

ECV 114 – FUNDAÇÕES E OBRAS DE TERRA

RECALQUES

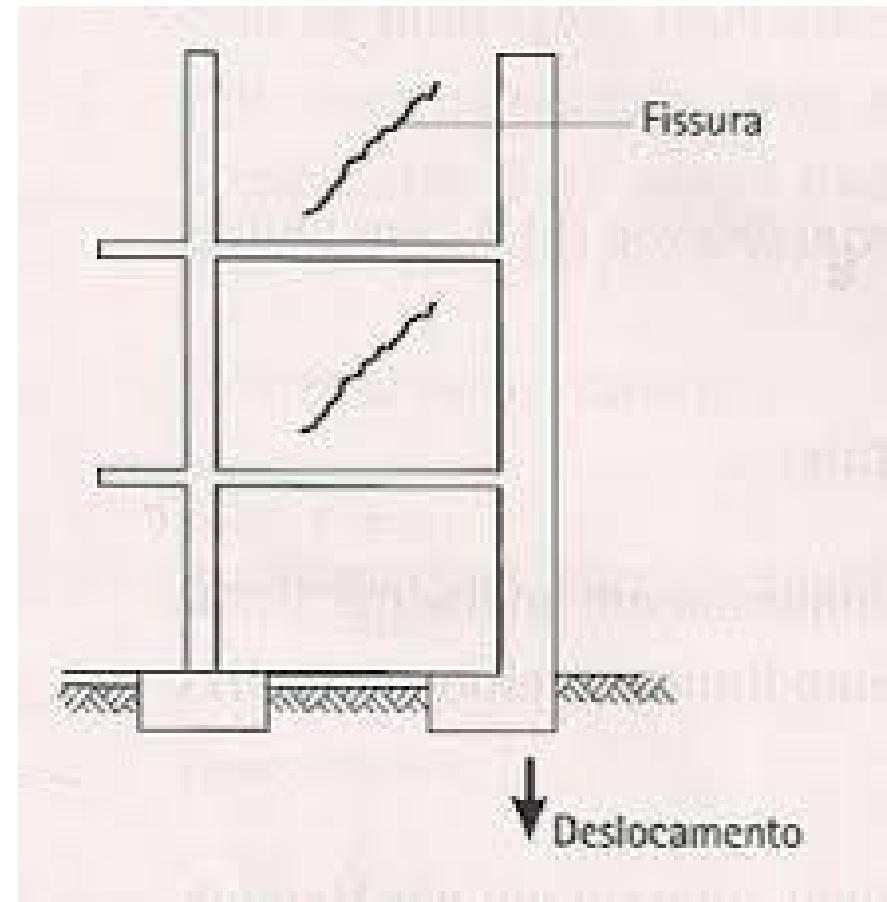
Prof. Ana Paula Moura
ana.paula.moura@live.com

PROGRAMAÇÃO DA AULA

- 1) Introdução;
- 2) Tipos de recalques;
- 3) Recalques em fundações rasas: considerações de cálculo, métodos para meios homogêneos e não homogêneos, prova de carga;
- 4) Tolerância a recalques.

1. INTRODUÇÃO

“Denomina-se recalque a deformação que ocorre no solo quando submetido a cargas. Essa deformação provoca movimentação na fundação que, dependendo da intensidade, pode resultar em sérios danos a super estrutura.”



1. INTRODUÇÃO

“Se o maciço de solo fosse homogêneo e todas as sapatas de mesmas dimensões e submetidas as mesmas cargas, os recalques seriam praticamente uniformes, mas a variabilidade do solo gera recalques desiguais. Além disso, o tamanho das bases das sapatas em um edifício pode variar, uma vez que as cargas são diferentes.”

TODA ESTRUTURA SUPORTA UM CERTO RECALQUE ADMISSÍVEL. TODA FUNDAÇÃO RECALCA!!!

Hipótese de apoio fixo para pilares → inválida.

1. INTRODUÇÃO

SOLO + CARREGAMENTO → RECALQUE

- Variações volumétricas – variação do volume de vazios (compressão do ar ou expulsão da água);
- Volume dos sólidos constante – compressibilidade dos grãos desprezível quando comparada com a dos vazios.

Resumindo...

Solos granulares → altamente permeáveis → variação rápida.

Solos saturados → baixa permeabilidade → variação dos volumes mais lenta.

2. TIPOS DE RECALQUES

2.1. SOB A ÓTICA DO SOLO

- 1)Imediato
- 2)Por adensamento
- 3)Secundario ou creep

2. TIPOS DE RECALQUES

2.2. SOB A ÓTICA DA ESTRUTURA

- 1)Recalque total ou absoluto
- 2)Recalque diferencial ou relativo
- 3)Distorção angula ou recalque diferencial específico.

“Recalques absolutos elevados de mesma ordem de grandeza podem ser tolerados. Entretanto, quando maiores os recalques absolutos, maiores os diferenciais. O controle dos recalques absolutos pode ser aceito como medida indireta para o controle de recalques diferenciais.”

RECALQUES EM FUNDAÇÕES RASAS

3. CONSIDERAÇÕES

Deformabilidade → propriedade que tem a rocha para alterar sua forma como resposta a ação das foras.

Elástico → o corpo recupera sua forma original quando deixam de agir as forças aplicadas.

Solo → não é um material elástico!!!

“Os recalques imediatos não são recuperáveis com o descarregamentos”

Módulo de elasticidade → Módulo de deformabilidade

3. CONSIDERAÇÕES

MÓDULO DE DEFORMABILIDADE

a) Constante com a profundidade

- *Meio elástico homogêneo*
- *Argilas sobre adensadas*

b) Variável com a profundidade

- *Meio elástico não homogêneo*
- *Areais*
- $E_s = E_o + kz$

3. CONSIDERAÇÕES

MÓDULO DE DEFORMABILIDADE

Sem dispor de ensaios de laboratório → correlações com SPT ou CPT

Teixeira e Godoy (1996)

- $E_s = \alpha q_c$
- $E_s = \alpha K N_{spt}$

A presença do lençol freático pode ser ignorada porque seu efeito no módulo de deformabilidade é refletido na obtenção de N_{spt} .

3. CONSIDERAÇÕES

MÓDULO DE DEFORMABILIDADE

| SOLO | α |
|--------|----------|
| AREIA | 3 |
| SILTE | 5 |
| ARGILA | 7 |

3. CONSIDERAÇÕES

MÓDULO DE DEFORMABILIDADE

| SOLO | K (MPa) | SOLO | K (MPa) |
|-----------------------|---------|----------------|---------|
| AREIA COM PEDREGULHOS | 1,10 | SILTE | 0,35 |
| AREIA | 0,90 | ARGILA ARENOSA | 0,30 |
| AREIA SILTOSA | 0,70 | SILTE ARGILOSO | 0,25 |
| AREIA ARGILOSA | 0,55 | ARGILA SILTOSA | 0,20 |
| SILTE ARENOSO | 0,45 | | |

3. CONSIDERAÇÕES

MÓDULO DE DEFORMABILIDADE

Sem dispor de ensaios de laboratório → correlações com SPT ou CPT

Schmertmann (1978)

- $E_s = 2,5 q_c$ sapatas quadradas ou circulares ($L/B = 1$)
- $E_s = 3,5 q_c$ sapatas corridas ($L/B \geq 10$)
- $E_s = 2,5 q_c (1 + 0,4 \log L/B)$ para sapatas intermediárias

3. CONSIDERAÇÕES

COEFICIENTE DE POISSON

Teixeira e Godoy (1996)

| SOLO | ν |
|----------------------|---------|
| AREIA POUCO COMPACTA | 0,2 |
| AREIA COMPACTA | 0,4 |
| SILTE | 0,3-0,5 |
| ARGILA SATURADA | 0,4-0,5 |
| ARGILA NÃO SATURADA | 0,1-0,3 |

4. RECALQUES IMEDIATOS EM MEIO ELÁSTICO HOMOGÊNEO

a) Camada semi infinita de argila sobre adensada

Placa circular rígida:

$$\rho_l = \sigma B \left[\frac{1 - \nu^2}{E_s} \right] \frac{\pi}{4}$$

- Módulo de deformabilidade do solo;
- Coeficiente de Poisson;
- Tensão média na superfície de contato entre a placa e o maciço de argila.

4. RECALQUES IMEDIATOS EM MEIO ELÁSTICO HOMOGÊNEO

a) Camada semi infinita de argila sobre adensada

Placa retangular flexível:

$$\rho_i = \sigma \cdot B \left[\frac{1 - \nu^2}{E_s} \right] I_p$$

- Fator de influência que depende da forma e da rigidez da sapata.

4. RECALQUES IMEDIATOS EM MEIO ELÁSTICO HOMOGÊNEO

| FORMA | Sapata flexível | | | Rígida |
|-----------|-----------------|-------|-------|--------|
| | CENTRO | CANTO | MÉDIO | |
| CIRCULAR | 1,00 | 0,64* | 0,85 | 0,79 |
| QUADRADA | 1,12 | 0,56 | 0,95 | 0,99 |
| L/B = 1,5 | 1,36 | 0,67 | 1,15 | |
| 2 | 1,52 | 0,76 | 1,30 | |
| 3 | 1,78 | 0,88 | 1,52 | |
| 5 | 2,10 | 1,05 | 1,83 | |
| 10 | 2,53 | 1,26 | 2,25 | |
| 100 | 4,00 | 2,00 | 3,70 | |

*Borda.

4. RECALQUES IMEDIATOS EM MEIO ELÁSTICO HOMOGÊNEO

b) Camada finita

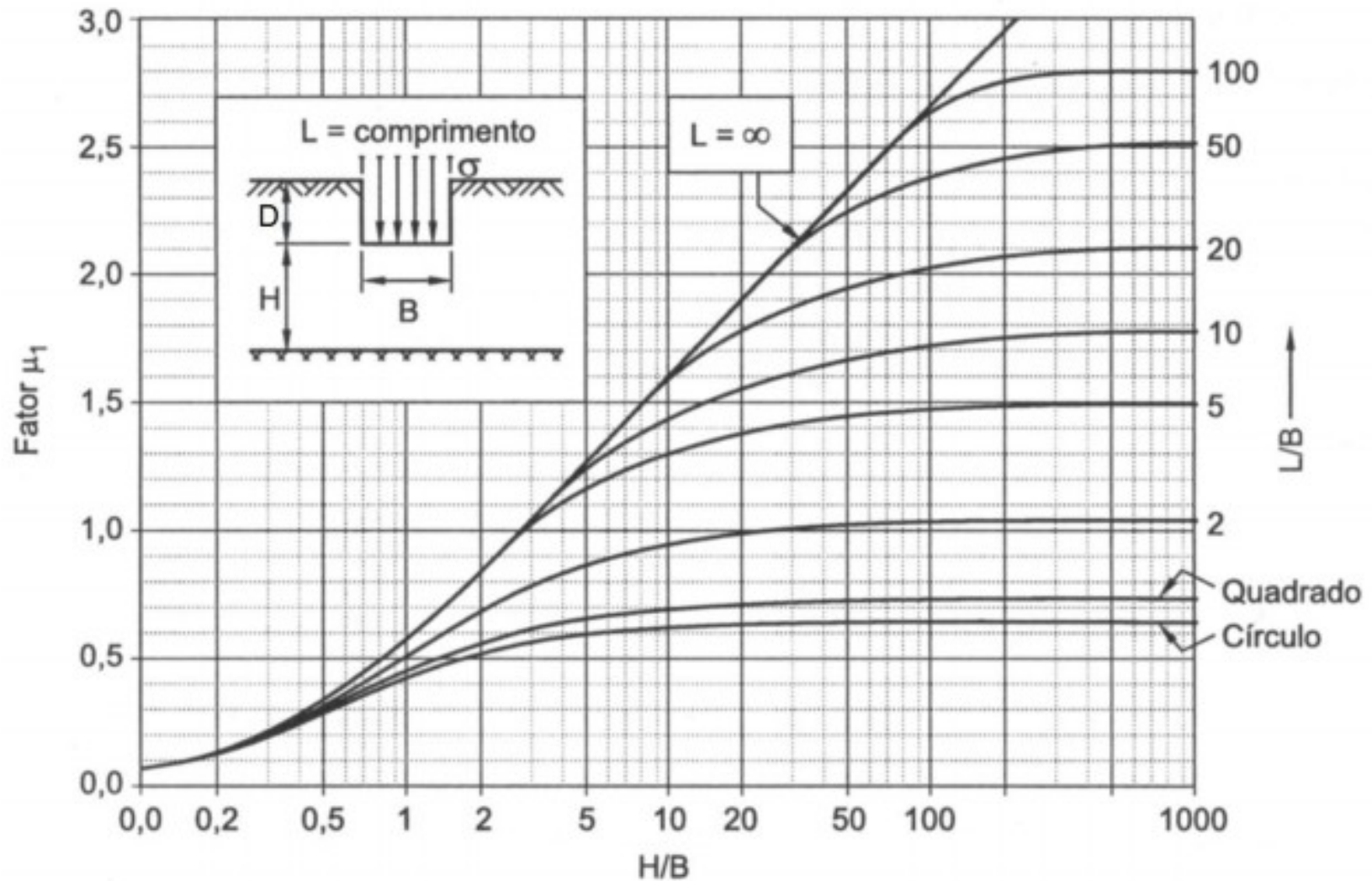
Camada de solo de espessura finita sobrejacente a um material muito rígido ou praticamente indeformável.

Recalque médio de sapatas flexíveis:

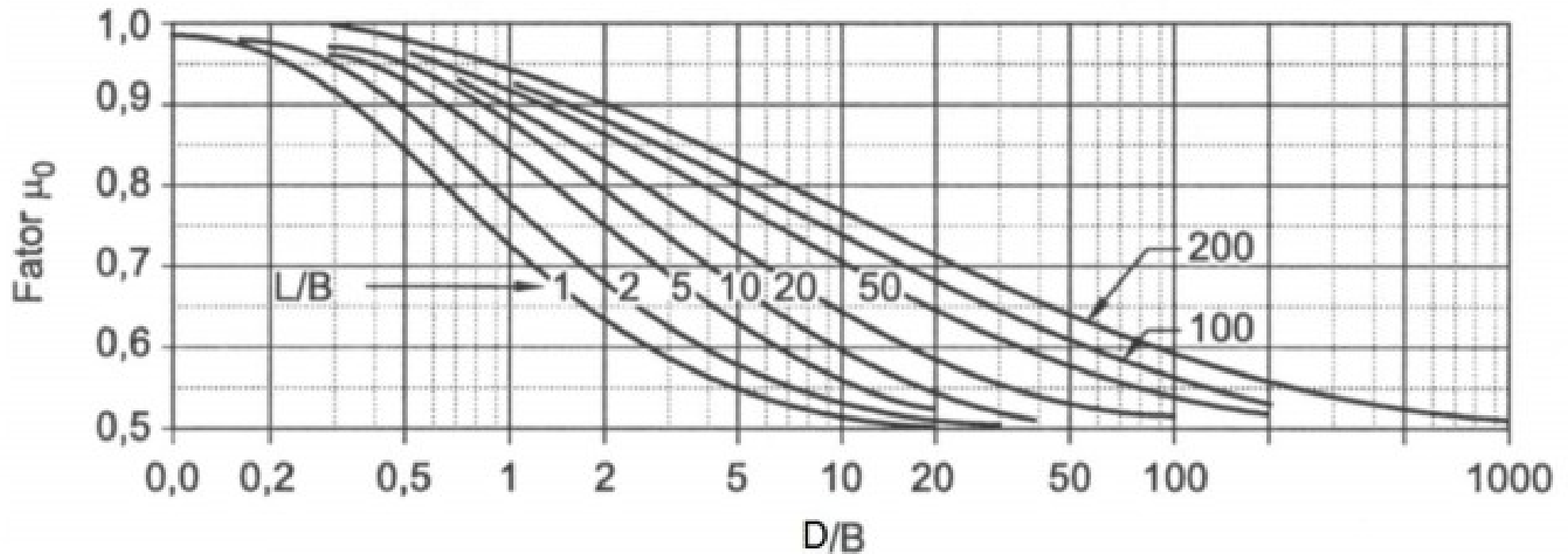
$$\rho_i = \mu_0 \mu_1 \frac{\sigma B}{E_s}$$

- Fator de embutimento da sapata e da espessura da camada de solo.
- O aumento do embutimento reduz o recalque.

4. RECALQUES IMEDIATOS EM MEIO ELÁSTICO HOMOGENEO



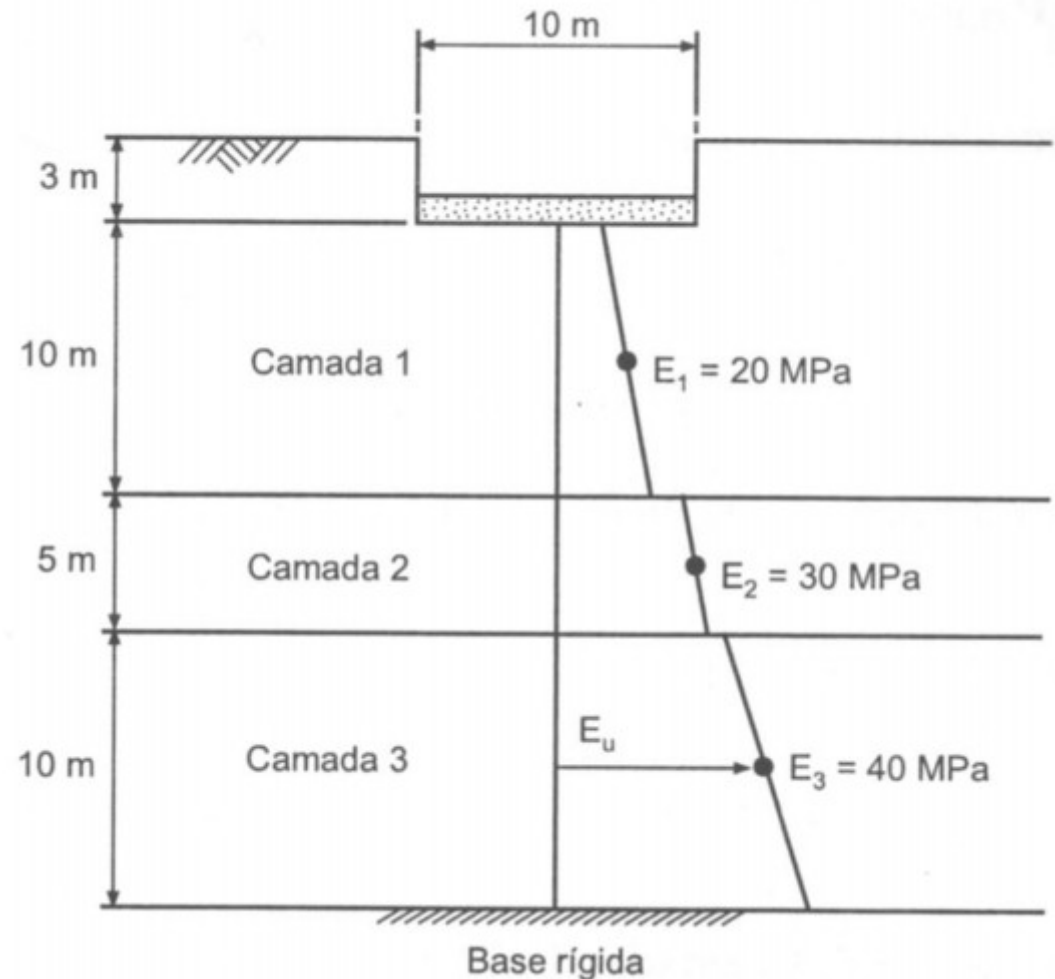
4. RECALQUES IMEDIATOS EM MEIO ELÁSTICO HOMOGÊNEO



4. RECALQUES IMEDIATOS EM MEIO ELÁSTICO HOMOGÊNICO

c) Multicamadas

O maciço de solo sobreposto ao não deslocável pode ser constituído por mais de uma camada, cada uma com seu módulo de deformabilidade.



4. RECALQUES IMEDIATOS EM MEIO ELÁSTICO HOMOGÊNEO

c) Multicamadas

c.1) Camada hipotética

- Camada 1 (de cima) → camada finita com não deslocável no topo da segunda camada;
- Camada 2 (de baixo) → camada hipotética com a espessura total das duas camadas e módulo de deformabilidade da segunda menos o recalque da primeira camada com módulo de deformabilidade da segunda.

ÚLTIMA SUBCAMADA → RECALQUE INFERIOR A 10% DO RECALQUE TOTAL.

4. RECALQUES IMEDIATOS EM MEIO ELÁSTICO HOMOGENEO

c) Multicamadas

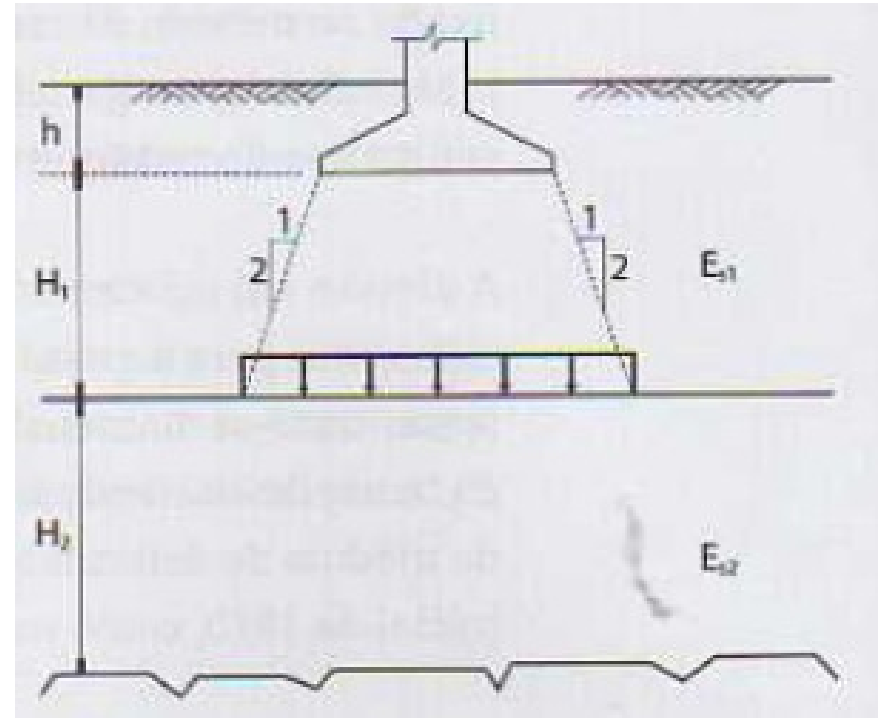
c.2) Sapata fictícia

- Sapata fictícia com propagação de tensões 1:2.

c.2) Média dos módulos

- Conduz a maiores erros.

$$E_{s\text{ med}} = \frac{H_1 \cdot E_{s1} + H_2 \cdot E_{s2}}{H_1 + H_2}$$



4. RECALQUES IMEDIATOS EM MEIO ELÁSTICO HOMOGÊNEO

d) Bulbo de recalques

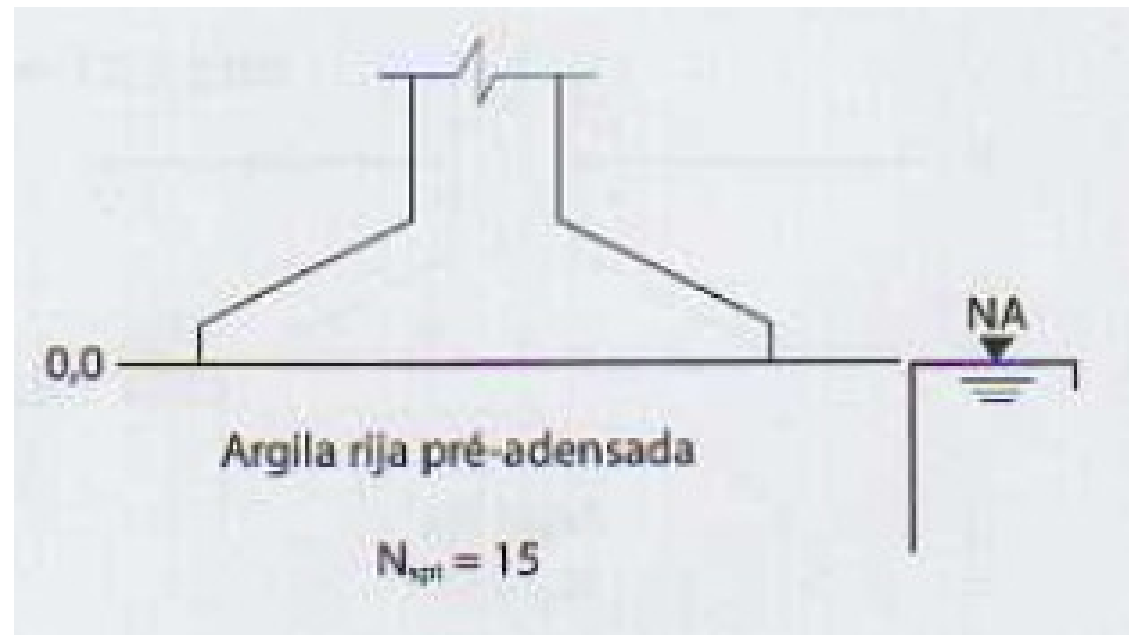
“Espessura da camada sob a base da sapata que produz mais de 90% do recalque imediato total.”

Bulbo de recalques atinge a profundidade $H = 6B$

Estimativa de recalques: não considerar apenas as camadas do bulbo de tensões, e sim as camadas do bulbo de recalques.

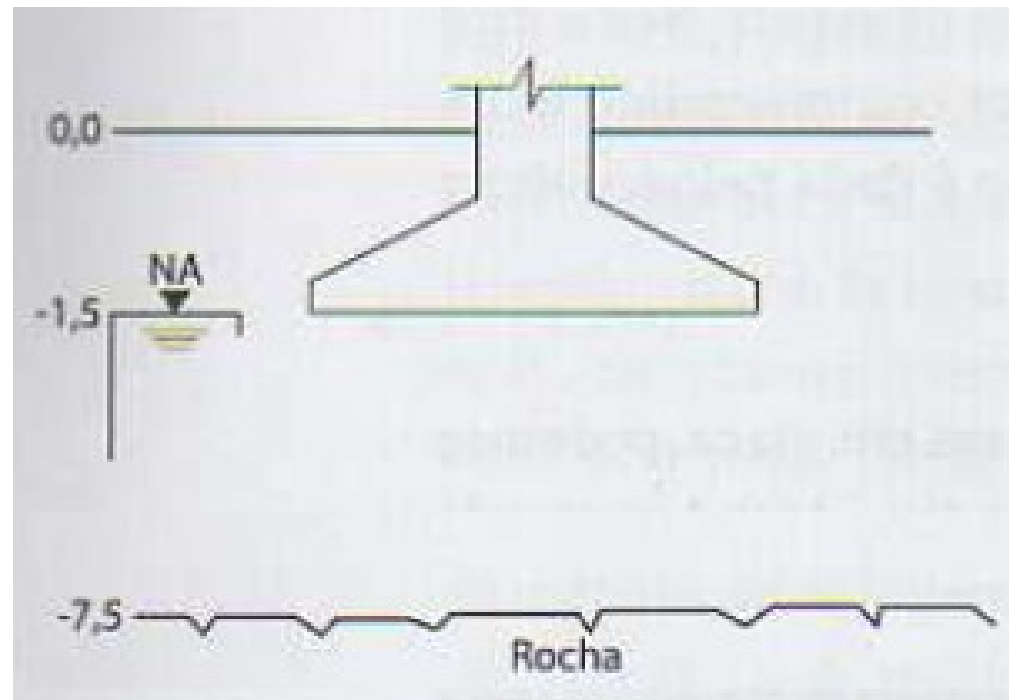
EXERCÍCIOS

1) *Estimar o recalque imediato da sapata apresentada na figura, considerada rígida, com $B = L = 3\text{m}$, aplicando no solo a tensão de $0,2\text{ MPa}$.*



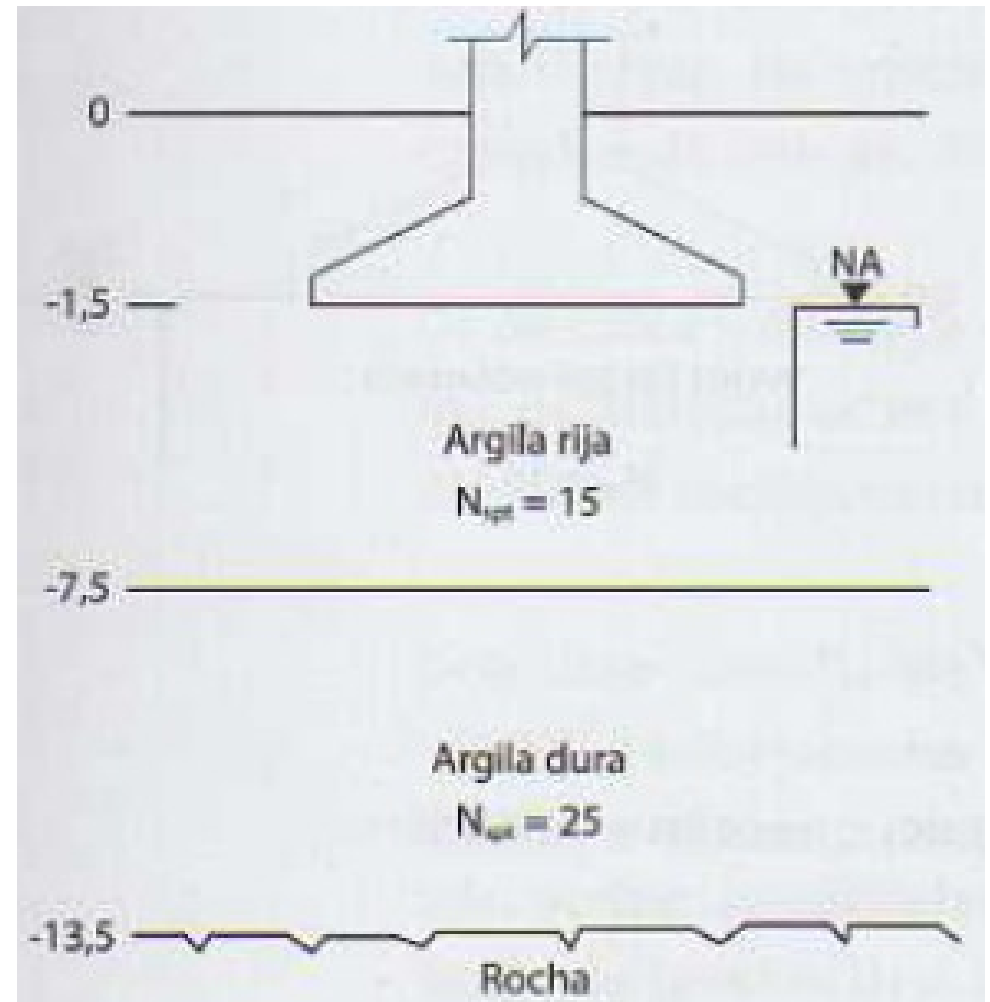
EXERCÍCIOS

2) *Estimar o recalque imediato da sapata apresentada na figura, considerada rígida, com $B = L = 3\text{m}$, aplicando no solo a tensão de $0,2\text{ MPa}$.*



EXERCÍCIOS

3) *Estimar o recalque imediato da sapata apresentada na figura, considerada rígida, com $B = L = 3\text{m}$, aplicando no solo a tensão de $0,2\text{ MPa}$.*



5. RECALQUES IMEDIATOS EM MEIO ELÁSTICO NÃO HOMOGÊNEO

“Nas areias o módulo de deformabilidade não é constante com profundidade devido a sua granulometria, mineralogia e compactação.”

AUMENTA → PROFUNDIDADE

Supor várias camadas pouco espessas com um valor constante de E_s → problema multicamadas do meio elástico homogêneo.

5. RECALQUES IMEDIATOS EM MEIO ELÁSTICO NÃO HOMOGÊNIO

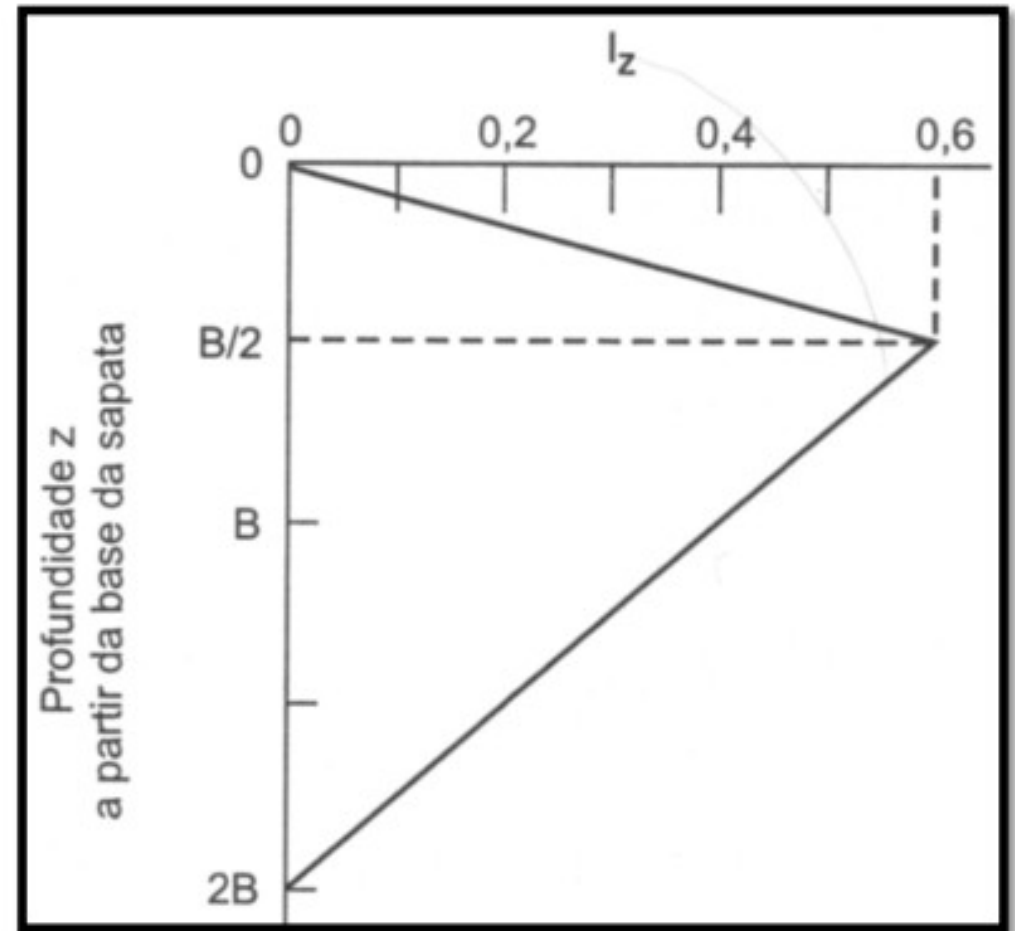
a) Método de Schmertmann

$$\varepsilon_z = \frac{\sigma}{E_s} I_z$$

- I_z : fator de influência na deformação;
- Deformação máxima não ocorre no contato base-sapata e sim em uma profundidade em torno de $z = B/2$.

5. RECALQUES IMEDIATOS EM MEIO ELÁSTICO NÃO HOMOGÊNEO

a) Método de Schmertmann



5. RECALQUES IMEDIATOS EM MEIO ELÁSTICO NÃO HOMOGÊNIO

a) Método de Schmertmann

- Coeficiente C1: embutimento da sapata
- Coeficiente C2: efeito do tempo
- Módulo de deformabilidade: correlações com o SPT.

$$C_1 = 1 - 0,5 \left[\frac{q}{\sigma^*} \right] \geq 0,5$$

$$C_2 = 1 + 0,2 \log \left(\frac{t}{0,1} \right)$$

q = tensão vertical efetiva à cota de apoio da fundação (sobrecarga);
 σ^* = tensão “líquida” aplicada pela sapata ($\sigma^* = \sigma - q$).

5. RECALQUES IMEDIATOS EM MEIO ELÁSTICO NÃO HOMOGÊNIO

a) Método de Schmertmann

$$\rho_i = C_1 C_2 \sigma * \sum_{i=1}^n \left(\frac{I_z}{E_s} \Delta z \right)_i$$

I_z = fator de influência na deformação à meia-altura da i -ésima camada;

E_s = módulo de deformabilidade da i -ésima camada;

Δz = espessura da i -ésima camada.

No intervalo 0 a 2B abaixo da sapata dividir o perfil num número de camadas, cada uma com E_s constante, considerando:

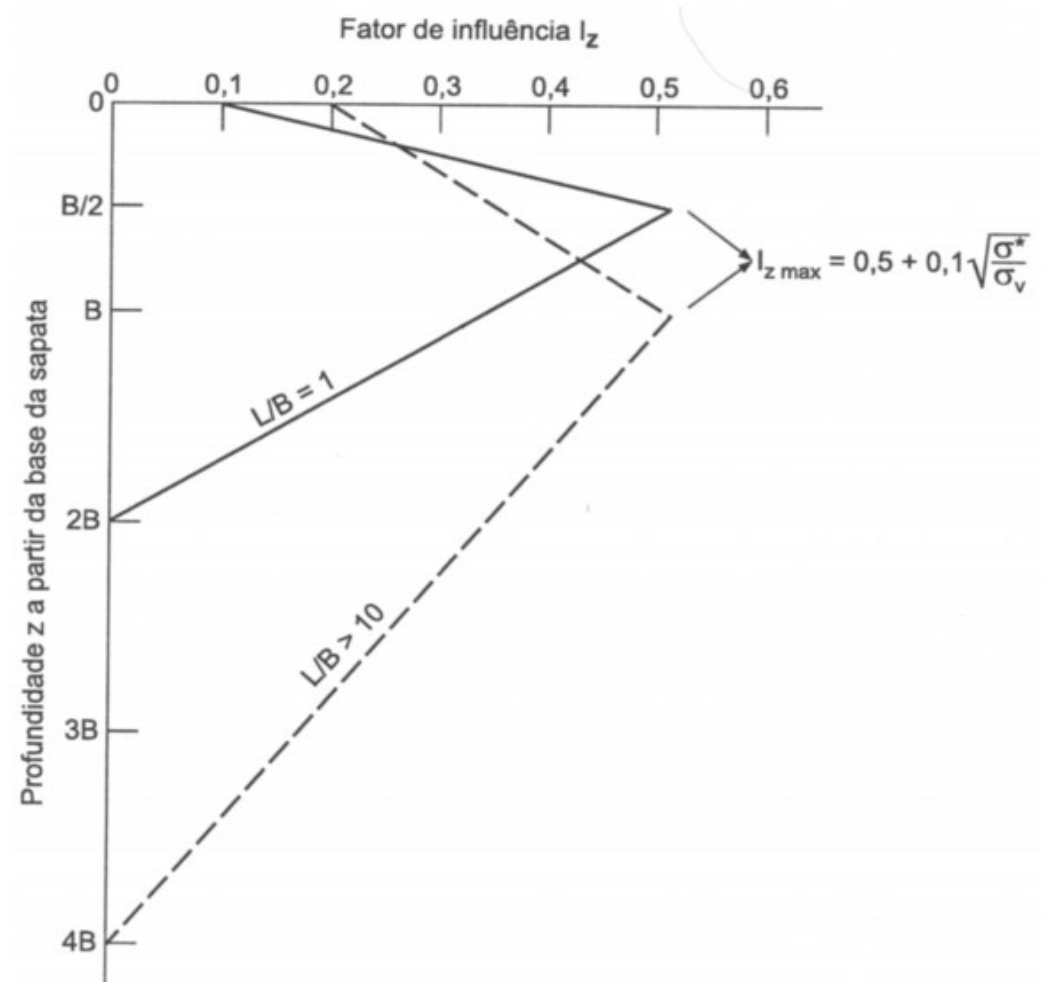
- Espessura máxima z das sub camadas igual a $B/2$.
- Deve haver uma divisão que passe por $B/2$: o vértice do triângulo.

5. RECALQUES IMEDIATOS EM MEIO ELÁSTICO NÃO HOMOGÊNIO

b) Método de Schmertmann modificado

- Sapatas planas e sapatas retangulares;
- Novos diagramas de I_z ;
- Valor máximo de I_z ocorre em profundidades diferentes para o tipo de sapata:

$$I_z = 0,5 + 0,1 \sqrt{\frac{\sigma^*}{\sigma_v}}$$



5. RECALQUES IMEDIATOS EM MEIO ELÁSTICO NÃO HOMOGÊNIO

b) Método de Schmertmann modificado

- σ_v - Tensão vertical efetiva na profundidade correspondente a I_z máx (B/2)

$$I_z = 0,5 + 0,1 \sqrt{\frac{\sigma^*}{\sigma_v}}$$

q = tensão vertical efetiva à cota de apoio da fundação (sobrecarga);
 σ^* = tensão "líquida" aplicada pela sapata ($\sigma^* = \sigma - q$).

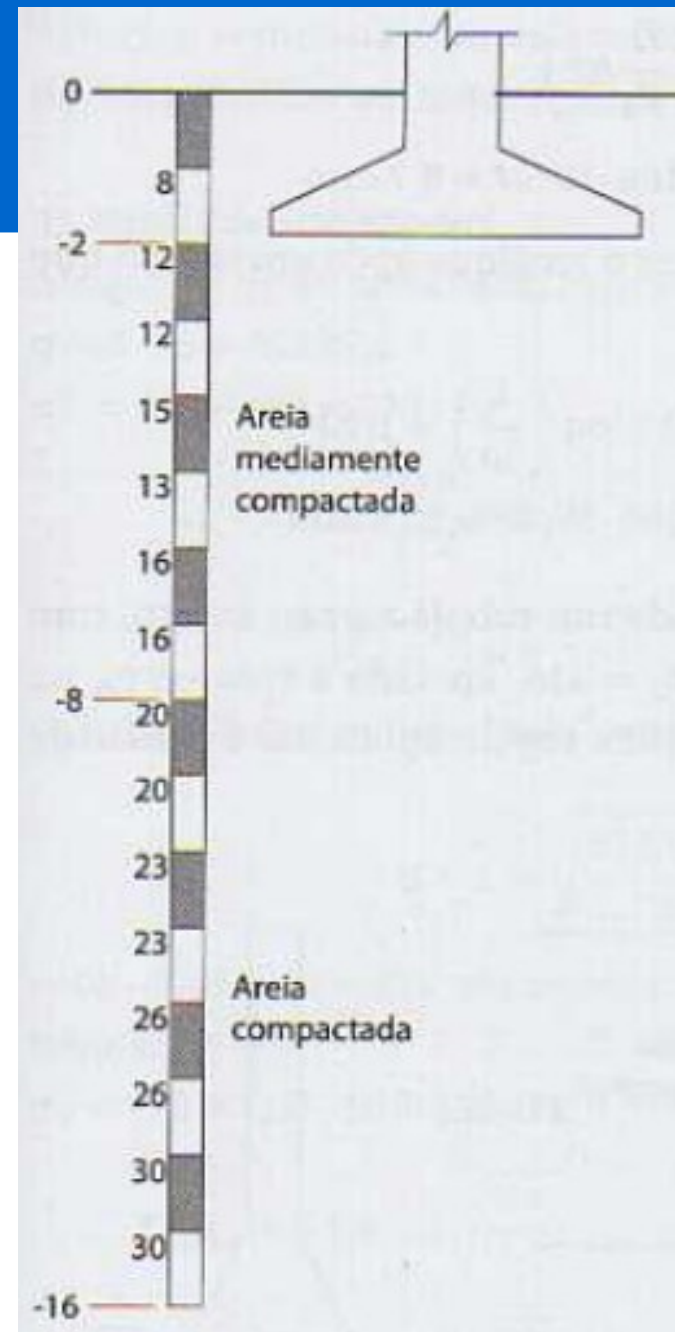
Sapata quadrada:

$$I_z = 0,1 + 2 (I_{z \max} - 0,1) z/B \quad \text{para } z \leq B/2$$

$$I_z = (2/3) I_{z \max} (2 - z/B) \quad \text{para } B/2 \leq z \leq 2B$$

EXERCÍCIOS

4) *Estimar o recalque imediato da sapata apresentada na figura, considerada rígida, com $B = L = 3m$, aplicando no solo a tensão de $0,2 \text{ MPa}$.*



6. PROVA DE CARGA

a) Argilas

Para uma mesma tensão aplicada, os recalque imediatos crescem com a dimensão da sapata. Tais recalques são proporcionais pois o módulo de deformabilidade é constante com a profundidade e os bulbos são proporcionais à largura da placa e da sapata.

Norma americana → placa quadrada de lado 0,30m

Norma brasileira → placa circular de diâmetro 0,80m

Sapata retangular → sapata circular fictícia de área equivalente.

$$\rho_s = \rho_p \frac{B_s}{B_p}$$

6. PROVA DE CARGA

b) Areias

b.1) Terzaghi-Peck – placa quadrada de 0,30 m

$$\rho_s = \rho_p \left(\frac{2B_s}{B_s + 0,30} \right)^2$$

b.2) Terzaghi-Peck Sowers – qualquer placa

$$\rho_s = \rho_p \left[\frac{B_s + (B_p + 0,30)}{B_p (B_s + 0,30)} \right]^2$$

6. PROVA DE CARGA

b) Areias

Equações subestimam os recalques → inaplicabilidade

“Ainda não há uma equação geral aplicável à extrapolação de recalque de uma placa de tamanho padrão para o recalque de uma sapata protótipo. Tal equação deverá considerar a compacidade da areia, o tamanho das partículas, a geometria da sapata, etc.”

b.3) Cintra et al

$$E_s = E_o + kz$$

6. PROVA DE CARGA

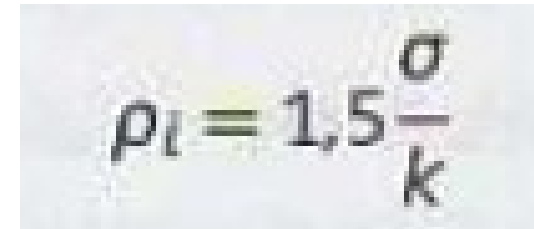
b) Areias

b.3) Cintra et al

- Função do módulo de deformabilidade: $E_s = E_o + kz$

Caso 1: $E_o = 0 \rightarrow E_s = kz$

- O aumento de B é compensado pelo aumento de E_s
- Recalque invariável com a dimensão;
- Meio Gibson


$$\rho_L = 1,5 \frac{\sigma}{k}$$

Caso 2: $k=0 \rightarrow E_s = E_o$

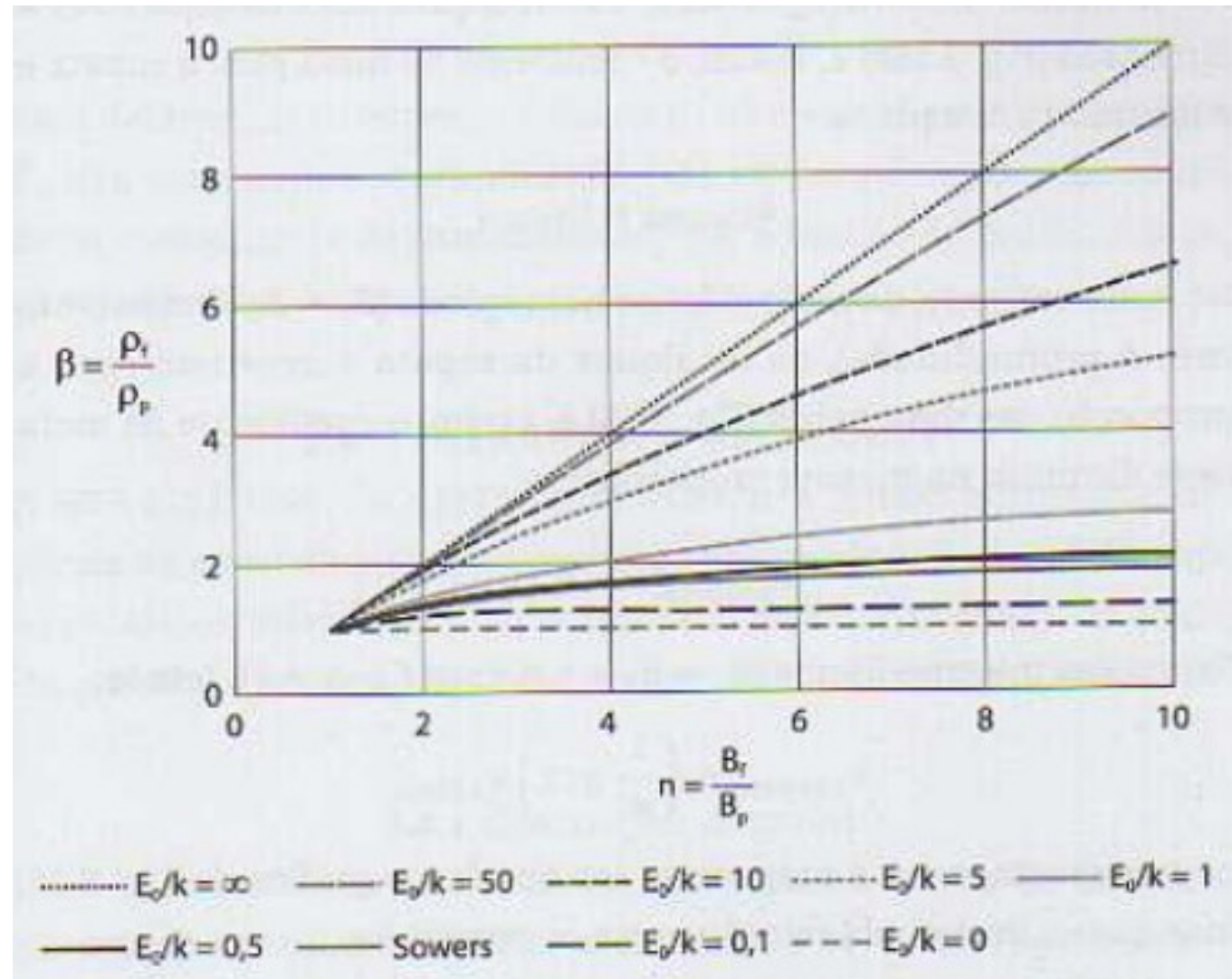
- Recalque proporcional a dimensão

6. PROVA DE CARGA

b) Areias

b.3) Cintra et al

- $E_s = E_o + kz$;
- Relação entre ;
- Relação entre dimensões.



6. PROVA DE CARGA

c) Coeficiente de reação do solo (k_s)

Coeficiente de recalque ou coeficiente de mola

$$k_s = \frac{\sigma}{\rho} \quad (\text{MPa/m})$$

Caso 1: $E_o = 0 \rightarrow E_s = kz$

$$k_{s \text{ sapata}} = k_{s \text{ placa}}$$

Caso 2: $k=0 \rightarrow E_s = E_o$

$$k_{s \text{ sapata}} = \frac{1}{n} k_{s \text{ placa}}$$

6. PROVA DE CARGA

d) Módulo de deformabilidade

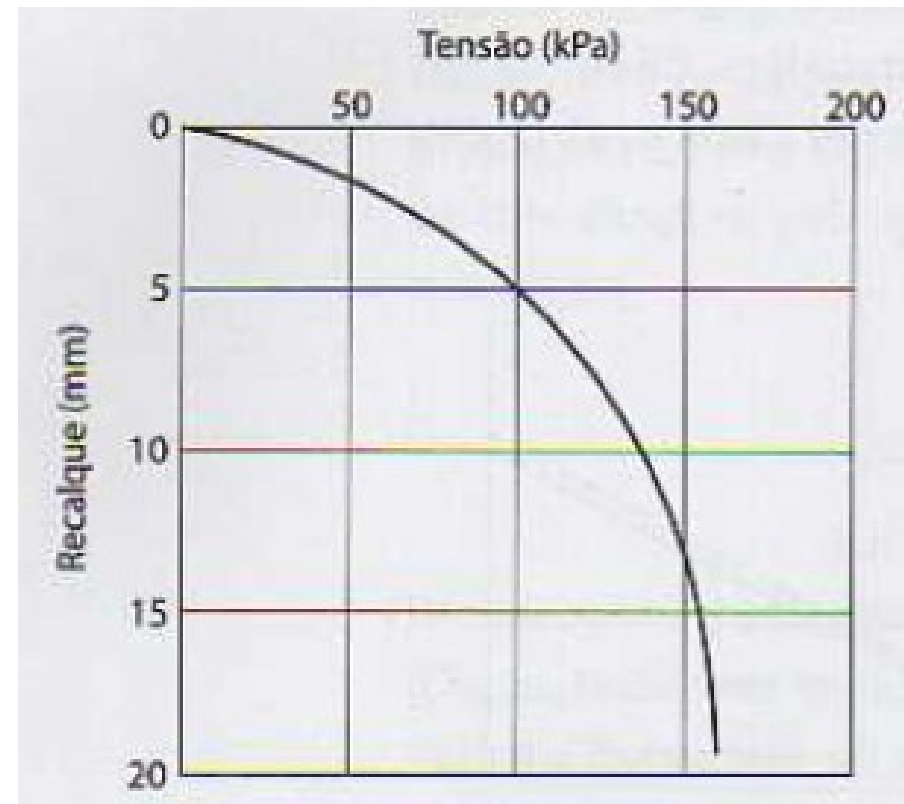
Estimativa através da curva tensão recalque em caso de meio elástico homogêneo.

$$E_s = 0,48 \frac{\sigma}{\rho_l} \quad E_s = 0,48 k_s \text{placa}$$

EXERCÍCIOS

5) Dada a curva tensão recalque abaixo, obtida em prova de carga em argila (placa circular rígida de aço com diâmetro de 0,80m), estimar:

- o recalque de uma sapata quadrada com 4,2m de lado, a ser instalada na mesma cota e no mesmo local de ensaio, aplicando uma tensão de 80 kPa;
- o coeficiente de recalque k_s ;
- o módulo de deformabilidade do solo.



EXERCÍCIOS

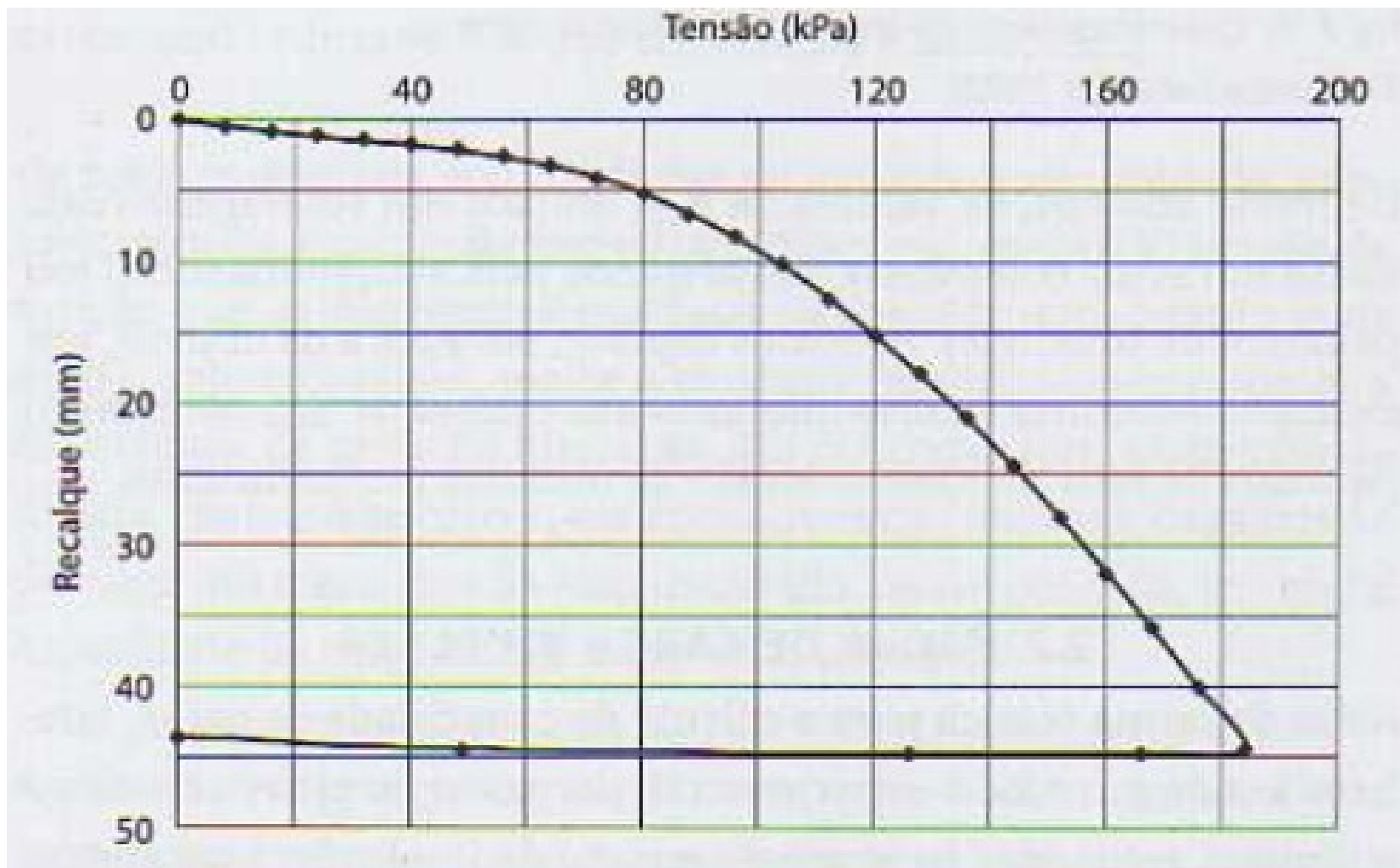
6) Dada a curva tensão recalque abaixo, obtida em prova de carga em areia argilosa (placa circular rígida de aço com diâmetro de 0,80m), considerando $E_s = 6 + 2z$, estimar:

a) o recalque de uma sapata quadrada com 3,5m de lado, a ser instalada na mesma cota e no mesmo local de ensaio, aplicando uma tensão de 70 kPa;

b) o coeficiente de recalque k_s .

EXERCÍCIOS

5)



7. TOLERÂNCIA A RECALQUES

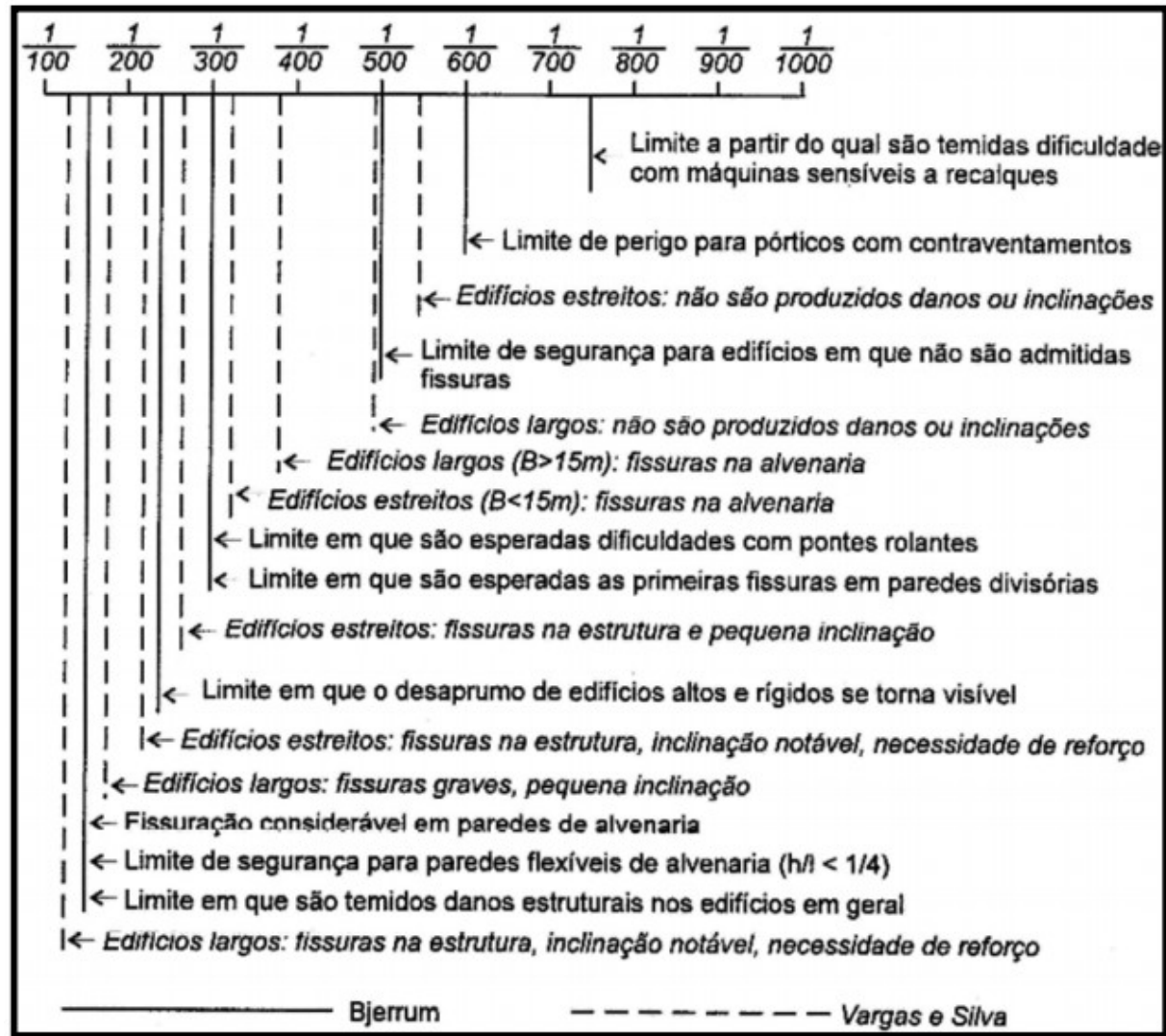
a) Recalque angular

1:300 → trincas em paredes de edifícios

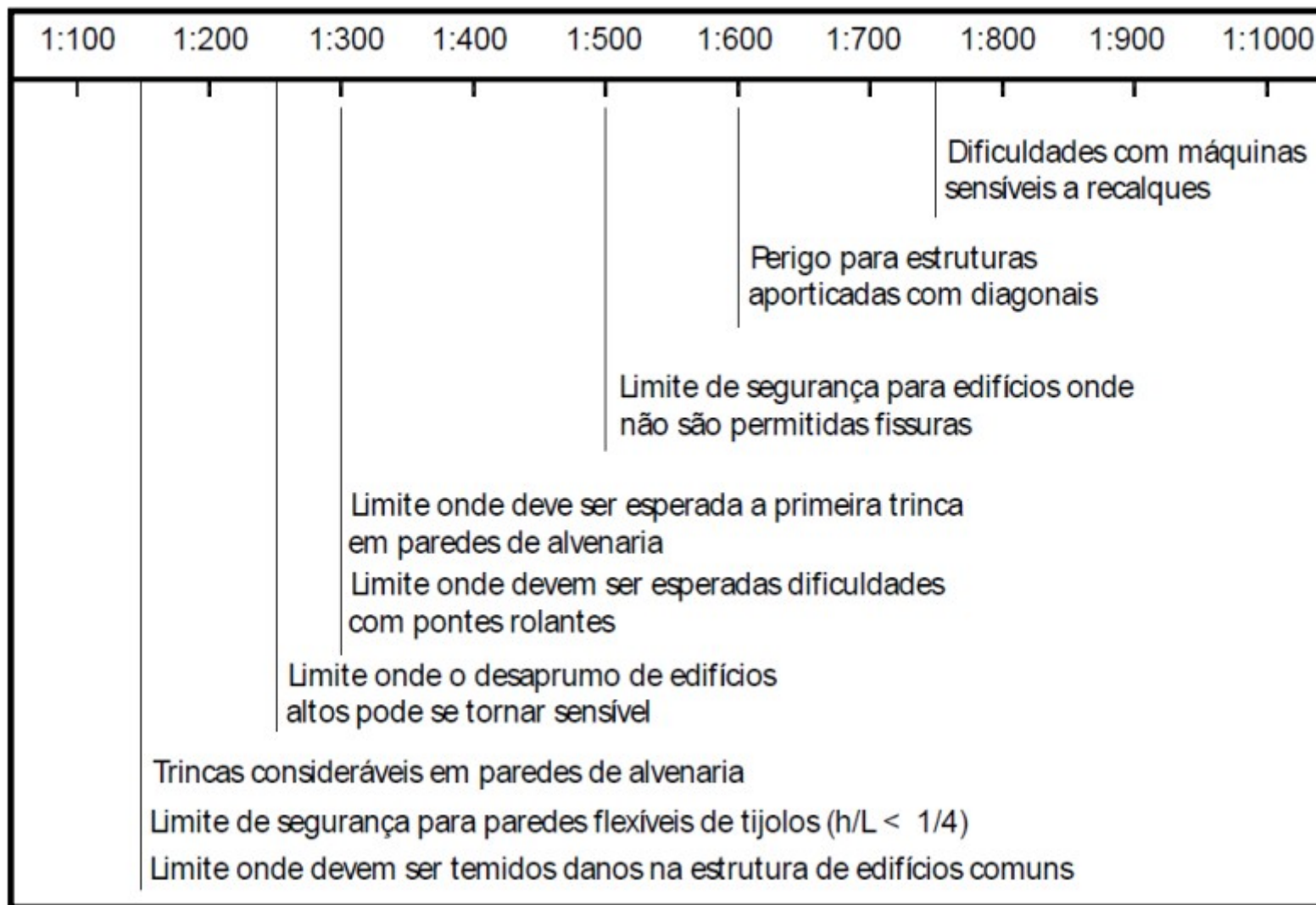
1:500 → danos estruturais

- Distorção angular depende de muitos fatores: tipo de fundação, tipo de solo, rigidez da estrutura, etc.
- Ocorrência de recalque acompanha redistribuição dos esforços.

7. TOLERÂNCIA A RECALQUES



7. TOLERÂNCIA A RECALQUES



7. TOLERÂNCIA A RECALQUES

b) Recalque total

- Recalques uniformes → ausência de danos mesmo para valores exagerados;
- Limitação do recalque total → Uma maneira de limitar o recalque diferencial;
- Sempton & MacDonald:

Argilas:

$\delta_{\max} = 40 \text{ mm}$
 $\rho_{\max} = 65 \text{ mm}$ para sapatas isoladas
 $\rho_{\max} = 65 \text{ a } 100 \text{ mm}$ para radiês

Areias:

$\delta_{\max} = 25 \text{ mm}$
 $\rho_{\max} = 40 \text{ mm}$ para sapatas isoladas
 $\rho_{\max} = 40 \text{ a } 65 \text{ mm}$ para radiês

7. TOLERÂNCIA A RECALQUES

As consequências...

- Danos arquitetônicos: trincas, desaprumo, etc;
- Danos a funcionalidade: desgaste de elevadores, declividade de pisos, emperramento de portas e janelas, etc.
- Danos estruturais: podem comprometer a estabilidade.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1) ABEF/ABMS (1996) Fundações - Teoria e Prática. São Paulo: Pini, 1998. 751 p.
- 2) ALONSO, U. R. Exercícios de fundações. São Paulo: Blucher, 2010.
- 3) ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6122:2010 – Projeto e execução de fundações. Rio de Janeiro, 2010.
- 4) REBELO, Y. C. P. Fundações – guia prático de projeto, execução e dimensionamento. São Paulo: Zigurate, 2008.
- 5) VELLOSO, D. & LOPES, F. R. Fundações. São Paulo: Oficina de textos, 2010. 568 p.
- 6) CINTRA, J. C. A, AOKI N., ALBIERO, J. H. Fundações diretas: projeto geotécnico. São Paulo: Oficina de textos, 2011.
- 7) Material de aula do professor Sérgio Paulino Mourthé – Faculdades Kennedy.