

ANÁLISE DE RISCO EM FUNDAÇÕES



VIII Jornada de Engenharia Civil **CEULP/ULBRA**

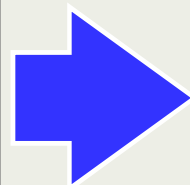
Palmas, 26 de abril de 2018

Profa. Cristina de H. C. Tsuha - EESC / Universidade de São Paulo

Fundações: conceitos básicos

SUPERESTRUTURA

peças estruturais que não entram em contato com o solo (acima do nível do terreno)



$R > S$

FUNDAÇÃO

subestrutura +
maciço de solo que o envolve



Fator de segurança $\Rightarrow F_s = R/S$

Projeto de fundações

Projeto de **adaptação** da estrutura na natureza

- Ações externas
- solo (ou rocha) de instalação da fundação



Segurança

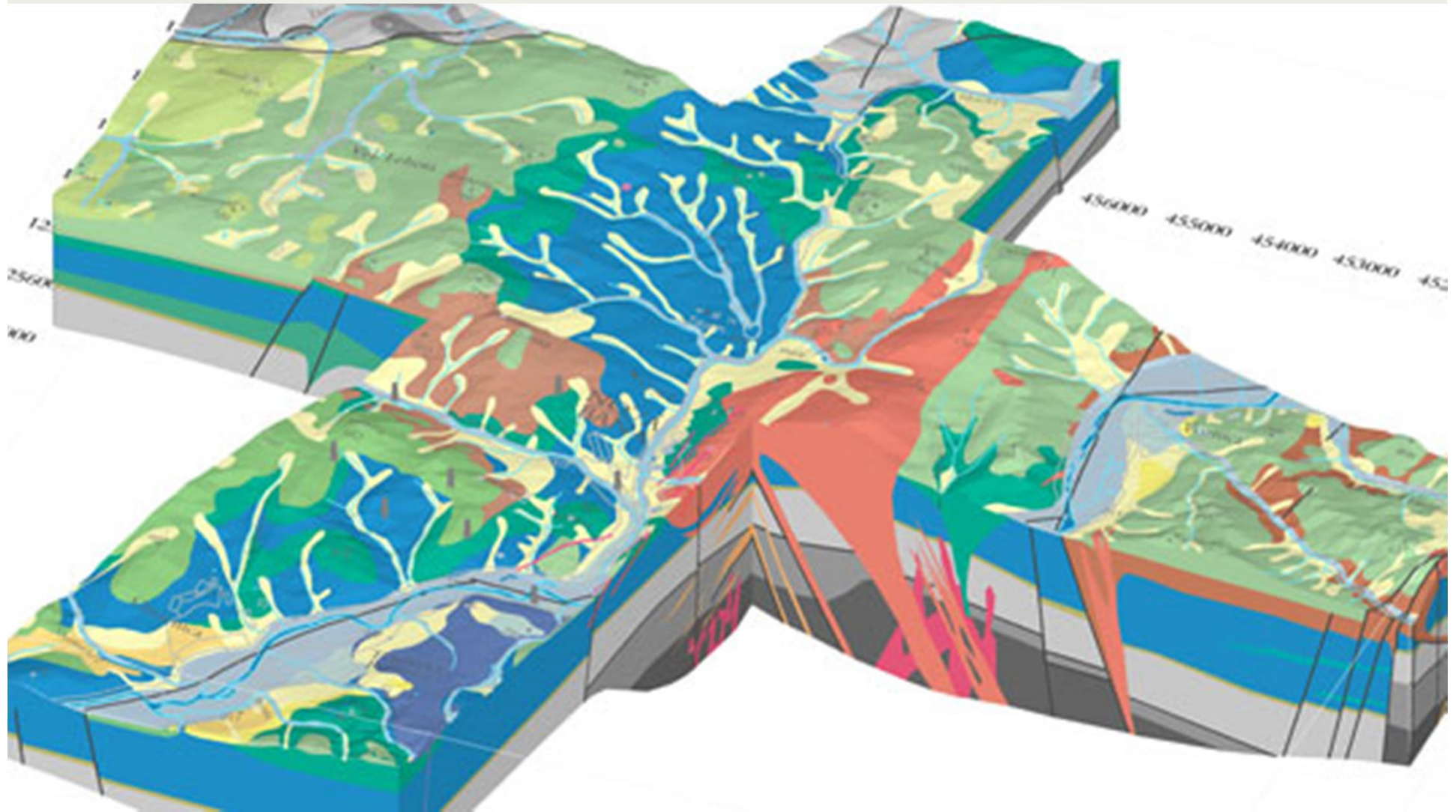
Ruptura



Recalques excessivos

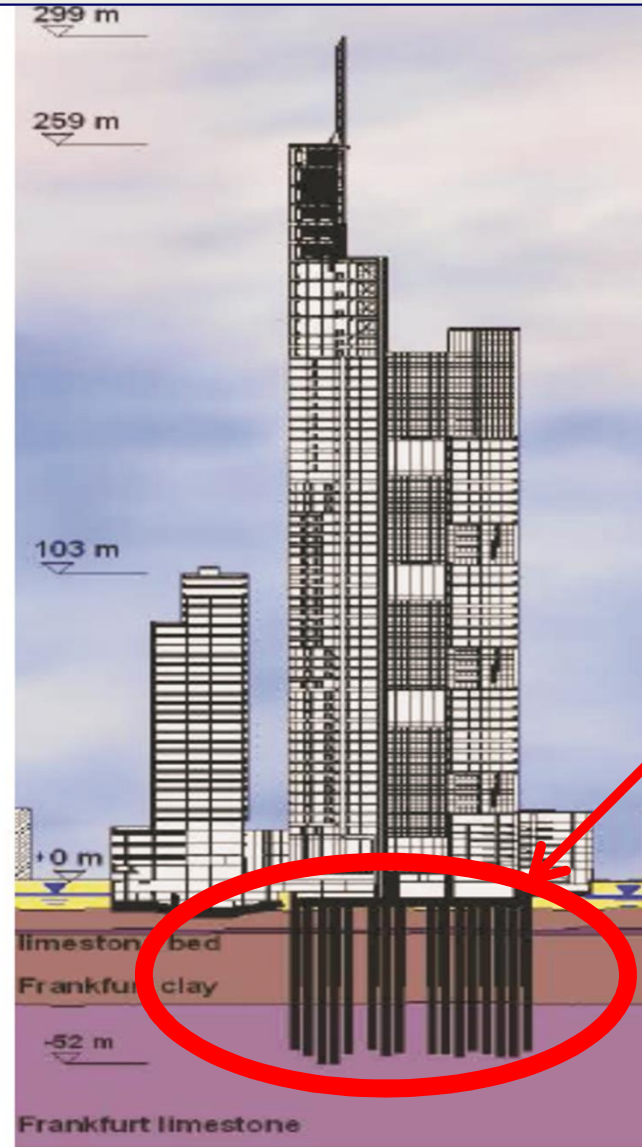
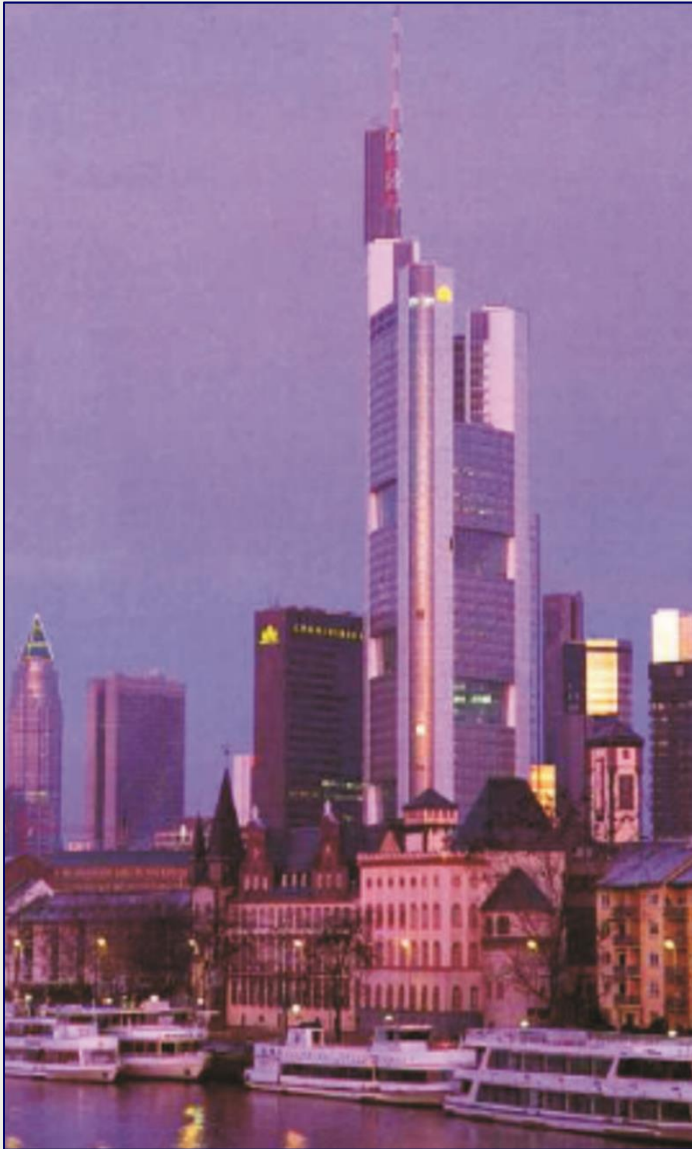


Projeto de adaptação da estrutura na natureza



Projeto de adaptação da estrutura no ambiente

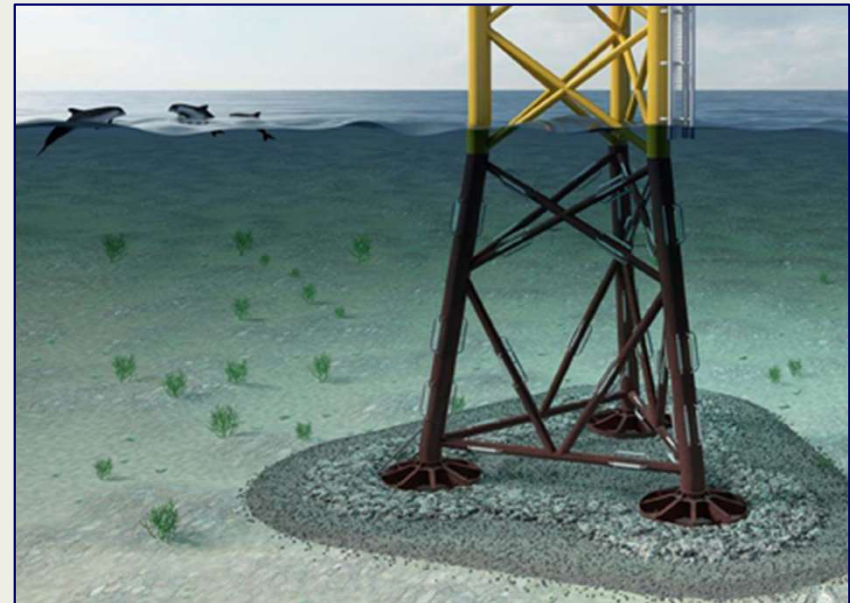
Edifício



Projeto de adaptação da estrutura no ambiente



Projeto de adaptação da estrutura no ambiente



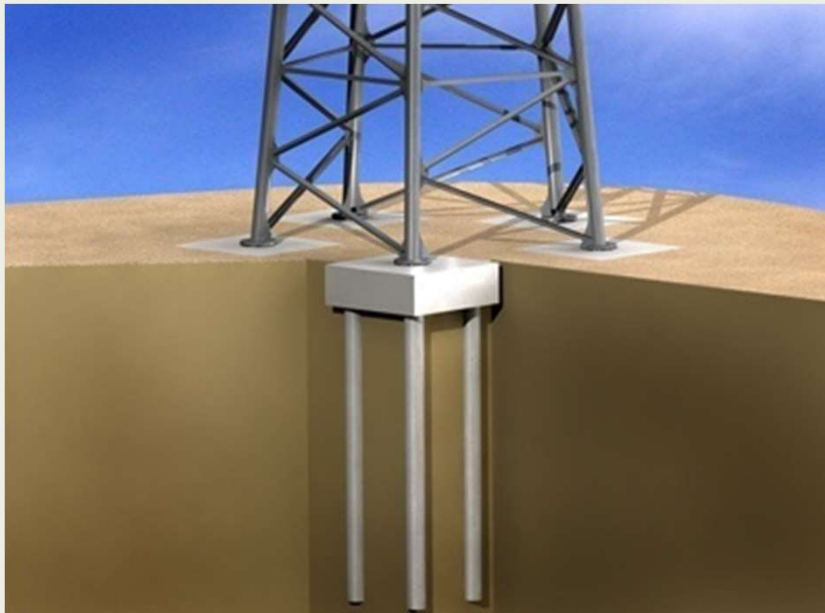
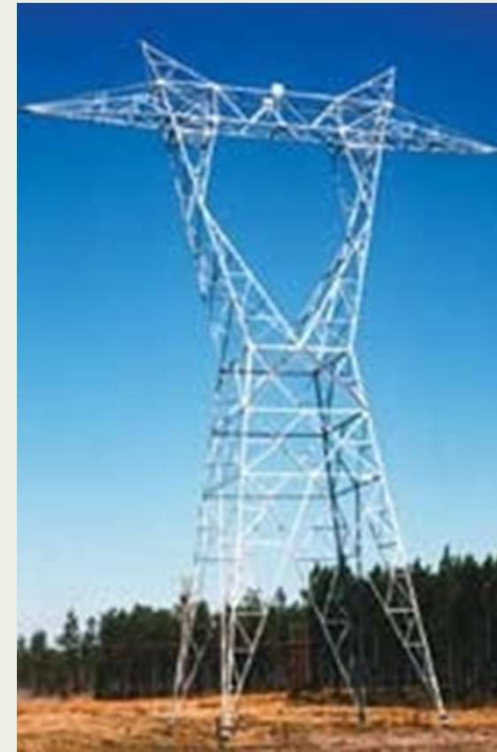
Projeto de adaptação da estrutura no ambiente



Projeto de adaptação da estrutura no ambiente



Projeto de adaptação da estrutura no ambiente



Cargas

Peso proprio
Vento
Correntes
Equipamentos
Sismos
Horizontais
Tração
etc

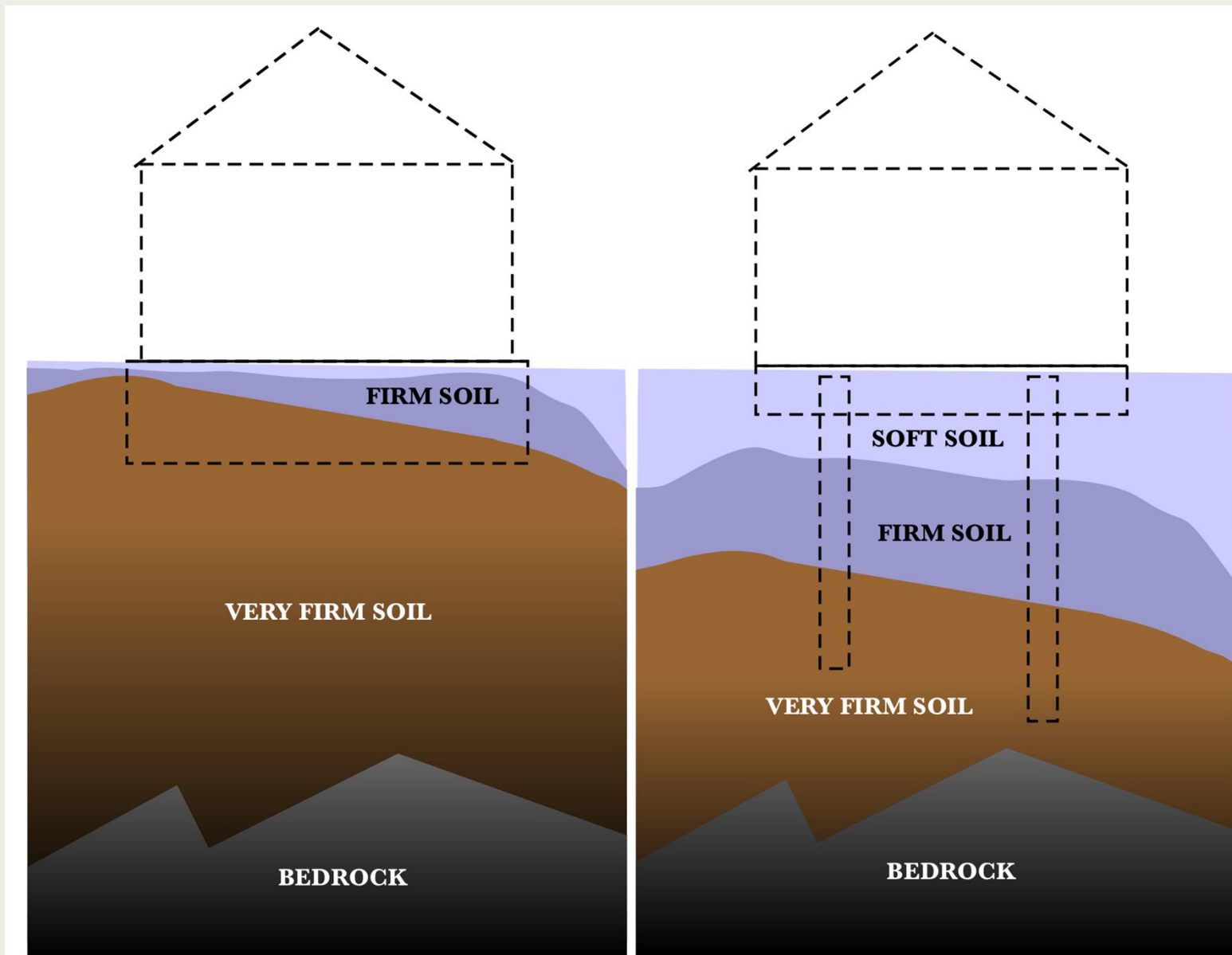
Ambiente

Solo de apoio
topografia
vizinhos

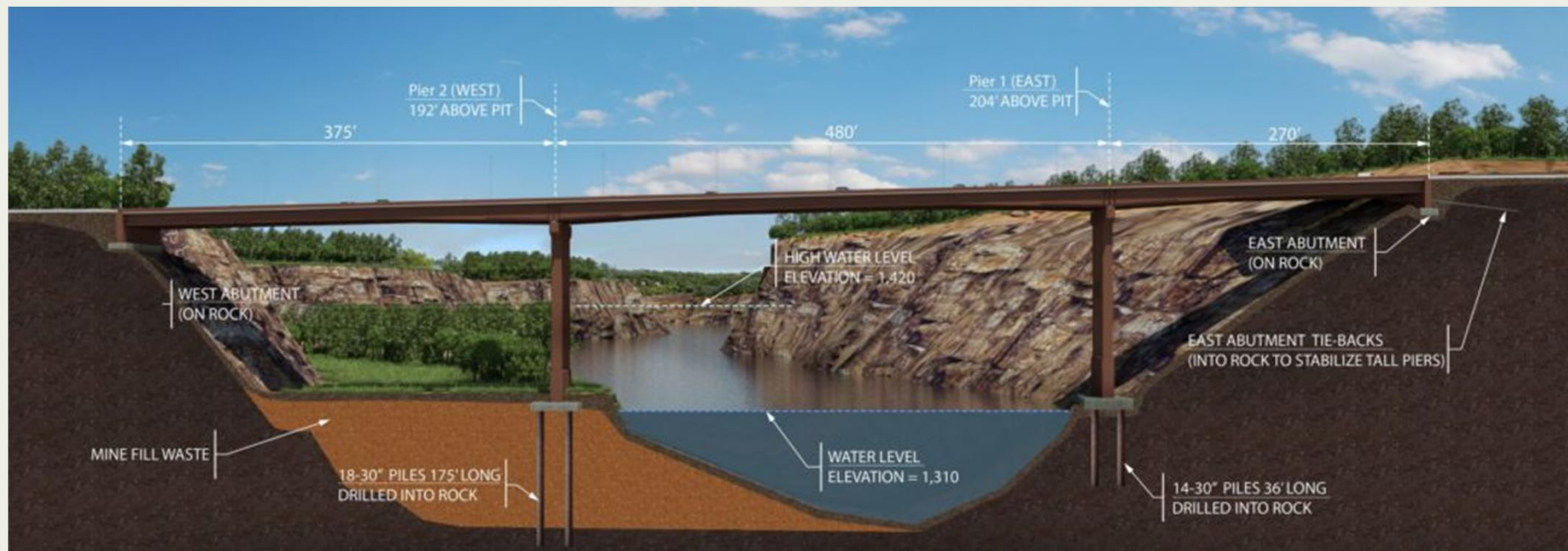
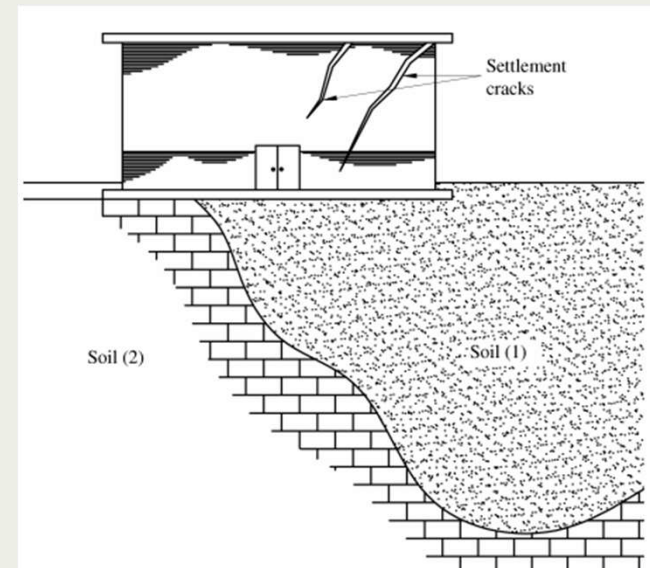
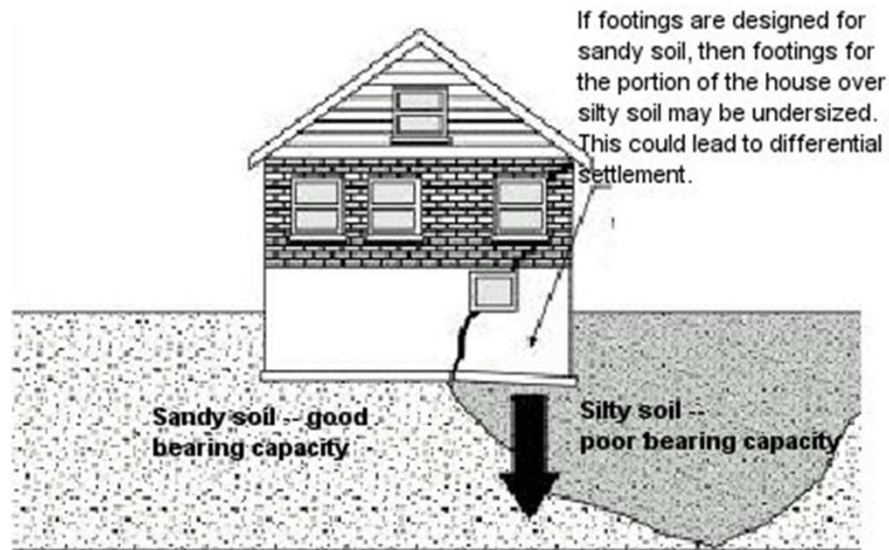
```
graph TD; Cargas[Cargas] --> Projeto[Projeto de fundação]; Ambiente[Ambiente] --> Projeto;
```

Projeto
de
fundação

Adaptação na natureza



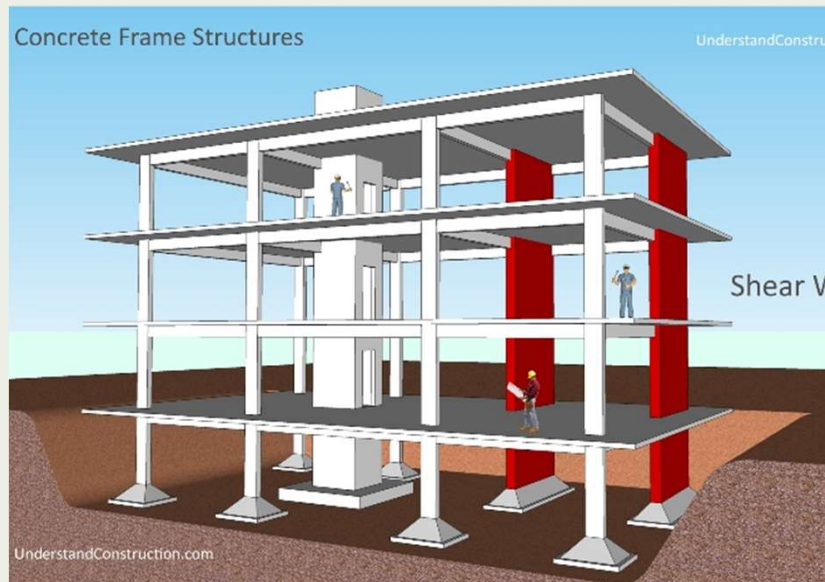
Variabilidade do terreno



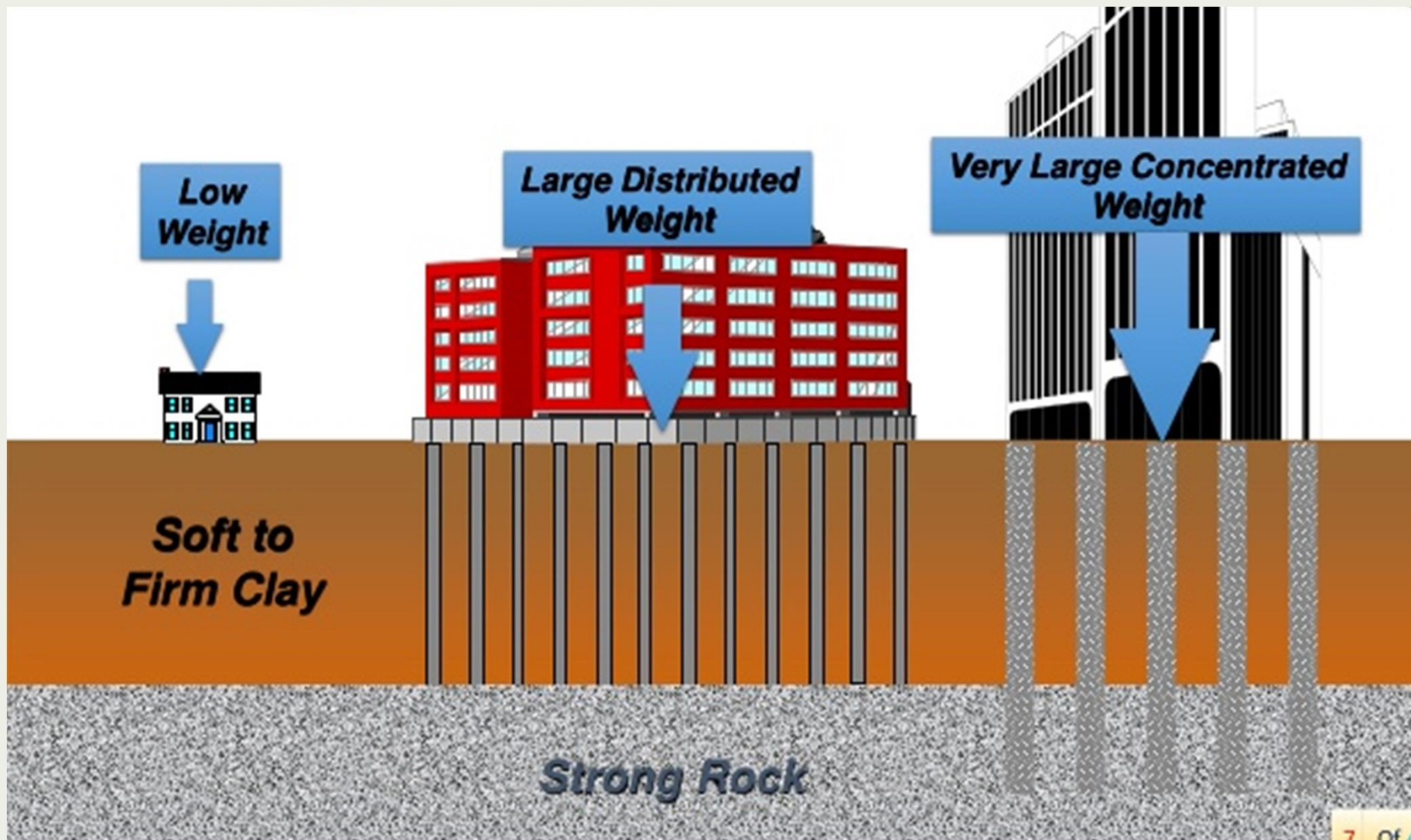
Tipos de fundações

Profundas

Direta



Tipos de fundações

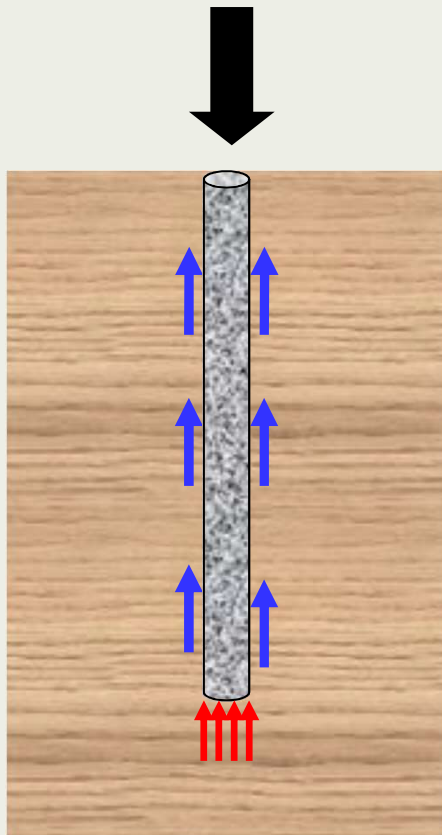


Tipos de fundações

Quanto ao modo de transferência das cargas no solo

ESTACAS

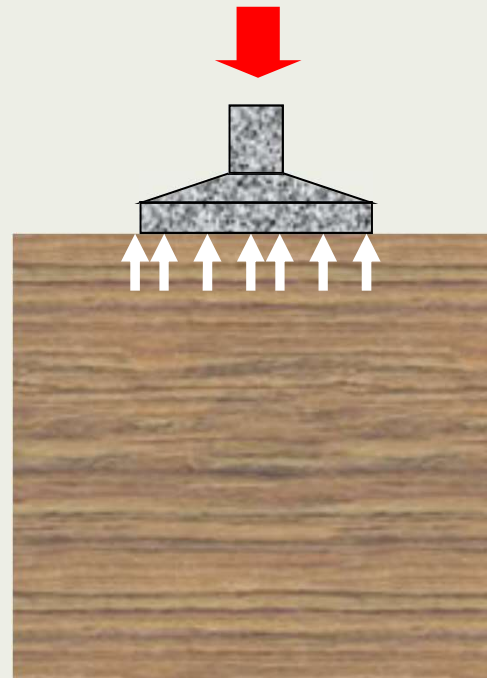
BASE LATERAL



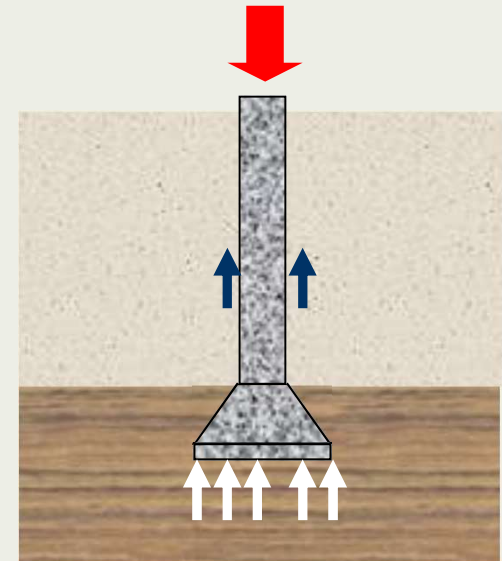
DIRETAS

BASE

SAPATAS

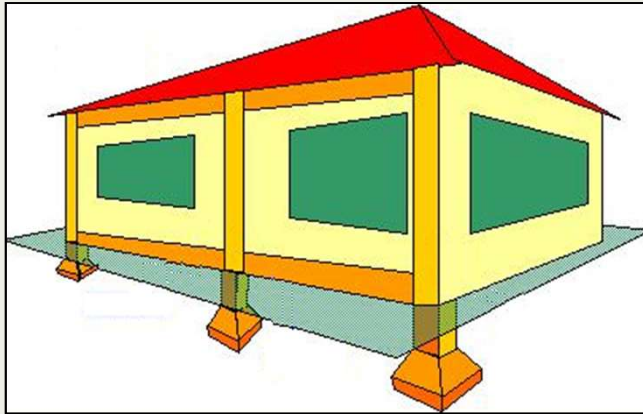


TUBULÕES



Diretas: Sapatas

SAPATAS



1



2



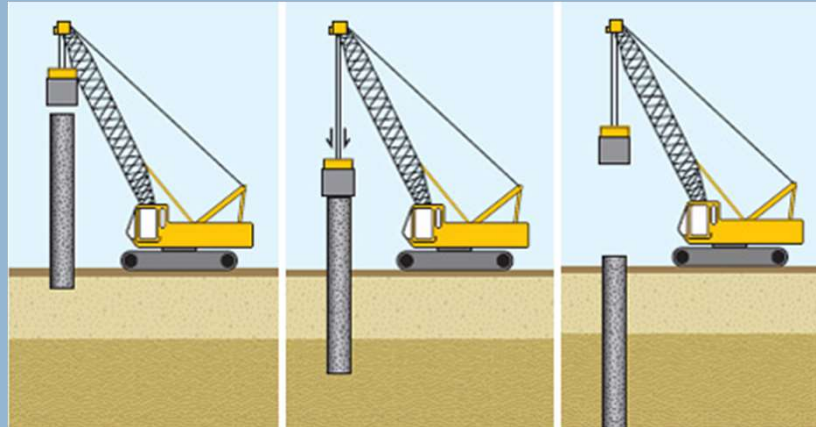
3



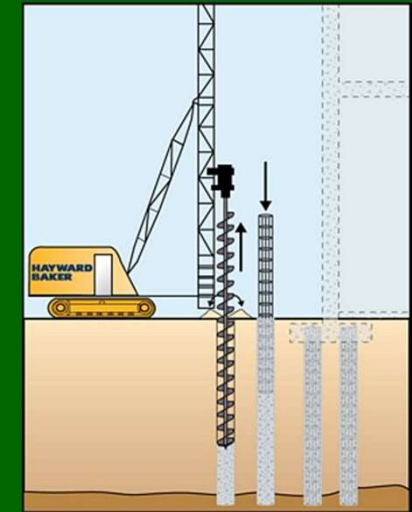
Tipos de estacas (evolução de equipamentos)



cravadas



outros tipos



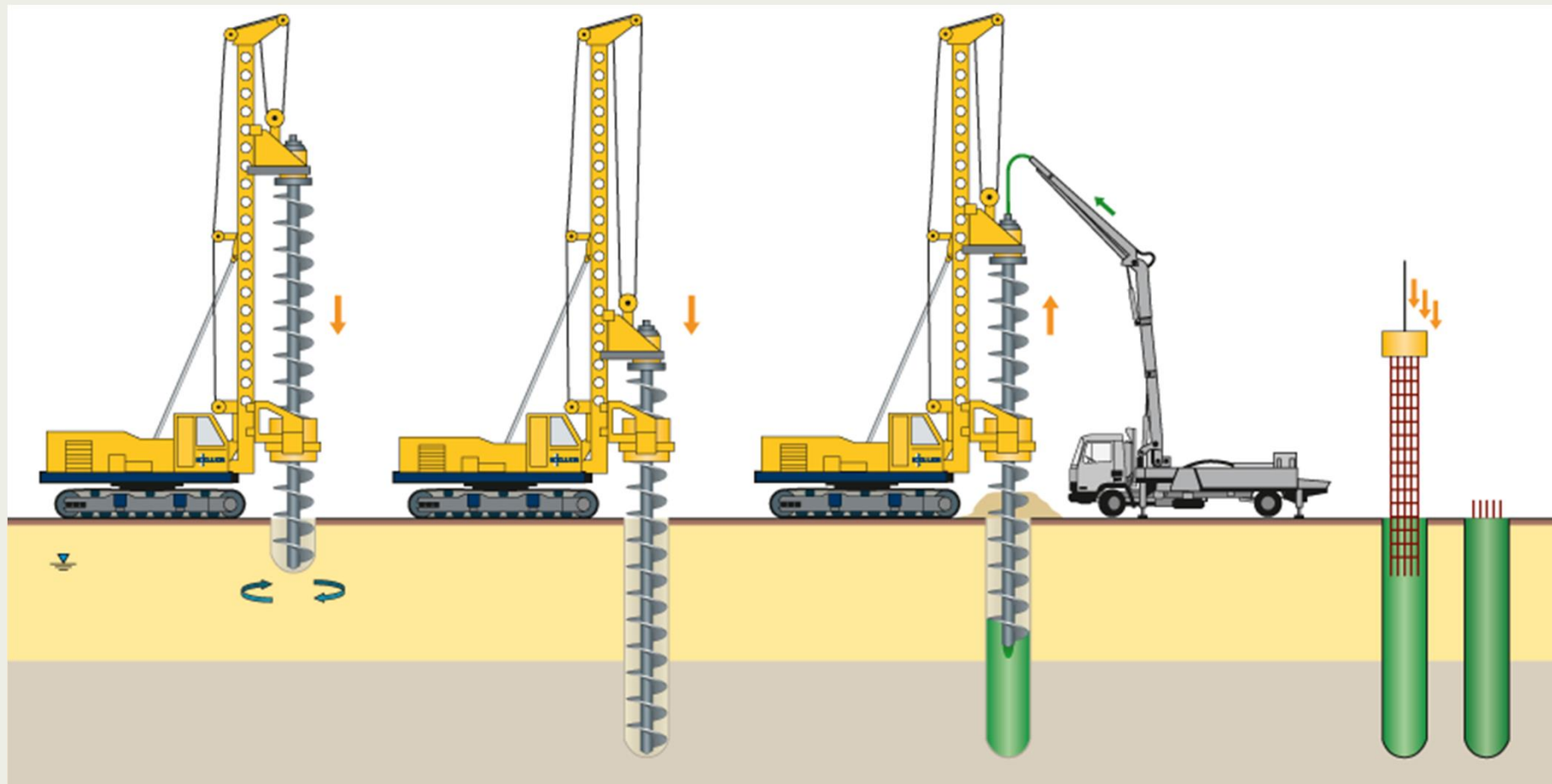
escavadas



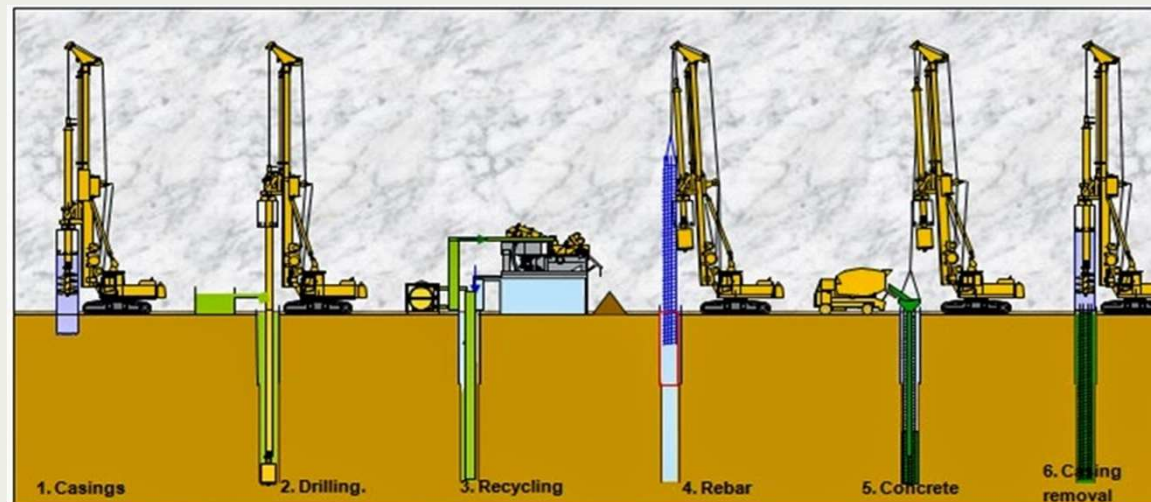
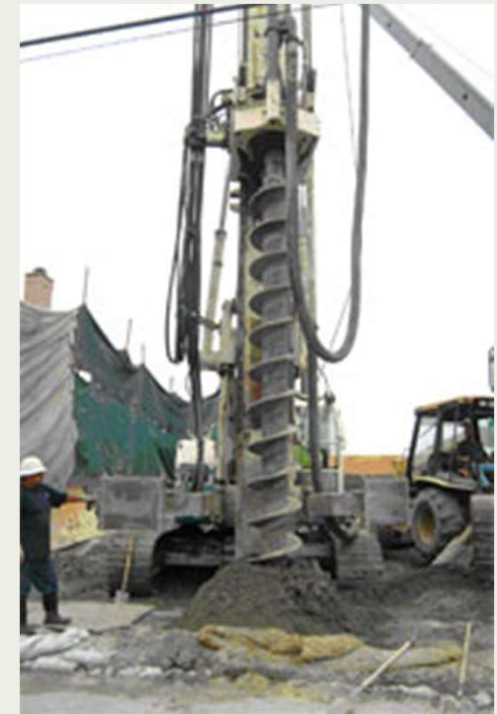
Estacas cravadas



Estacas



Estacas – diferentes procedimientos



ANÁLISE DE RISCO EM FUNDAÇÕES



VIII Jornada de Engenharia Civil **CEULP/ULBRA**

Palmas, 26 de abril de 2018

Profa. Cristina de H. C. Tsuha - EESC / Universidade de São Paulo

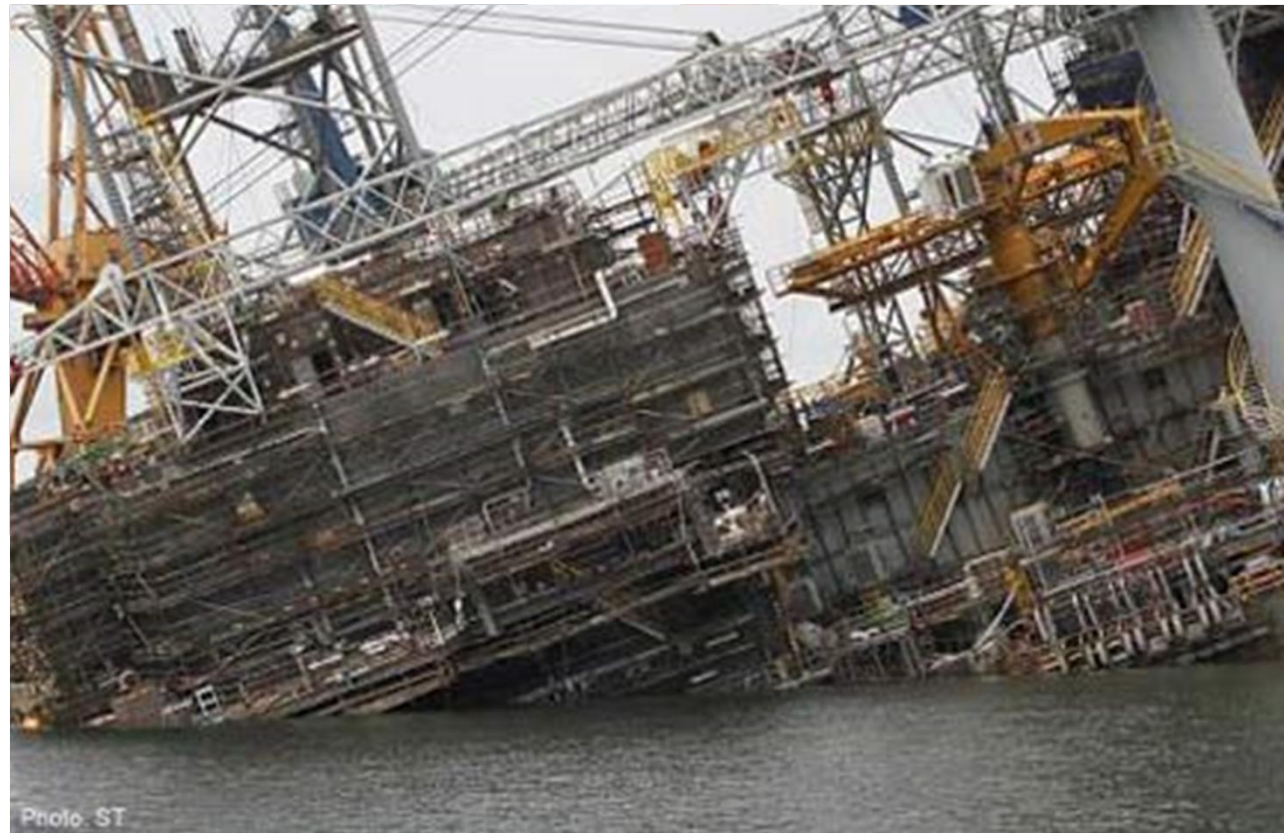
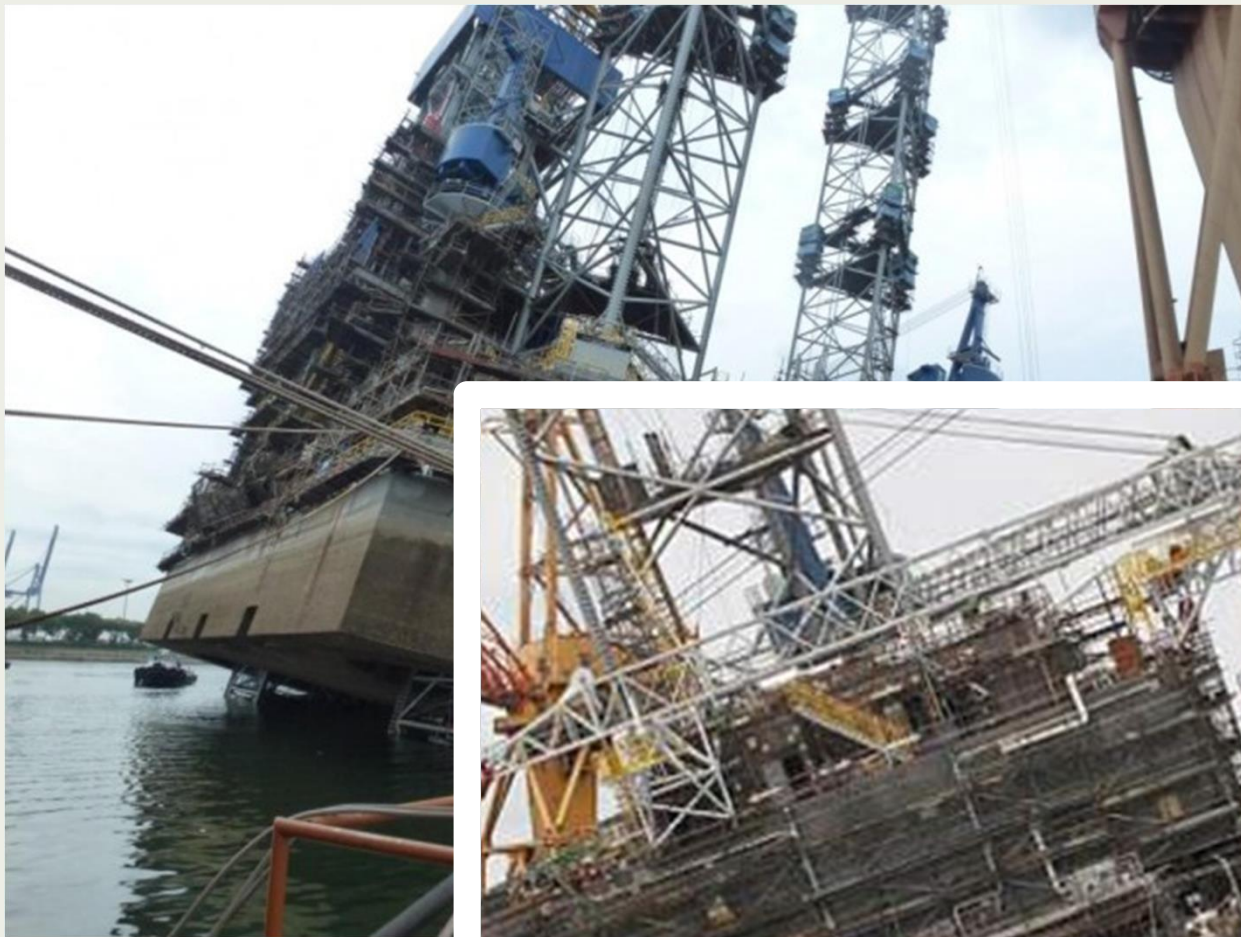
Falhas não previstas em projeto











Recalque



Recalque



Incertezas em Fundações

Risco

Métodos Probabilísticos

Estimativa da Probabilidade de Falha

Projeto Baseado em Confiabilidade

Segurança e Confiabilidade: Normas

Método Observacional e Abordagem
Bayesiana

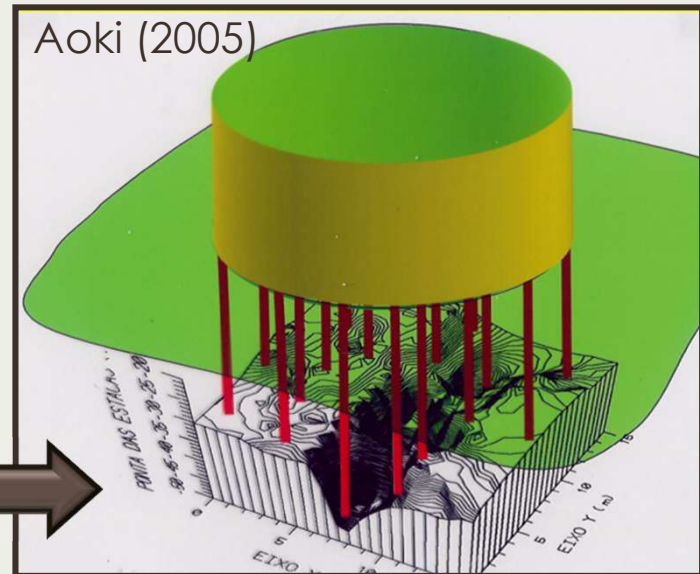
Incertezas em Fundações

O projeto de fundações envolve muitas limitações e **incertezas**

Bauduin (2003)

- ✓ Variabilidade espacial
- ✓ Investigação de campo limitada
- ✓ Incertezas nos parâmetros de solo
- ✓ Modelos de cálculo limitados
- ✓ Instalação (controle)
- ✓ Carregamento (solicitações)

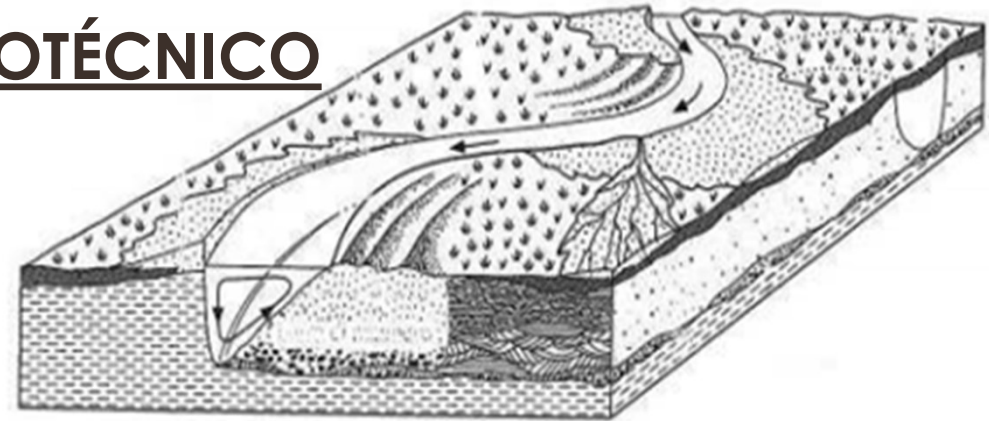
✓ **ERROS HUMANOS**



Investigação de campo limitada

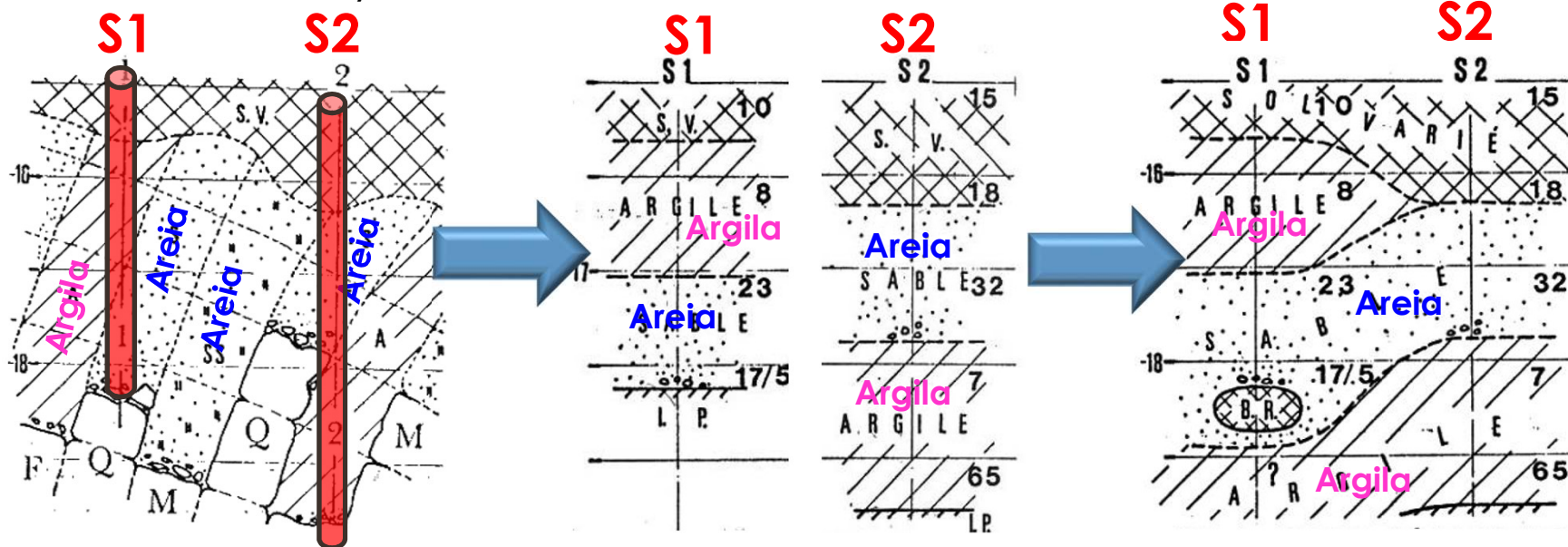
MODELO GEOLÓGICO – GEOTÉCNICO

AR, ÁGUA, SOLOS E ROCHAS



DESCONHECIDO: PARCIALMENTE REVELADO NAS INVESTIGAÇÕES

(Aoki, 1985 e 2009)



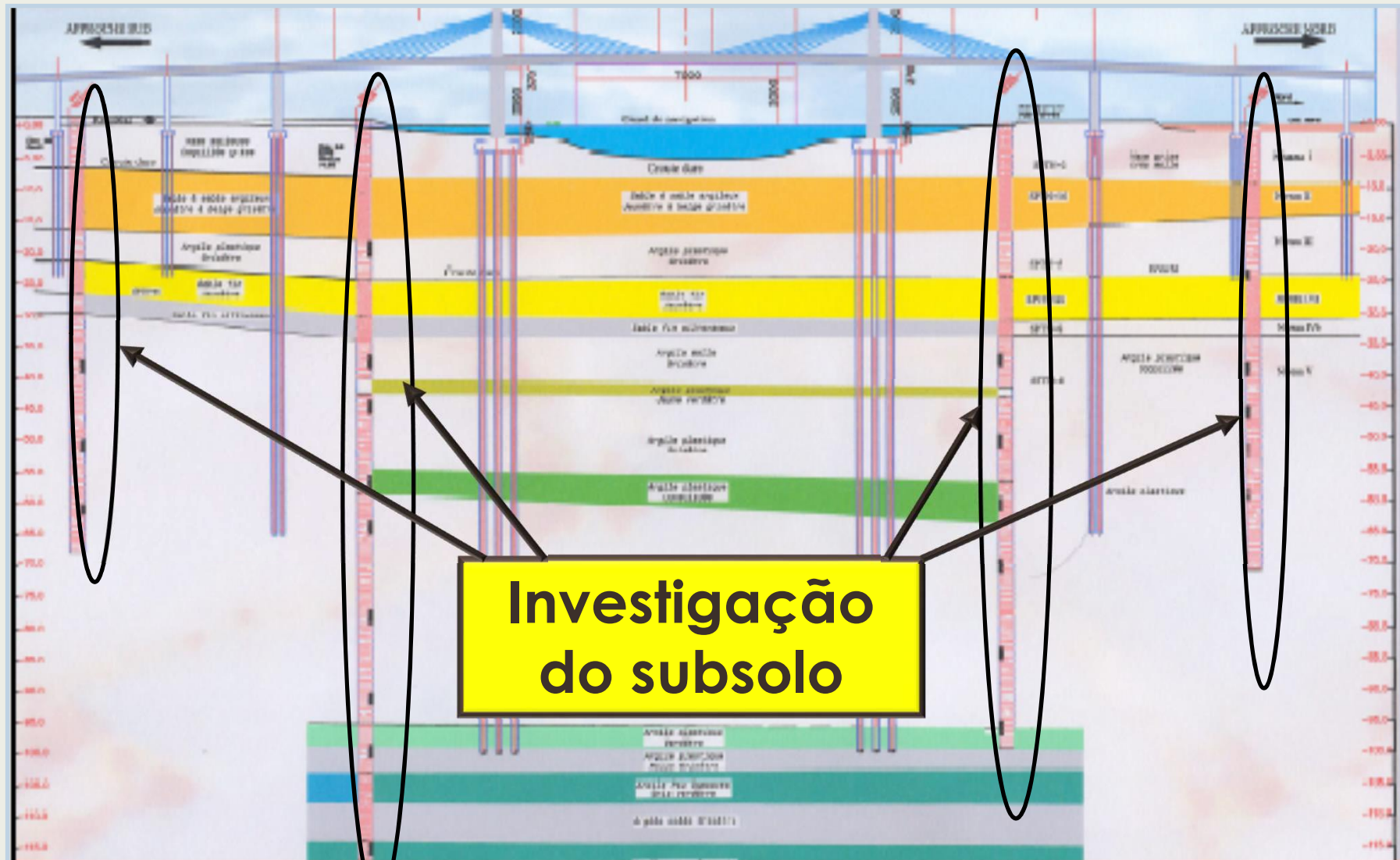
MODELO MENTAL

Implantação de uma estrutura



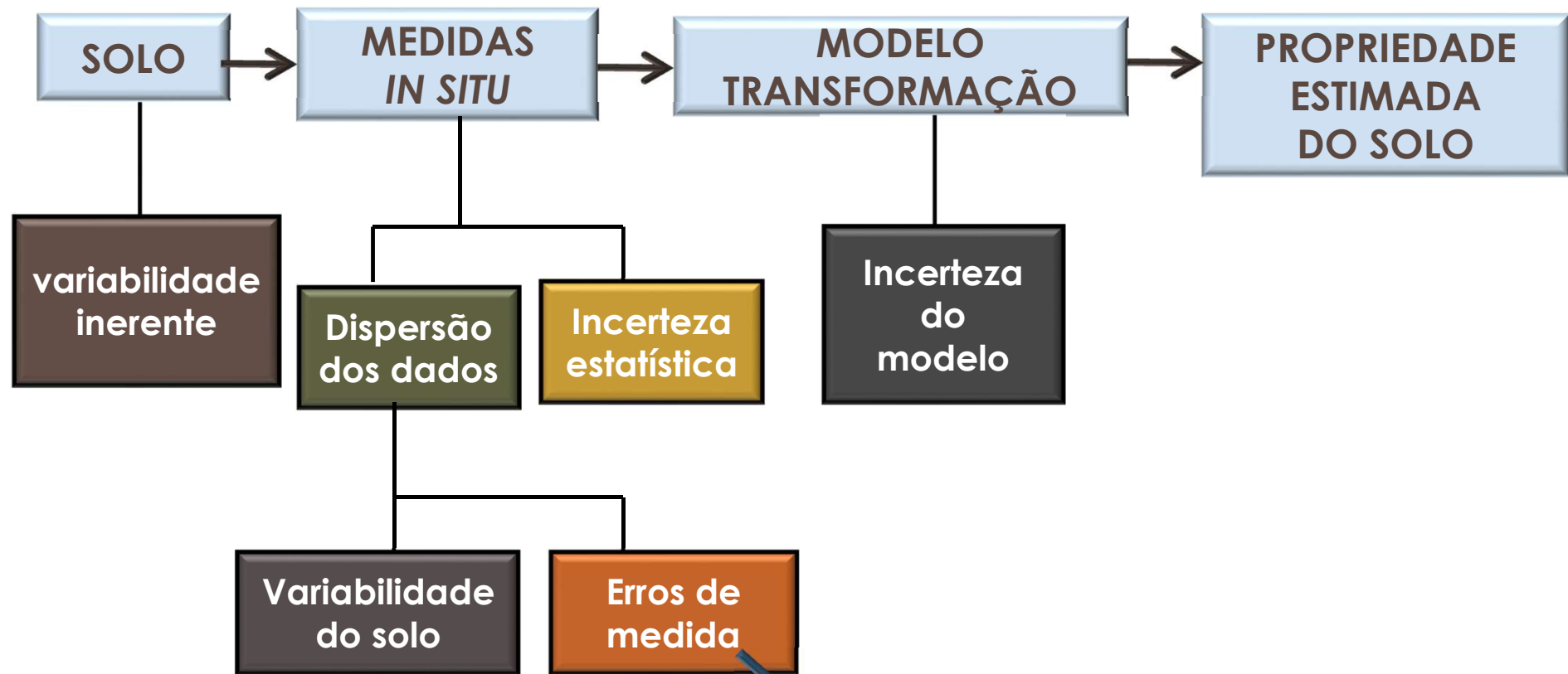
Ponte na Tunisia (notas de aula, Foray 2009)

Perfil Geotécnico (interpolação)



Ponte na Tunisia (notas de aula, Foray 2009)

Incertezas na estimativa de propriedades do solo



(Kulhawy e Phoon, 2002)

Kulhawy e Trautmann (1996)

SPT (equip., processo, etc.)
COV 15- 45%

CPT (5-15%)

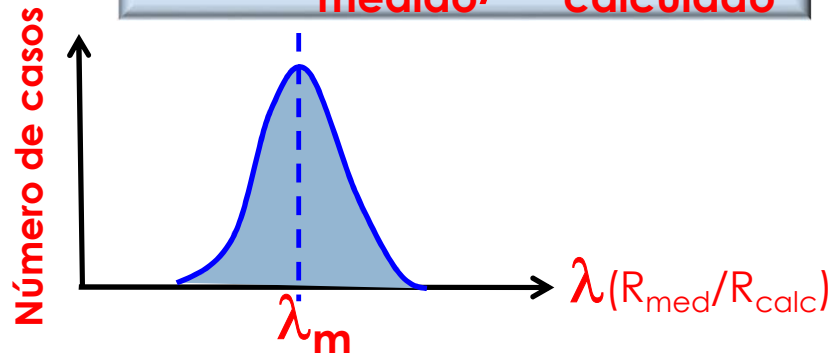
Modelos de cálculo limitados

Prática brasileira: **Aoki-Velloso e Decourt-Quaresma**

correlação **empírico-estatística** com resultados de **provas de carga** estática

PAIKOWSKY et al. (2004)

$$\lambda = R_{\text{medido}} / R_{\text{calculado}}$$



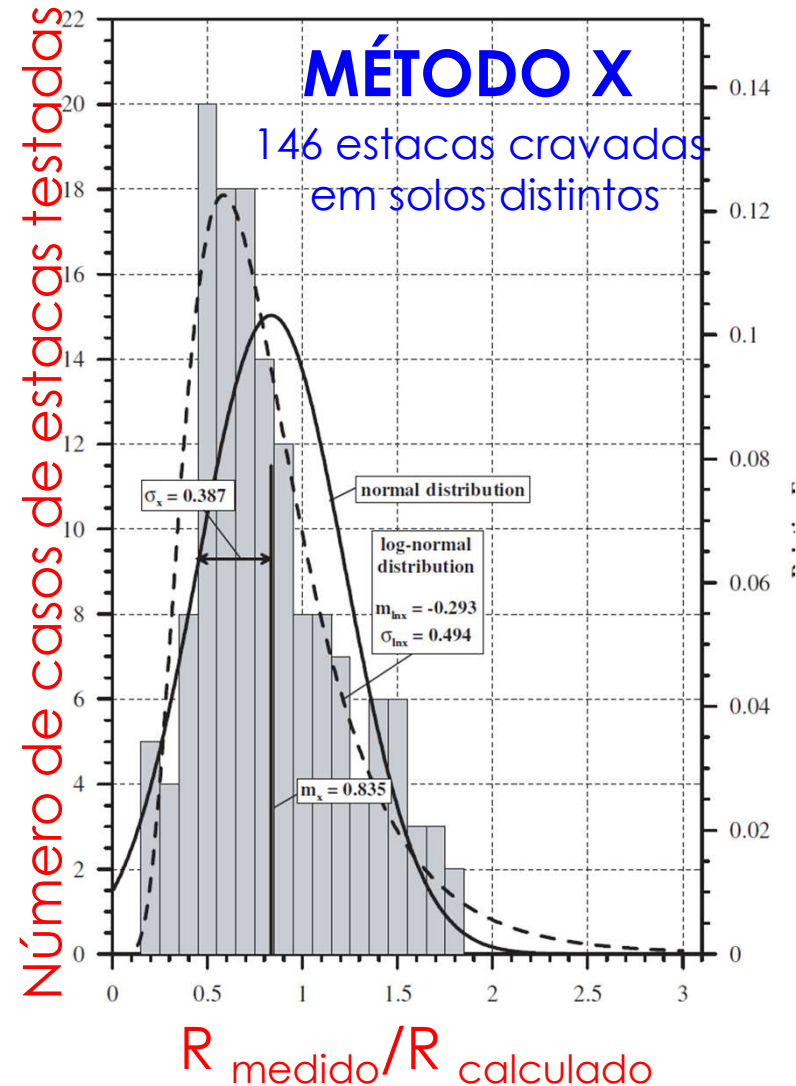
✓ Viés de vários métodos

AASHTO LRFD Bridge Design Specifications

Fatores parciais – Fundações

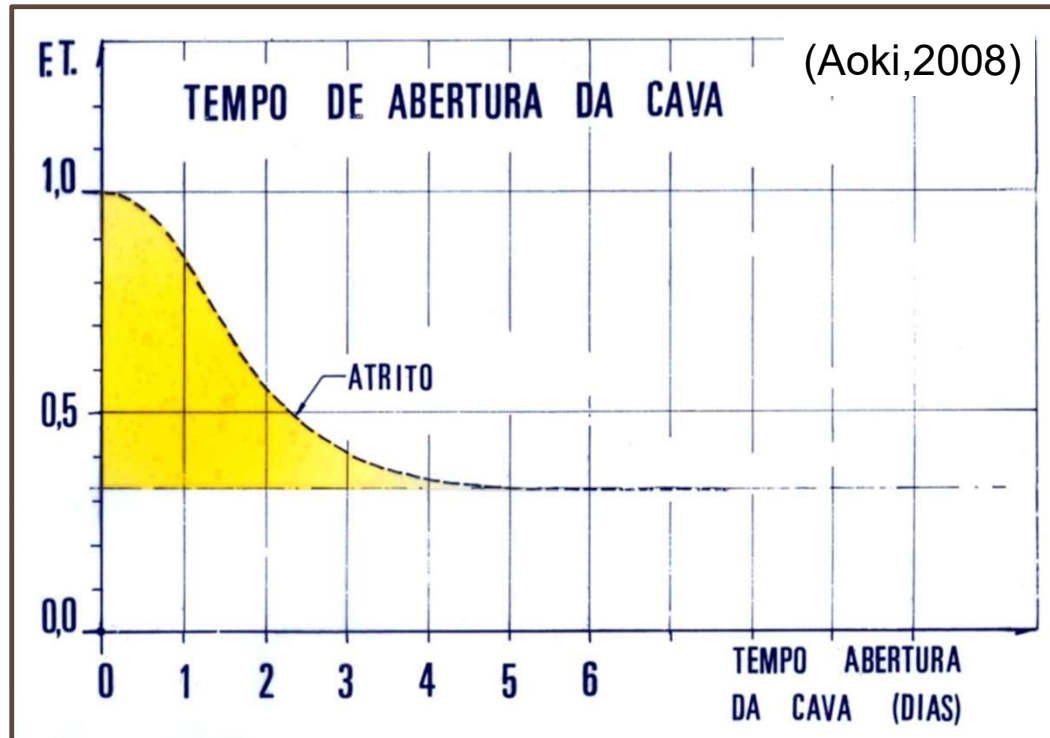
Pesquisa com projetistas:

- Métodos mais usados
- 86% SPT, 11% CPT, 2% DMT
- **14% dos entrevistados já tinham presenciado ruptura da fundação**



Instalação - Controle de execução

Estaca escavada:
demora na concretagem



Integridade



Estacas cravadas
(nega e repique)



- **Nível de controle de execução:**
tipo de estaca

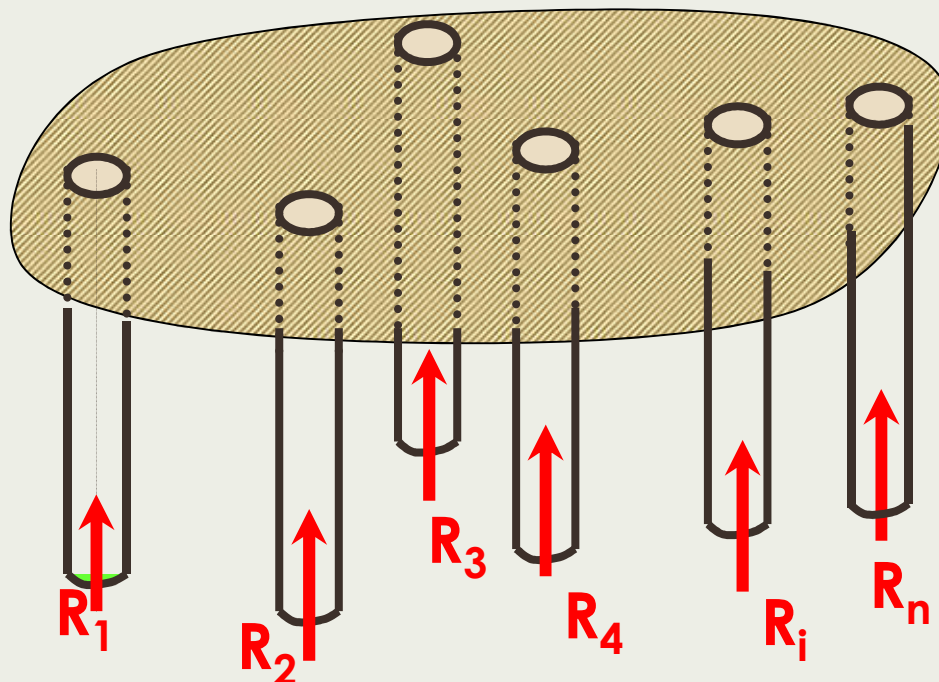
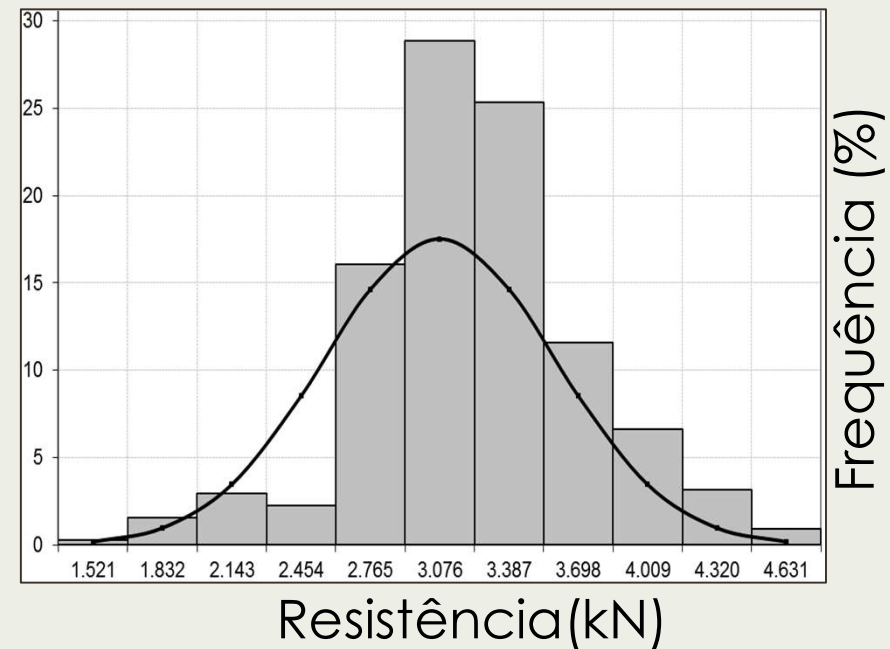
Variabilidade de R em obra controlada

Obra de um porto com **2506**
estacas cravadas



Medrano (2014)

Ensaio de carregamento dinâmico
(CAPWAP) em **74** estacas



$R_{\text{médio}} = 3295 \text{ kN}$

Desvio padrão = 483 kN

Coef. de variação = 14,7 %

“Controle de execução”

Variabilidade das ações e solicitações

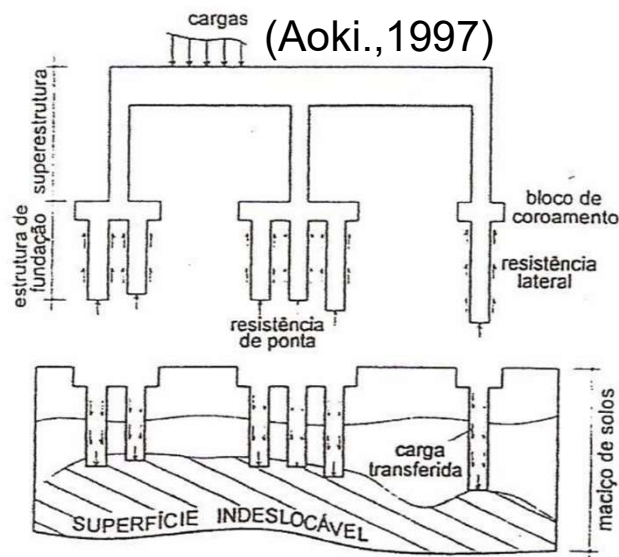
Variáveis aleatórias referentes às ações dos carregamentos na estrutura

Variável		Média	c.v.	distribuição
Ação permanente		$1,05 D_n$	0,10	Normal
Ação variável devido ao uso e ocupação da edificação	$L_{a.p.t.}$ $L_{50 \text{ anos}}$	$0,25 L_n$ $1,00 L_n$	0,55 0,25	Gamma Gumbel Tipo I
Ação variável devido à ação do vento	$W_{1 \text{ ano}}$ $W_{50 \text{ anos}}$	$0,33 W_n$ $0,90 W_n$	0,47 0,34	Gumbel Tipo I Gumbel Tipo I

$$S_d = \max \begin{bmatrix} \gamma_D \cdot D_n \\ \gamma_D \cdot D_n + \gamma_L \cdot L_n \\ \gamma_D \cdot D_n + \gamma_W \cdot W_n \\ \gamma_D \cdot D_n + \gamma_L \cdot L_n + \psi_W \cdot \gamma_W \cdot W_n \\ \gamma_D \cdot D_n + \gamma_W \cdot W_n + \psi_L \cdot \gamma_L \cdot L_n \end{bmatrix}$$

(ELLINGWOOD et al., 1980)

Interação solo-estrutura



✓ Edifícios: recalque dos apoios causa a redistribuição dos esforços nos elementos estruturais e nas cargas dos pilares

✓ Transferência de cargas dos apoios que tendem a recalcar mais para os que tendem a recalcar menos (Gusmão, 1998)

Risco

“O termo risco é o produto entre probabilidade de um evento ocorrer e as consequências da ocorrência deste evento”

Lacasse & Nadim (1998)

Risco = Probabilidade x Consequência

(Prob. de falha x Custo da falha)

A comunicação do risco (transparente e racional) é necessária

definição de níveis aceitáveis de risco e compartilhamento de risco entre cliente, consultor, segurador e financiador

(Phoon et al., 2003)

Uso de métodos probabilísticos

- ✓ **aliviar o engenheiro projetista** de Fundações da tarefa inadequada de avaliar a relação complexa entre incertezas e riscos de forma intuitiva
(Zaghloul, 2008)
- ✓ ao mesmo tempo enfatiza a importância do **julgamento e da experiência de engenharia** nos outros aspectos de projeto que estão atualmente além do escopo de análise matemática
(Zaghloul, 2008)
- ✓ base para se comparar diferentes alternativas para **tomar decisão fundamentada** (maior racionalidade)

Teoria de probabilidade

aliada à estatística e teoria da decisão

- Base matemática para **modelar as incertezas e analisar os seus efeitos** no projeto de engenharia

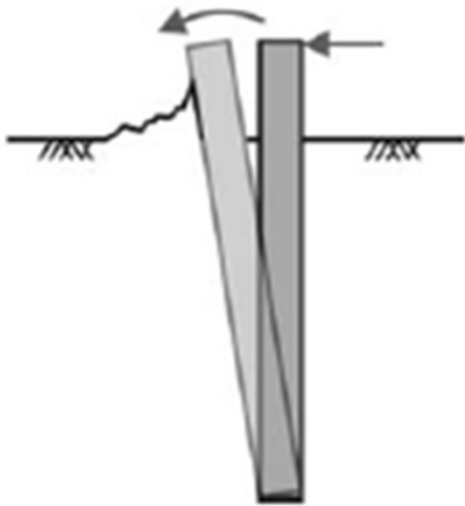
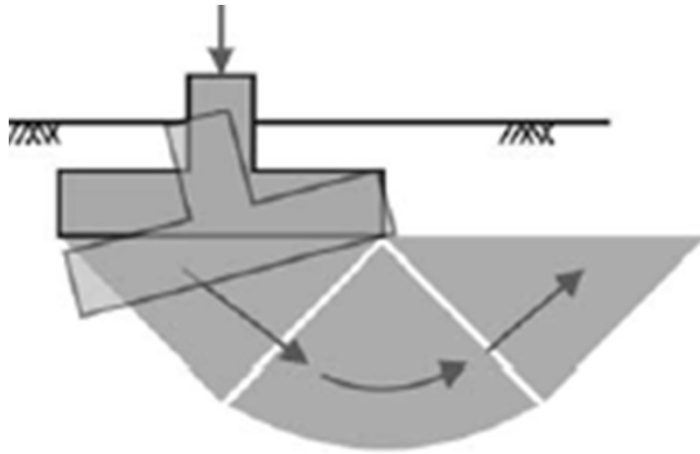
(Ang e Tang, 1975)

- Panorama **formal (e lógico)** para o desenvolvimento de critérios de projeto que garantam que a **probabilidade de "falha"** (de exceder qualquer **estado limite prescrito**) é aceitável

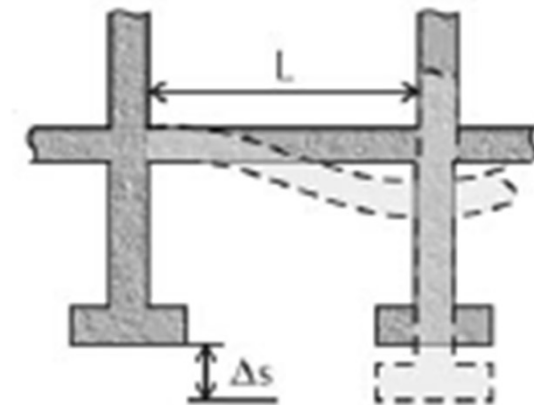
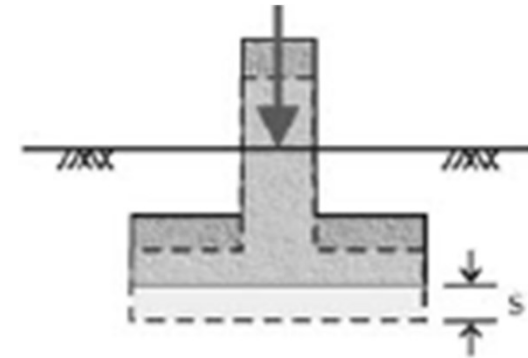
(Phoon et al., 2003)

Probabilidade de falha quanto ao ELU e ELS

Estado limite último



Estado limite de serviço

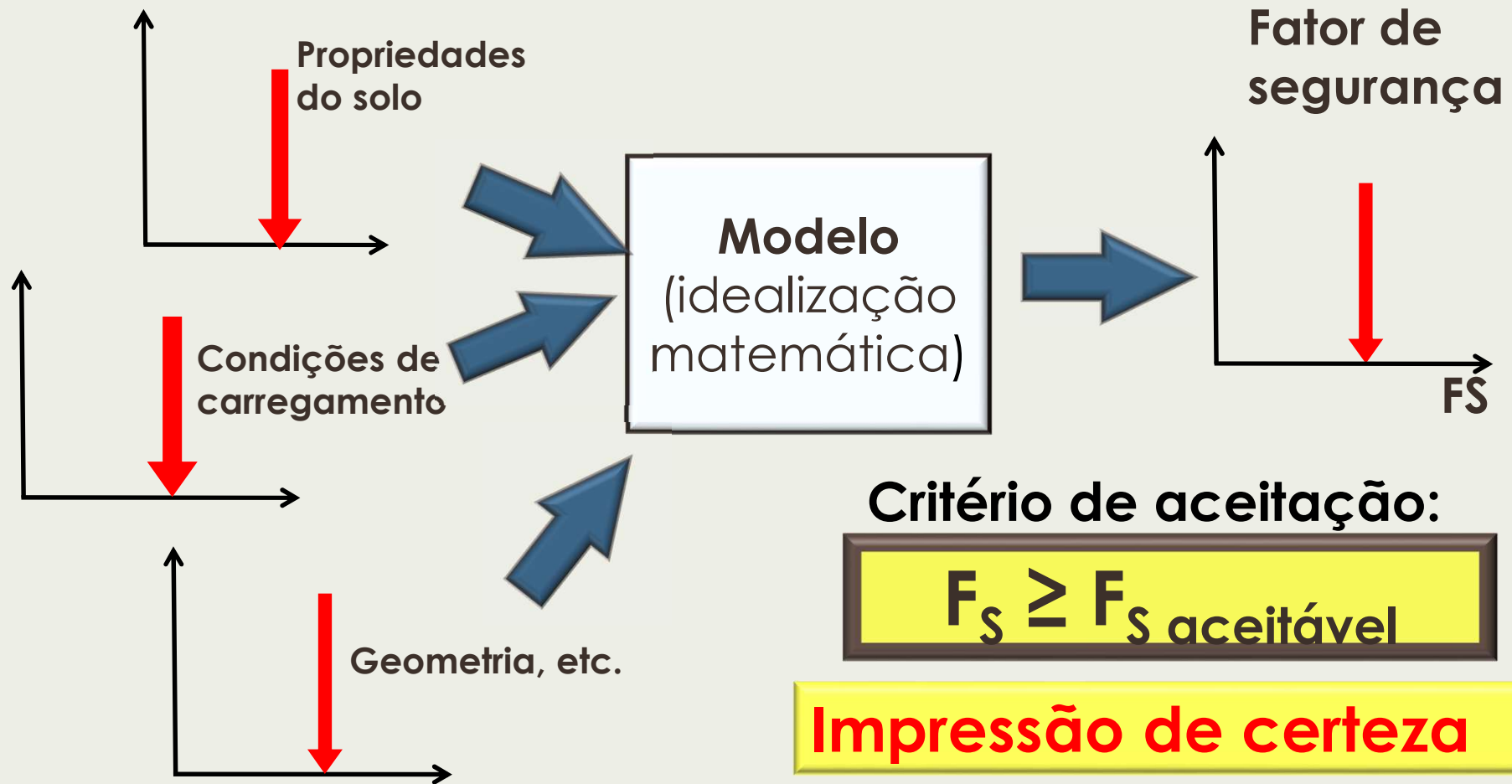


Métodos determinísticos e probabilísticos

$$\text{Carga admissível} = \frac{\text{Carga última}}{FS}$$

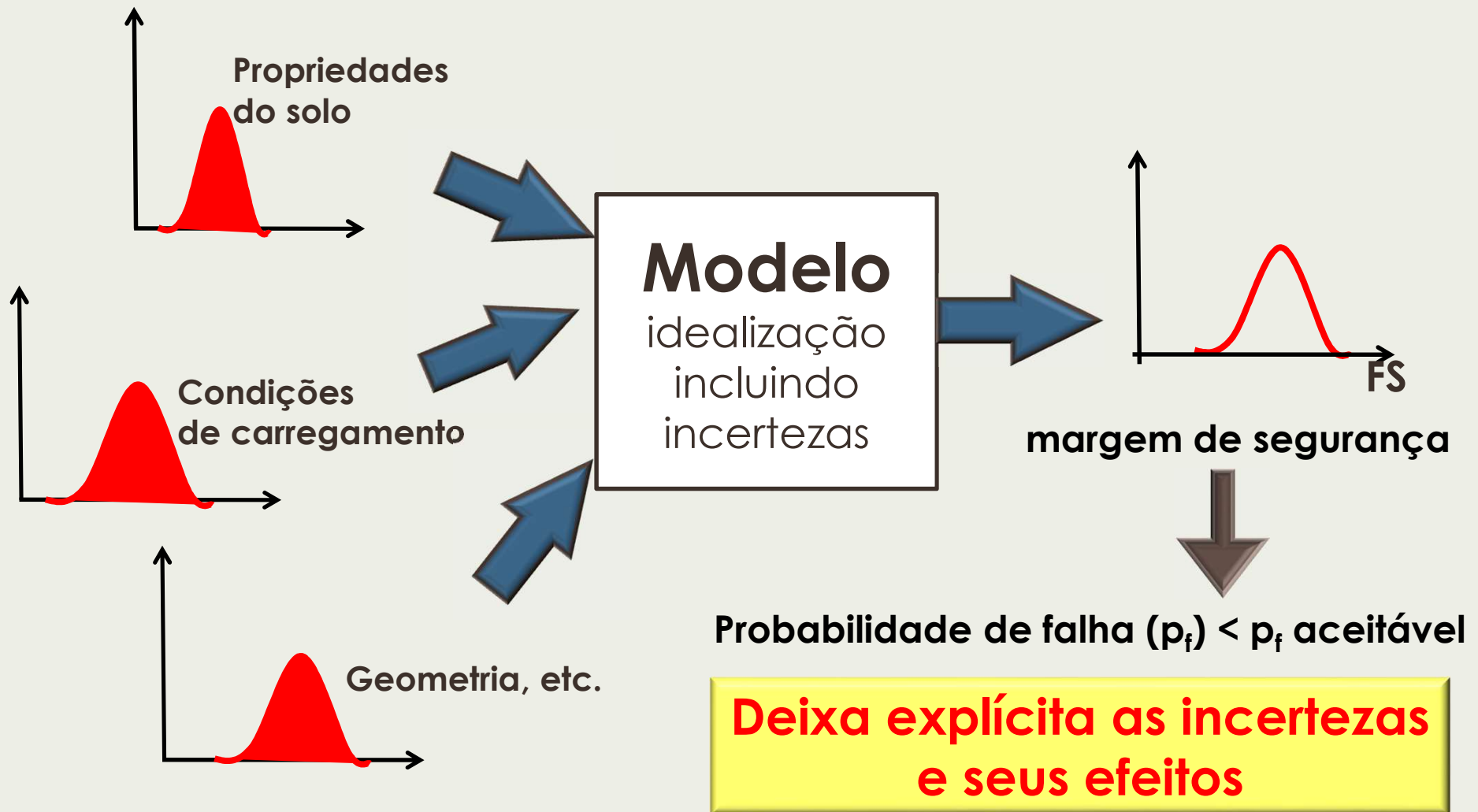
Lacasse (2015)

ANÁLISES DETERMINÍSTICAS



Métodos determinísticos e probabilísticos

ANÁLISES PROBABILÍSTICAS



Fator de segurança x probabilidade de falha

Meyerhof (1970)

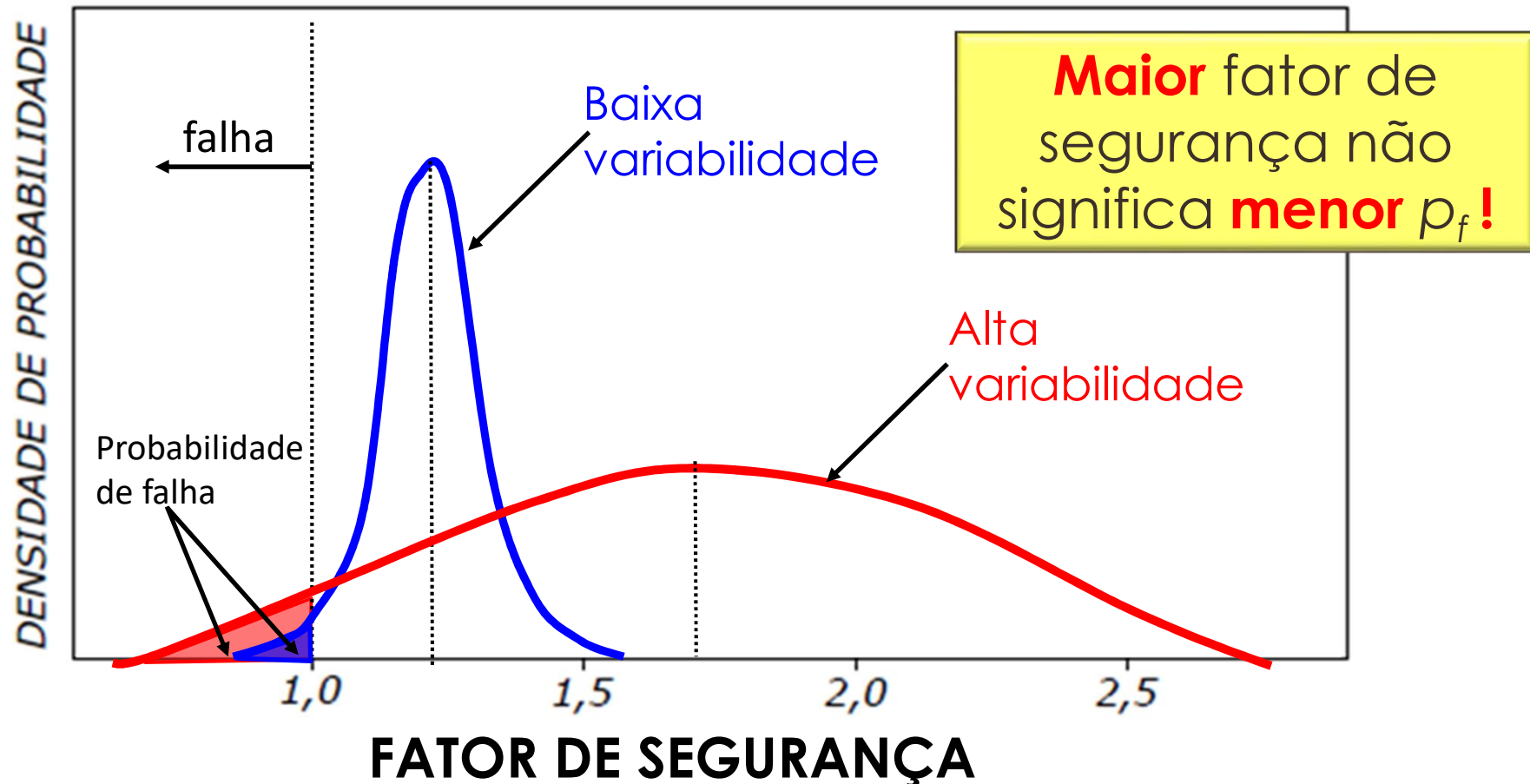
% de rupturas em Fundações
é muito pequena

1 caso em aproxim. **5000** a **10000** estruturas

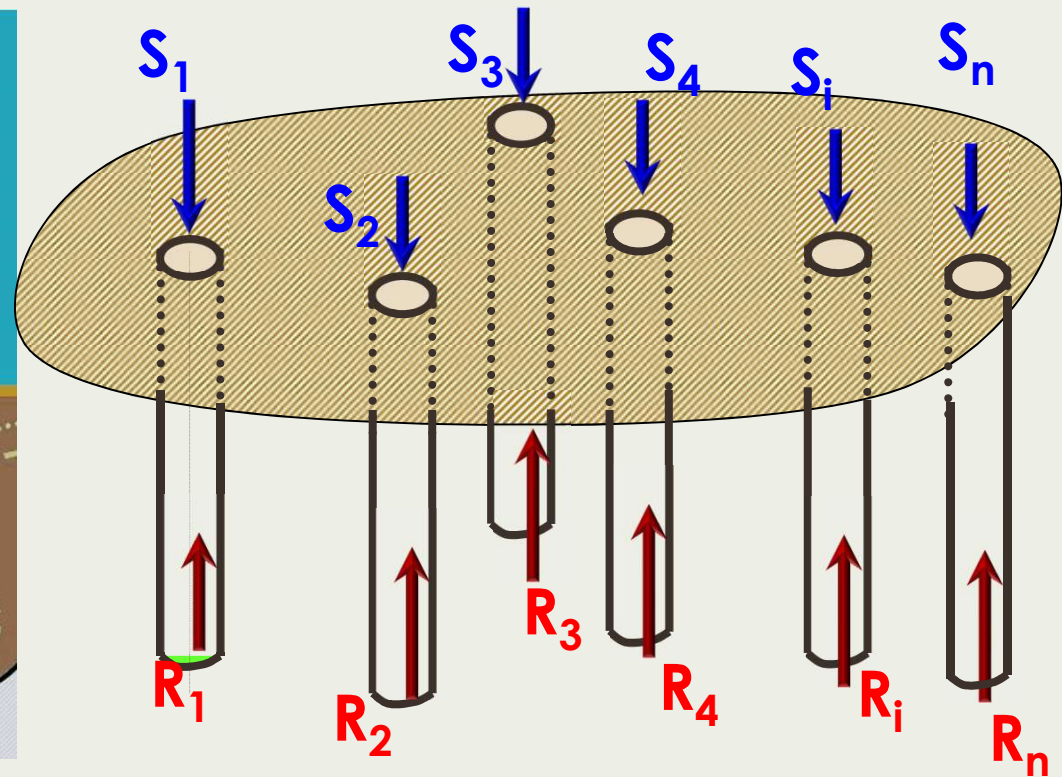
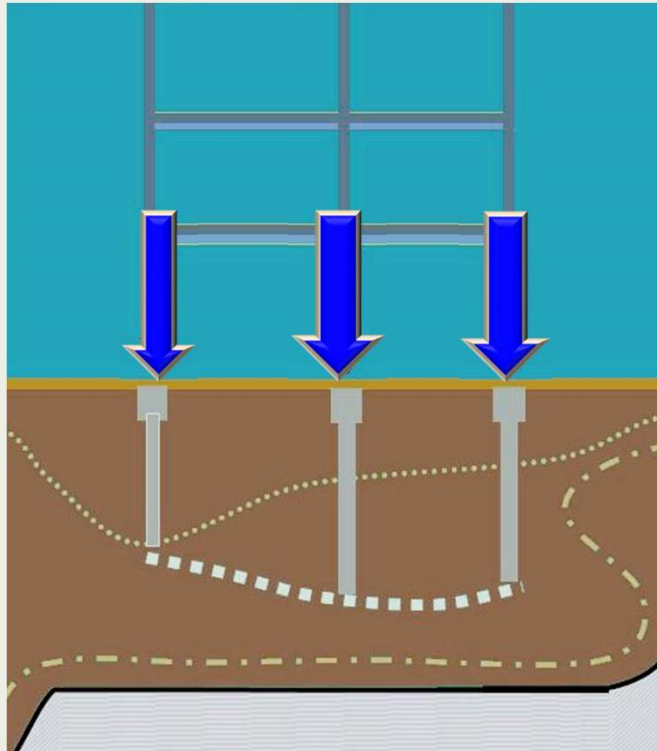
p_f de 10^{-3} a 10^{-4} (razoável)

FS entre **2** e **3** adequado

Lacasse & Nadim (1998)



Estimativa da probabilidade de falha

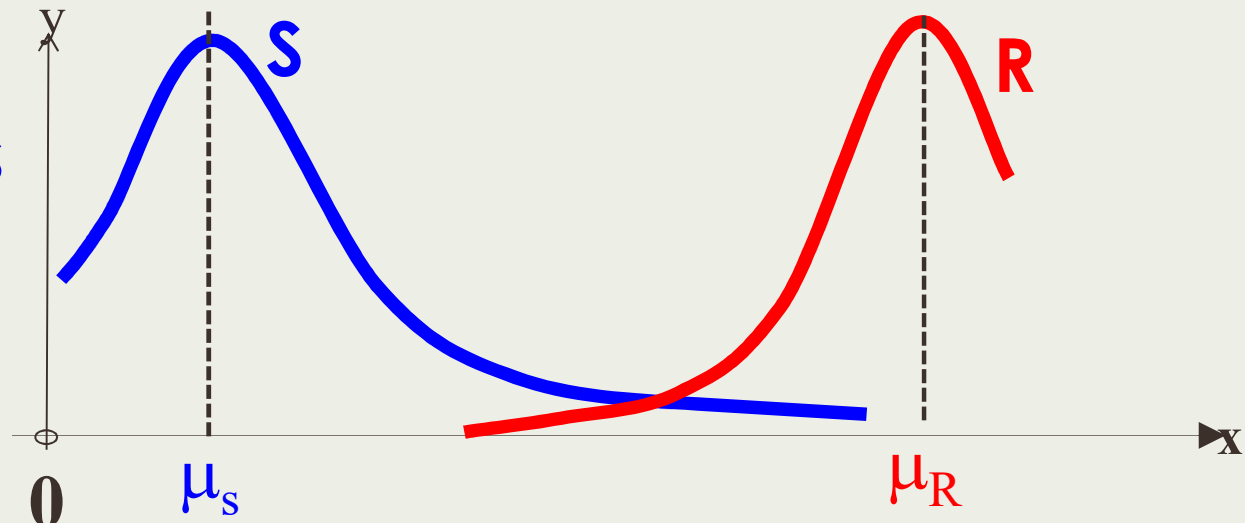


S = solicitações

μ_s, σ_s, v_s

R = resistências

μ_R, σ_R, v_R



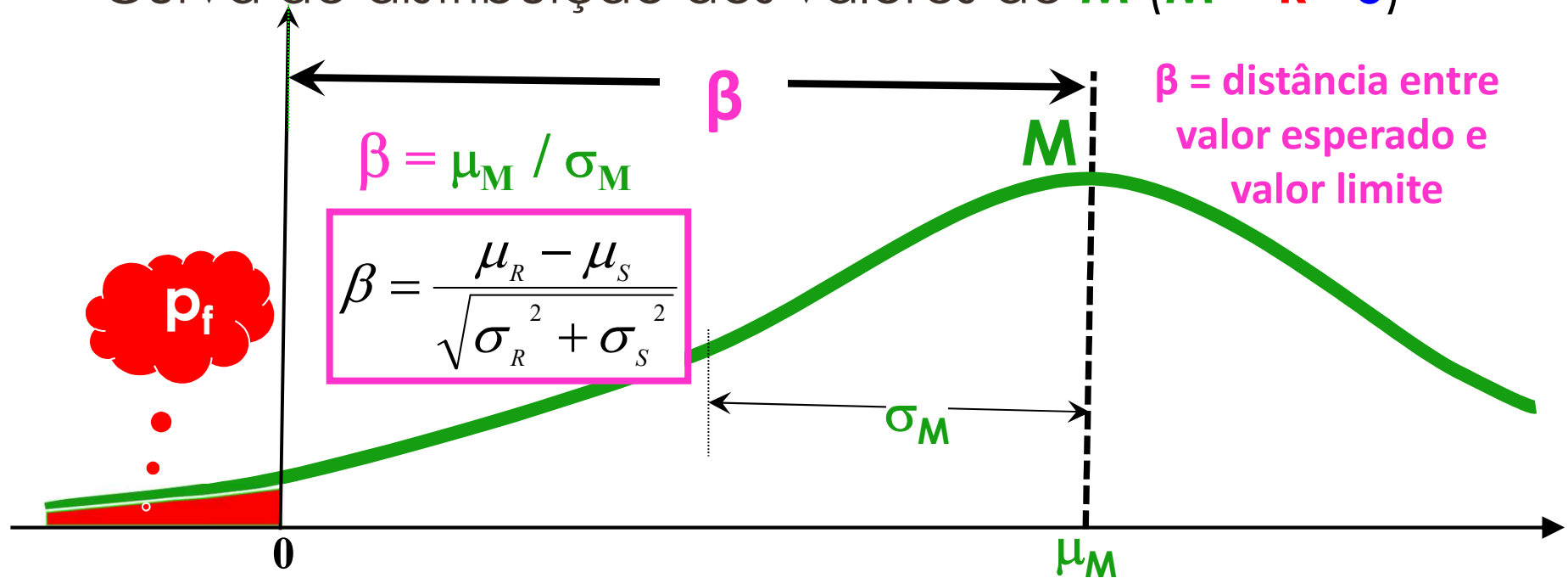
Probabilidade de falha e índice de confiabilidade β

Probabilidade de falha dada pelo conjunto de realizações em que S supere a resistência R :

$$P_F = P(R \leq S) = P(R - S \leq 0) = P[G(R, S) \leq 0]$$

Se R e S são variáveis aleatórias normais, o problema pode ser resolvido analiticamente. Caso haja independência entre as variáveis:

Curva de distribuição dos valores de M ($M = R - S$)



$$P_f = P([M < 0]) = P\left(\left[Y \leq -\frac{\mu_M}{\sigma_M}\right]\right) = \Phi\left[-\frac{\mu_M}{\sigma_M}\right]$$

Projeto baseado em confiabilidade (RBD)

Expressar segurança e confiabilidade na forma de um índice de confiabilidade β que está associado a uma probabilidade de falha

índice de confiabilidade β : versão mais completa de FS
(incorpora informações estatísticas de R e S)

Métodos de **RBD** não eliminam as incertezas
modo consistente de quantificar as incertezas e lidar com elas

Projeto baseado em confiabilidade



**estrutura com probabilidade de falha inferior a um valor
prescrito aceitável**

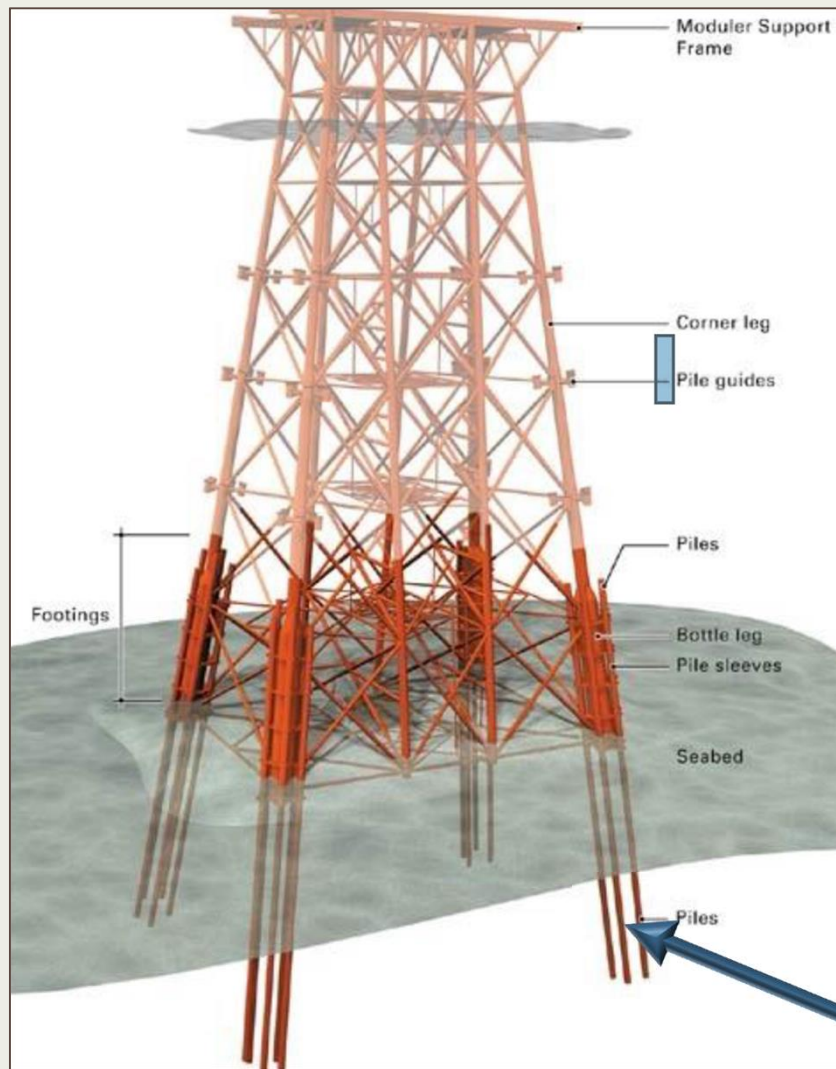
Investigações in situ, ensaios de laboratório, monitoramento, julgamento do especialista **são partes necessárias** na abordagem de confiabilidade

(Lacasse 2015)

Exemplo de projeto baseado em confiabilidade

Projeto de fundação de obra offshore

(Lacasse et al. 2013)



3 sites: A, B e C

- Projeto **determinístico** (fatores parciais)
- Projeto **probabilístico** : probab.de falha anual p_f de 10^{-4} /ano (Norma Norueguesa)

Det

Prob

- **Site A** (argila): **90** m para **75** m
- **Site B** (areia): **51** m para **27** m
- **Site C** (argila e areia): **45** m para **36** m

Uso do método probabilístico (p_f de 10^{-4})



Economia significativa

Estacas cravadas

Normas : semi-probabilísticos (LRFD)

(Foye et al. 2004)

Projeto baseado em fatores parciais de segurança (**LRFD**) é semelhante à prática existente, e pode ser desenvolvido utilizando conceitos **RBD** (formato “**familiar**” de projeto)



Fatores parciais associados a valores de β_T alvo (e p_f)

- desenvolvidos para considerar as incertezas
- Incertezas no carregamento são separadas das incertezas na resistência
- **compatível com o projeto estrutural**

Níveis de confiabilidade para estruturas o mais próximo possível do índice de confiabilidade alvo β_T

Baixa probabilidade de falha

β_T de ~ 2,5 a 4,2

	P_f	β
1 : 10,000	0.0001	3.568
1 : 5,000	0.0002	3.407
1 : 2,000	0.0005	3.194
1 : 1,500	0.0007	3.127
1 : 400	0.0025	2.819
1 : 300	0.0033	2.752

Método Observacional



Terzaghi & Peck 1948

Rankine Lecture **Peck (1969)**

Terzaghi: “**learn-as-you-go**”

Obras geotécnicas (fundações, túneis, barragens, etc.) grande esforço é gasto para encontrar **valores aproximados de parâmetros** para serem usados em equações

A disposição real das camadas (e N.A.) é desconhecida, portanto os **cálculos de projetos** são apenas **hipóteses que precisam ser confirmadas** ou **alteradas durante a execução**.

- ✓ Engenheiro reconhece grande quantidade de **incerteza** envolvida
- ✓ Projeto **melhorado durante a execução** de acordo com a realidade observada

base do método:

- aceitar **alterações pré-definidas em projeto** durante a construção
- acomodar as condições do solo reais no caso do projeto estar inadequado

Pode ser melhorado se associado à abordagens probabilísticas

(Spross, 2014)

Abordagem Bayesiana aplicada a Fundações

Thomas Bayes (1701 –1761)

Atualização das estimativas iniciais com informações novas

cálculos realizados “a priori” combinados com observações objetivas

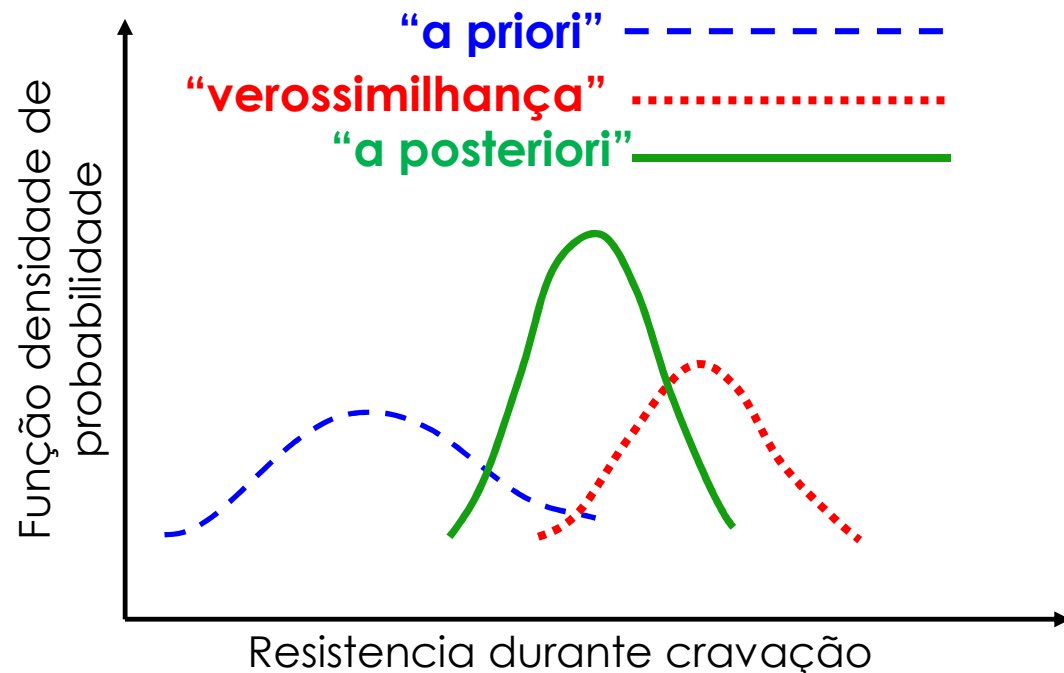
Exemplo: Atualização da estimativa da resistência durante a cravação

(Cabral, Danzinger e Pacheco, 2011)

valor esperado e da variância da resistência atualizada do solo durante a cravação:

$$\mu_Q = \frac{\sigma_Q^{2,L} \cdot \mu_Q^P + \sigma_Q^{2,P} \cdot \mu_Q^L}{\sigma_Q^{2,L} + \sigma_Q^{2,P}}$$

$$\sigma_Q^2 = \frac{\sigma_Q^{2,L} \cdot \sigma_Q^{2,P}}{\sigma_Q^{2,L} + \sigma_Q^{2,P}}$$



Conclusões

Maior **racionalidade** nos projetos

As avaliações de risco estão cada vez mais se tornando uma **exigência** em muitos projetos de engenharia

Métodos probabilísticos são reconhecidos em algumas **normas de projeto** para a determinação de fatores parciais para atingir os níveis de **risco admissíveis em projetos geotécnicos**