SAPATAS
AULA 05
PREVISÃO DE RECALQUE

Victor S. Terra

Mecânica dos Solos e Fundações

2° Semestre/ 2015

- A parte de tensões induzidas pode ser estudada pelo capítulo 08 do livro “Curso básico de mecânica dos solos”, do Carlos Souza Pinto.

TENSÕES VERTICAIS DEVIDO A CARGAS APLICADAS NA SUPERFÍCIE DO TERRENO

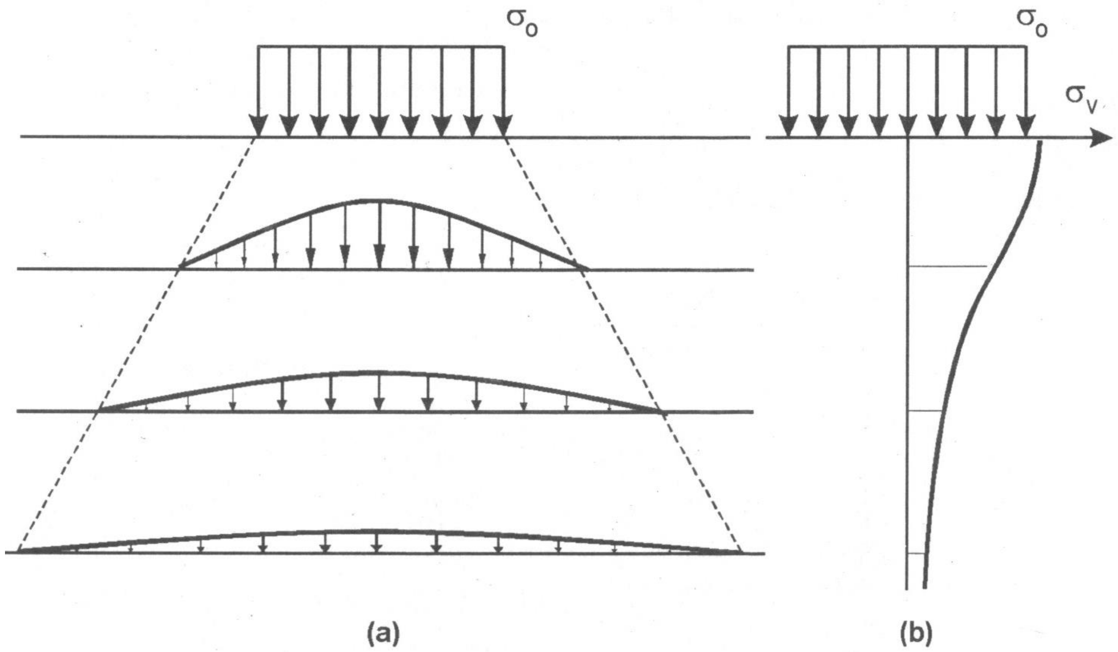
- ❑ Distribuição de Tensões
- ❑ Aplicação da Teoria da Elasticidade
  - ❑ Carregamento pontual
  - ❑ Carregamento distribuído (retangular)
  - ❑ Carregamento distribuído (círculo)
  - ❑ Métodos do ábaco de Love
- ❑ Considerações sobre o emprego da Teoria da Elasticidade

TENSÕES VERTICAIS DEVIDO A CARGAS APLICADAS NA SUPERFÍCIE DO TERRENO

- Distribuição de cargas aplicadas na superfície do terreno
  - Acréscimos de tensões se estendem além da projeção da área carregada
  - O aumento de tensão se soma às tensões geostáticas (i.e., aquelas causadas pelo peso próprio do solo

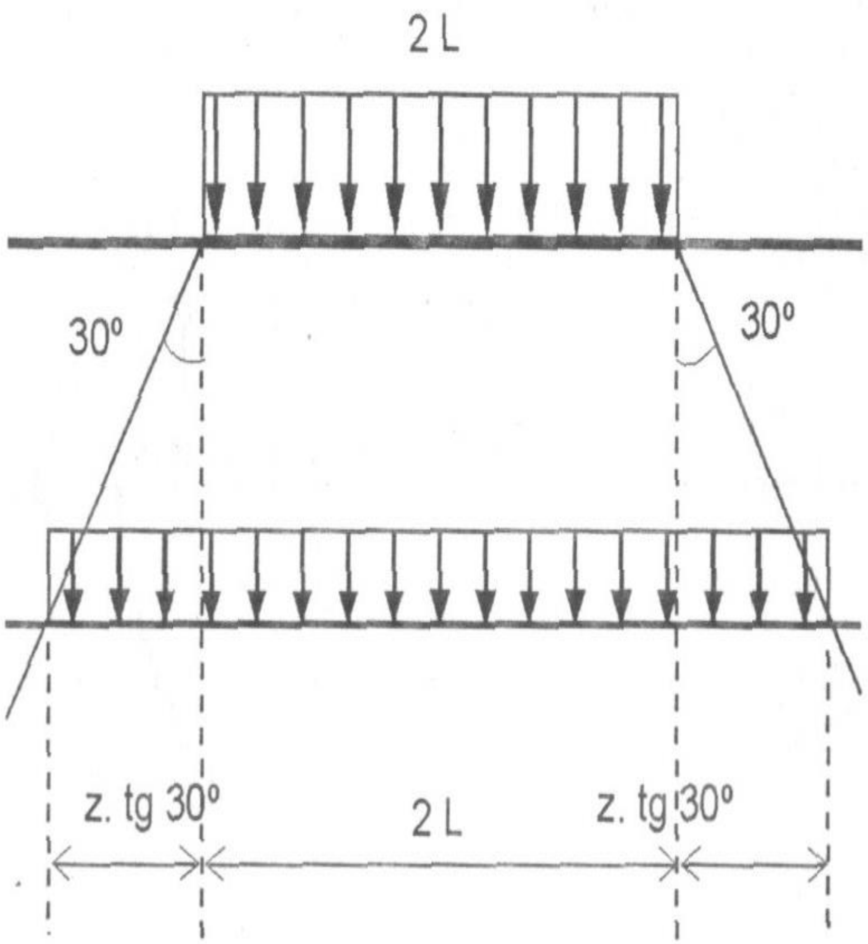
- Equilíbrio de forças deve ser respeitado
  - Integral das tensões em qualquer plano horizontal da Figura ao lado corresponde à carga original

- Tensões diminuem porque se distribuíram por uma extensão maior



DISTRIBUIÇÃO DE TENSÕES

- Espraiamento de tensões
  - Pode-se fazer uma estimativa grosseira do acréscimo de tensões;
  - Considerar que as tensões se espraiam em áreas crescentes;
  - Considerar distribuições uniformes ao longo da área de espraiamento;
  - Considerar um ângulo de espraiamento (30 graus);
  - Fazer equilíbrio de forças na direção vertical;

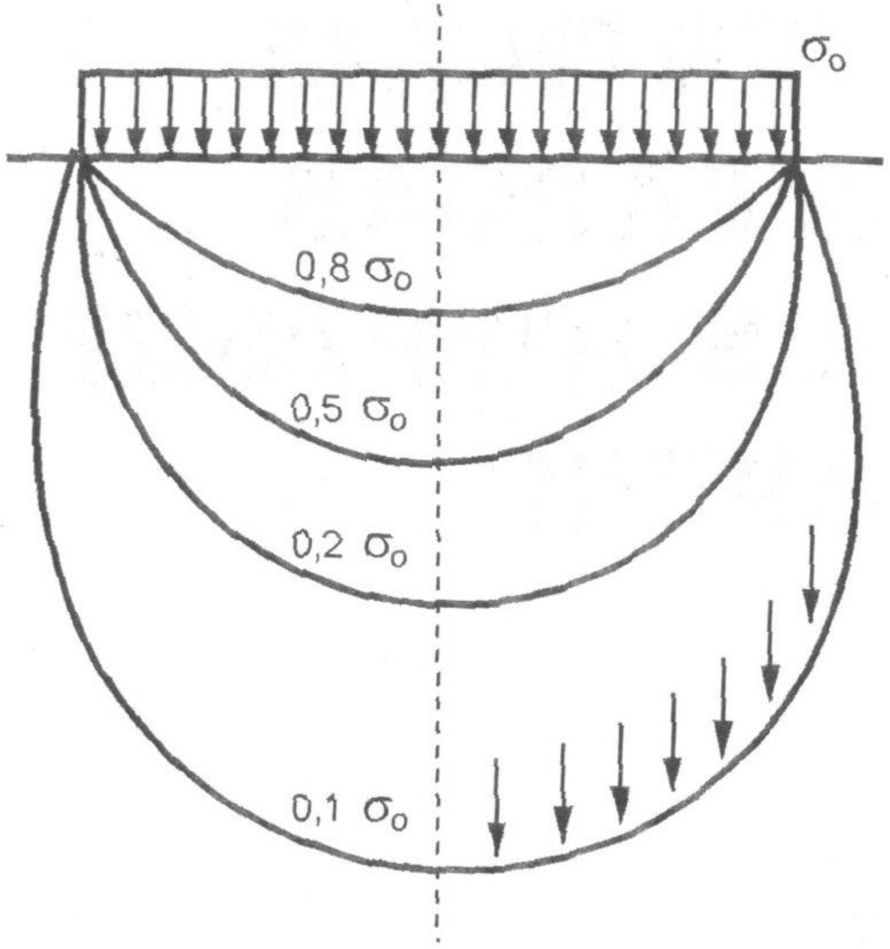


$$\text{Área carregada}: \quad A = 2L + 2z \times tg30^o$$

$$\text{Tensão vertical}: \quad \Delta\sigma_v = \frac{2L}{2L + 2z \times tg30}\Delta\sigma_0$$

DISTRIBUIÇÃO DE TENSÕES

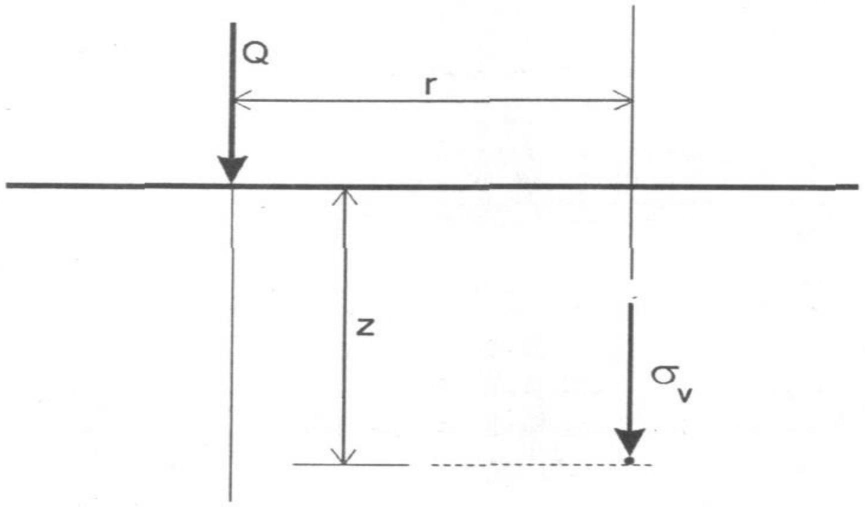
- Bulbo de tensões
  - Local geométrico de iguais valores de acréscimos de tensão
  - Sinônimos: contorno, iso-linha
  - Pode ser apresentado em termos de valores absolutos
  - Pode ser apresentado em termos da fração da tensão aplicada na superfície (conforme a Figura ao lado)



APLICAÇÃO DA TEORIA DA ELASTICIDADE

❑Solução de Boussinesq

- ❑ Várias hipóteses simplificadoras
- ❑ Material elástico
- ❑ Material isotrópico
- ❑ Material homogêneo
- ❑ Semi-espaço infinito
- ❑ Superfície horizontal
- ❑ Carga pontual aplicada à superfície



Solução de Boussinesq

$$\Delta\sigma_v = \frac{3z^3}{2\pi\left(r^2+z^2\right)^{\frac{5}{2}}}Q$$

Reescrevendo:

$$\Delta\sigma_v = \frac{3Q}{2\pi z^2 z^{-5}\left(r^2+z^2\right)^{5/2}} = \frac{3Q}{2\pi z^2\left[z^{-5\times\frac{2}{5}}\left(r^2+z^2\right)\right]^{\frac{5}{2}}}$$

$$\Delta\sigma_v = \frac{Q}{\pi\times z^2}\frac{3/2}{\left(1+\left(\frac{r}{z}\right)^2\right)^{\frac{5}{2}}}$$

APLICAÇÃO DA TEORIA DA ELASTICIDADE

❑Solução de Boussinesq

- ❑ A tensão varia de forma inversamente proporcional à profundidade do ponto considerado
- ❑ A tensão varia de forma inversamente proporcional à distância r do ponto considerado
- ❑ A tensão na superfície, abaixo do ponto, é infinita (ponto de singularidade)

Solução de Boussinesq

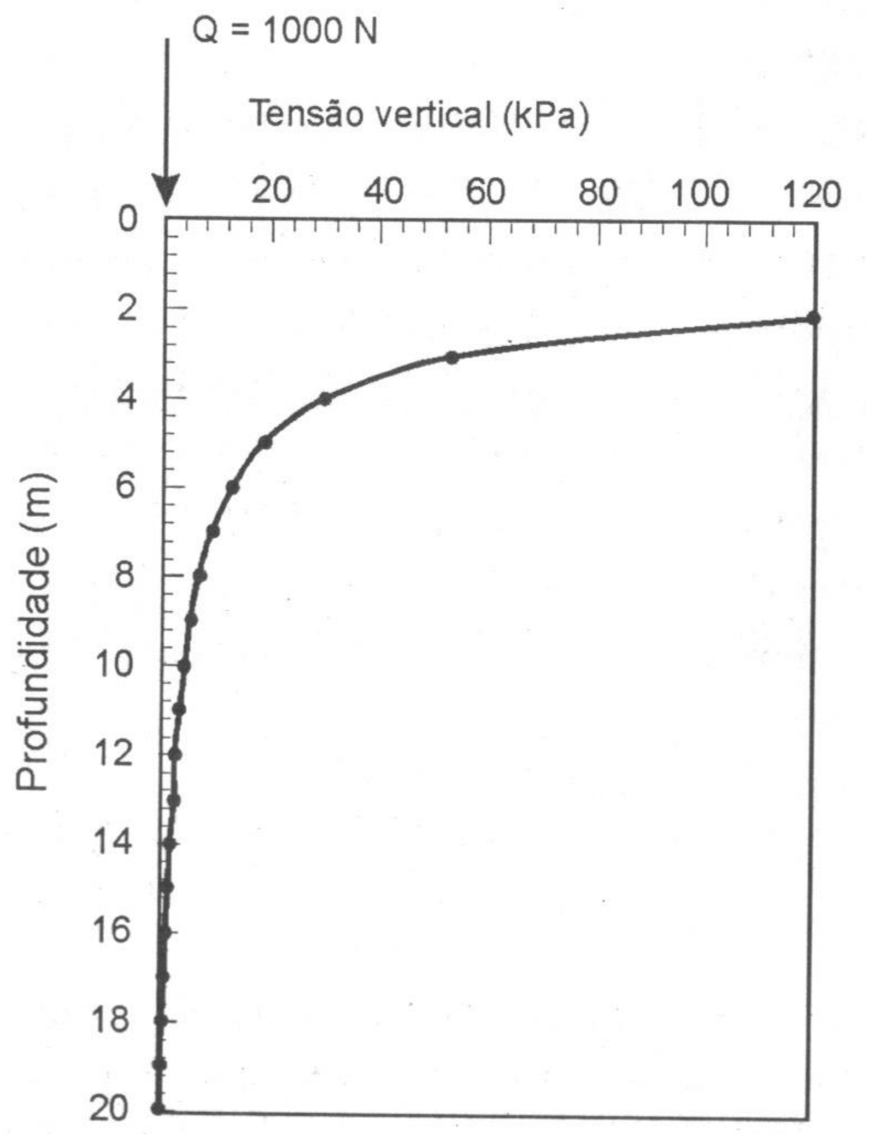
$$\Delta\sigma_v = \frac{3z^3}{2\pi\left(r^2+z^2\right)^{\frac{5}{2}}}Q$$

Reescrevendo:

$$\Delta\sigma_v = \frac{Q}{\pi \times z^2}\frac{3/2}{\left(1+\left(\frac{r}{z}\right)^2\right)^{\frac{5}{2}}}$$

Para valores de $r = 0$:

$$\sigma_v = 0{,}48\frac{Q}{z^2}$$

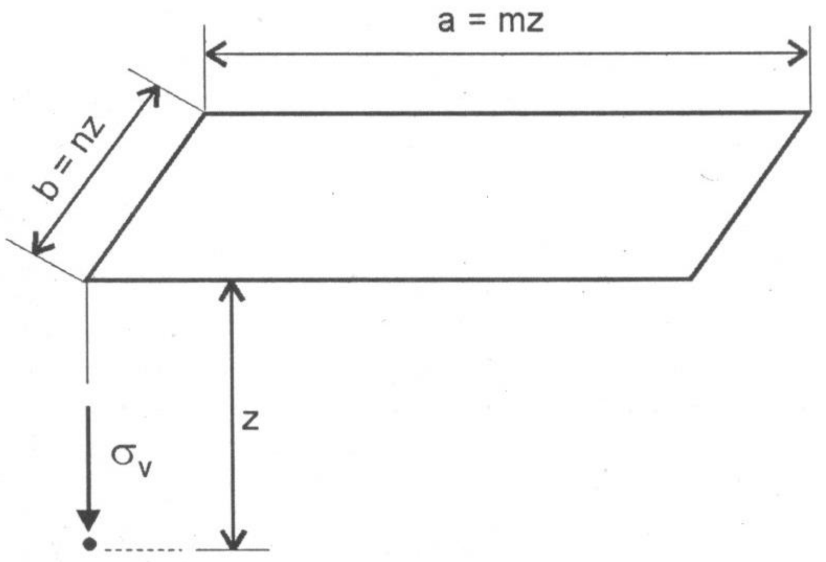


APLICAÇÃO DA TEORIA DA ELASTICIDADE

- Solução de Newmark: carregamento em áreas retangulares flexíveis
  - Integração da equação de Boussinesq
  - Mesmas condições simplificadoras: material elástico, isotrópico, homogêneo, etc.
  - Tensões para os pontos abaixo da aresta da área
  - Tensões são proporcionais aos valores de a/z e b/z

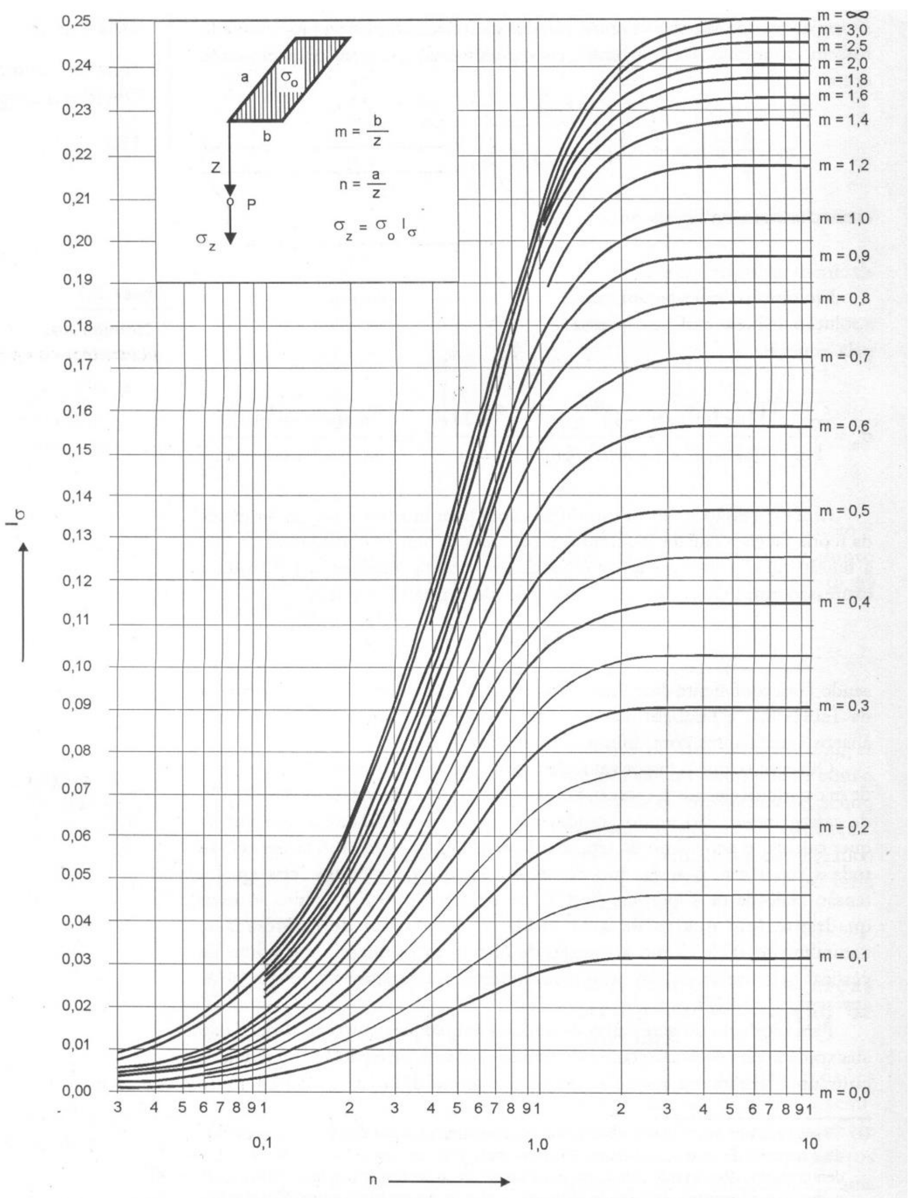
$$m = \frac{a}{z} \quad ; \quad n = \frac{b}{z}$$

$$\Delta\sigma_v = \frac{\Delta\sigma_0}{4\pi} \times \left[\frac{2mn\left(m^2+n^2+1\right)^{0,5}\left(m^2+n^2+2\right)}{\left(m^2+n^2+1+m^2n^2\right)\left(m^2+n^2+1\right)} + arctg\,\frac{2mn\left(m^2+n^2+1\right)^{0,5}}{\left(m^2+n^2+1-m^2n^2\right)} \right]$$



APLICAÇÃO DA TEORIA DA ELASTICIDADE

- Solução de Newmark: carregamento em áreas retangulares flexíveis
  - Solução trabalhosa
  - Pode-se utilizar ábaco
  - Valor máximo de I_σ = 0,25 (carga distribuída em área extensa, tomando apenas um quadrante
  - Fórmula pode ser programada em planilha
  - Cuidado com valores negativos do argumento da tangente



$$m = \frac{a}{z} \quad ; \quad n = \frac{b}{z}$$

$$\Delta\sigma_v = \Delta\sigma_0 \times I_\sigma$$

$$I_\sigma = f(m, n)$$

APLICAÇÃO DA TEORIA DA ELASTICIDADE

- Solução de Newmark: carregamento em áreas retangulares flexíveis
  - Exemplo: Considerando uma sapata 2x3 metros, com uma carga de 2000 kN, calcule, para uma profundidade de 1,5 metros abaixo da sapata, a tensão induzida no canto da mesma.

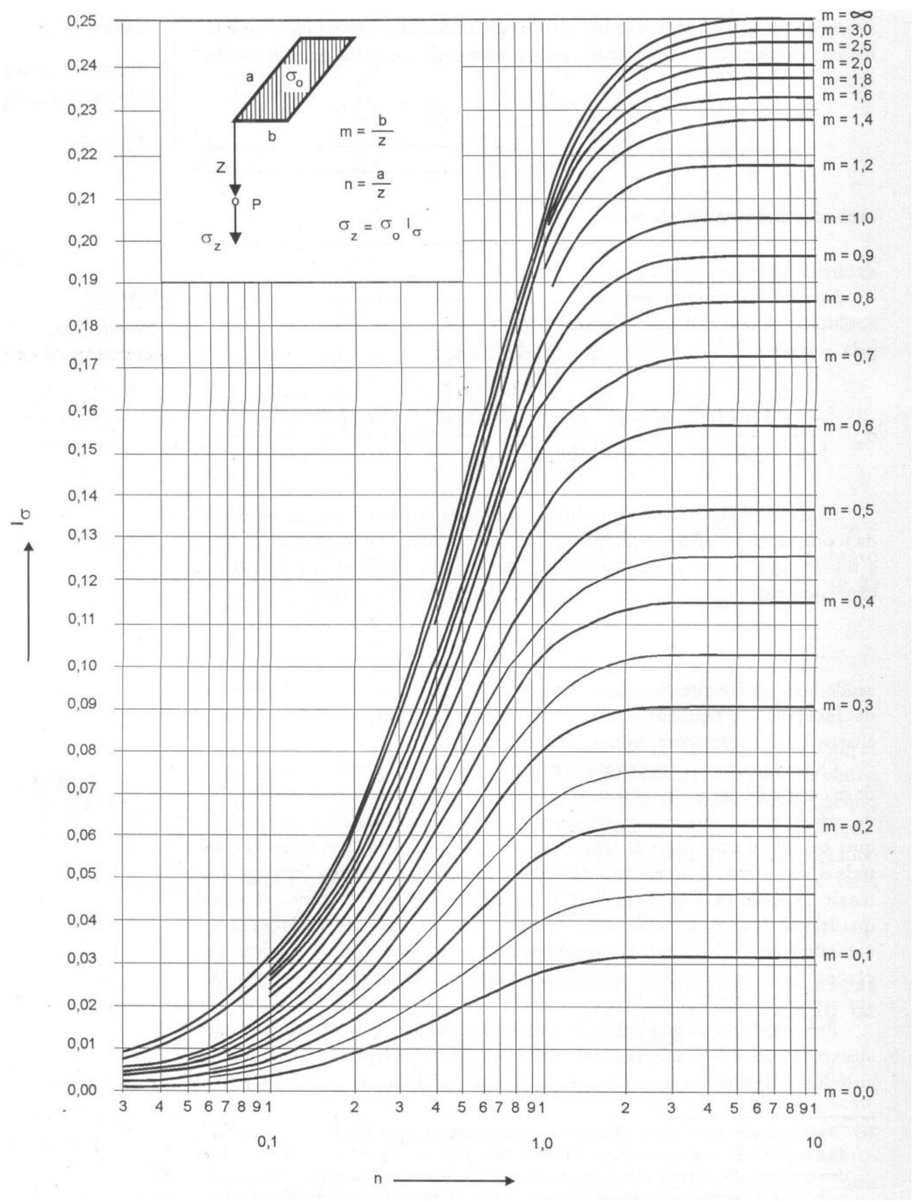
$$m = \frac{a}{z} = \frac{2}{1.5} = 1.33$$

$$n = \frac{b}{z} = \frac{3}{1.5} = 2.0$$

$$I_\sigma = k \cong 0.217$$

$$\Delta\sigma_0 = \frac{P}{A} = \frac{2000}{6} = 333.33kPa$$

$$\Delta\sigma_v = \Delta\sigma_0 \times I_\sigma = 333.33 \times 0.217 = 72.33kPa$$

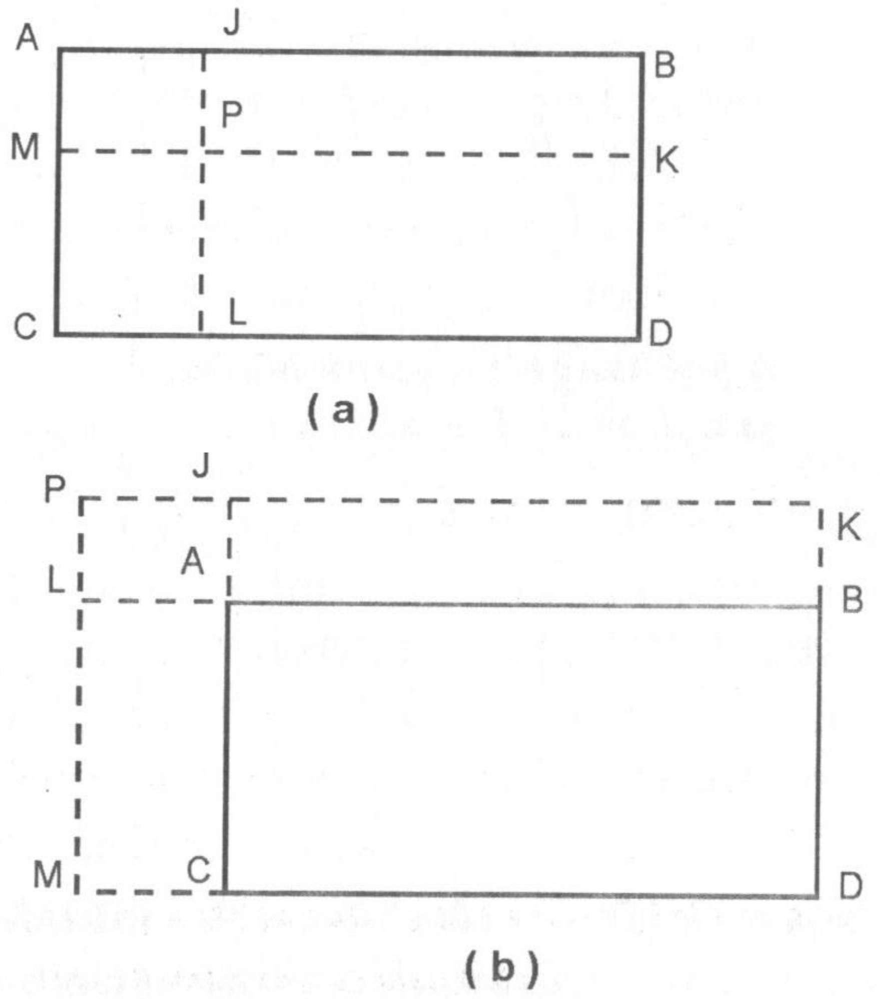


APLICAÇÃO DA TEORIA DA ELASTICIDADE

- Solução de Newmark: carregamento em áreas retangulares
  - Para qualquer ponto que não seja abaixo da aresta, pode-se decompor a figura em sub-regiões de formato retangular
  - Considera-se neste caso o princípio da superposição de efeitos
  - Todos os retângulos devem ter uma aresta sobre o ponto onde se deseja calcular a tensão vertical.
  - FIGURA (A): Ponto abaixo da superfície de carregamento
    - Tensão é a soma dos efeitos
    - Efeitos das áreas

    AJPM + BKPJ + DLPK + CMPL
  - FIGURA (B): Ponto externo à superfície de carregamento
    - Tensão é a subtração dos efeitos
    - Efeitos das áreas

    PKDM – PKBL – PJCM + PJAL



RECALQUE DE FUNDAÇÕES

- Recalque absoluto: o quanto cada fundação recalca individualmente;
- Recalque diferencial: a diferença de recalque entre duas fundações;
- Distorção angular (γ): rotação dos recalques entre duas ou mais fundações.

- Parcelas do recalque

O recalque de uma fundação pode ocorrer em diferentes tempos, e pode ser resumido como:

$$\rho = \rho_i + \rho_c + \rho_s$$

Onde: ρ_i é o recalque inicial, que ocorre numa escala de tempo de horas ou poucos dias;

ρ_c é o recalque por adensamento primário, que ocorre num período de meses ou anos; e

ρ_s é o recalque por adensamento secundário, que ocorre num período de várias décadas.

RECALQUE DE FUNDAÇÕES

a) Recalque inicial: em areias e solos não saturados é resultante da redução do índice de vazios. Em argilas saturadas também ocorre o recalque inicial sem variar o índice de vazios (ocorre por rearranjo dos grãos). Em ambos os casos pode ser estimado pela Teoria da Elasticidade;

b) Recalque por adensamento primário: ocorre em argilas saturadas devido ao processo de transferência gradativa de tensões aos grãos causada pela expulsão da água nos vazios (processo lento). Pode-se empregar a Teoria de Terzaghi para o seu cálculo.

c) Recalque por adensamento secundário : É resultante do adensamento secundário, que é a redução dos vazios sob carga constante. Só é relevante em argilas muito moles ou argilas marinhas, ambas saturadas. A única maneira de estudar esta parcela do recalque é por meio de ensaios de laboratório.

RECALQUE DE FUNDAÇÕES

De maneira geral:

(I) Areias e solos não saturados:

$$\rho \cong \rho_i$$

(II) Argilas saturadas:

$$\rho \cong \rho_i + \rho_c$$

(III) Argilas muito moles e argilas marinhas

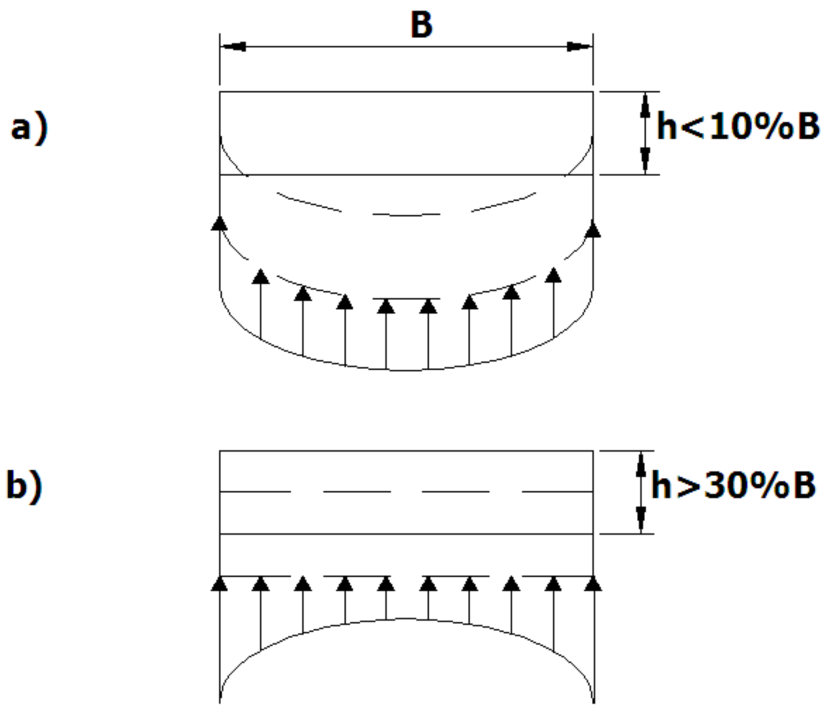
$$\rho = \rho_i + \rho_c + \rho_s$$

RECALQUE EM AREIAS E SOLOS NÃO SATURADOS (SAPATAS E TUBULÕES)

❑ Tensões de contato:

a) Sapata Flexível;
- Tensões uniformes;
- Recalques diferentes.

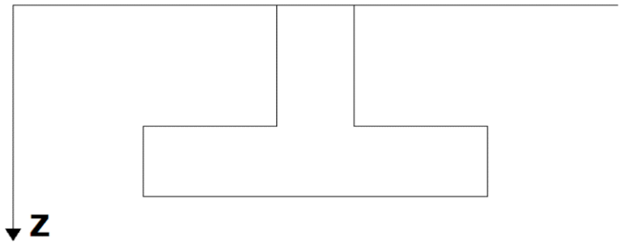
b) Sapata Rígida;
- Tensões desiguais;
- Recalques iguais.



RECALQUE EM AREIAS E SOLOS NÃO SATURADOS (SAPATAS E TUBULÕES)

- **Conceito de recalque:**

$$\rho = \int_0^\infty \varepsilon_z \, dz$$



- **Etapas de cálculo**

1° passo: Considerar uma profundidade até na rocha ou até "5B", sendo B a menor dimensão da fundação;

2° passo: Subdividir a camada do solo de 6 a 12 sub-camadas;

3° passo: Iniciar a primeira sub-camada com espessura de 25% do valor de B;

4° passo: Estimar a tensão no ponto médio de cada sub-camada ($\Delta\sigma_v$) induzida pela fundação. Usar Teoria da Elasticidade (Newmark);

5° passo: Determinar o Módulo Elástico (E) aproximado de cada sub-camada;

6° passo: Calcular o recalque em cada sub-camada;

7° passo: Recalque total – somatória dos recalques em cada sub-camada.

$$\rho = \sum_{j=1}^{n} \frac{\Delta\sigma_j}{E_j} \Delta z_j$$

RECALQUE EM AREIAS E SOLOS NÃO SATURADOS (SAPATAS E TUBULÕES)

- **Observação 1:** **Recalque em sapatas rígidas (recalques uniformes).**

$$\rho_{rígida} = (80\% - 85\%) \times \rho_{flexível}^{centro}$$

- **Observação 2:** **Recalque em tubulões (base circular)→ é possível calcular o recalque pelo mesmo método. Deve-se considerar uma área quadrada de forma que a área circular (πR^2) seja igual à área do quadrado (B^2).**

RECALQUE EM AREIAS E SOLOS NÃO SATURADOS (SAPATAS E TUBULÕES)

- **Exemplo: Calcular o recalque de uma sapata 2x3m, com carga de projeto de 2000 kN, considerando que a mesma esteja à 2,0 metros de profundidade no perfil abaixo:**