

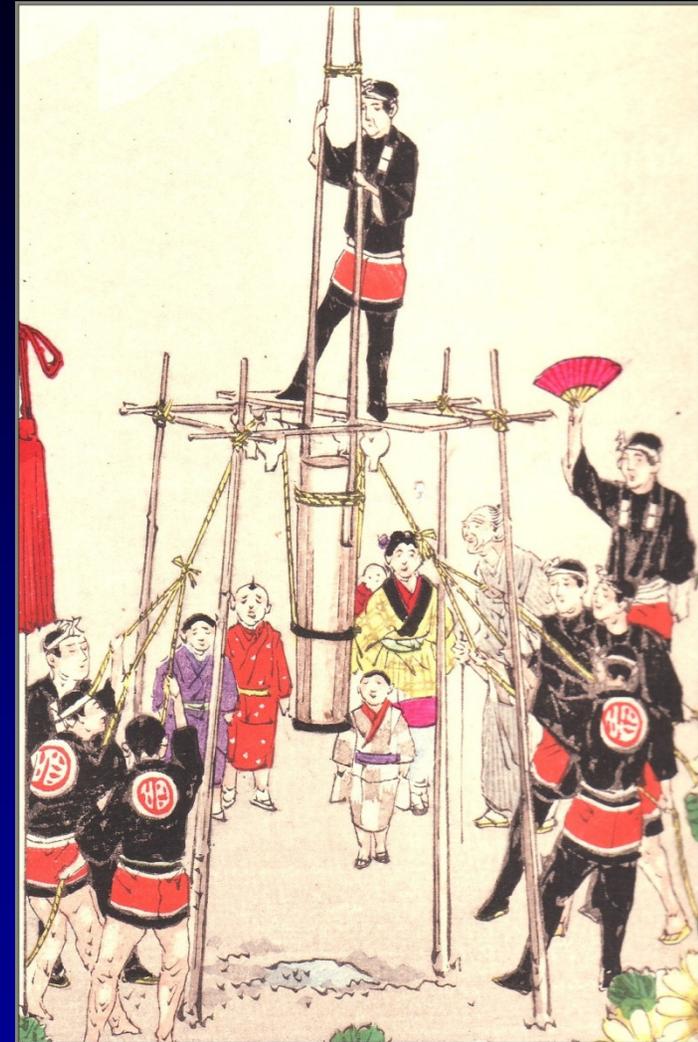
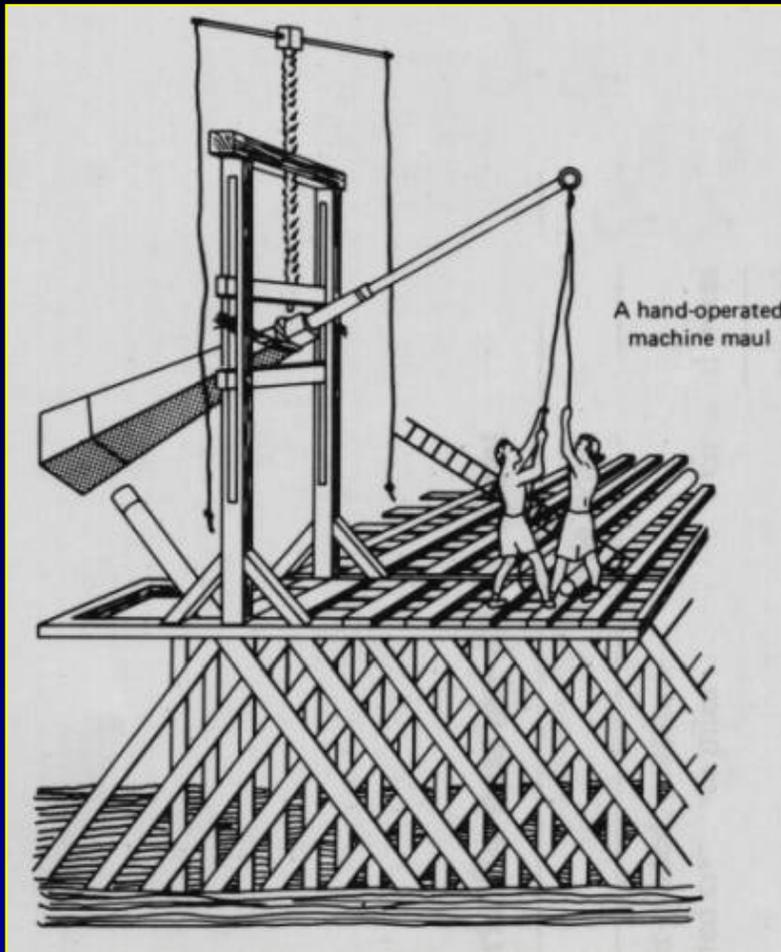
# Ensaio de Carregamento Dinâmico (Prova de carga dinâmica)

PEF 2405 (20/09/2010)

Sussumu Niyama, Dr. Eng.

# PROGRAMA DA AULA DE HOJE

- INTRODUÇÃO
- TEORIA DA EQUAÇÃO DE ONDA.
- ENSAIO DE CARREGAMENTO DINÂMICO .
- COMPARAÇÃO COM PROVAS DE CARGA ESTÁTICA.
- NORMAS.



Estruturas suportadas por estacas cravadas remontam às eras pré-históricas. Referências de estacas de madeira utilizadas na Babilônica são encontradas na Bíblia.



Estacas de madeira eram cravadas na Idade Média e com a Revolução Industrial, em 1845, foram inventadas os “modernos” martelos acionados por motor a vapor.



Hoje os equipamentos de cravação de estacas, basicamente continuam seguindo o mesmo princípio, apenas com algumas modernizações.



Como garantir a resistência às cargas que serão aplicadas nestas estacas?



**Colapso de um edifício de 13 andares no final da construção em Shangai.**



**Problema de fundação?**



**Quando se observa o entorno...**

Desde antiguidade, a questão sempre mereceu atenção, o que propiciou estudos para tentar compreender do **fenômeno**.

Numerosas fórmulas dinâmicas surgiram, baseadas normalmente na conservação da energia.

Muito utilizadas no passado, mesmo com muitas restrições, ainda hoje são empregadas.

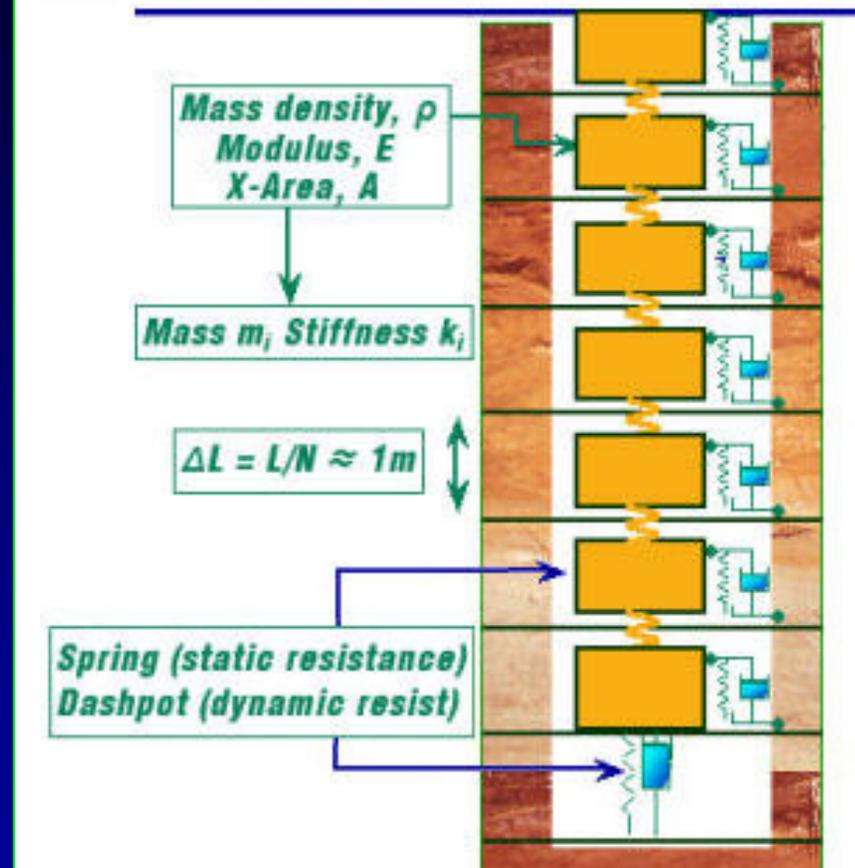


## Compreensão do fenômeno.

Nos anos 50, E.A. Smith desenvolveu um método de análise numérico para prever a capacidade versus *blow count* e pesquisou as tensões na cravação da estaca.

O método era baseado no uso da chamada teoria da Equação de Onda.

### The Pile and Soil Model



## Avanço tecnológico.

Em 1960, com advento dos computadores permite a solução da teoria da Equação de Onda, tornando prático a sua aplicação.

A técnica de ensaios dinâmicos, nos moldes atualmente conhecidos, é fruto do programa de pesquisa desenvolvido entre 1964 a 1975 no Case Institute of Technology em Cleveland, Ohio.



## Histórico no Brasil

No Brasil, esta técnica foi trazida em 1981 pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas - IPT, para atender às necessidades de controle de qualidade de cravação de estacas das inúmeras plataformas marítimas “offshore” que a Petrobrás instalaria ao longo de toda a costa brasileira.

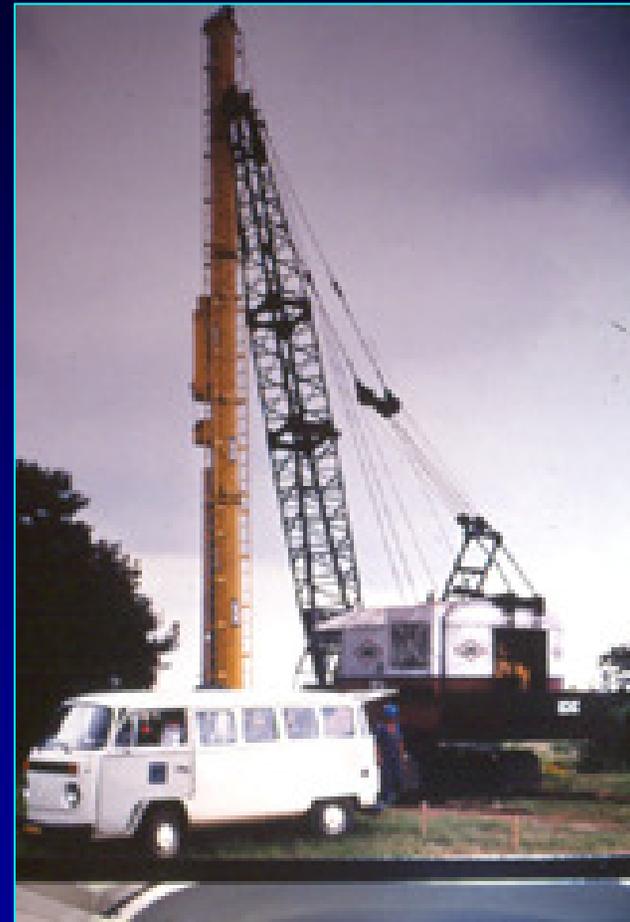


**Plataforma PCR1 na  
Bacia do Curimã, Ceará**

## Histórico no Brasil

Em obras em terra, esta técnica foi pioneiramente utilizada numa grande obra industrial da Albrás no Estado do Pará em 1983.

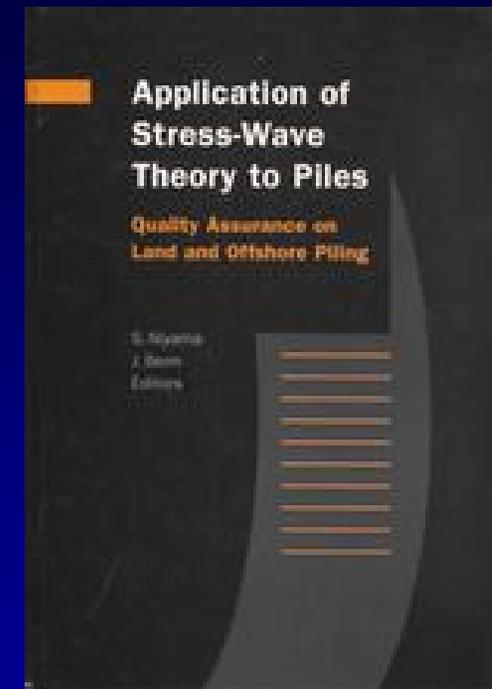
Desde então milhares de fundações foram submetidas a estes ensaios que tiveram diversas denominações no Brasil, ao longo do tempo.



## Conferências Técnicas

### *Application of Stress Wave Theory to Piles*

Nº	Ano	Localidade / país	Nº de artigos
1ª	1980	Estocolmo / Suécia	24
2ª	1984	Estocolmo / Suécia	54
3ª	1988	Otawa / Canadá	88
4ª	1992	Haia / Holanda	116
5ª	1996	Orlando / EUA	101
6ª	2000	São Paulo / Brasil	100
7ª	2004	Malásia	-
8ª	2008	Lisboa	103



a revista do engenheiro civil

www.revistatechne.com.br

2010 IPT **téchne**

PINI

# Revista téchne (Editora Pini - agosto/2010)

## MELHORES PRÁTICAS

### Ensaio de carregamento dinâmico em estacas de concreto

Também conhecido como prova de carga dinâmica, ensaio determina a capacidade de ruptura da interação estaca-solo

#### Posição

Reconhecido pela NBR-6122, o teste de carregamento dinâmico é realizado com a instalação de sensores no fuste da estaca cravada. Após verificação das condições do topo da estaca (nivelamento e perpendicularidade em relação ao eixo longitudinal), são marcados os locais para furação.



#### Aparafusamento

Os sensores devem estar fixados corretamente, mantendo contato perfeito com a superfície lateral da estaca e em posição vertical.



#### Furação

Os furos são realizados para fixação dos sensores por meio de chumbadores de expansão.



#### Seção instrumentada

Em cada estaca são instalados um par de acelerômetros e um par de transdutores de deformação. Deve-se evitar a fixação dos sensores muito próximos ao tipo de estaca por causa da concentração de tensões neste região. Os equipamentos são dispostos aos pares, sempre em posições diametralmente opostas.

#### Análise

A cada dois golpes sucessivos, a capacidade de carga é calculada pelo PDA, a análise dos dados deve ser feita por profissional treinado no uso de teorias de equação de onda unidimensional e, também, no uso dos equipamentos e software específicos.



#### Bate-estaca

Os sensores são ligados a um PDA (Pile Driving Analyzer), equipamento portátil cuja função é processar os sinais. Após calibragem, é iniciada a medição junto com a aplicação dos golpes do martelo de cravação com energias previamente estabelecidas. A energia aplicada deve ser suficiente para mobilizar toda a resistência disponível no conjunto solo-estaca. Após aplicação de uma série de golpes, são escolhidos os sinais mais representativos do comportamento da estaca em avaliação.



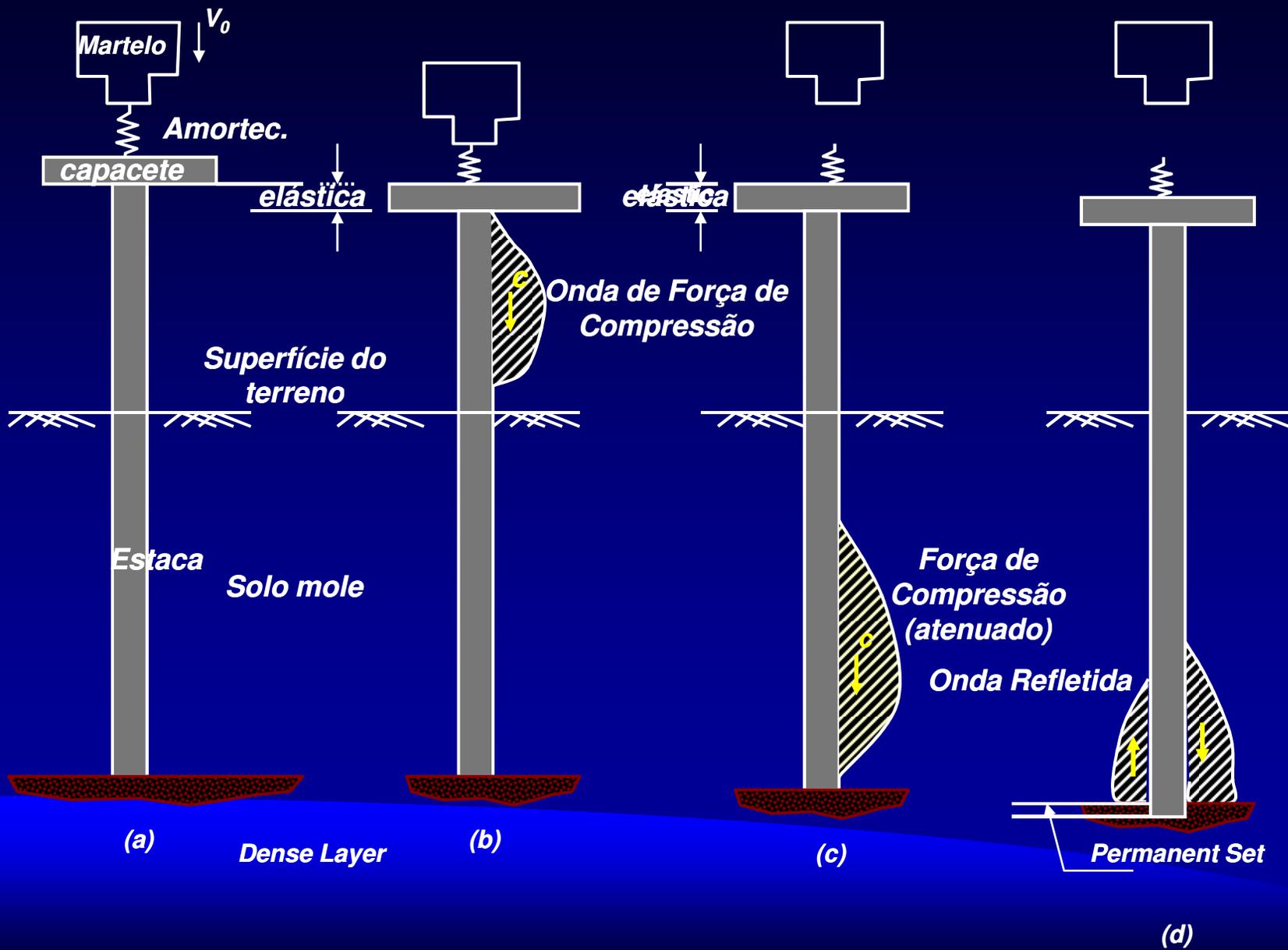
#### Relatório conclusivo

O ensaio de carregamento dinâmico permite obter informações como a resistência do solo atirada, as tensões máximas na estaca, a integridade da estaca e o desempenho do martelo.

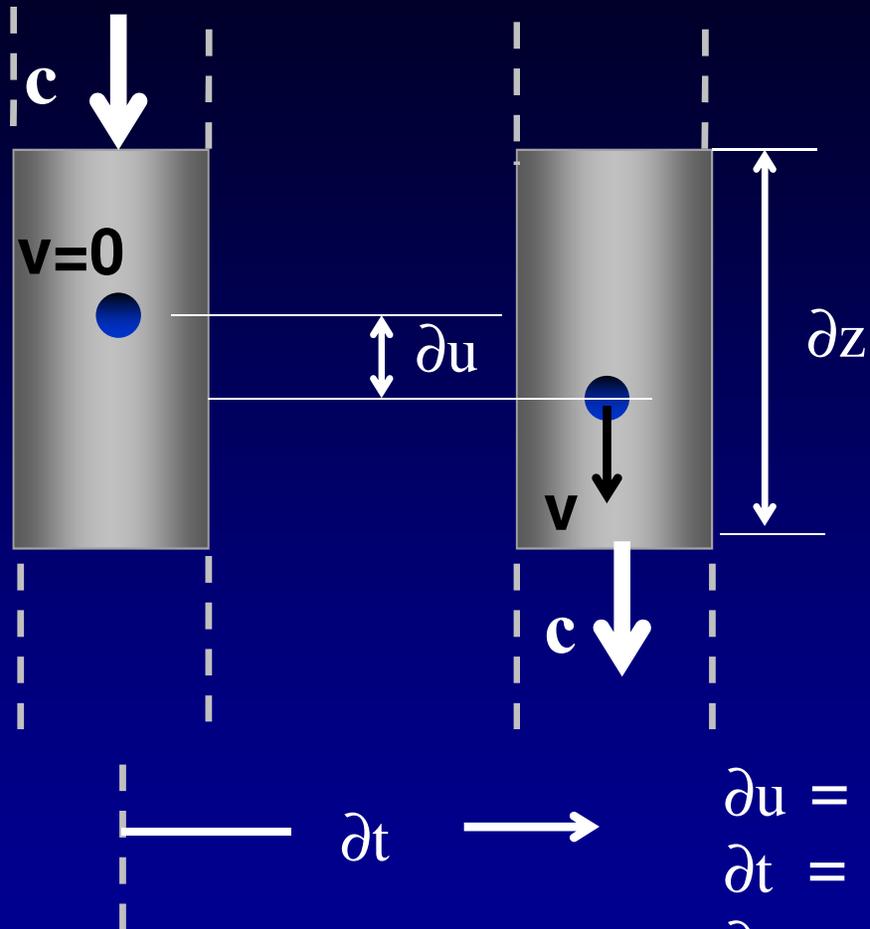
Apoio técnico: engenheiro Sérgio Volverde (PDI Engenharia) e engenheira Gisela Coelho de Campos (IPT).

# Teoria da Equação de Onda

# Ondas na cravação da estaca



# Equação da onda (barra livre)



$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = c^2 \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial z^2}$$

$\partial u$  = deslocamento vertical

$\partial t$  = intervalo de tempo

$\partial z$  = segmento da barra

$v$  = velocidade da partícula =  $\partial u / \partial t$

$c$  = velocidade de propagação

da onda =  $(E/\rho)^{1/2}$

# Solução da equação de onda (barra livre)

$$u(z,t) = f(z - ct) + g(z + ct)$$

*Representa duas ondas de deslocamento propagando-se em sentidos opostos, ao longo de um eixo, com velocidade  $c$ .*

*A partir desta solução, obtem-se as funções  $F$  e  $v$  que mantêm uma proporcionalidade entre si :*

$$F = \sigma A = \epsilon EA = \frac{\partial u}{\partial z} EA$$

$$v = \frac{\partial u}{\partial t}$$

$$F = \pm Zv, \text{ onde } Z = \text{impedância} = EA/c$$

# Equação da onda (estaca)

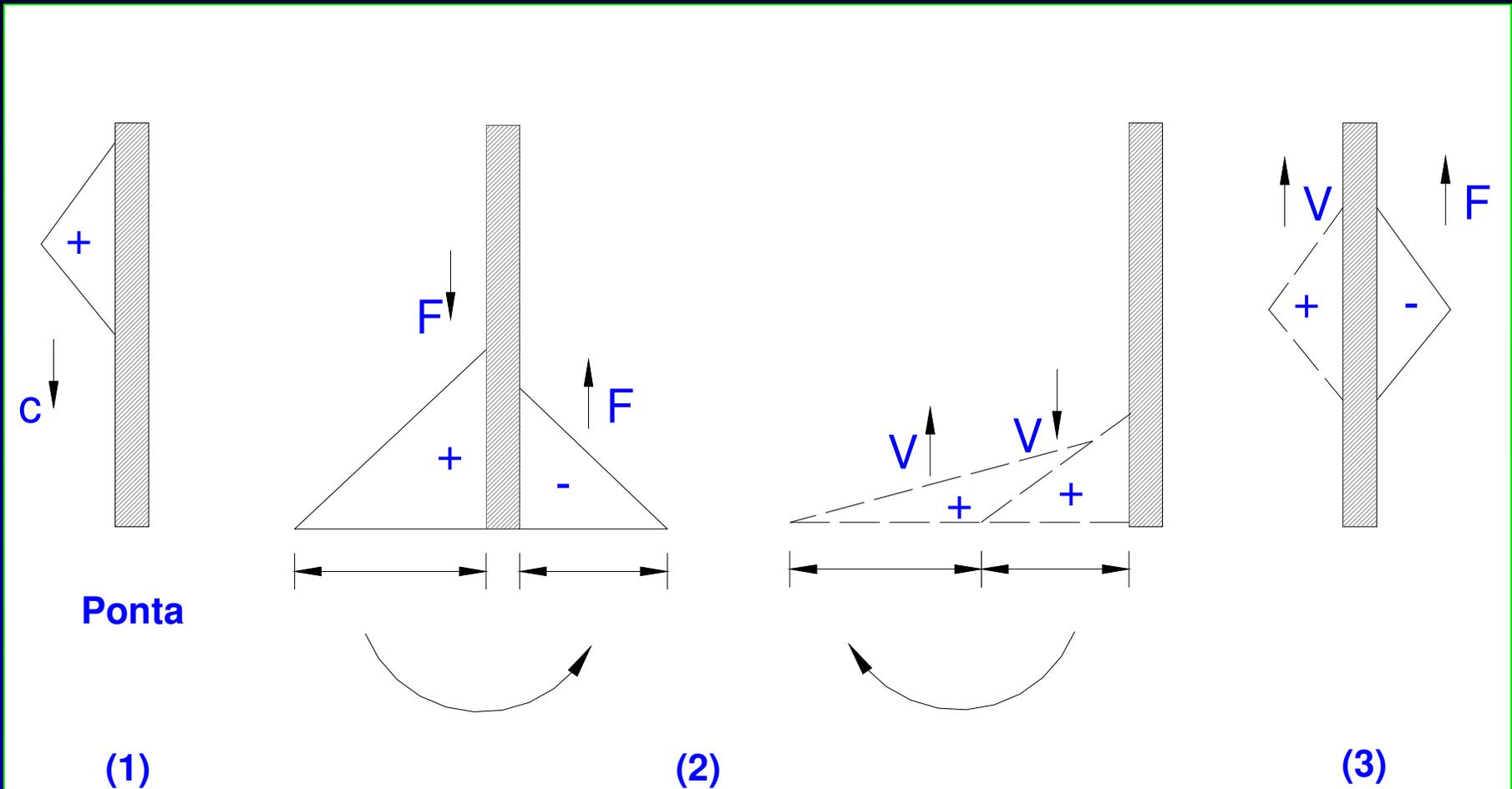
$$\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} - \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = \frac{R(u, t)}{EA}$$

Diferença entre uma barra livre e uma estaca:

$R(u,t)$  = resistências ao longo do fuste e ponta da estaca

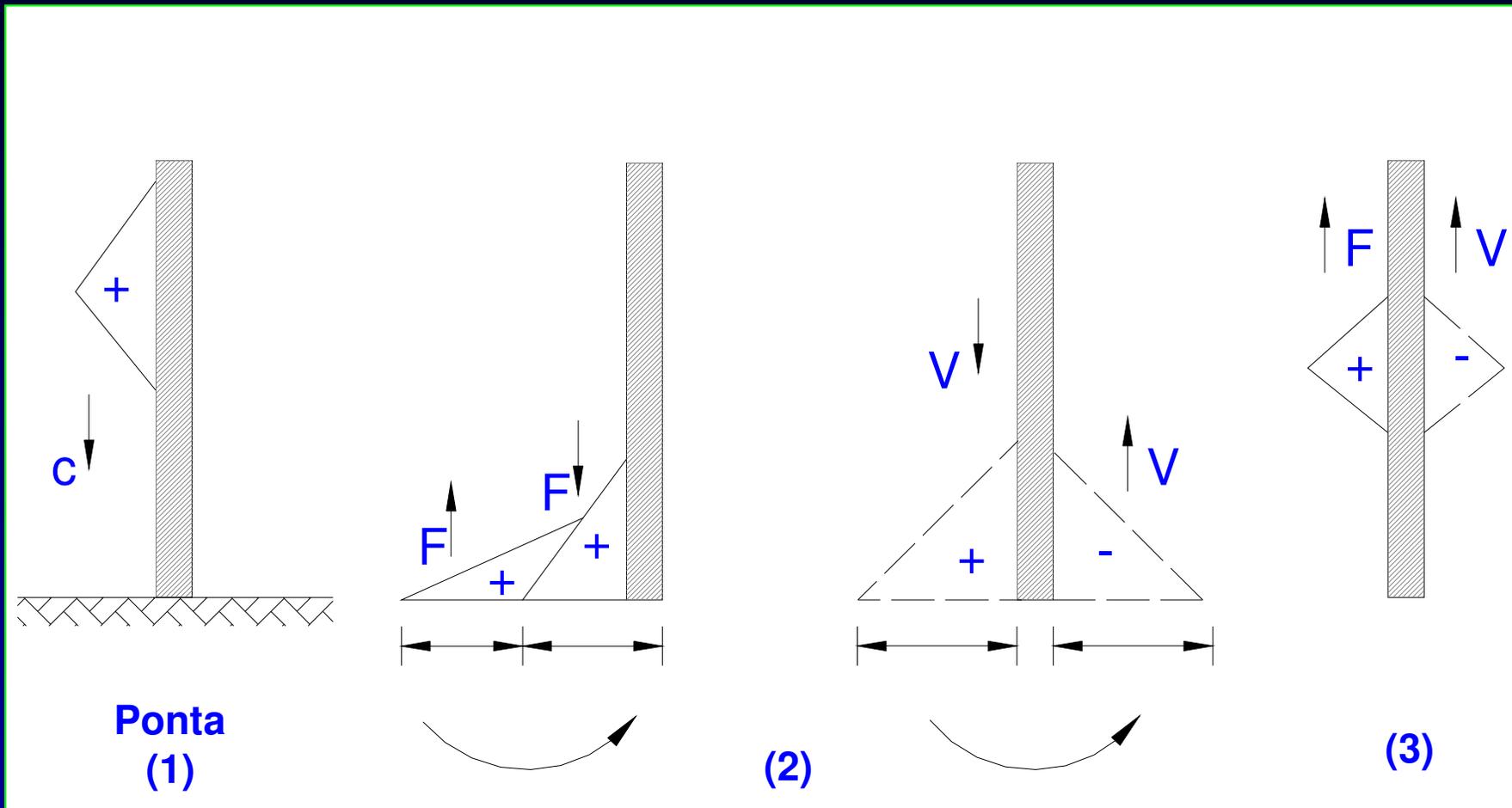
Desaparece a proporcionalidade entre  $F$  e  $v$  por causa das reflexões devidas a  $R(u,t)$

# Propagação de onda de Força (F) e velocidade (V) numa barra



Condição de Ponta livre ( $F=0$ )

# Propagação de onda de Força (F) e velocidade (V) numa barra

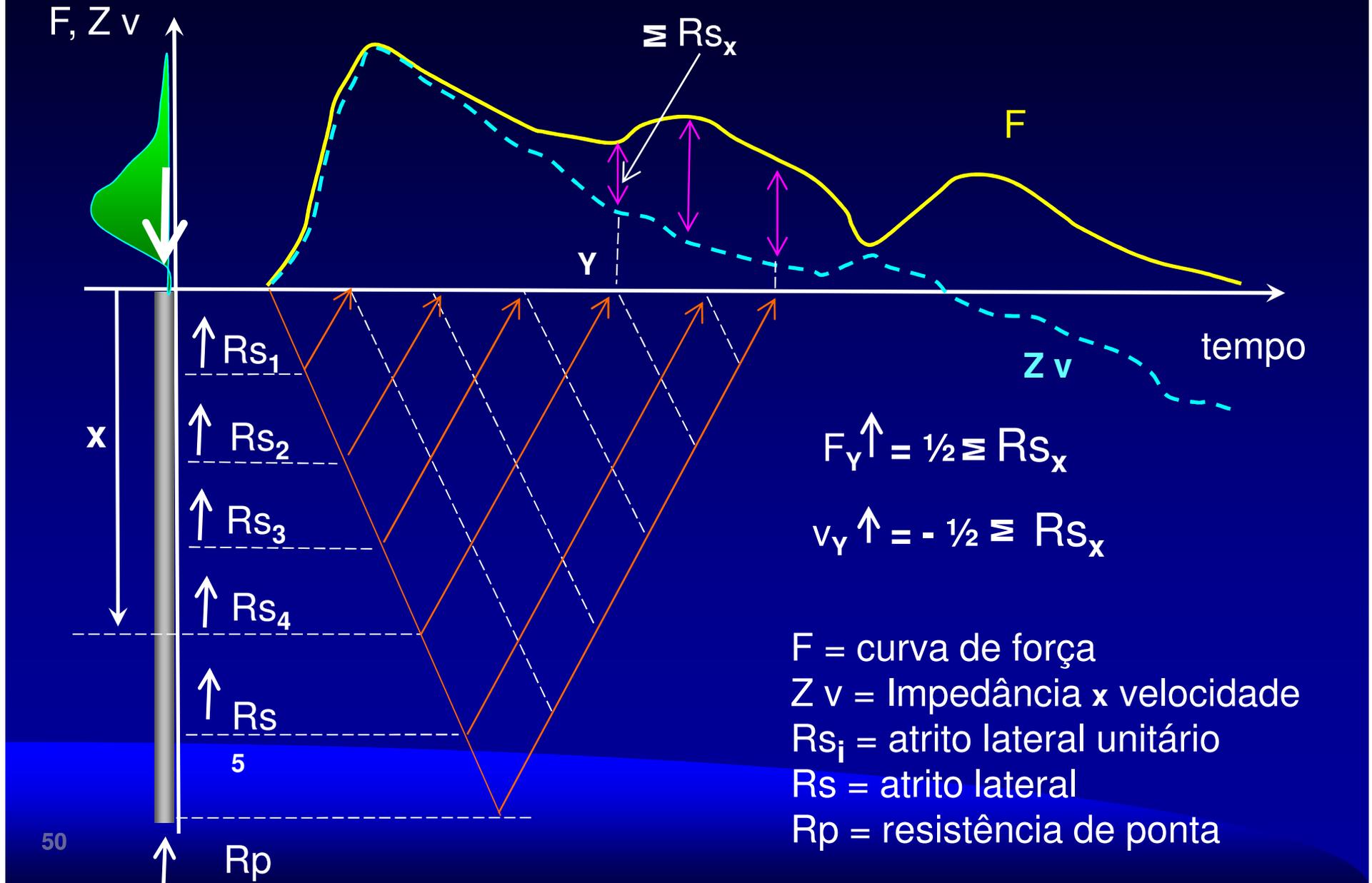


Condição de Ponta indeslocável ( $v=0$ )

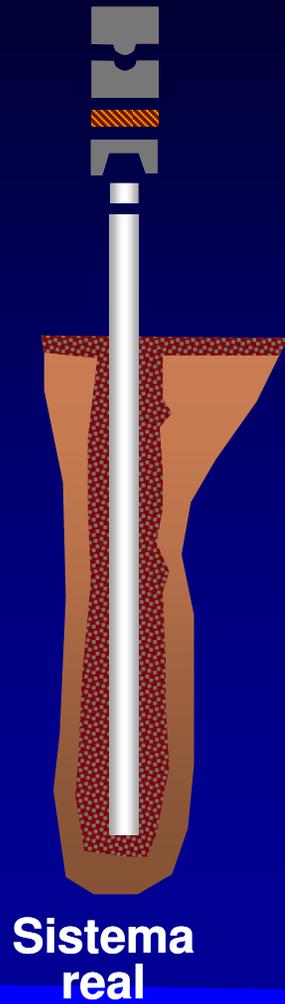


**Situação dos perfis metálicos ao atingirem o topo rochoso**

# Registro das curvas Força e Velocidade



# Modelo de Smith

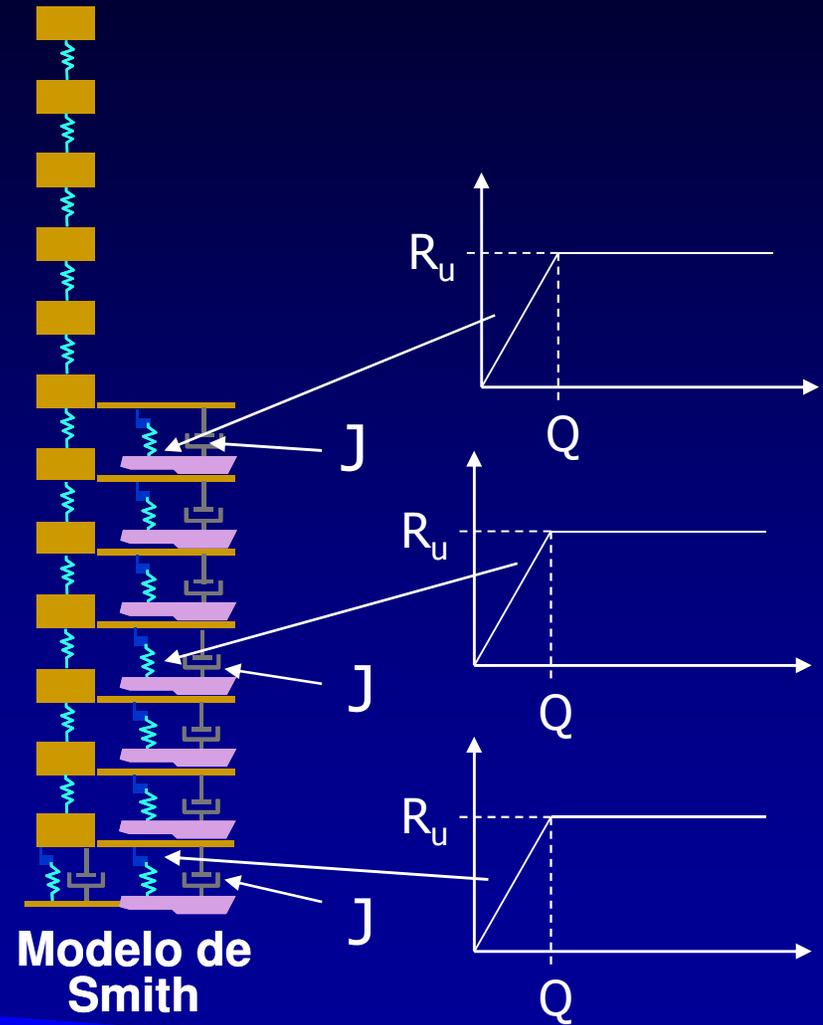


$$R = R_E + R_D$$

$$R_E = f(u, Q, R_u)$$

$$R_D = J v$$

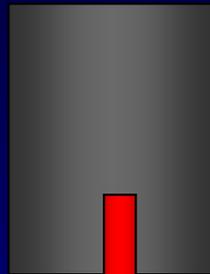
$J$  = coef. de amortecimento viscoso



# Técnica da Instrumentação

# Esquema de instrumentação (PDA)

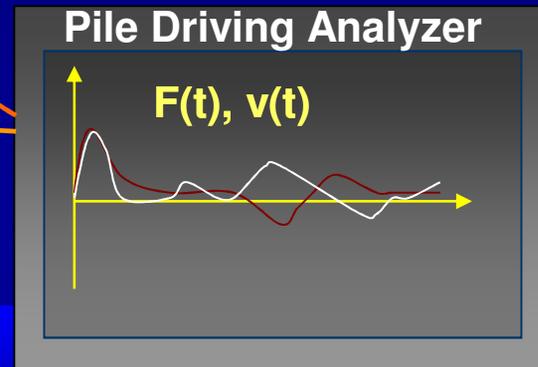
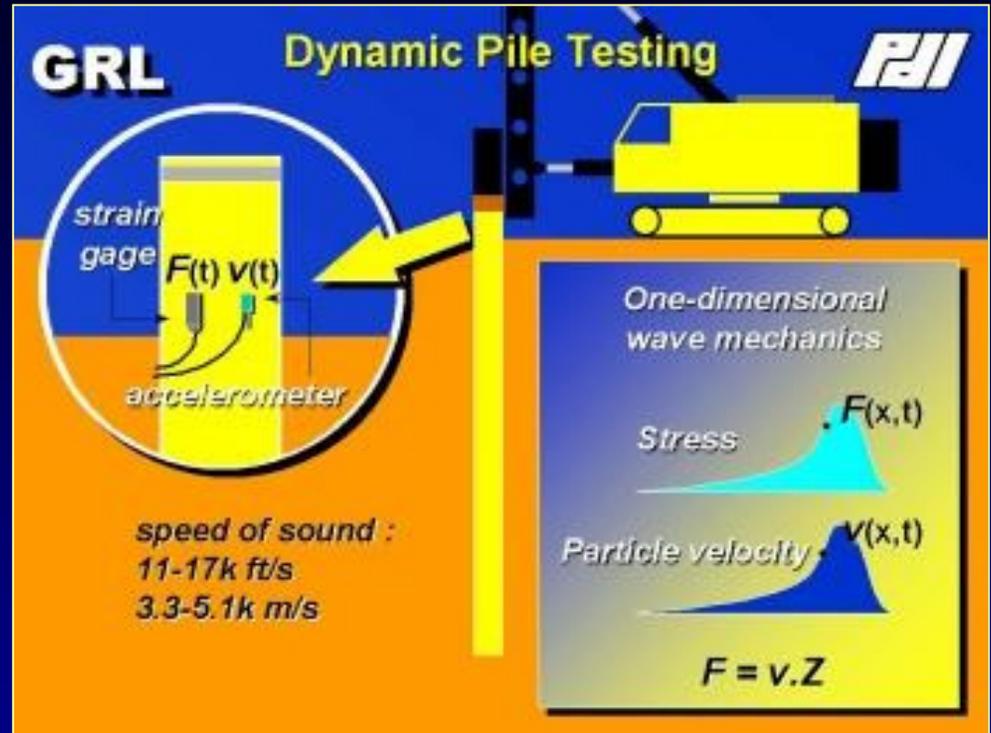
Martelo de cravação



Transdutor de força



acelerômetro



# Sensores utilizados



**Transdutores de deformação e acelerômetro instalados na estaca.**



**Instrumentos a prova de água para trabalho submerso**



**Instrumentos instalados numa estaca pré-moldada de concreto**

# Evolução tecnológica do PDA



**Pile Driving Analyzer nos anos 80**

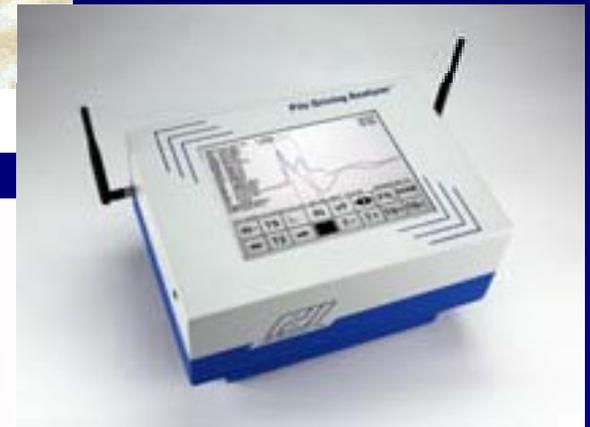
# Evolução tecnológica do PDA



Pile Driving Analyzer modelo PAK



A Unit of PDA



PILE DRIVING ANALYZER®  
model PAX

# Introdução no Brasil através da engenharia offshore, pelo IPT, atendendo à Petrobrás



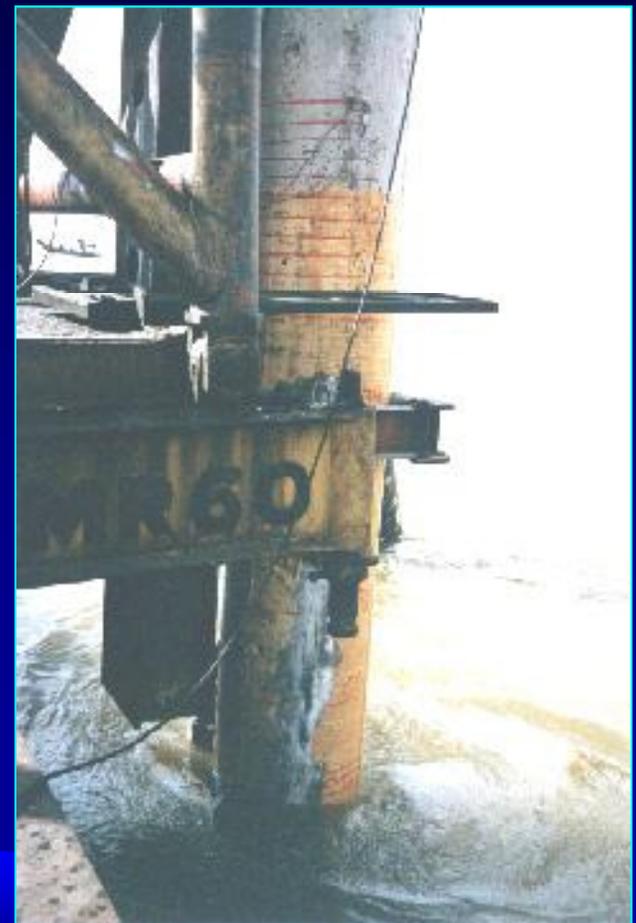
**Plataforma Enchova,  
Bacia de Campos, RJ**



**Plataforma PCR1 na  
Bacia do Curimã, Ceará**

**POSTERIORMENTE O SEU EMPREGO VAI CRESCENDO EM  
TODOS OS TIPOS DE OBRAS.**

**A PARTIR DE 1987 A EMPRESA PDI COMEÇA TAMBÉM A  
ATUAR NO PAÍS**



# Preparação da Estaca Furação e instalação de instrumentos



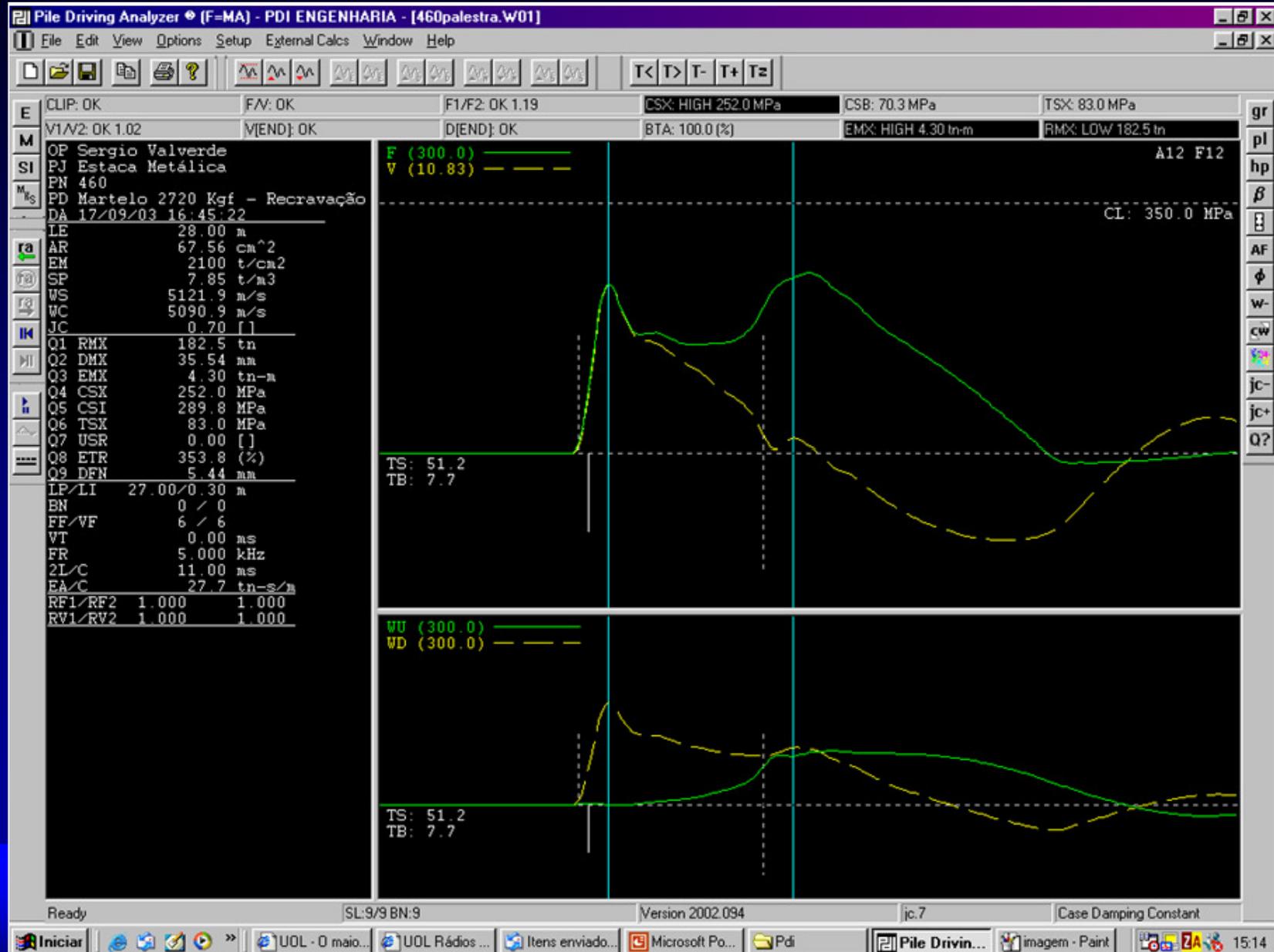
## Instrumentos instalados e o cabo ligado ao PDA no porta malas de um veículo



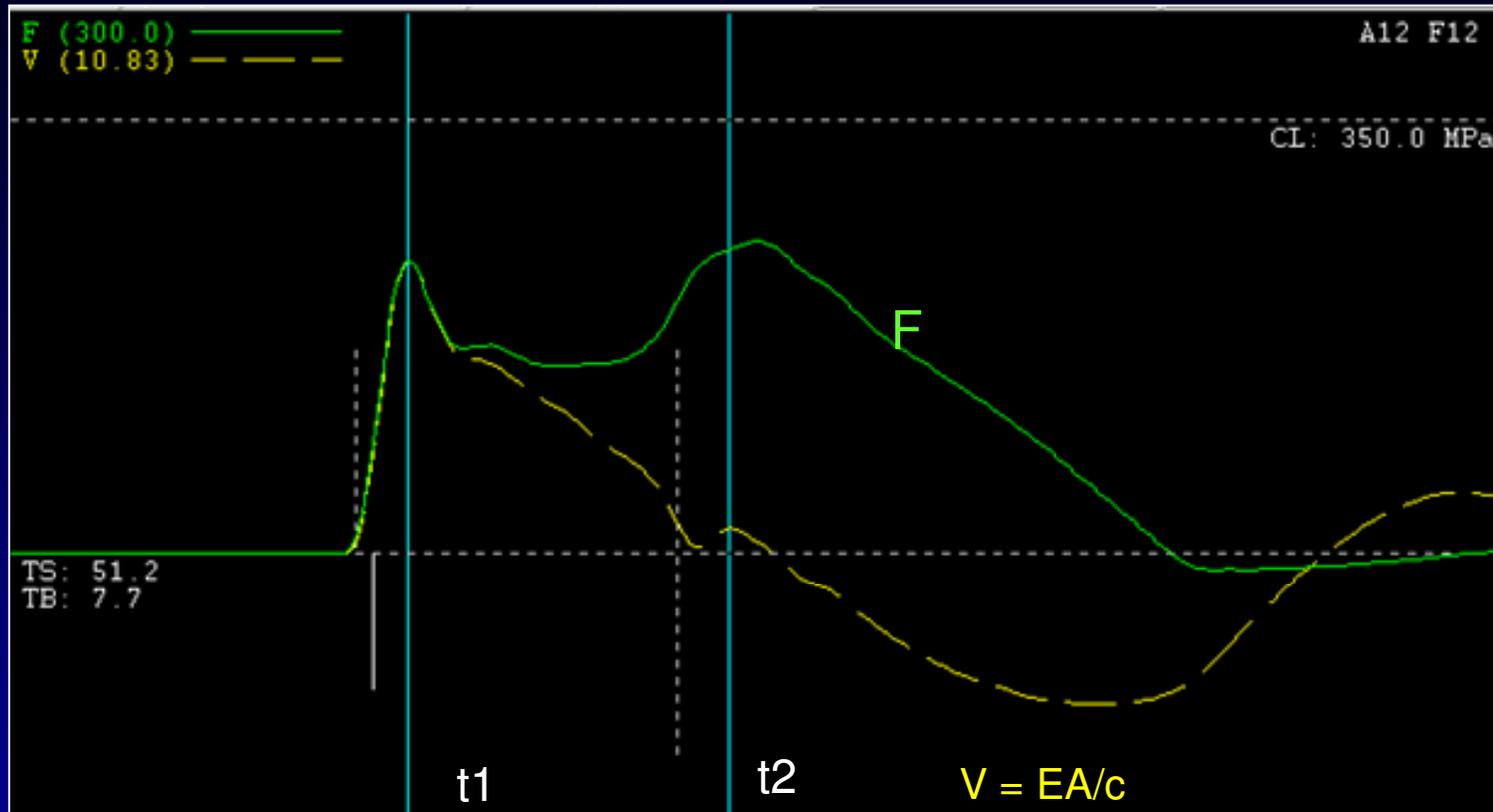
## Uma outra obra com PDA modelo PAX



# Tela do PDA modelo PAK



# Avaliação da capacidade de carga com o PDA



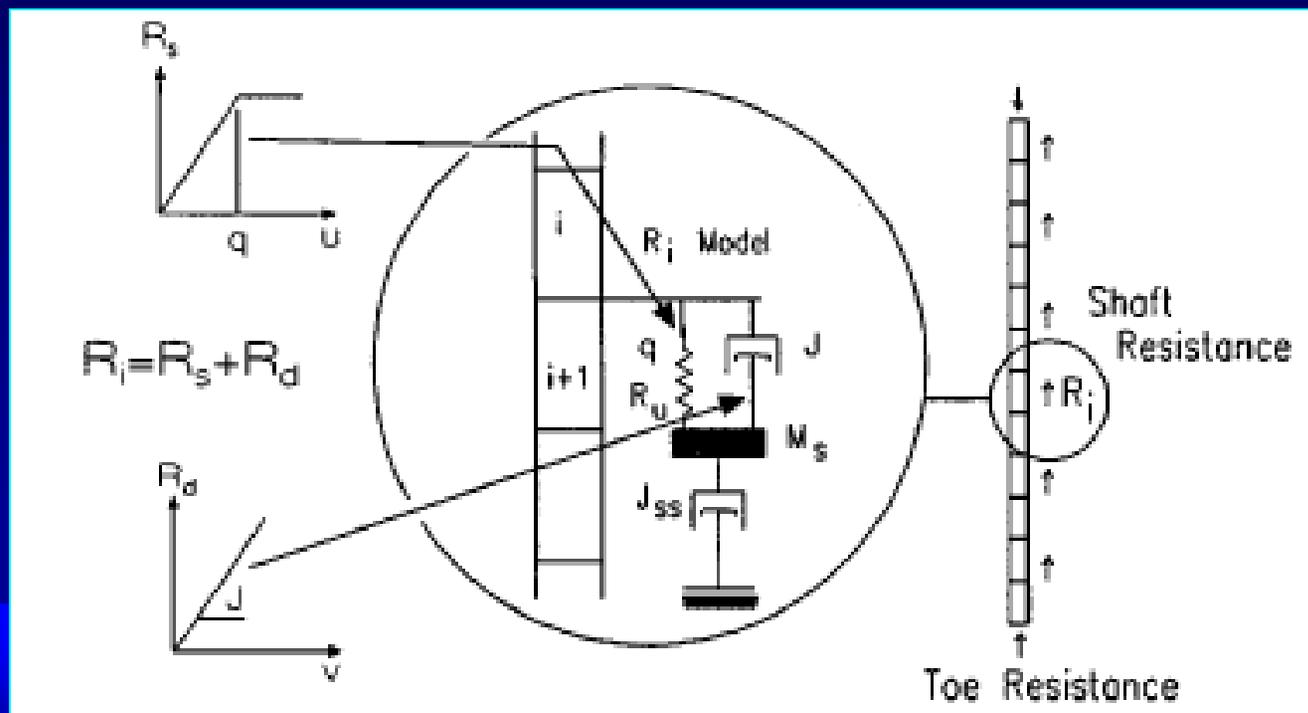
**Método CASE**  $\rightarrow R_t = EA/c \{ [ F(t_1) + F(t_2)] - [ v(t_1) + v(t_2)] \} - (EA/c) J_C v$

$$R_t = R + R_d$$

$$R_d = \text{parcela dinâmica} = J_C \cdot E \cdot A/c \cdot v_p$$

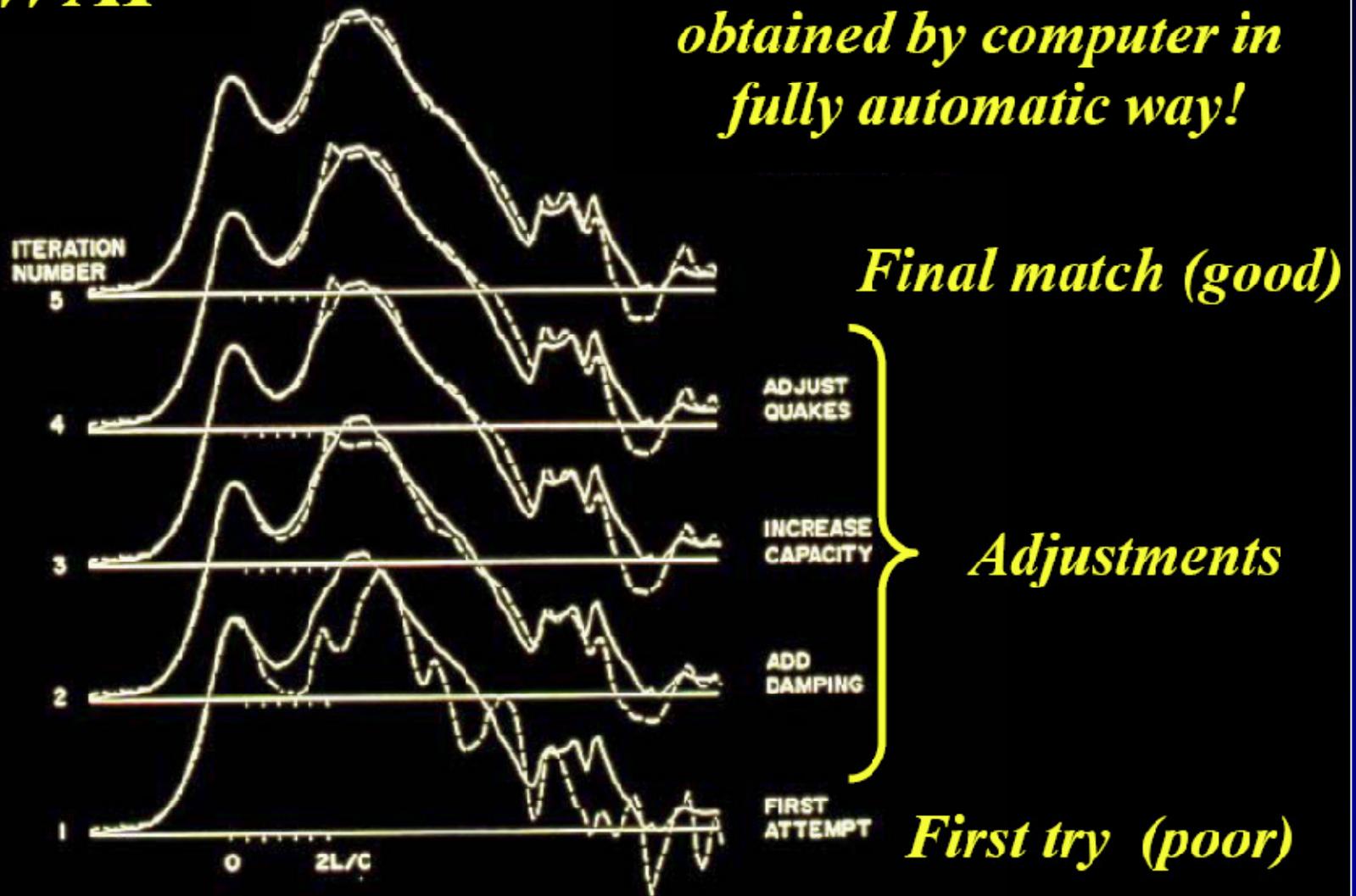
# ANÁLISE PELO MÉTODO CAPWAP

É um método que utiliza um programa computacional que discretiza todo o sistema martelo, cepo, capacete, coxim e estaca em elementos de massa, mola e amortecedores e utilizando os registros capturados pela instrumentação faz a consistência entre valores medidos e calculados.



# CAPWAP

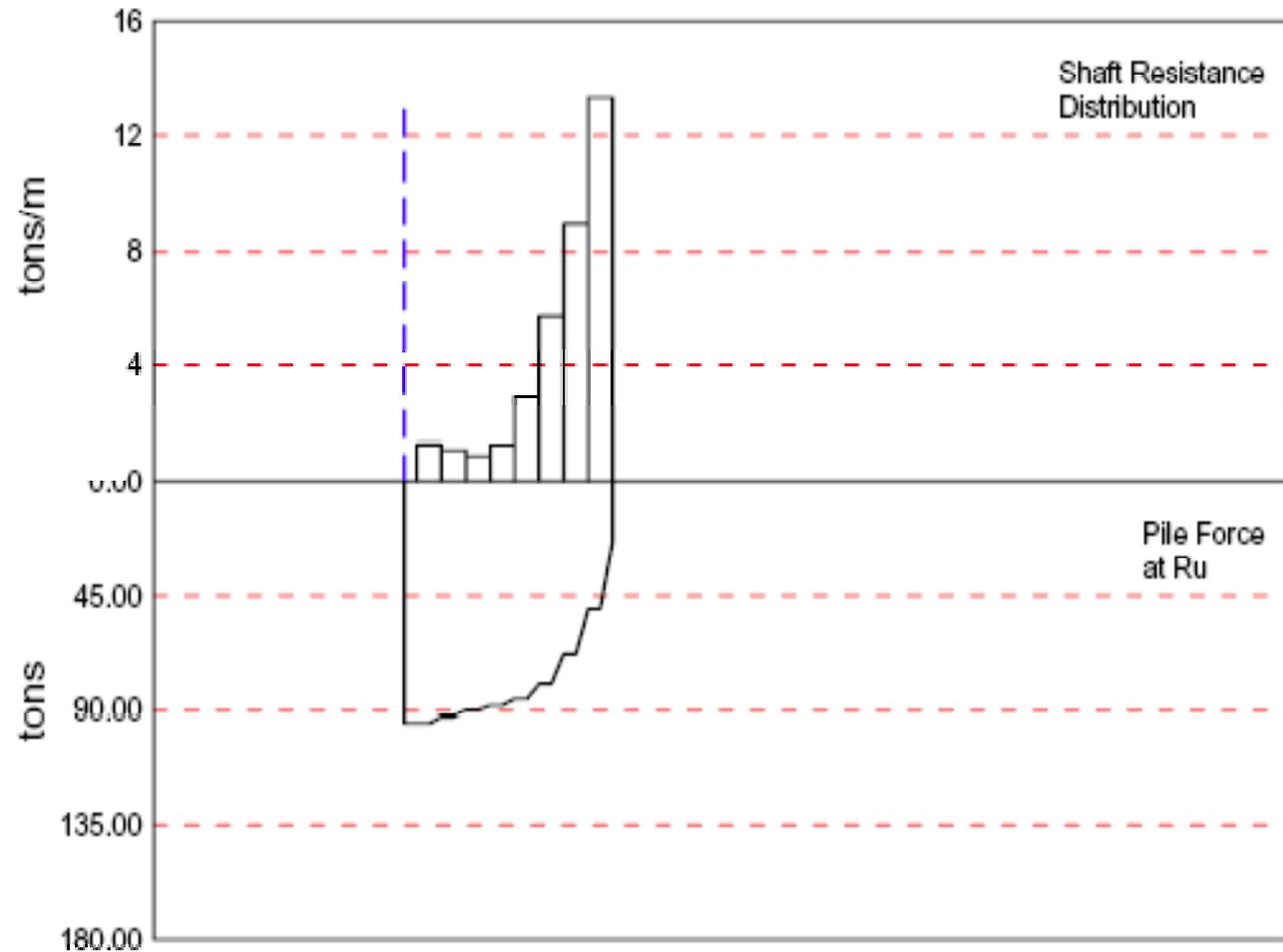
*CAPWAP match can be obtained by computer in fully automatic way!*



# Distribuição de resistências

— Pile Top  
- - - Bottom

Ru = 94.7 tons  
Rs = 71.1 tons  
Rb = 23.6 tons  
Dy = 13.2 mm  
Dx = 13.3 mm

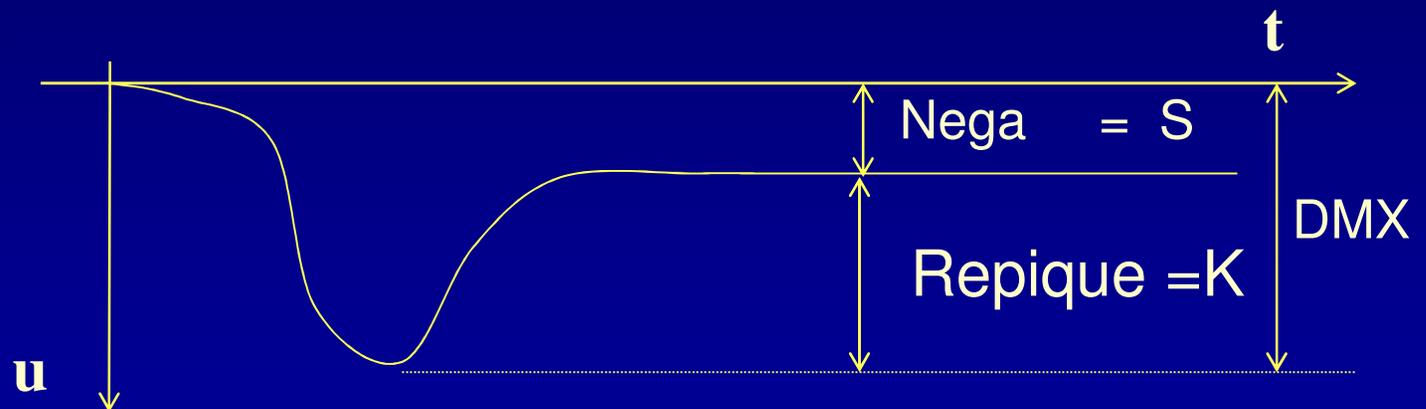


# Ensaio Dinâmico - Uma evolução sobre as práticas anteriores

## FÓRMULAS DINÂMICAS

NEGAS

REPIQUE  $\rightarrow R = (K-3 \text{ mm}). AE / (0,7. L)$



**Fatores que afetam  
a avaliação  
da capacidade de carga**

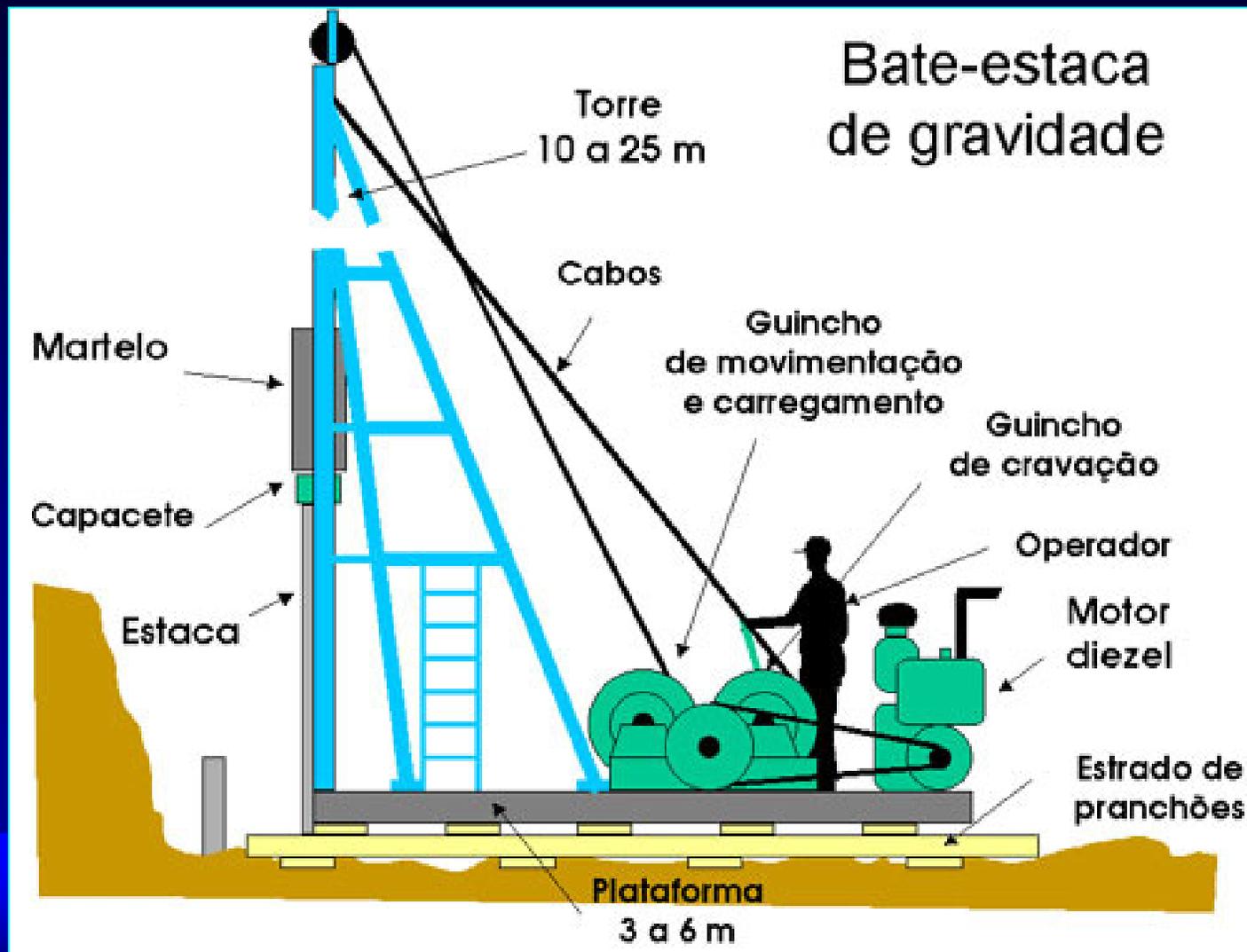
## Informações obtidas no Ensaio

Além da avaliação da capacidade de carga da estaca, alguns dos outros mais importantes são:

- Tensões máximas de compressão e de tração nos golpes.
- Nível de flexão sofrido pela estaca durante os golpes.
- Integridade da estaca, posição do dano e sua intensidade.
- Energia efetivamente transferida para a estaca.
- Deslocamento máximo da estaca durante o golpe.
- Da análise CAPWAP®, é possível determinar a distribuição de atrito ao longo do fuste, separado da ponta.

**Fatores que afetam  
a avaliação  
da capacidade de carga**

# 1. Energia Aplicada no Golpe

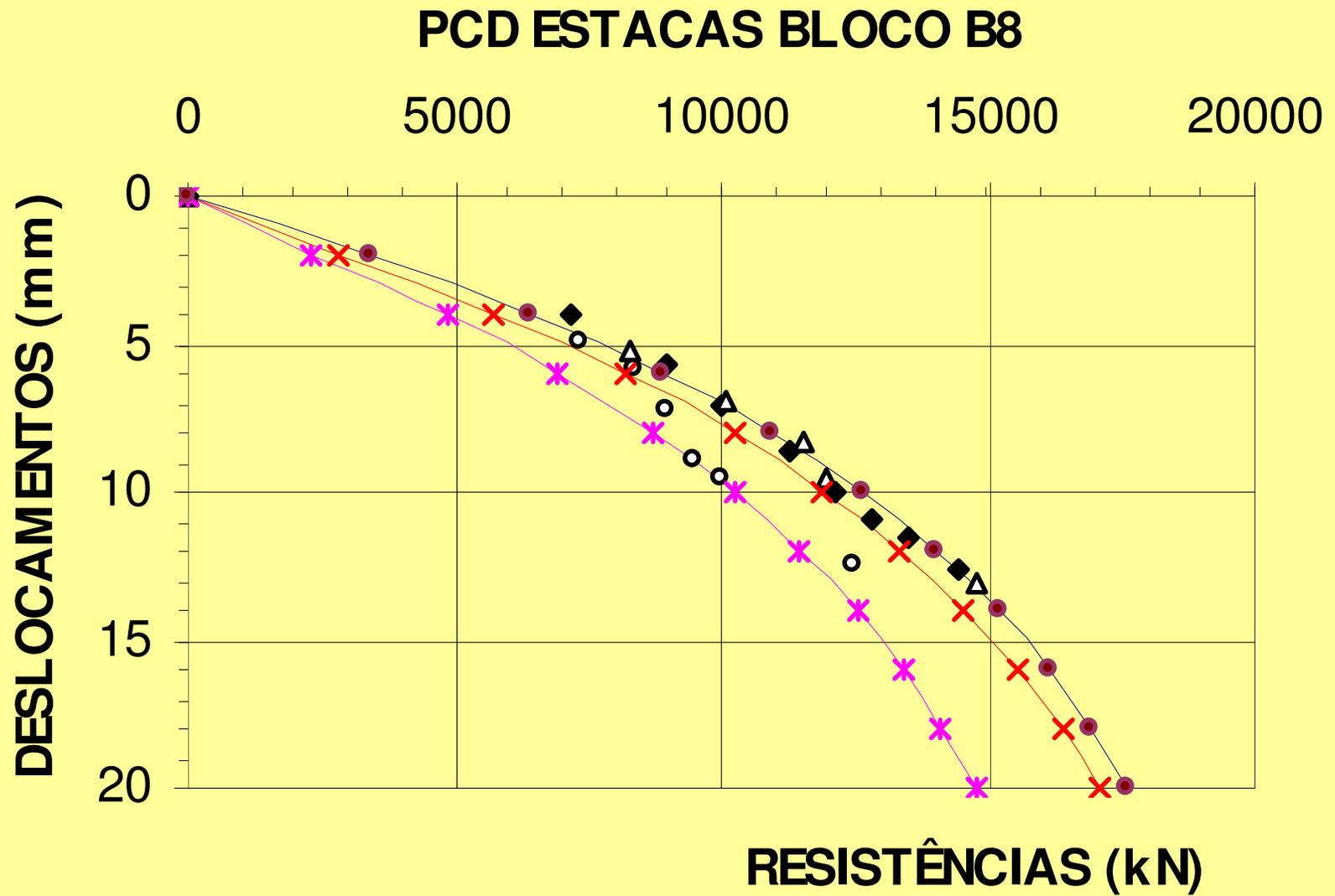


## Resultados da aplicação de energia crescente.

H (campo) (m)	R <sub>t</sub> (PDA) (kN)	DMX (PDA) (m)	S (campo) (m)
.2	850	0.0035	0
0.4	1010	0.0051	0
0.6	1140	0.0054	0
0.8	1330	0.0072	0
1.0	1530	0.0082	0
1.2	1730	0.0111	0
1.4	1930	0.0132	0.002
1.6	2010	0.0147	0.003
1.8	2060	0.0158	0.004
2.0	2080	0.0160	0.005
2.5	2110	0.0178	0.006
3.0	2180	0.0203	0.009

(Apud, Aoki, 2002)

# Resultados da aplicação de energia crescente.



## Prova de carga com Energia Crescente

- Só é possível em bate estacas de queda livre
- Em martelos hidráulicos e a diesel a variação possível de energia é limitada.



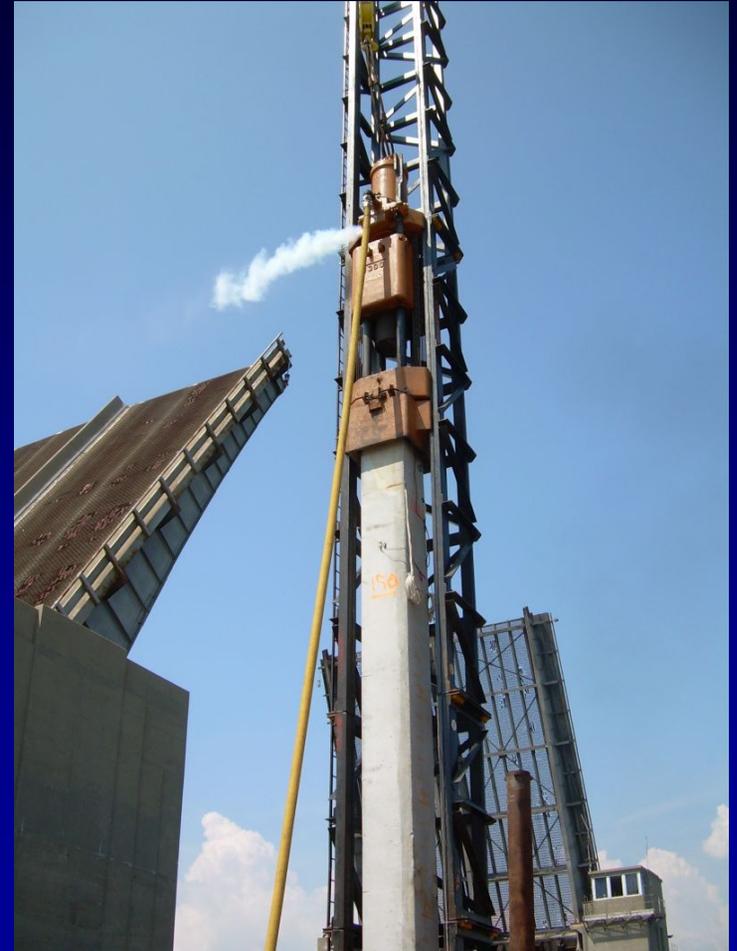
## 2. Mudanças na resistência de atrito do solo

Principalmente em solos coesivos, a interface com a estaca, pode ter sua resistência de atrito ( $R_{Ac}$ ) reduzida pelo processo de cravação.

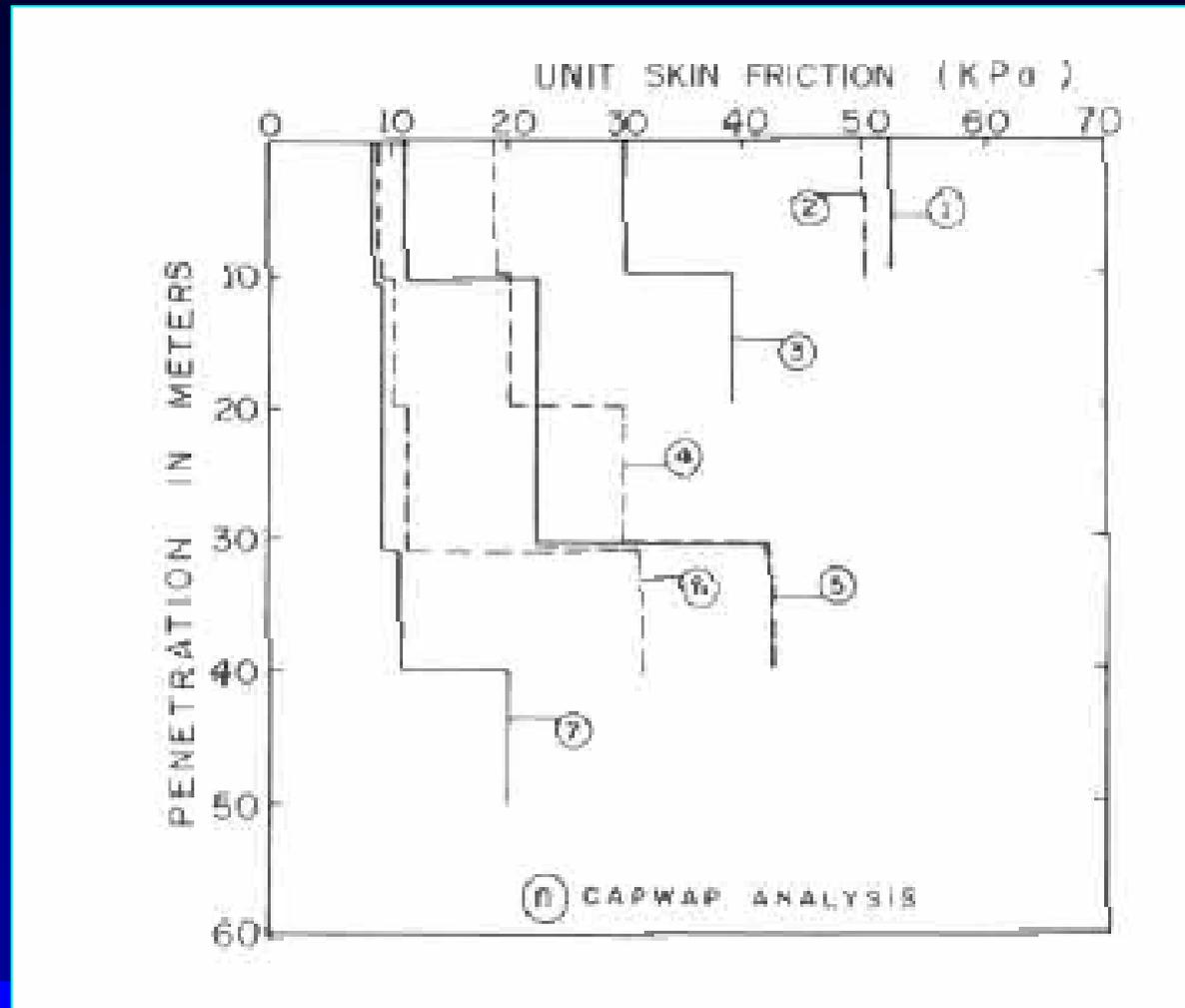
Após um período de tempo, o solo recupera parte ou totalmente a resistência original, medida numa recravação ( $R_{Ar}$ ).

Fator de “set up” =  $R_{Ar} / R_{Ac}$

O inverso também pode ocorrer, em solos que apresentam relaxação, ou seja ter reduzida a sua resistência após repouso.



# Degeneração do atrito lateral unitário ao longo da penetração da estaca numa estaca “offshore”



(Apud, Niyama, 1982)

# Para uma correta avaliação da capacidade de carga

- Aplicar energia suficiente para mobilizar toda a resistência potencialmente disponível;
- Verificar se o terreno apresenta fator de recuperação de resistência, “set up” ou relaxação, considerando seus efeitos se necessário.
- Ensaiar preferencialmente na cravação e nas recravações.
- Ensaiar estacas representativas da obra, em número mínimo de Norma

# Estadística de resistência das estacas



N = 95 estacas; D = 70 cm; MÉDIA = 5953 kN; DESVIO PADRÃO = 1112 kN; RK = 4119 kN;  
PRmin = 3936 kN; CV = 19%

(Apud, Aoki, 2002)

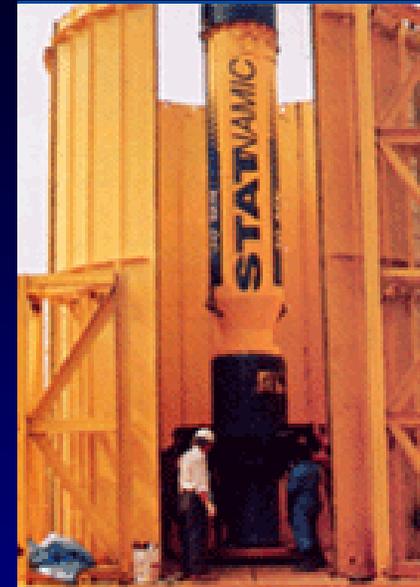
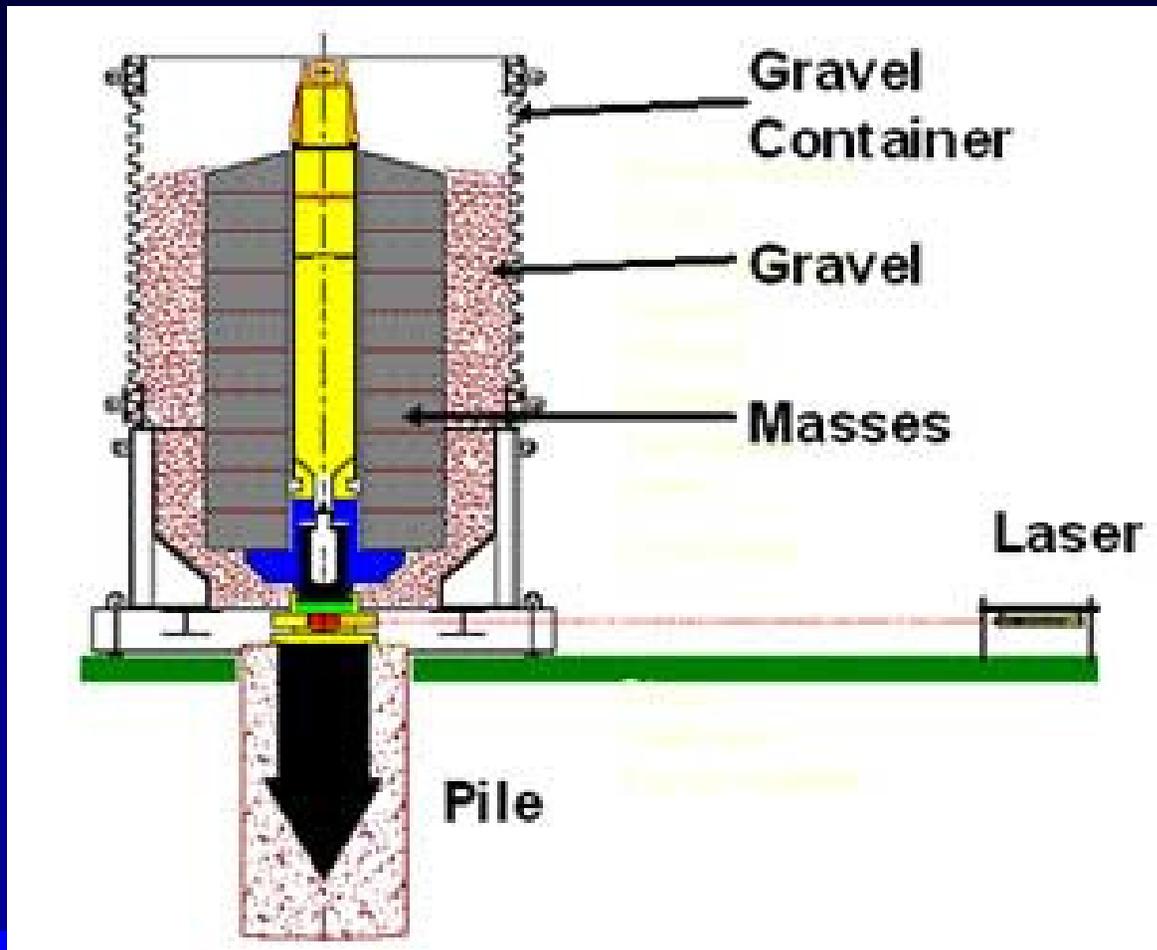
# Provas de Carga Dinâmica com Utilização de Martelo Hidráulico



# Provas de Carga Dinâmica com Utilização de Martelo Especial



# Prova de carga STATNOMIC

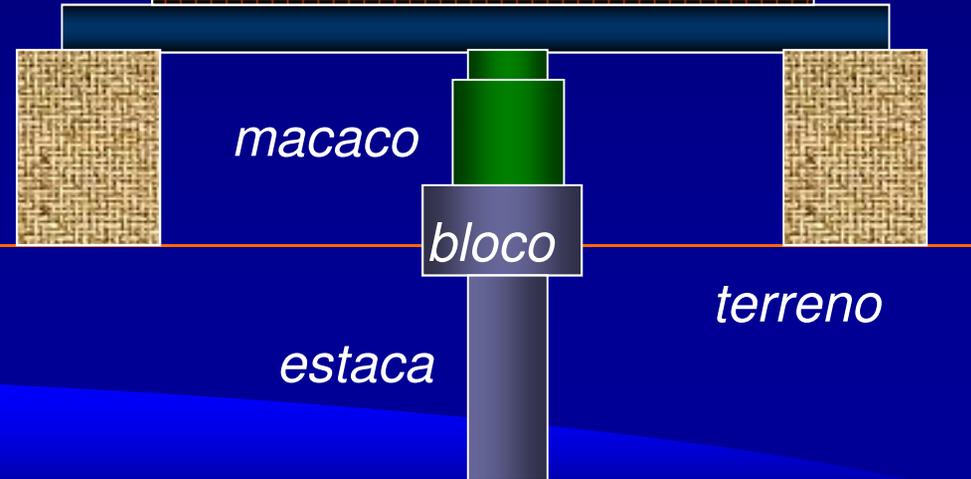


# Comparação com Provas de Carga Estáticas

# Provas de carga estáticas

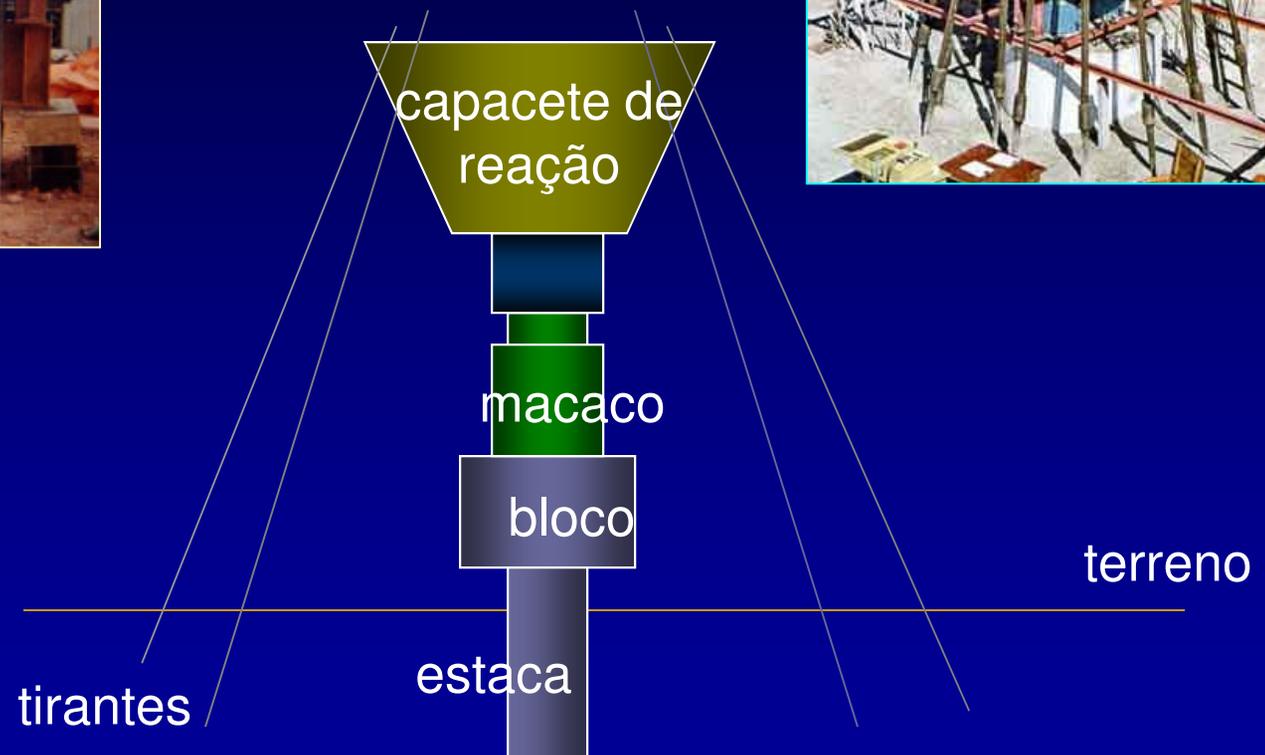
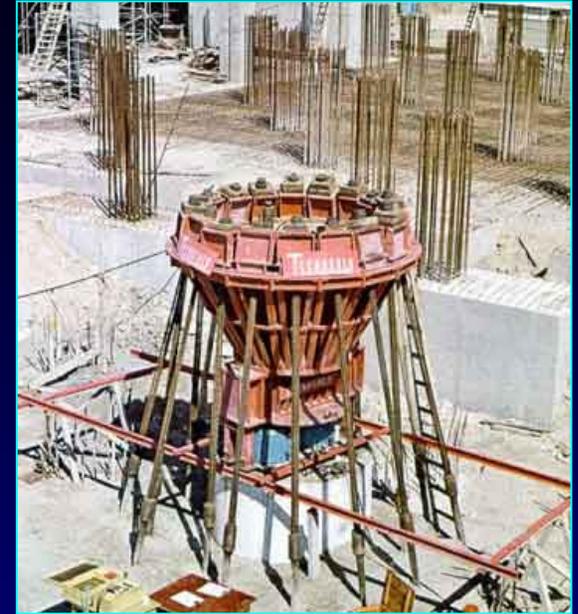


Reação por cargueira



# Provas de carga estáticas

## Reação por tirantes



# Curva carga/descarga x recalque em provas de carga estáticas

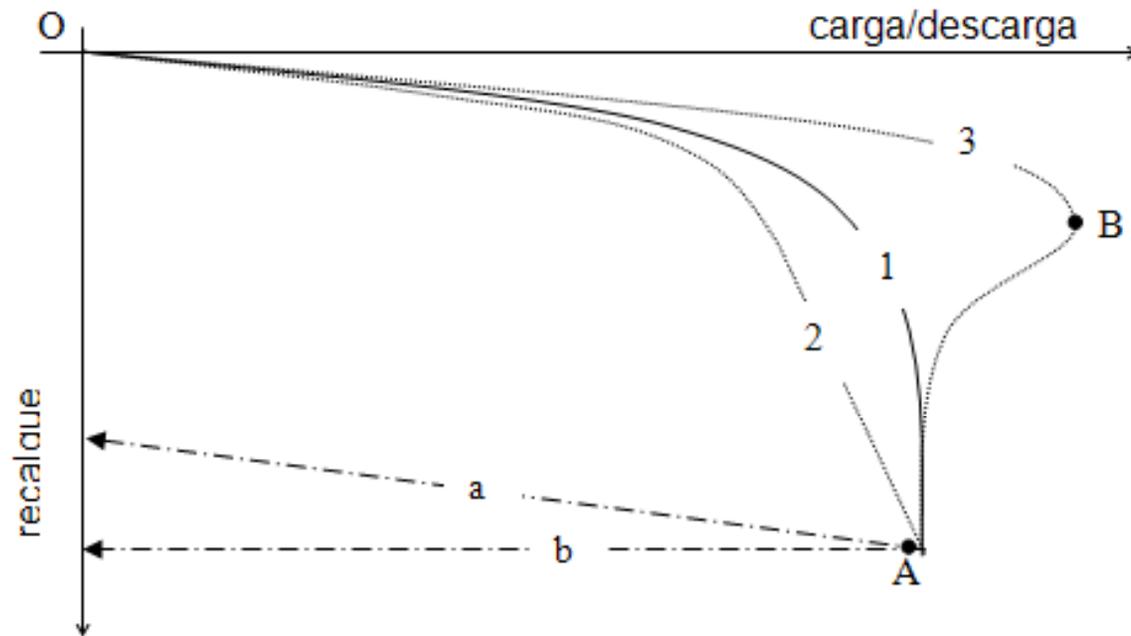
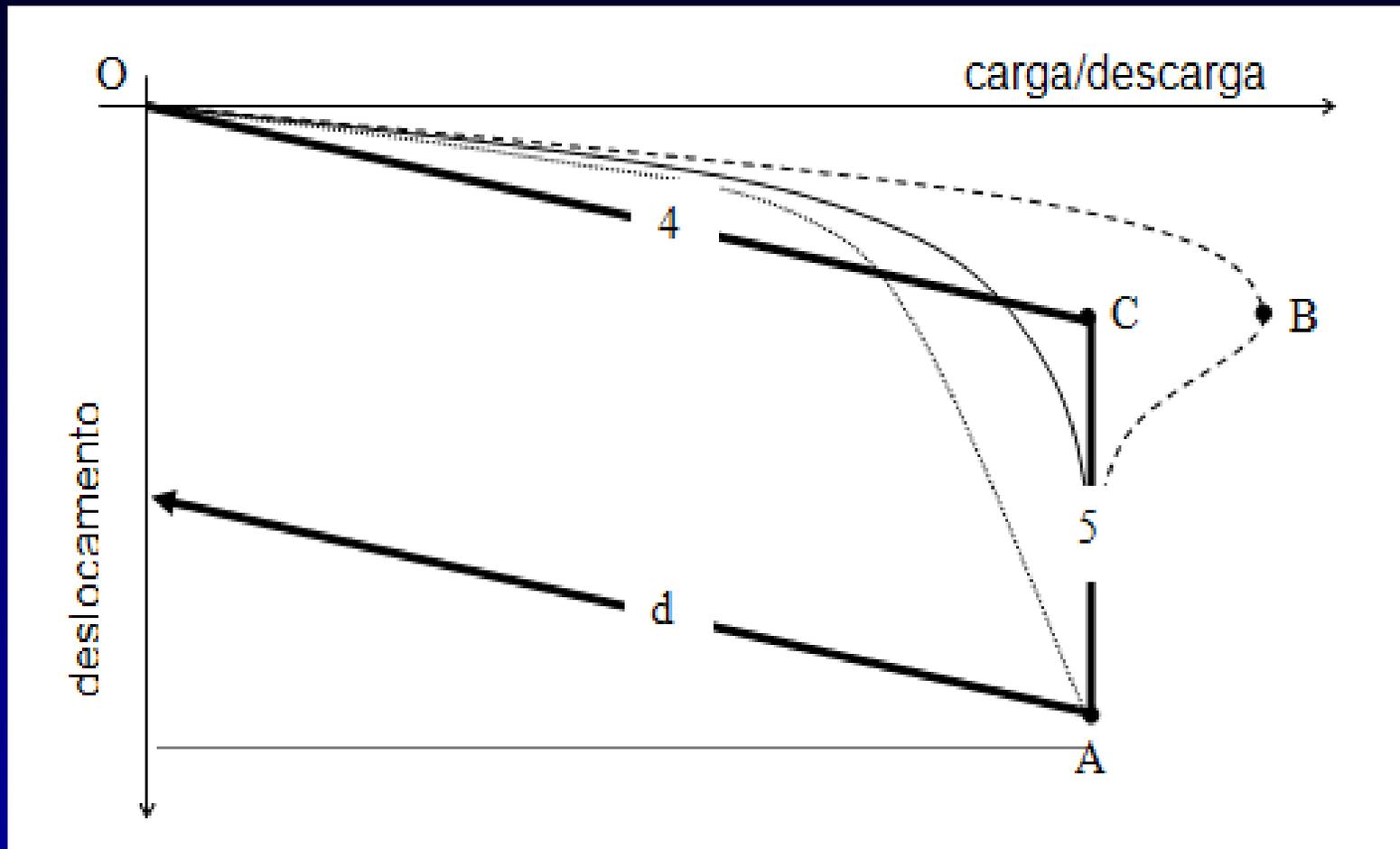


Figura 1. Prova de carga estática: formas da curva carga/descarga x recalque.

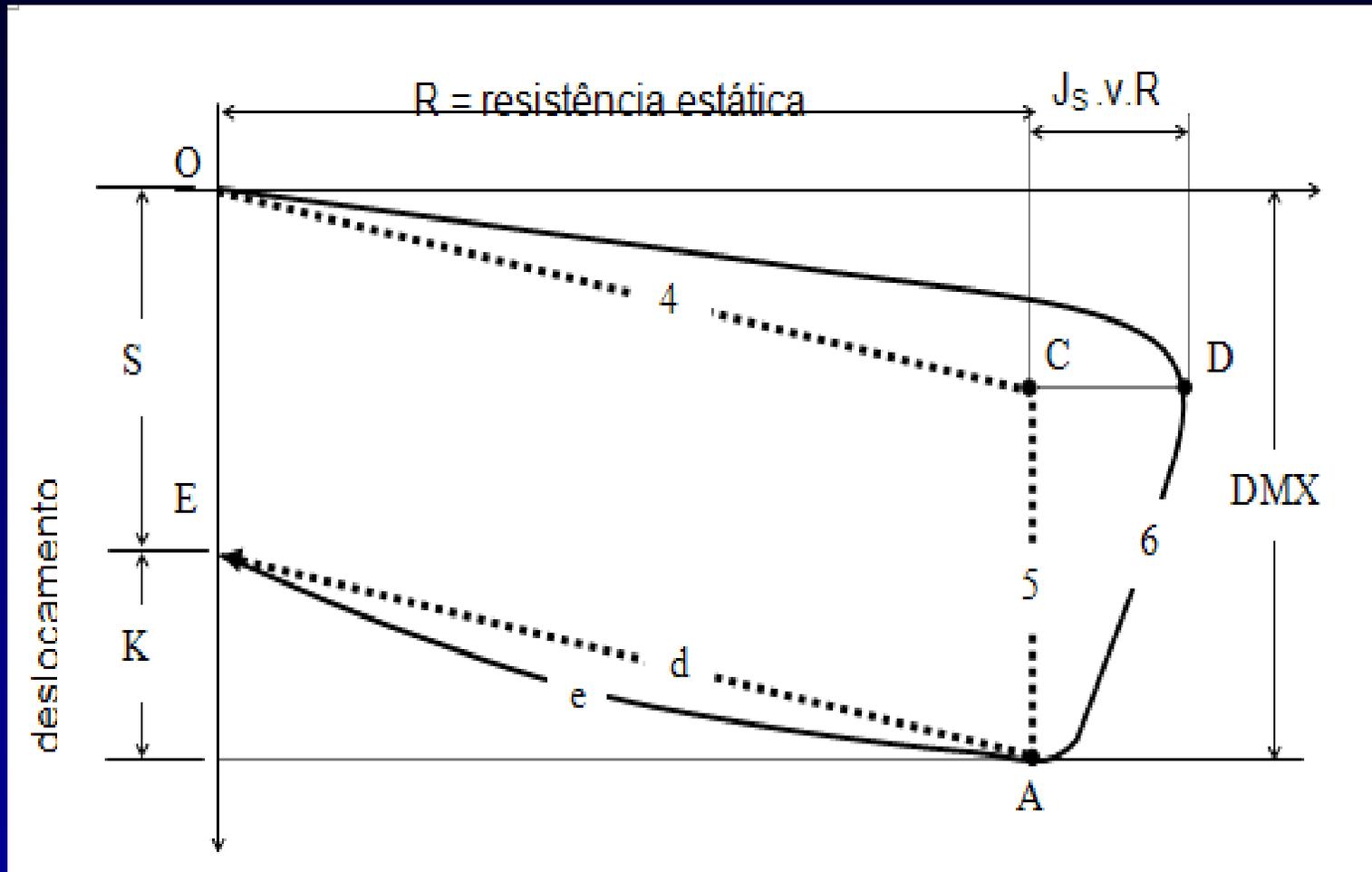
A figura 1 mostra que as curvas de carregamento (1,2 e 3) podem se combinar com as possíveis curvas de descarregamento (a ou b). No ponto A das curvas, a carga aplicada é igual ao valor da resistência estática mobilizada ( $R$ ).

# Curva carga/descarga estática x deslocamento, do modelo de Smith

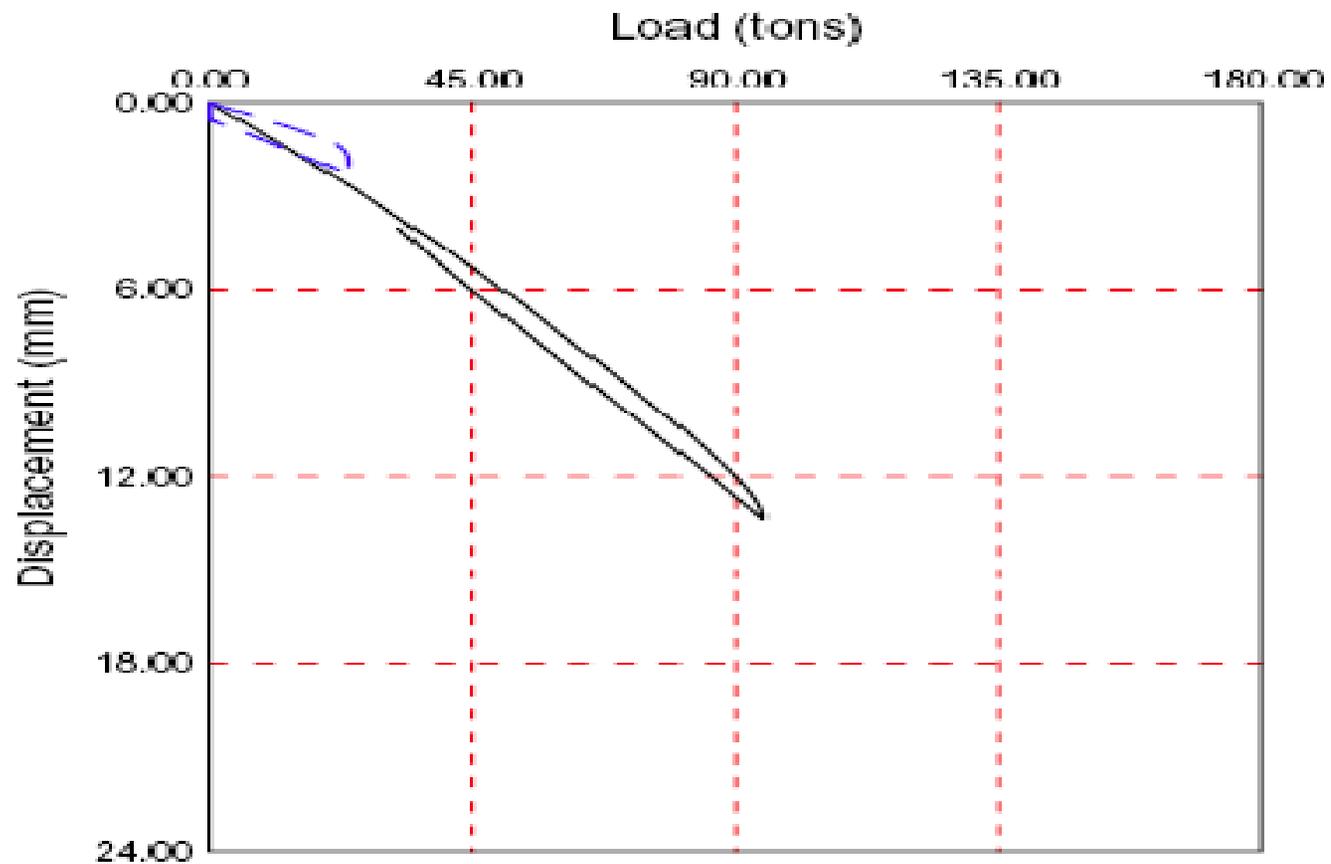


(Apud, Aoki, 2002)

# Curva resistência total x deslocamento, do modelo de Smith.



# Curva resistência total x deslocamento gerado pelo programa CAPWAP



# Provas de carga estáticas

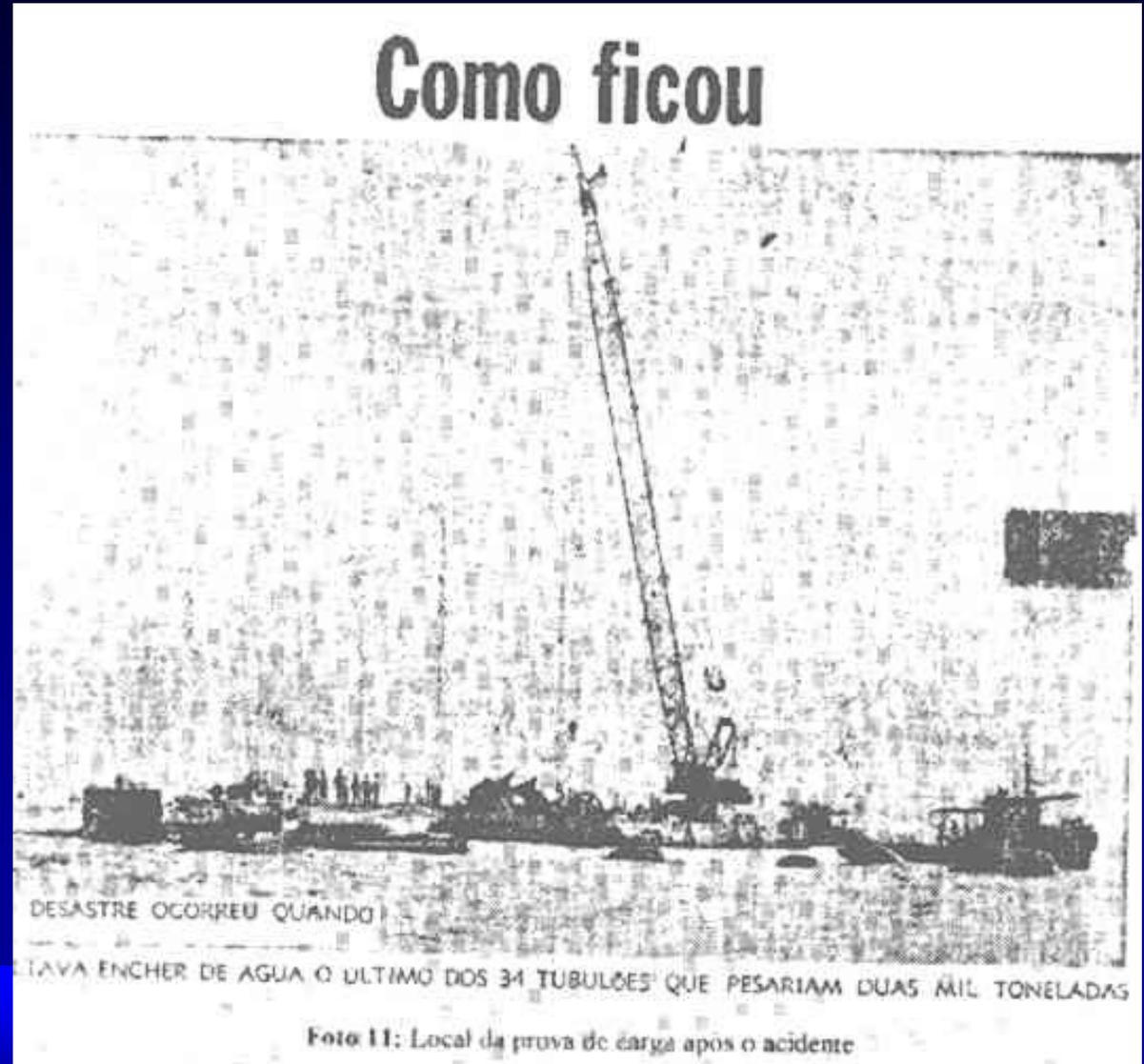
## Prova de carga - Ponte Rio Niterói

Acidente em  
25/03/1970

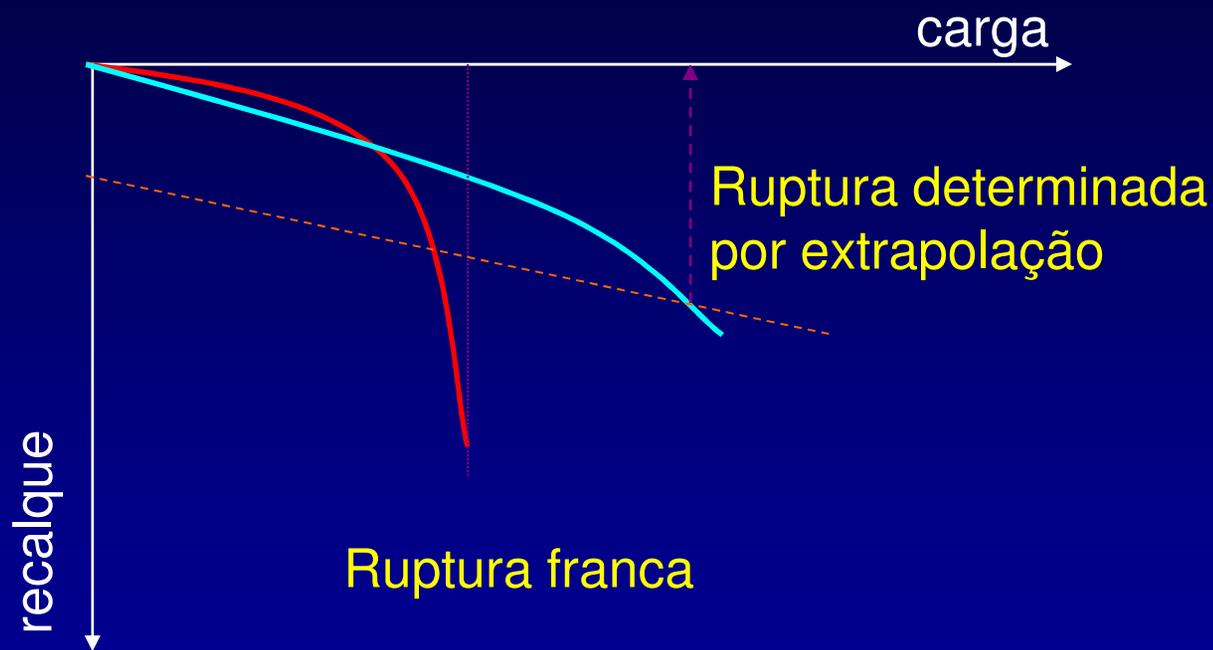


# Provas de carga estáticas

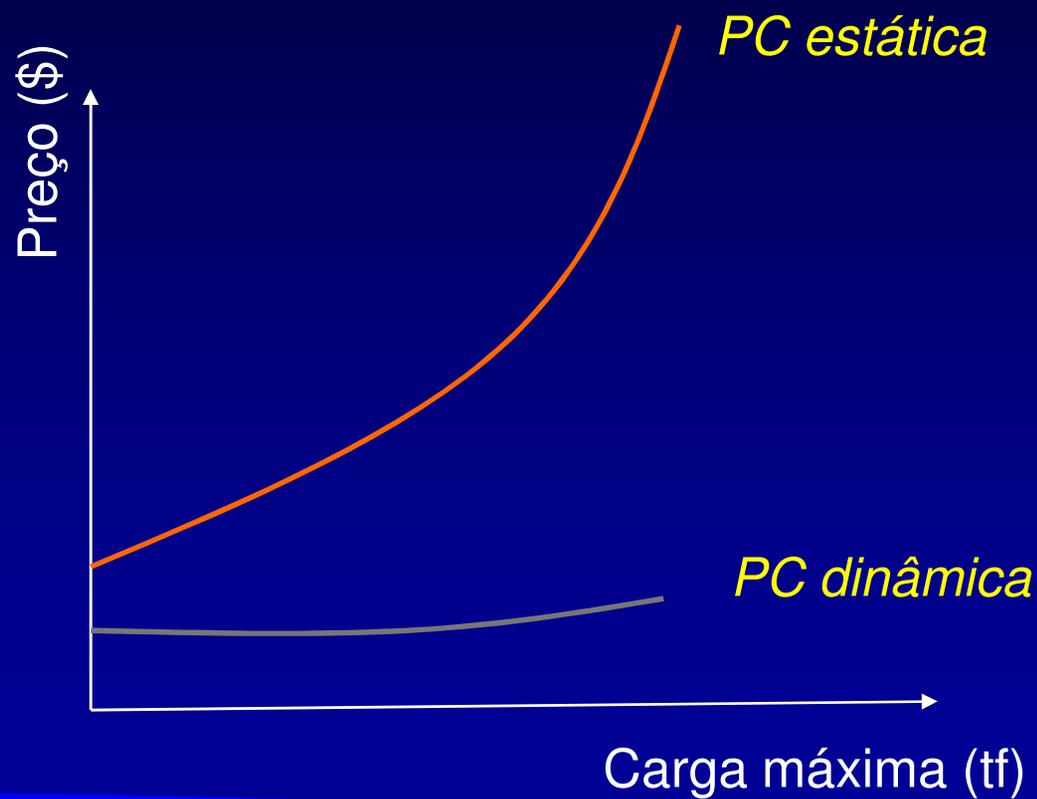
## Prova de carga - Ponte Rio Niterói



# Determinação de cargas de ruptura em provas de carga estática



# Custo relativo entre provas de carga



# Normas Técnicas

## Normas relacionadas

NBR-6.118 - Projeto e execução de obras de concreto armado.

NBR-12.131 - Estacas - prova de carga estática.

NBR- 13.208 – Ensaio de carregamento dinâmico (revista em 2006)

NBR-6122 - Projeto e execução de fundações (nova revisão aguardando publicação)

A partir da elaboração do método de ensaio NBR 13208 da ABNT, de outubro de 1994, a prova de carga dinâmica passou a ter uma denominação oficial de Ensaio de Carregamento Dinâmico de Estacas. Esta norma foi revista em 2006.

A revisão da norma NBR-6122/96, no seu capítulo de estacas cravadas considera o ensaio de carregamento dinâmico (NBR 13208/94) como uma das alternativas válidas para avaliação capacidade de carga.

Esta norma NBR 6122, foi revista e aprovada em 3 de agosto de 2010. Nela, percebe-se uma tentativa de valorizar mais a prova de carga estática, minimizando o uso do ensaio de carregamento dinâmico.

## Norma NBR – 6122 (abril de 1996) dizia:

### Aceitação do Ensaio de Carregamento Dinâmico

7.2.3.2 Para avaliação da capacidade de carga, pode ser usado o ensaio de carregamento dinâmico, definido como aquele que se utiliza de uma instrumentação fundamentada na aplicação da “Equação da Onda” conforme a NBR 13208”

### Fator de segurança

#### 7.2.3 Métodos dinâmicos

“7.2.3.3 Para fixação da carga admissível, o coeficiente de segurança não deve ser inferior a fatores de segurança globais mínimos:

- 1) Fundações superficiais →3,0
- 2) Estacas ou tubulões sem prova de carga →2,0
- 3) Estacas ou tubulões com prova de carga →1,6 (Esta redução só é possível quando as provas de carga são realizadas a priori na obra).

# NORMAS TÉCNICAS

## NBR – 6122 (abril de 1996)

### Capacidade de carga de estacas ou tubulões com prova de carga →1,6

**Nota: no caso de fundações profundas, só é permitido reduzir o fator de segurança quando se dispõe de um número adequado de provas de carga e quando os elementos ensaiados são representativos do conjunto da fundação, ou a critério do projetista. Esta redução só é possível quando as provas de carga são realizadas a priori na obra, e não a posteriori, como instrumento para dirimir dúvidas quanto à qualidade do estaqueamento.”**

## Quantidade de estacas a serem testadas

### “7.8.3 Estacas pré-moldadas de concreto

7.8.3.6.1 Nas estacas comprimidas, quando não é feita a prova de carga ou de instrumentação, pode-se adotar como carga de trabalho aquela obtida a partir da tensão média atuante na seção de concreto, limitada ao máximo de 6 MPa.

7.8.3.6.2 Nas estacas comprimidas, quando é feita a prova de carga ou de instrumentação, a carga de trabalho máxima é aquela calculada como peça estrutural de concreto, ... Notas:

B) As provas de carga estáticas devem ser executadas em número de **1% do conjunto de estacas**, com mínimo de uma prova de carga.

C) Os ensaios de carregamento dinâmico devem ser executados em número de **3% do conjunto de estacas** de mesmas características na obra, respeitando-se o mínimo de três estacas instrumentadas....”

Não há nenhum outro item da norma especificando a quantidade de Ensaio de Carregamento Dinâmico necessários. Na prática, o valor de 3% é usualmente “extrapolado” para outros tipos de estacas.

NBR-6122-Divulgação-20091117.pdf ([www.abms.com.br](http://www.abms.com.br))  
diz agora:

#### 8.2.1.1 Provas de carga

A carga de ruptura pode ser determinada por provas de carga executadas de acordo com a ABNT NBR 12.131.

(Exclusivamente)

#### 8.2.1.6 Ensaio de carregamento dinâmico

O ensaio de carregamento dinâmico visa à avaliação de cargas mobilizadas na interface solo-estaca, fundamentada na aplicação da Teoria da Equação da Onda Unidimensional, conforme NBR 13.208.

## A nova NBR-6122, diz ainda:

**Tabela 6: Quantidade de provas de carga**

Tipo de estaca	A Tensão (admissível) máxima abaixo da qual não serão obrigatórias provas de carga desde que o número de estacas da obra seja inferior à coluna (B), em MPa	B Número total de estacas da obra a partir do qual serão obrigatórias provas de carga
Pre moldada <sup>(1)</sup>	7,0	100
Madeira	-	100
Aço	0.5 $f_{yk}$	75
Hélice e hélice de deslocamento (monitoradas)	5,0	75
Estacas escavadas Com ou sem fluido $\Phi > 60$ cm	5,0	75
Raiz	17 (até $\phi 250$ mm nominal <sup>(5)</sup> )	75
	12,5 (> $\phi 250$ mm nominal <sup>(5)</sup> )	
Micro-estaca	17 (até $\phi 250$ mm nominal <sup>(5)</sup> )	50
	12,5 (> $\phi 250$ mm nominal <sup>(5)</sup> )	
Trado segmentado	5,0	50
Franki	7,0	100
Escavadas sem fluido $\Phi$ até 50 cm	4,0	100
Strauss	4,0	100

<sup>(1)</sup> Para efeito de escolha do concreto considerem-se estas estacas com uma resistência limitada ao aço usado.

A nova NBR-6122, diz ainda:

### 9.2.2.3 Quantidade de ensaios dinâmicos

Para comprovação de desempenho as provas de carga estáticas podem ser substituídas por ensaios dinâmicos na proporção de três ensaios dinâmicos para cada prova de carga estática.

## Norma NBR – 13208 (julho de 2006) Tópicos importantes:

5.4.1.1 Para a avaliação da capacidade de carga em condições mais próximas às que se verificarão durante a vida útil da estaca, recomenda-se que os ensaios de carregamento dinâmico **sejam realizados após o processo de instalação da estaca**, em tempo suficiente a favorecer a ocorrência de variações da resistência do solo devido à perturbação do terreno gerada pelo processo executivo.

5.4.1.4 Nos casos de avaliação de “*set up*” (ganho de resistência na interface solo/estaca com o tempo) sugere-se ensaios na cravação e em re-cravações sucessivas.

6.2 “Os dados obtidos e processados pelo método simplificado do tipo CASE® devem ser confirmados e calibrados por meio de análise numérica rigorosa, do tipo CAPWAP®, ou por uma prova de carga estática segundo a ABNT NBR 12131.

## NORMAS TÉCNICAS – ALGUNS CONCEITOS

- *Desde a regulamentação da profissão de engenharia (técnicas em geral), as normas sempre foram obrigatórias (obrigação dos profissionais de “atuar dentro da melhor técnica”, “conforme a boa técnica”).*
- *A partir do CDC, as normas passaram a ter um status para-legal, cuja inobservância caracteriza uma “prática abusiva” do fornecedor de produto ou serviço.*
- *A regra de obrigatoriedade de atendimento às normas técnicas, não pode ser considerada absoluta.*

## NORMAS TÉCNICAS – ALGUNS CONCEITOS

- *As normas não podem ser consideradas como um fim em si mesmas.*
- *São recomendações, com base na melhor técnica disponível e certificada num determinado momento, para se atingir um resultado satisfatório.*
- *Um instrumento de meio, e não um fim.*

*O avanço tecnológico e a criatividade humana desenvolvem procedimentos e técnicas diferentes daquelas recomendadas pelas normas expedidas e também atingem resultados satisfatórios, não raro melhores*

*No campo jurídico, o respeito às normas técnicas, como fator de atendimento à qualidade, é uma presunção juris tantum (admite prova em contrário)*

## Bibliografia

- NBR- 13.208 – Ensaio de carregamento dinâmico
- NBR- 6122 - Projeto e execução de fundações
- Controle de Qualidade de Fundações através de Provas de Cargas Dinâmicas (PDA) e Verificação de Integridade Estrutural (PIT)”, Workshop ABMS/SindusCon-SP ( 2002)
- Fundações – Teoria e Prática, Editora Pini.
- [www.pile.com](http://www.pile.com)

# FINAL

Sussumu Niyama, Dr. Eng.  
sniyama@tecnum.com.br