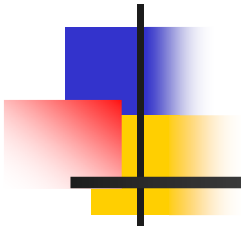


# Recalque (ELS) e carga última (ELU) de Fundações Diretas



Prof. Mauricio Abramento

Revisão (2017): Waldemar Hachich



# Avaliação da Tensão Admissível

---

- Tensão admissível deve
  - garantir segurança contra ruptura ( $F = \frac{q_{\acute{u}lt}}{q}$ )
    - $2,0 < F < 3,0$  (de maneira geral em fundações)
  - garantir recalques aceitáveis
- Avaliação exige
  - determinação de  $q_{\acute{u}lt} = q_{rupt}$
  - determinação de recalques diferenciais
- Avaliação alternativa: correlações (principalmente, mas não exclusivamente, com  $N_{SPT}$ )



# Recalques de Fundações Diretas

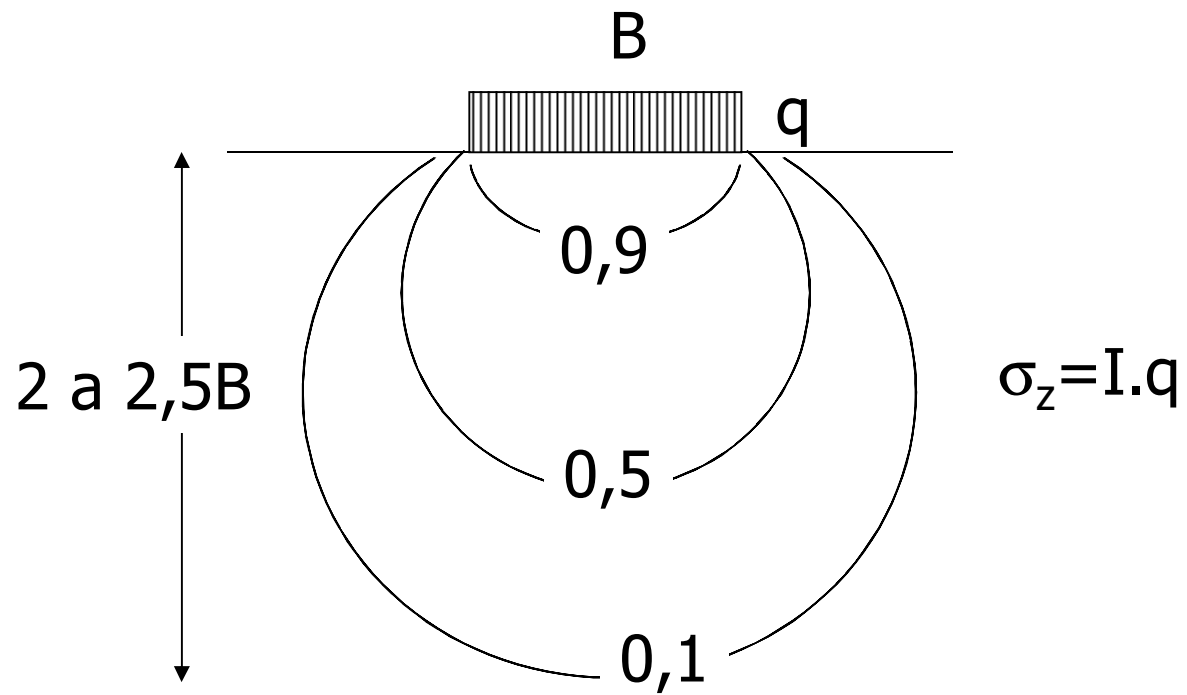
---

- Recalques regidos pelas tensões
  - aplicadas: cargas externas
  - pré-existentes: peso próprio, pré-adensamento, etc.
- Importam sempre tensões efetivas  $\Leftrightarrow$  oscilações do N.A. também têm efeito nos recalques



# Cargas externas

---





# Mecanismos de recalque

---

- Aumento de tensões efetivas causando **pequenas** variações volumétricas
  - $\Delta V$  ou  $\Delta e$  pequeno
  - deformações devidas principalmente a pequenos ajustes de posição relativa dos grãos
  - recalques imediatos ou rápidos
  - modelos da Teoria da Elasticidade
  - solos arenosos e argilas sobreadensadas
- Aumento de tensões efetivas causando **grandes** variações volumétricas
  - $\Delta V$  ou  $\Delta e$  grande
  - deformações devidas principalmente a grandes ajustes de posição relativa dos grãos
  - recalques por adensamento, demorados
  - modelos das Teorias de Adensamento
  - argilas muito moles a médias, saturadas



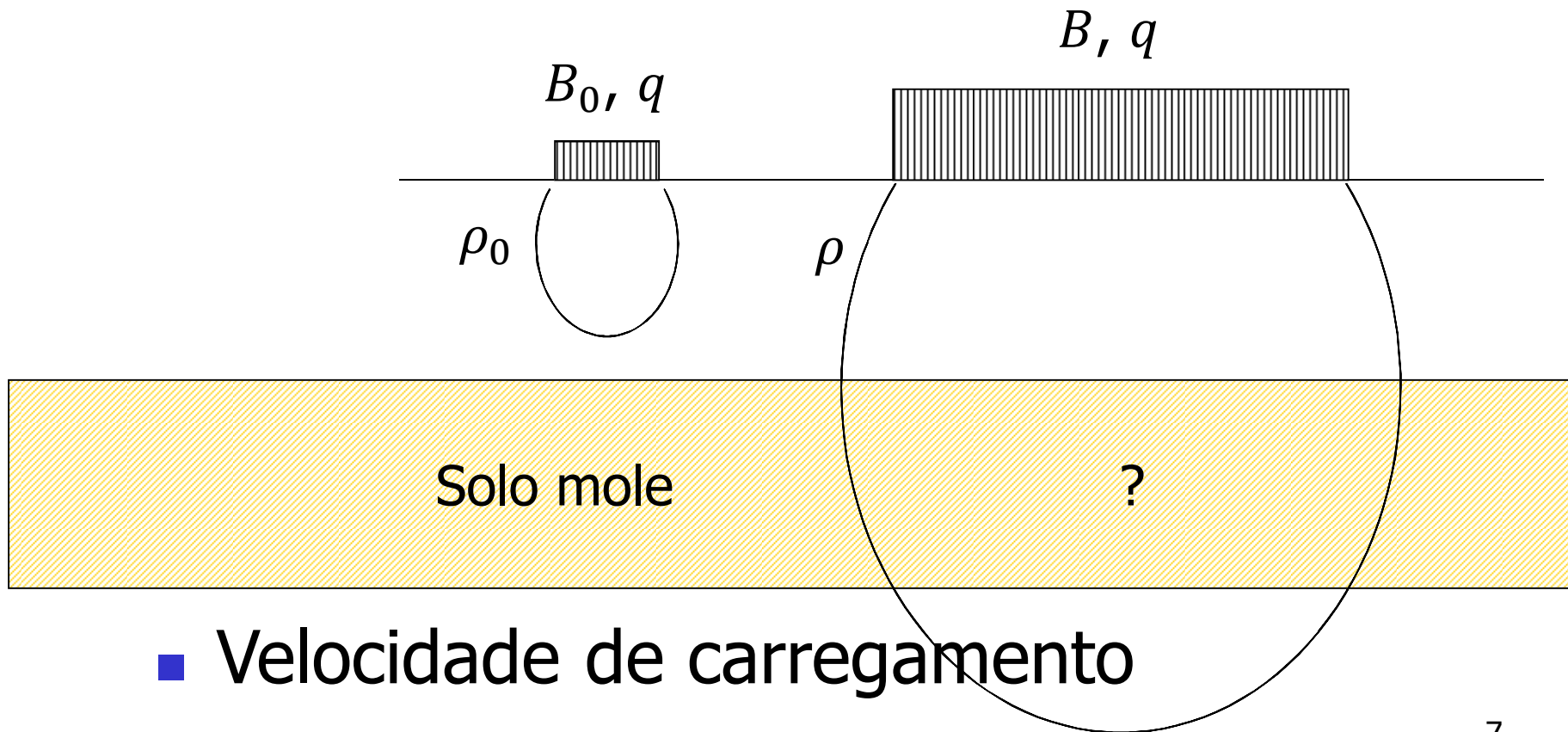
# Tipos de recalques (definidos pelos mecanismos)

---

- Imediatos
- Por adensamento
- Secundários: argilas orgânicas com IP elevado
  
- Um ou mais podem ocorrer em determinado perfil de subsolo

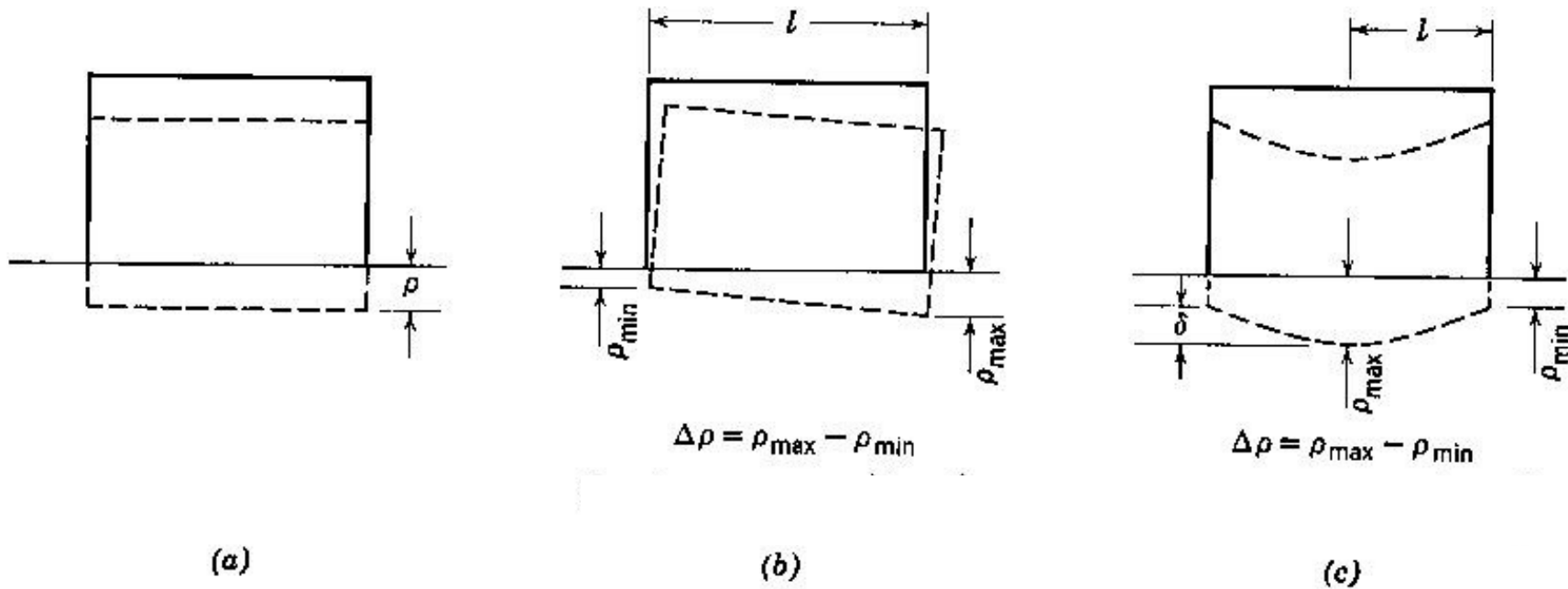
# Prova de carga: dificuldades

- Representatividade



- Velocidade de carregamento

# Recalques



a) uniformes

b) rotação contante ( $= \Delta\rho/l$ )

c) distorção variável ( $= \Delta\rho/l$ )





# Solos especiais

(exigem modelos especiais)

---

- Solos colapsíveis
  - Carregamento +  $\Delta w \Rightarrow$  instabilidade da estrutura do solo
  - Exemplo: argila porosa da Av. Paulista
- Solos expansivos
  - $\Delta w \Rightarrow$  aumento significativo de volume, devido a argilo-minerais expansivos (esmectitas, motmorilonitas), podendo inclusive elevar edificações neles apoiadas
  - Exemplo: regiões do Vale do Paraíba



# Carga última: introdução

---

- Definições:

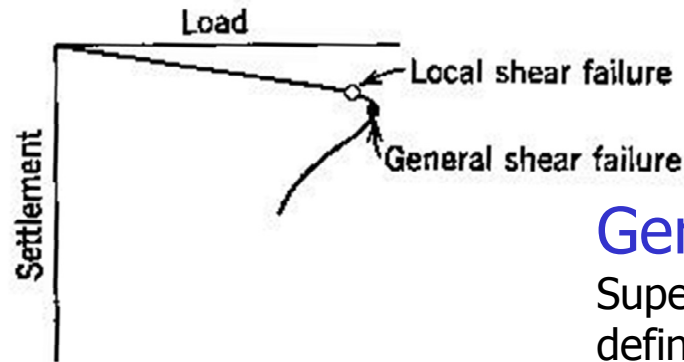
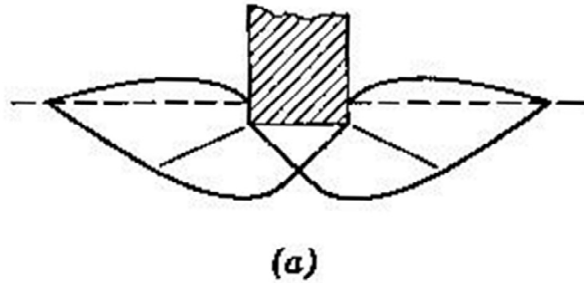
- tensão de ruptura (antigamente, capacidade de carga) =  
= resistência (tensão) última =  $\sigma_{rupt}$
- ruptura clássica: deslocamento incessante sem acréscimo de carga



# Tipos de Rupturas

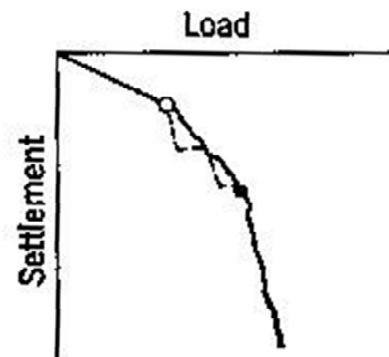
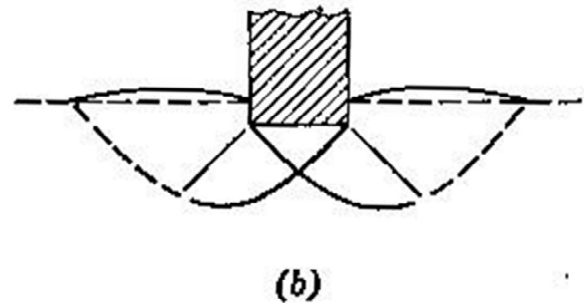
---

- Observação de modelos  $\Rightarrow$  três tipos de ruptura (Vésic, 1963 e 1975)
  - Ruptura Geral
  - Ruptura Local
  - Ruptura por Puncionamento
- Tipos dependem de:
  - compressibilidade do solo (compacidade das areias, consistência das argilas)
  - profundidade e largura da sapata
  - condições de carregamento



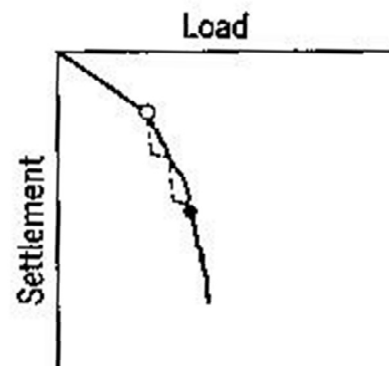
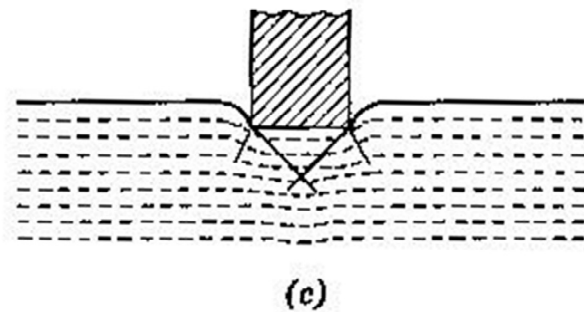
## Geral

Superfície de ruptura bem definida, em geral com pico, ruptura brusca, colapso da estrutura  
ELU típico



## Local

Superfície definida progressivamente, carga sempre crescendo com recalques, mas em ritmo decrescente  
ELS antes de ELU

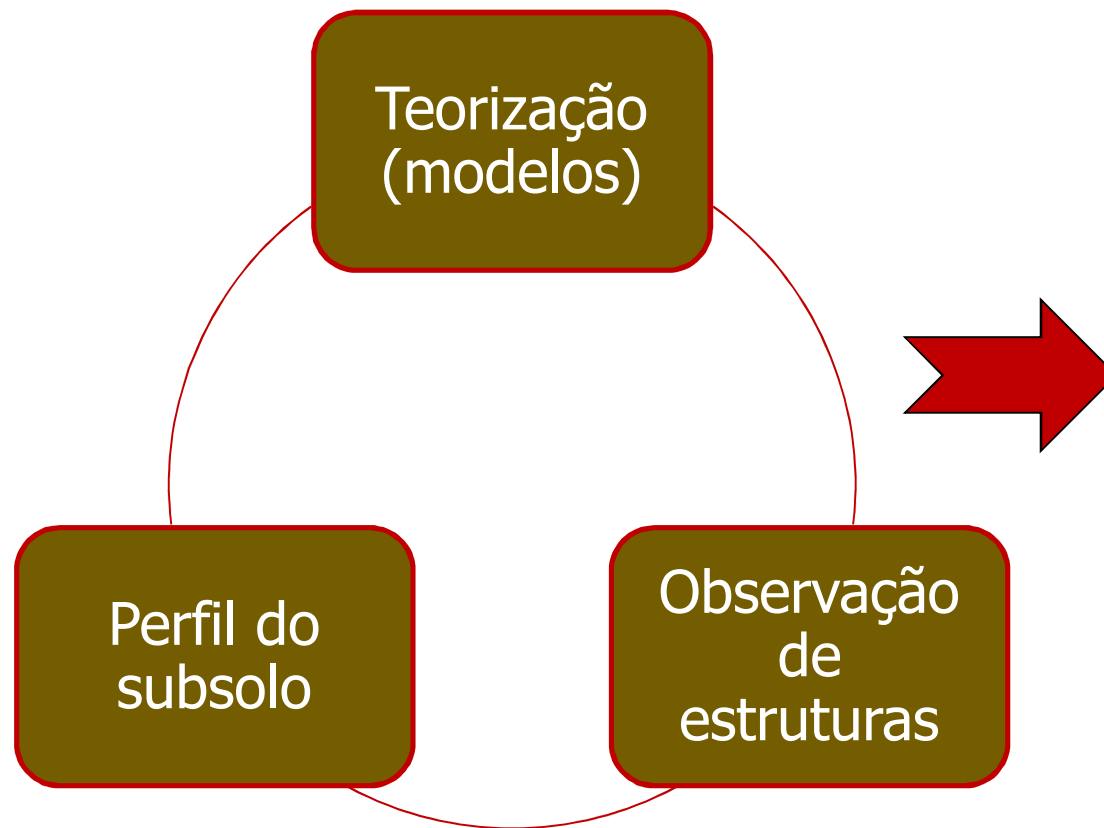


## Puncionamento

Não se detectam as superfícies de ruptura, recalque acentuado, em geral sem tombamento ("corte", como uma faca)  
Evitar com largura mínima.



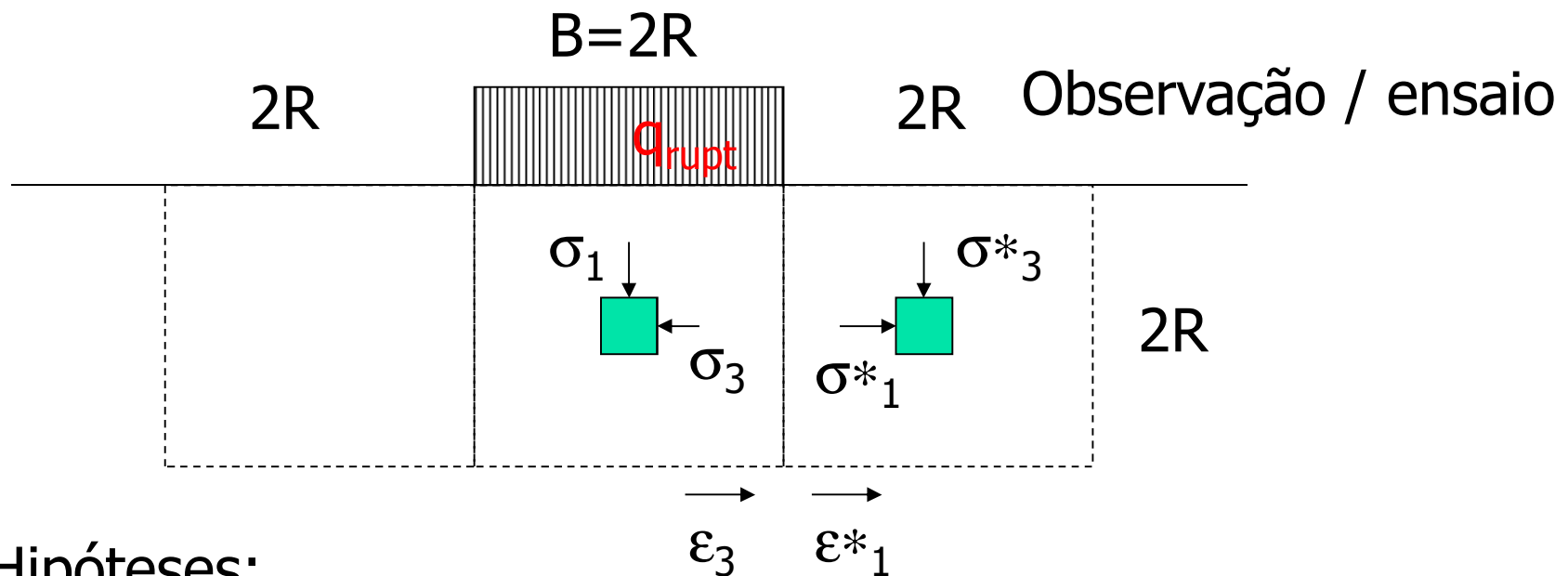
# Determinação da carga última



- Provas de carga (vide coleção 6 de PEF3305)
- Formulações teóricas
- Formulações semi-empíricas
- Correlações

# Fórmulas Didáticas de Terzaghi

## ■ Placa Circular

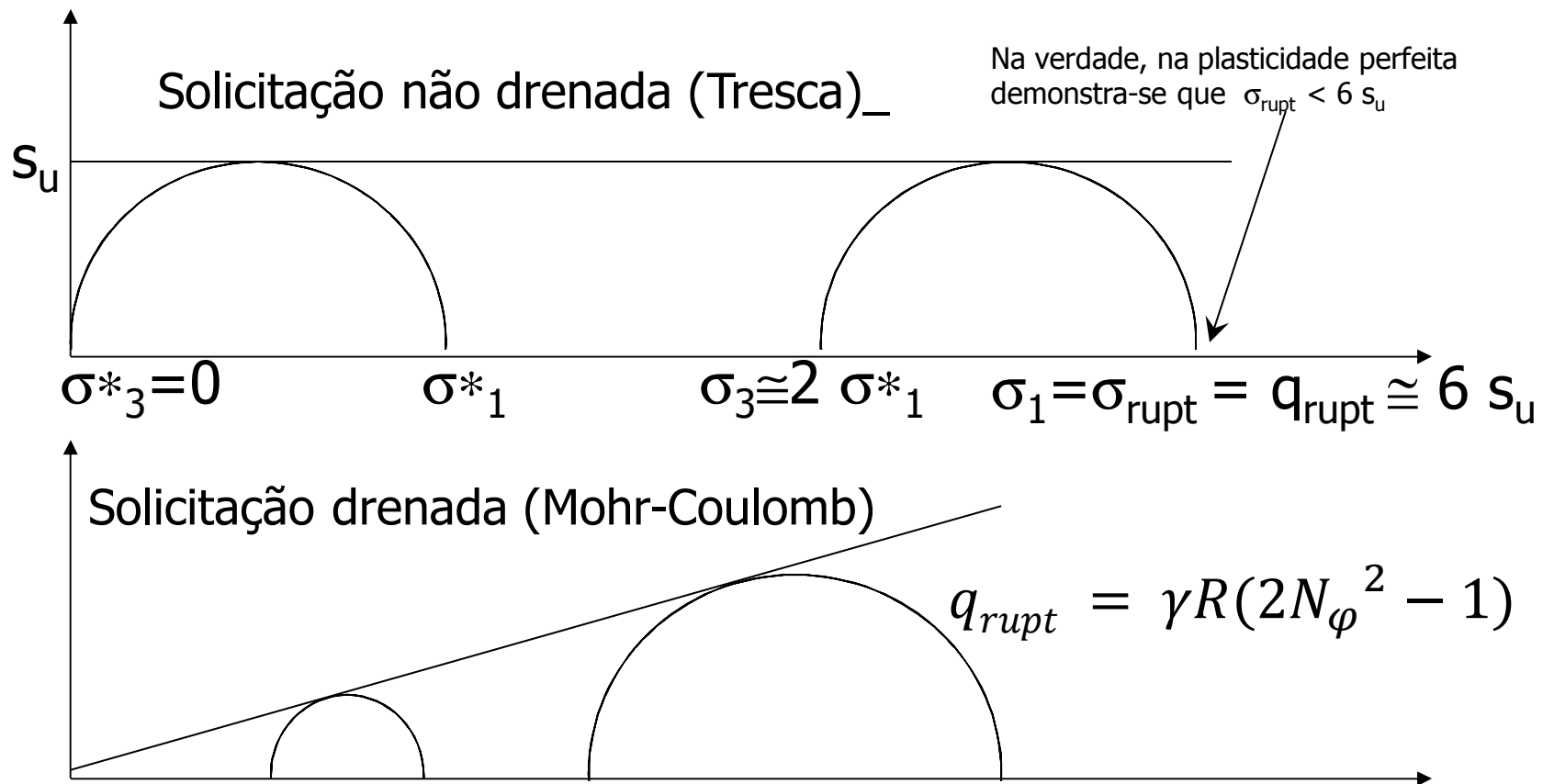


Hipóteses:

- $\epsilon_3 \cong 2 \epsilon^*_1$  (intuição + observação)
- $\sigma_3 \cong 2 \sigma^*_1$  (elasticidade linear)
- Resistência é função do solo e do tipo de sollicitação



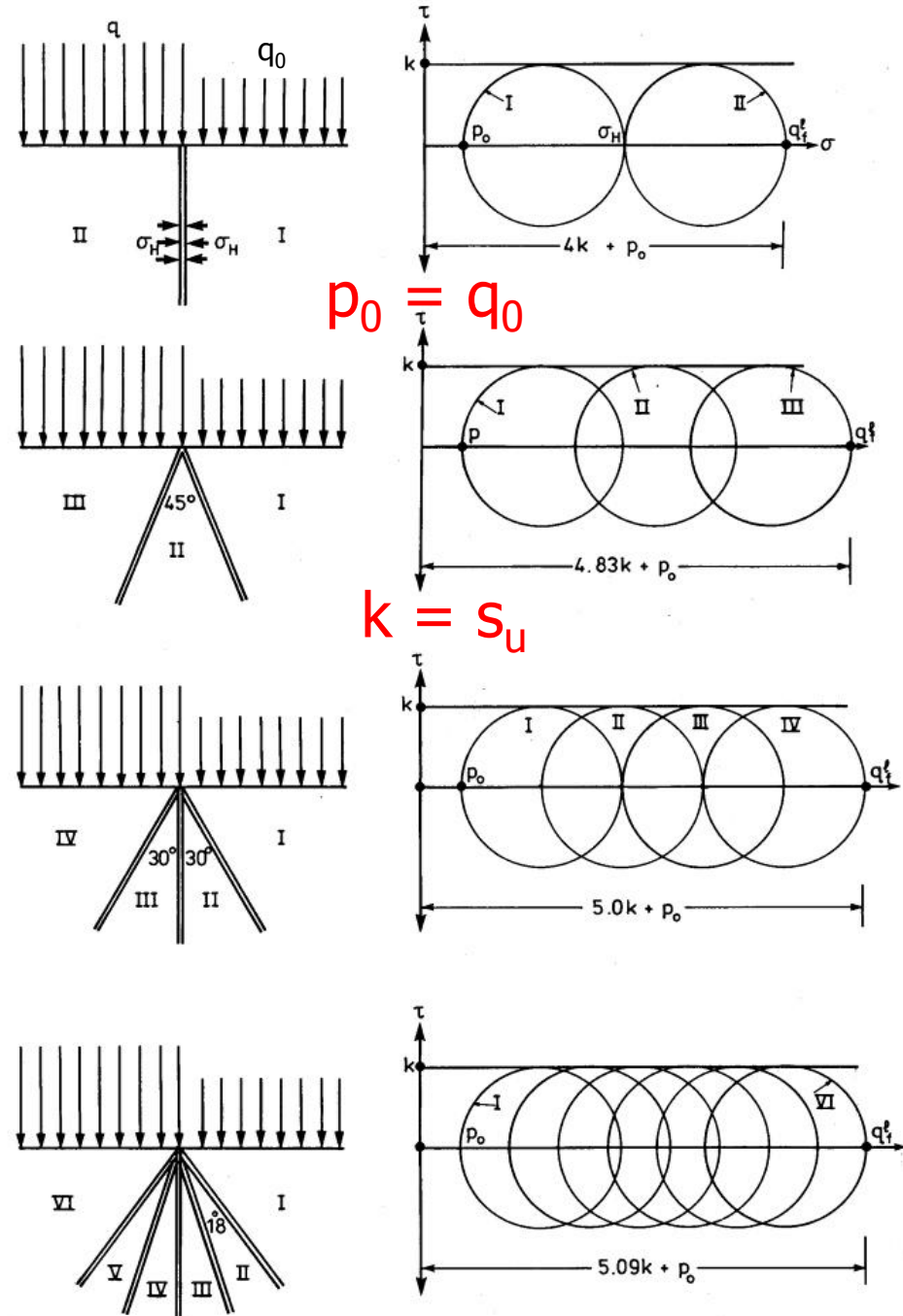
# Resistência



# Análise Limite

- Teorema do limite inferior
- Observar o aumento do limite inferior com o refinamento:

$$\sigma_{rupt} = q_{rupt} \geq q_0 + 5,09 s_u$$

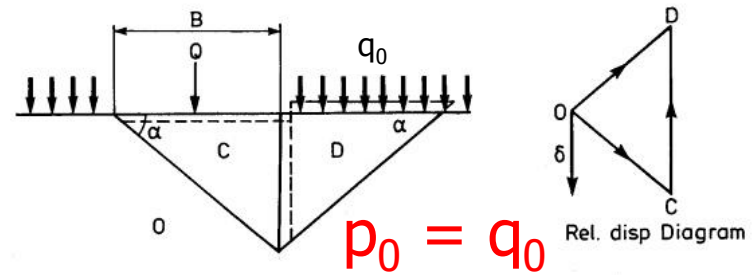




# Análise Limite

- Teorema do limite superior
- Observar a redução do limite superior com o refinamento

$$\sigma_{rupt} = q_{rupt} \leq q_0 + 5,18 s_u$$



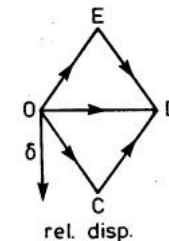
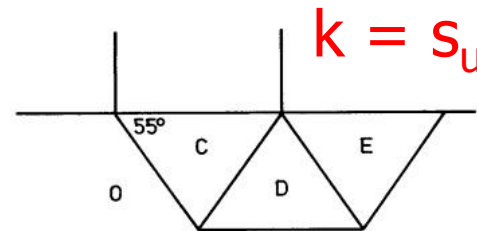
Interface	Length	Rel. Disp.	Int. Work
O C	$B/\cos \alpha$	$\delta/\sin \alpha$	$\frac{B \cdot \delta}{\cos \alpha \sin \alpha} \times k$
C D	$B \cdot \tan \alpha$	$2 \cdot \delta$	$B \cdot \delta \cdot 2 \cdot \tan \alpha \times k$
D O	$B/\cos \alpha$	$\delta/\sin \alpha$	$\frac{B \cdot \delta}{\cos \alpha \sin \alpha} \times k$

Ext. Work:  
 $= Q \delta - p_0 \cdot B \delta$

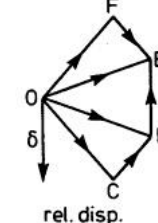
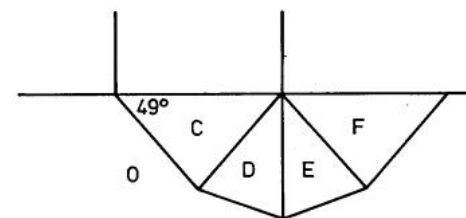
Equating int. and ext. work:  $Q_f^u/B = q_f^u = \frac{2 \cdot k}{\cos \alpha} \left\{ \frac{1}{\sin \alpha} + \sin \alpha \right\} + p_0$

$q_f^u$  is a minimum when  $\alpha = 35.3^\circ$

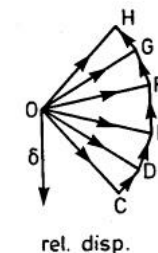
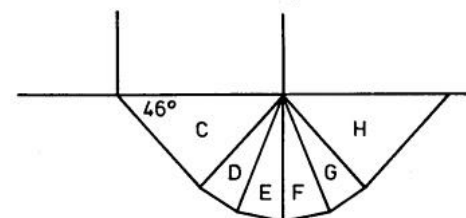
i.e.  $q_f^u = 5.66k + p_0$



$q_f^u = 5.65k + p_0$



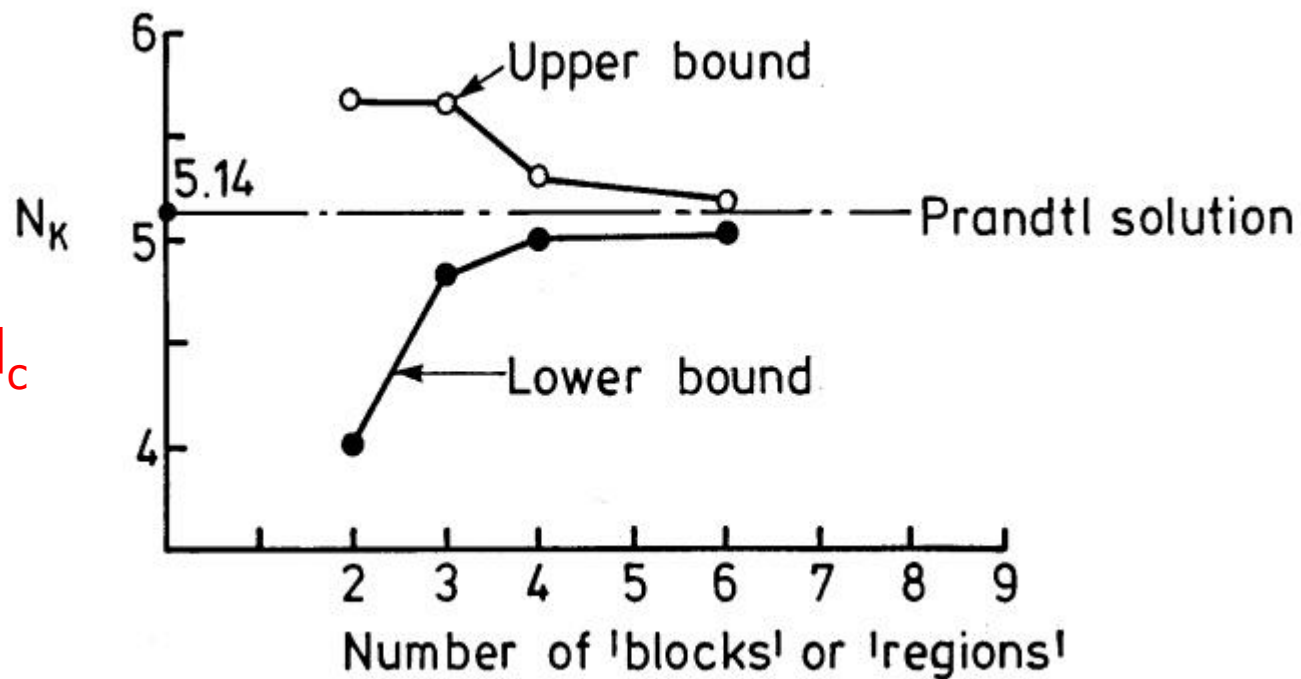
$q_f^u = 5.29k + p_0$



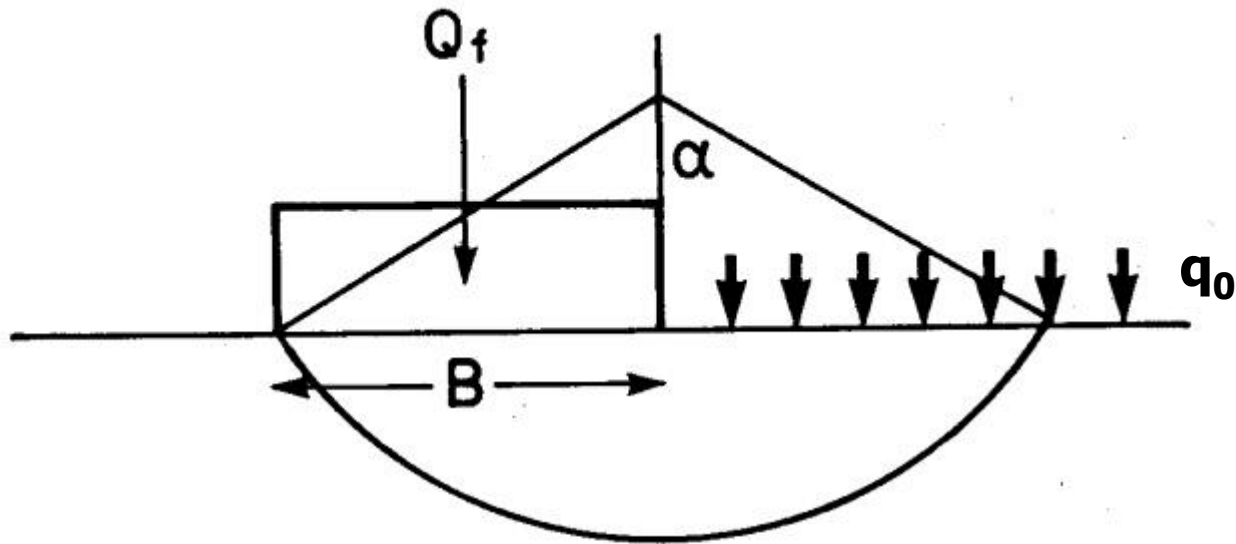
$q_f^u = 5.18k + p_0$

# Convergência para a solução exata da Teoria da Plasticidade

$$N_k = N_c$$



# Equilíbrio limite usual



$$Q_f = Q_{rupt}$$

$$k = s_u$$

$$\frac{Q_f}{B} = 5.52 \times k + q_0$$

when  $\alpha = 67^\circ$

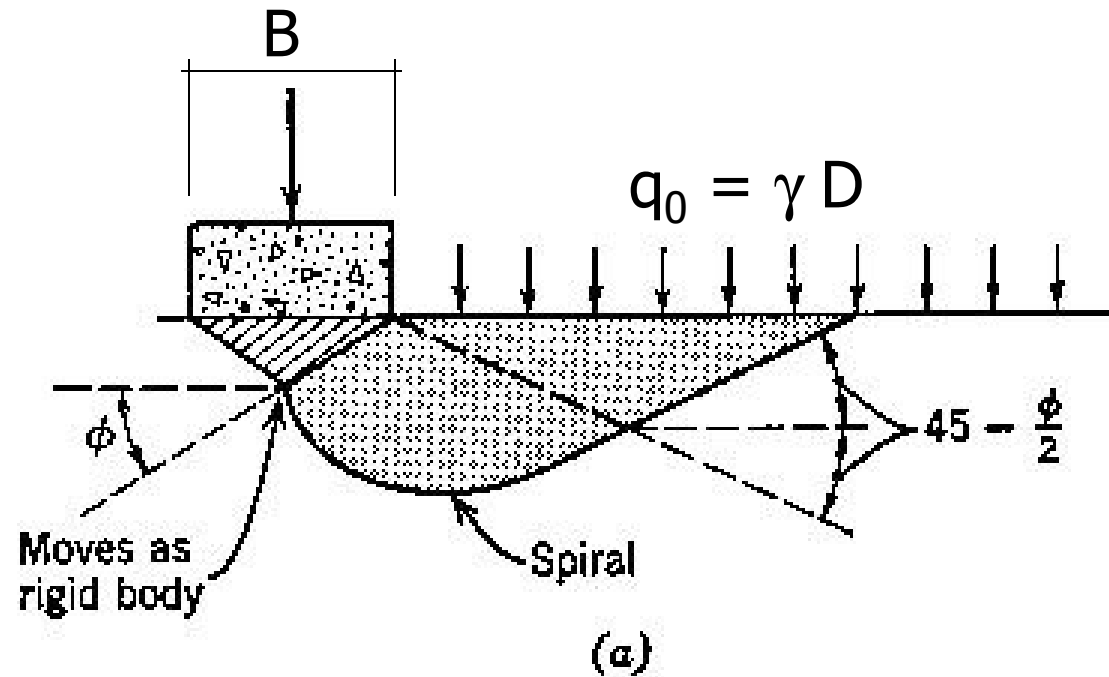


# Fórmula Generalizada Terzaghi

---

- Hipóteses:
  - Solo rígido-plástico
  - Solo homogêneo, semi-infinito, contínuo, isotrópico
  - Estudo bidimensional (sapata corrida)
  - Solo genérico ( $c$  e  $\phi$ )
  - Despreza-se a resistência ao cisalhamento (mas não o peso) do solo acima da cota de apoio da sapata

# Fórmula Generalizada Terzaghi





# Fórmula Generalizada Terzaghi

$$\sigma_{rupt} =$$

parcela de resistência devida a:

$$s_c c N_c$$

intercepto de coesão (ou  
resistência não drenada,  
caso em que  $c = s_u$ )

+

$$s_q q_0 N_q$$

sobrecarga lateral ( $q_0 = \gamma D$ )


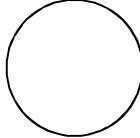

+

$$s_\gamma 0,5 \gamma B N_\gamma$$

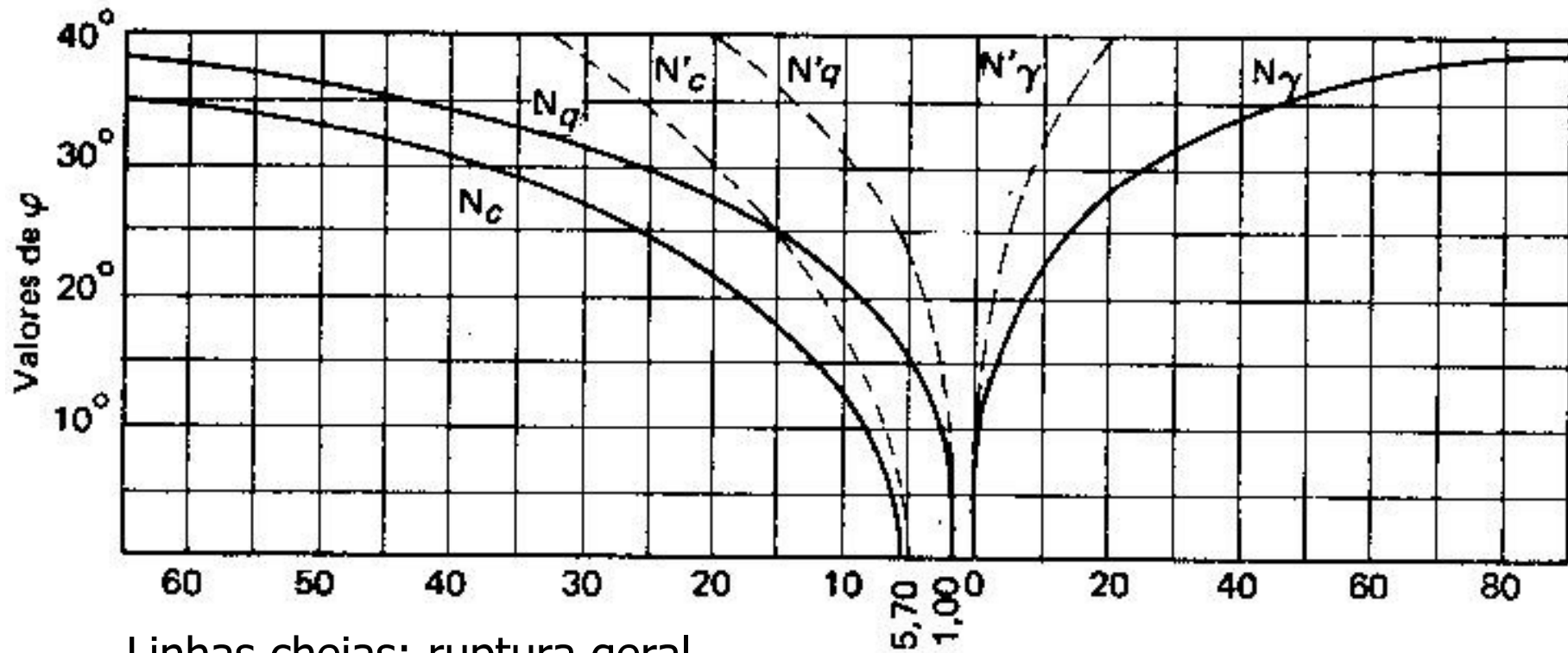
atrito na superfície de ruptura



# Fatores de forma

			
$S_c$	1,3	1,3	$1+0,3 B/L$
$S_q$	1,0	1,0	1,0
$S_\gamma$	0,8	0,6	$1-0,2 B/L$

# Fatores de Capacidade de Carga



Linhas cheias: ruptura geral

Linha tracejadas: ruptura local





# Influência da dimensão B

---

Dimensão B da sapata (para  $D=0$ )

- Solicitação não drenada  
 $\sigma_{rupt} = s_u N_c$  (não depende das dimensões)
- Solicitação drenada  
 $\sigma_{rupt} = 0,5 \gamma B N_\gamma$  (tensão diretamente proporcional a B)



# Influência da sobrecarga

---

Sobrecarga  $q_0 = \gamma D$

Sempre aumenta  $\sigma_{rupt} = q_0 N_q$

- Solicitação não drenada:  $N_q = 1,0$   
(pouco importante)
- Solicitação drenada:  $N_q > 1,0$   
(mais importante)



# Influência do NA

---

Tendo em mente que:

$$\sigma_{rupt} = s_c c N_c + s_q q_0 N_q + s_\gamma 0,5 \gamma B N_\gamma$$

- $\gamma = \gamma_{sub}$  para tudo que estiver submerso
  - Solicitação drenada: redução substancial de  $\sigma_{rupt}$
  - Solicitação não drenada: altera  $q_0$  se NA acima da cota de apoio, mas altera pouco ( $N_q = 1,0$ )
  - Capilaridade, sucção (efeito transitório)