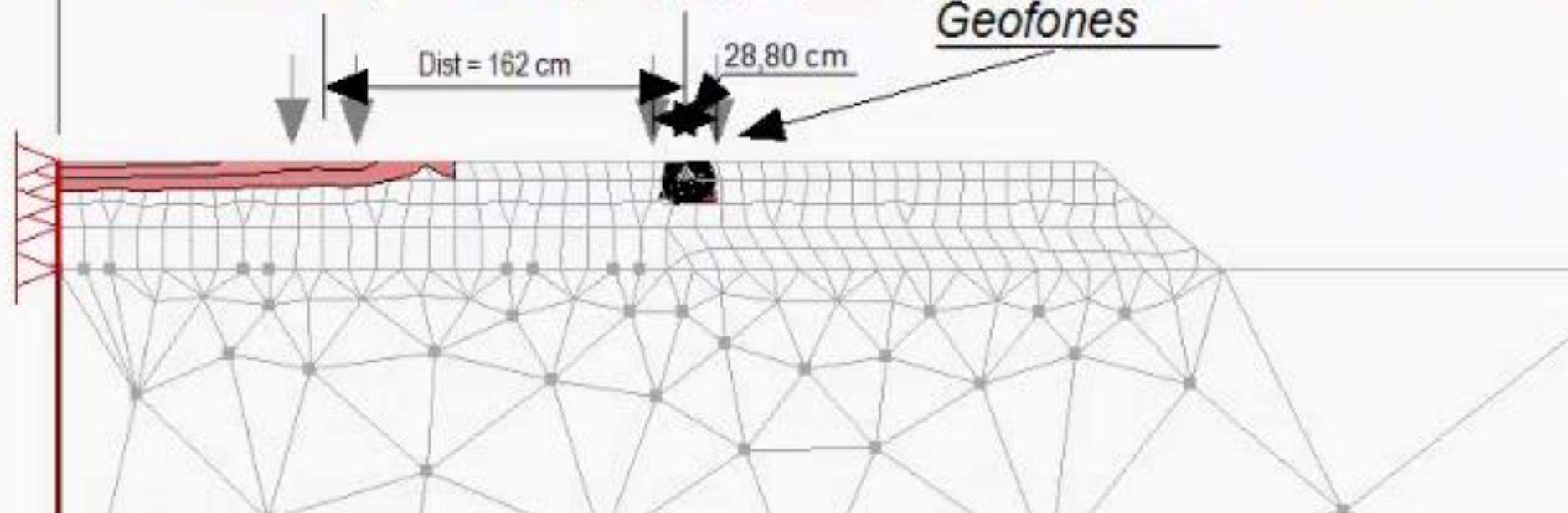
**Modelos de elementos finitos
aplicados a sistemas de carregamento dinâmico²⁸**



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



Eixo

MA - 034 (Greide Colado e Corte)

S J dos Patos x P Franca



Base CBR=90% e 5% de argila (MR=150 MPa)(esp=20 cm)

Sub-Base CBR=80% e 5% de argila (esp = 20 cm) MR=120 MPa

Subleito regularizado (MR=90 MPa) (esp = 20 cm)

Subleito CBR = 12% e 5% de teor de argila

MR = 65 MPa (TRRL)

GOD SAVE THE DNIT

Muito obrigado por vossas atenções!!!