

USP Escola Politécnica da Universidade de São Paulo Departamento de Estruturas e Geotecnia POLI USP

Aula 3. Capacidade de carga em fundações rasas. Fundações rasas - projetos geométricos

PEF 3405 - Engenharia Geotécnica e Fundações - Prof. Massao

1

USP Escola Politécnica da Universidade de São Paulo Departamento de Estruturas e Geotecnia POLI USP

CAPACIDADE DE CARGA

Comportamento de uma sapata sob carga vertical

Fonte: Kézdi, 1970

PEF 3405 - Engenharia Geotécnica e Fundações - Prof. Massao

2

USP Escola Politécnica da Universidade de São Paulo Departamento de Estruturas e Geotecnia POLI USP

CAPACIDADE DE CARGA

Geral: superfície de ruptura bem definida, ruptura brusca, tombamento da estrutura
Puncionamento: não se detectam as superfícies de ruptura, recalque acentuado sem tombamento
Local: intermediária
 Tipo de ruptura depende de: compressibilidade do solo, profundidade da sapata e condições de carregamento

Ruptura por **puncionamento** de uma areia compacta acima de uma argila mole

Fonte: VESIC, 1970

PEF 3405 - Engenharia Geotécnica e Fundações - Prof. Massao

3

USP Escola Politécnica da Universidade de São Paulo Departamento de Estruturas e Geotecnia POLI USP

CAPACIDADE DE CARGA

Tipos de ruptura

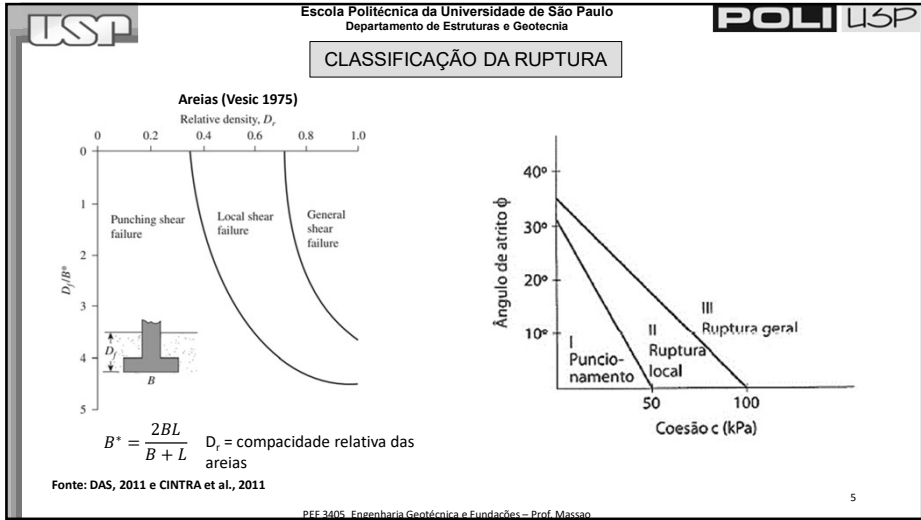
Campos de deslocamentos

Generalizada
 Localizada
 Puncionamento

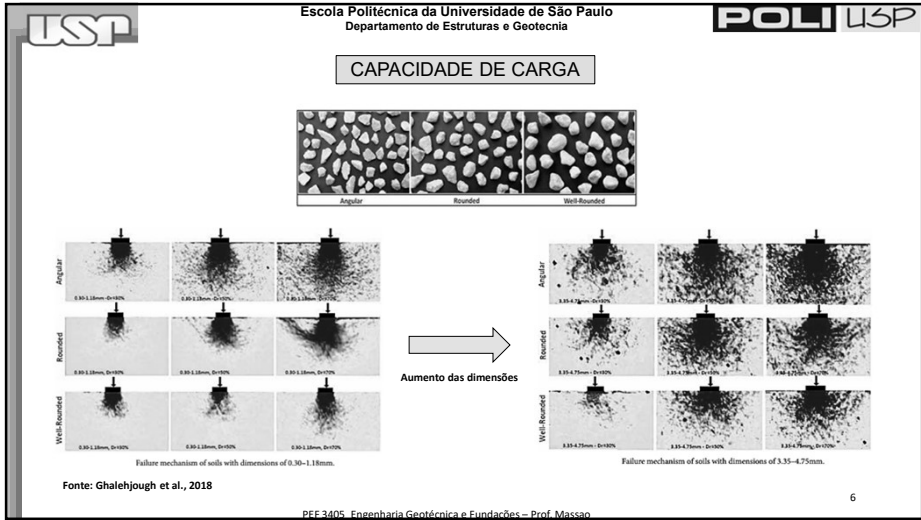
Fonte: DAS, 2011 apud Vesic (1973) e Lopes, 1979

PEF 3405 - Engenharia Geotécnica e Fundações - Prof. Massao

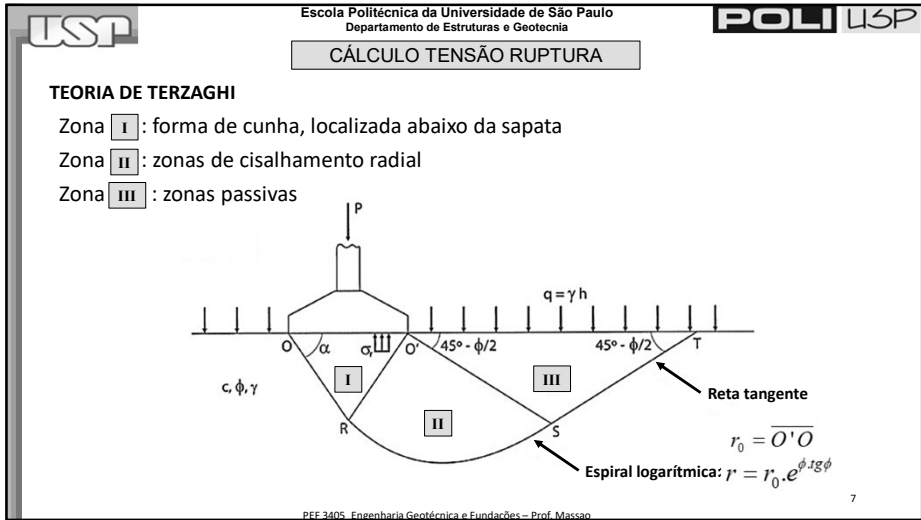
4



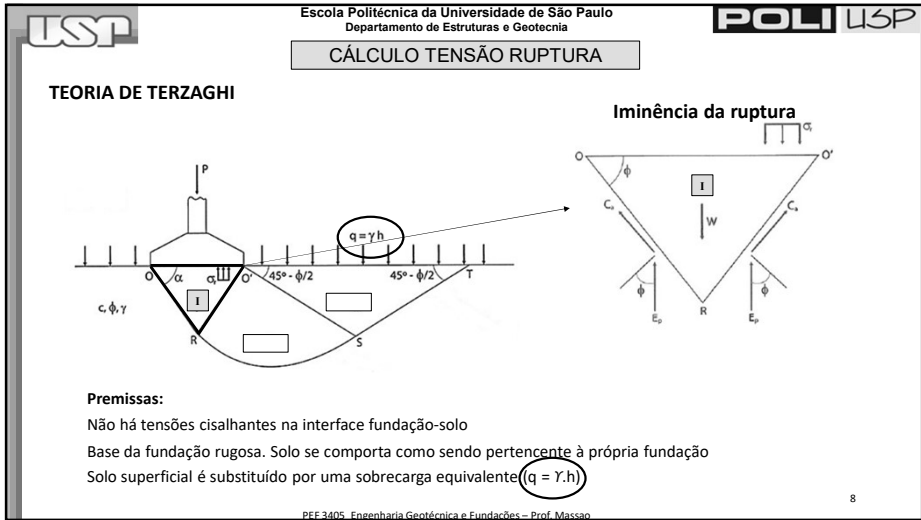
5



6



7



8

USP POLI USP
Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
Departamento de Estruturas e Geotecnia
CÁLCULO TENSÃO RUPTURA

Equação geral para capacidade de carga de Terzaghi (1943):

$$\sigma_r = c \cdot N_c + q \cdot N_q + \frac{1}{2} \gamma \cdot B \cdot N_\gamma$$

coesão sobrecarga ângulo de atrito

AUSÊNCIA da influência da forma/geometria da sapata

PEF 3405 - Engenharia Geotécnica e Fundações - Prof. Massao

USP POLI USP
Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
Departamento de Estruturas e Geotecnia
CÁLCULO TENSÃO RUPTURA

Inserção de parâmetros de forma TERZAGHI & PECK (1967)

Para solos compactos ou rijos (generalizada):

$$\sigma_r = c \cdot S_c \cdot N_c + q \cdot S_q \cdot N_q + \frac{1}{2} \gamma \cdot B \cdot S_\gamma \cdot N_\gamma$$

coesão sobrecarga ângulo de atrito

Sapata	S _c	S _q	S _γ
Corrida (lado B)	1,0	1,0	1,0
Quadrada (B=L)	1,2	1,0	0,8
Circular (B=φ)	1,2	1,0	0,6
Retangular	1,1	0,9	1,0

PEF 3405 - Engenharia Geotécnica e Fundações - Prof. Massao

USP POLI USP
Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
Departamento de Estruturas e Geotecnia
CÁLCULO TENSÃO RUPTURA

Coefficiente de capacidade de carga para Ruptura Geral (Terzaghi)

φ°	N _c	N _q	N _γ *	φ°	N _c	N _q	N _γ *
0	5.70	1.00	0.00	26	27.09	14.21	9.84
1	6.00	1.10	0.01	27	29.24	15.90	11.60
2	6.30	1.22	0.04	28	31.61	17.81	13.70
3	6.62	1.35	0.06	29	34.24	19.98	16.18
4	6.97	1.49	0.10	30	37.16	22.46	19.13
5	7.34	1.64	0.14	31	40.41	25.28	22.65
6	7.73	1.81	0.20	32	44.04	28.52	26.87
7	8.15	2.00	0.27	33	48.09	32.23	31.94
8	8.60	2.21	0.35	34	52.64	36.50	38.04
9	9.09	2.44	0.44	35	57.75	41.44	45.41
10	9.61	2.69	0.56	36	63.53	47.16	54.36
11	10.16	2.98	0.69	37	70.01	53.80	65.27
12	10.76	3.29	0.85	38	77.50	61.55	78.61
13	11.41	3.63	1.04	39	85.97	70.61	95.03
14	12.11	4.02	1.26	40	95.66	81.27	115.31
15	12.86	4.45	1.52	41	106.81	93.85	140.51
16	13.68	4.92	1.82	42	119.67	108.75	171.99
17	14.60	5.45	2.18	43	134.58	126.50	211.56
18	15.12	6.04	2.59	44	151.95	147.54	260.60
19	16.56	6.70	3.07	45	172.28	173.28	325.34
20	17.69	7.44	3.64	46	196.22	204.19	407.11
21	18.92	8.26	4.31	47	224.55	241.80	512.84
22	20.27	9.19	5.09	48	258.28	287.85	650.67
23	21.75	10.23	6.00	49	298.71	344.63	831.99
24	23.36	11.40	7.08	50	347.50	415.14	1072.80
25	25.13	12.72	8.34				

Fonte: DAS, 2011

PEF 3405 - Engenharia Geotécnica e Fundações - Prof. Massao

USP POLI USP
Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
Departamento de Estruturas e Geotecnia
CÁLCULO TENSÃO RUPTURA

TERZAGHI & PECK (1967)

Para solos fofos ou moles (puncionamento):

$$\sigma_r = c^* \cdot S_c \cdot N'_c + q \cdot S_q \cdot N'_q + \frac{1}{2} \gamma \cdot B \cdot S_\gamma \cdot N'_\gamma$$

Coefficiente de capacidade de carga Ruptura Local (Terzaghi)

φ°	N _c	N _q	N _γ	φ°	N _c	N _q	N _γ
0	5.70	1.00	0.00	26	15.53	6.05	2.59
1	5.90	1.07	0.005	27	16.30	6.54	2.88
2	6.10	1.14	0.02	28	17.13	7.07	3.29
3	6.30	1.22	0.04	29	18.03	7.66	3.76
4	6.51	1.30	0.055	30	18.99	8.31	4.39
5	6.74	1.39	0.074	31	20.03	9.03	4.83
6	6.97	1.49	0.10	32	21.16	9.82	5.51
7	7.22	1.59	0.128	33	22.39	10.69	6.32
8	7.47	1.70	0.16	34	23.72	11.67	7.22
9	7.74	1.82	0.20	35	25.18	12.75	8.35
10	8.02	1.94	0.24	36	26.77	13.97	9.61
11	8.32	2.08	0.30	37	28.51	15.32	10.90
12	8.63	2.22	0.35	38	30.43	16.85	12.75
13	8.96	2.38	0.42	39	32.53	18.56	14.71
14	9.31	2.55	0.48	40	34.87	20.50	17.22
15	9.67	2.73	0.57	41	37.45	22.70	19.75
16	10.06	2.92	0.67	42	40.33	25.21	22.50
17	10.47	3.13	0.76	43	43.54	28.06	26.25
18	10.90	3.36	0.88	44	47.13	31.34	30.60
19	11.36	3.61	1.03	45	51.17	35.11	36.00
20	11.85	3.88	1.12	46	55.73	39.48	41.70
21	12.37	4.17	1.35	47	60.91	44.45	49.20
22	12.92	4.48	1.55	48	66.80	50.46	59.25
23	13.51	4.82	1.74	49	73.55	57.41	71.45
24	14.14	5.20	1.97	50	81.31	65.60	85.75
25	14.80	5.60	2.25				

Fonte: DAS, 2011

PEF 3405 - Engenharia Geotécnica e Fundações - Prof. Massao

USP Escola Politécnica da Universidade de São Paulo Departamento de Estruturas e Geotecnia POLI USP

CÁLCULO TENSÃO RUPTURA

Adaptação da TERZAGHI & PECK (1967) proposta por Vesic (1975) e DeBeer (1970)
 Fatores de forma também dependem do ângulo de atrito do solo, não apenas da geometria da sapata

Bearing Capacity Factors

ϕ	N_c	N_q	N_{γ}	ϕ'	N_c	N_q	N_{γ}
0	5.14	1.00	0.00	26	22.25	11.85	12.54
1	5.38	1.09	0.07	27	23.94	13.20	14.47
2	5.63	1.20	0.15	28	25.80	14.72	16.72
3	5.90	1.31	0.24	29	27.86	16.44	19.34
4	6.19	1.43	0.34	30	30.14	18.40	22.40
5	6.49	1.57	0.45	31	32.67	20.63	25.99
6	6.81	1.72	0.57	32	35.49	23.18	30.22
7	7.16	1.88	0.71	33	38.64	26.09	35.19
8	7.53	2.06	0.86	34	42.16	29.44	41.06
9	7.92	2.25	1.03	35	46.12	33.30	48.03
10	8.35	2.47	1.22	36	50.59	37.75	56.31
11	8.80	2.71	1.44	37	55.63	42.92	66.19
12	9.28	2.97	1.69	38	61.35	48.93	78.03
13	9.81	3.26	1.97	39	67.87	55.96	92.25
14	10.37	3.59	2.29	40	75.31	64.20	109.41
15	10.98	3.94	2.65	41	83.86	73.90	130.22
16	11.63	4.34	3.06	42	93.71	85.38	155.55
17	12.34	4.77	3.53	43	105.11	99.02	186.54
18	13.10	5.26	4.07	44	118.37	115.31	224.64
19	13.93	5.80	4.68	45	133.88	134.88	271.76
20	14.83	6.40	5.39	46	152.10	158.51	330.35
21	15.82	7.07	6.20	47	173.64	187.21	403.67
22	16.88	7.82	7.13	48	199.26	222.31	496.01
23	18.05	8.66	8.20	49	229.93	265.51	613.16
24	19.32	9.60	9.44	50	266.89	319.07	762.89
25	20.72	10.66	10.88				

Sapata	S_c	S_q	S_{γ}
Corrida	1,0	1,0	1,0
Retangular	$1+(B/L)(N_q/N_c)$	$1+(B/L)tg\phi$	$1-0,4(B/L)$
Circular ou Quadrada	$1+(N_q/N_c)$	$1+tg\phi$	0,6

Fonte: DAS, 2011 13

PEF 3405 - Engenharia Geotécnica e Fundações - Prof. Massao

13

USP Escola Politécnica da Universidade de São Paulo Departamento de Estruturas e Geotecnia POLI USP

CÁLCULO TENSÃO RUPTURA

E a consideração de solos intermediários? Ruptura localizada

Vesic (1975)

Ruptura Geral – RG (areias compactadas e argilas duras)

Ruptura Local – RL (solos intermediários)

Ruptura por Puncionamento – RP (areias fofas e argilas moles) (c^* e ϕ')

$$RL = \frac{RG + RP}{2}$$

PEF 3405 - Engenharia Geotécnica e Fundações - Prof. Massao 14

14

USP Escola Politécnica da Universidade de São Paulo Departamento de Estruturas e Geotecnia POLI USP

CÁLCULO TENSÃO RUPTURA

Argilas saturadas na condição não drenada ($\phi=0$)

Skempton (1951)

$$\sigma_r = c \cdot S_c \cdot N_c + q$$

$$S_c = 1 + 0,2 \cdot \left(\frac{B}{L}\right)$$

h/B é o embutimento relativo da sapata

--- Quadrada ou circular — Sapata corrida

PEF 3405 - Engenharia Geotécnica e Fundações - Prof. Massao 15

15

USP Escola Politécnica da Universidade de São Paulo Departamento de Estruturas e Geotecnia POLI USP

CÁLCULO TENSÃO RUPTURA

Excentricidade da Carga e Inclinação (Meyerhoff e Hansen)

A influência da excentricidade é feita a partir da redução da área real da base da fundação, sendo considerada, então, uma área efetiva ($B' \cdot L'$), para o cálculo da carga de ruptura

$$B' = B - 2e_B$$

$$L' = L - 2e_L$$

e_B = excentricidade na direção transversal

e_L = excentricidade na direção longitudinal

PEF 3405 - Engenharia Geotécnica e Fundações - Prof. Massao 16

16

USP Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
Departamento de Estruturas e Geotecnia **POLI USP**

CÁLCULO TENSÃO RUPTURA

Excentricidade da Carga e Inclinação (Meyerhoff e Hansen) associada a Vesic

$$\sigma_r = c \cdot N_c \cdot F_{cs} \cdot F_{cd} \cdot F_{ci} + q \cdot N_q \cdot F_{qs} \cdot F_{qd} \cdot F_{qi} + \frac{1}{2} \cdot \gamma \cdot B \cdot N_\gamma \cdot F_{\gamma s} \cdot F_{\gamma d} \cdot F_{\gamma i}$$

$$Q_{ult} = \sigma_r (B')(L')$$

Forma

$$F_{cs} = 1 + \left(\frac{B}{L}\right) \left(\frac{N_q}{N_c}\right)$$

$$F_{ci} = 1 + \left(\frac{B}{L}\right) \tan \phi'$$

$$F_{\gamma s} = 1 - 0.4 \left(\frac{B}{L}\right)$$

DeBeer (1970)

Profundidade (D_f) (Hansen, 1970)

$\frac{D_f}{B} \leq 1$

For $\phi = 0$:

$$F_{cd} = 1 + 0.4 \left(\frac{D_f}{B}\right)$$

For $\phi' > 0$:

$$F_{cd} = F_{qt} - \frac{1 - F_{qt}}{N_c \tan \phi'}$$

$$F_{ci} = 1 + 2 \tan \phi' (1 - \sin \phi')^2 \left(\frac{D_f}{B}\right)$$

$F_{\gamma d} = 1$

$\frac{D_f}{B} > 1$

For $\phi = 0$:

$$F_{cd} = 1 + 0.4 \frac{\tan^{-1} \left(\frac{D_f}{B}\right)}{\text{radian}}$$

For $\phi' > 0$:

$$F_{ci} = 1 + 2 \tan \phi' (1 - \sin \phi')^2 \tan^{-1} \left(\frac{D_f}{B}\right)$$

$F_{\gamma d} = 1$

Inclinação

$$F_{ci} = F_{qi} = \left(1 - \frac{\beta^2}{90^\circ}\right)^2$$

$$F_{\gamma i} = \left(1 - \frac{\beta}{\phi'}\right)$$

β = inclination of the load on the foundation with respect to the vertical

Meyerhof (1963); Hanna and Meyerhof (1981)

Fonte: DAS, 2011 (3.10 Ultimate Bearing Capacity)

17

USP Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
Departamento de Estruturas e Geotecnia **POLI USP**

CÁLCULO TENSÃO RUPTURA

Nível de água (N.A.)

Caso I

$$0 \leq N.A. \leq D_f$$

$$q = D_1 \gamma_{nat} + D_2 (\gamma_{sat} - \gamma_w)$$

$$\gamma = \gamma_{sat} - \gamma_w$$

Caso II

$$D_f \leq N.A. \leq D_f + B$$

$$q = \gamma_{nat} D_f$$

$$\gamma = (\gamma_{sat} - \gamma_w) + \frac{d}{B} (\gamma_{nat} - \gamma_{sat} + \gamma_w)$$

Caso III

$$N.A. > D_f + B$$

$$q = \gamma_{nat} D_f$$

$$\gamma = \gamma_{nat}$$

Consideração normal

Fonte: DAS, 2011

18

USP Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
Departamento de Estruturas e Geotecnia **POLI USP**

CÁLCULO TENSÃO RUPTURA

Duas camadas
Influência dos bulbos de tensões

Fonte: PEF 3405 - Engenharia Geotécnica e Fundações - Prof. Massao

19

USP Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
Departamento de Estruturas e Geotecnia **POLI USP**

CÁLCULO TENSÃO RUPTURA

Duas camadas

1ª verificação: $\sigma_{r,1} \leq \sigma_{r,2} \rightarrow \text{Ok!} \rightarrow \sigma_r = \sigma_{r,1}$

2ª verificação: $\sigma_{r,1} > \sigma_{r,2} \rightarrow \sigma_{r,1-2} = \frac{a \cdot \sigma_{r,1} + b \cdot \sigma_{r,2}}{a + b} \rightarrow \sigma_r = \sigma_{r,1-2}$

3ª verificação: $\Delta \sigma > \sigma_{r,2}$

- sim $\rightarrow \sigma_r = \sigma_{r,1-2} \cdot \frac{\sigma_{r,2}}{\Delta \sigma}$ (redução requerida)
- não $\rightarrow \text{Ok!} \rightarrow \sigma_r = \sigma_{r,1-2}$

$$\Delta \sigma = \frac{\sigma \cdot B \cdot L}{(B+z) \cdot (L+z)}$$

Fonte: PEF 3405 - Engenharia Geotécnica e Fundações - Prof. Massao

20

USP Escola Politécnica da Universidade de São Paulo Departamento de Estruturas e Geotecnia POLI USP

CÁLCULO TENSÃO RUPTURA

Fundação em rocha (Bowles, 1996)

$$\sigma_r = c' \cdot S_c \cdot N_c + q \cdot S_q \cdot N_q + \frac{1}{2} \gamma_{rock} \cdot B \cdot S_\gamma \cdot N_\gamma$$

$N_c = 5 \tan^4 \left(45 + \frac{\phi'}{2} \right)$

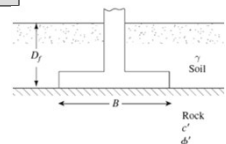
$N_q = \tan^6 \left(45 + \frac{\phi'}{2} \right)$

$N_\gamma = N_q + 1$

$\sigma_{r(modificado)} = \sigma_r \cdot (RQD)^2$

RQD = Rock quality designation (porcentagem de recuperação da amostra)

Rock type	α_{uc} MN/m ²	α_{uc} kip/m ²	ϕ' (deg)
Granite	65-250	9.5-36	45-55
Limestone	30-150	4-22	35-45
Sandstone	25-130	3.5-19	30-45
Shale	5-40	0.75-6	15-30



RQD = $\frac{\sum \text{rock pieces} \geq 10 \text{ cm}}{\text{Core run total length}} \cdot 100$ (%)

RQD (%)	Geotechnical quality
<25	Very poor
25-50	Poor
50-75	Fair
75-90	Good
90-100	Excellent

Fonte: DAS, 2011

USP Escola Politécnica da Universidade de São Paulo Departamento de Estruturas e Geotecnia POLI USP

ESTIMATIVA TENSÃO ADMISSÍVEL

Métodos para estimativa da tensão admissível:

$$\sigma_{adm} = \frac{\sigma_{rup}}{F \cdot S}$$

Teóricos → F.S. ≥ 3

Semiempíricos → F.S. ≥ 3 (se aplicável)

Prova de carga sobre placa → F.S. ≥ 2

Empíricos → F.S. não aplicável

PEF 3405 - Engenharia Geotécnica e Fundações - Prof. Massao

USP Escola Politécnica da Universidade de São Paulo Departamento de Estruturas e Geotecnia POLI USP

Recalques diferenciais

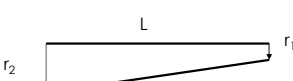
Recalques diferenciais específicos:

$$\delta = (r_2 - r_1) / L$$

Limites:

- δ=1/750: para equipamentos sensíveis
- δ=1/350: para fissuração em alvenaria
- δ=1/150: para início de dano estrutural

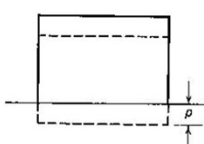
- Recalques diferenciais: r_1/r_2
- Recalques totais: r



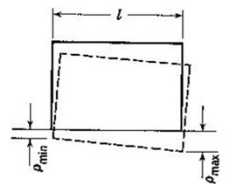
Professores Massao e Maurício

USP Escola Politécnica da Universidade de São Paulo Departamento de Estruturas e Geotecnia POLI USP

Recalques

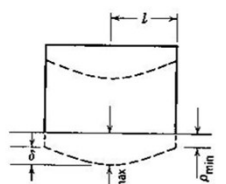


(a)



$\Delta\rho = \rho_{max} - \rho_{min}$
Angular distortion = $\frac{\Delta\rho}{L} = \frac{\delta}{L}$

(b)



$\Delta\rho = \rho_{max} - \rho_{min}$
Angular distortion = $\frac{\Delta\rho}{L} = \frac{\delta}{L}$

(c)

Professores Massao e Maurício

USP Escola Politécnica da Universidade de São Paulo Departamento de Estruturas e Geotecnia POLI USP

Recalques limites

$$\delta = \frac{\text{Recalque diferencid}}{\text{Dist. entre os elementos}} = \frac{\Delta}{L}$$

Professores Massao e Maurício
PEF 3405 - Engenharia Geotécnica e Fundações - Prof. Massao

25

USP Escola Politécnica da Universidade de São Paulo Departamento de Estruturas e Geotecnia POLI USP

Exemplo de uso numérico

Modelo físico (Mucolino, 2001)

Modelo numérico

Mucolino SR. L'influenza delle interfacce e dei dettagli costitutivi minori sulla stabilità delle fondazioni e delle gallerie. PhD thesis, University of Palermo; 2001.
PEF 3405 - Engenharia Geotécnica e Fundações - Prof. Massao

26

USP Escola Politécnica da Universidade de São Paulo Departamento de Estruturas e Geotecnia POLI USP

Table 1
Soil parameters used in the analyses.

	γ (kN/m ³)	E (kPa)	ν	ϕ_{cr}^o (°)	ψ_p (°)	k_{shear}^o (%)	k_{shear}^c (%)
Sand	16.8	6000	0.3	50	33	17	11
Talcum	15.7	2000	0.3	18	18	0	-

(a)

(b)

Fig. 5. Case study with the weak layer at $z = 0.5B$: (a) predicted settlement curve of the foundation and comparison with the experimental results and (b) accumulated plastic deviatoric strain (k_{shear}) calculated at the end of simulation.

Mucolino SR. L'influenza delle interfacce e dei dettagli costitutivi minori sulla stabilità delle fondazioni e delle gallerie. PhD thesis, University of Palermo; 2001.
PEF 3405 - Engenharia Geotécnica e Fundações - Prof. Massao

27

USP Escola Politécnica da Universidade de São Paulo Departamento de Estruturas e Geotecnia POLI USP

Resultados prova de carga em placa, Capacidade de carga e tensão admissível

- Ruptura Geral: $\sigma_{adm} \leq \frac{\sigma_{rup}}{F.S.}$
- Não há ruptura: $\sigma_{adm} \leq \frac{\sigma_{mic}}{F.S.}$ e $\sigma_{adm} \leq \frac{\sigma_{recalque, mic}}{1,5}$
- Recalques elevados (Ruptura local/Punção)

$$\sigma_{adm} \leq \begin{cases} \frac{\sigma_{25mm}}{F.S.} \\ \sigma_{10mm} \end{cases}$$

PEF 3405 - Engenharia Geotécnica e Fundações - Prof. Massao

28

USP POLI USP
 Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
 Departamento de Estruturas e Geotecnia

ESTIMATIVA TENSÃO ADMISSÍVEL

Métodos baseados no ensaio CPT

Teixeira e Godoy (1996) em Argilas

$$\sigma_{adm} = \frac{q_{c,médio}}{10} \leq 4,0 \text{ [MPa]}$$

Teixeira e Godoy (1996) em Areias

$$\sigma_{adm} = \frac{q_{c-médio}}{15} \leq 4,0 \text{ [MPa]}$$

q_c-médio : é o valor médio no bulbo de tensões, com *q_c* ≥ 1,5 MPa

PEF 3405 - Engenharia Geotécnica e Fundações - Prof. Massao 29

29

USP POLI USP
 Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
 Departamento de Estruturas e Geotecnia

ESTIMATIVA TENSÃO ADMISSÍVEL

Métodos baseados em ensaio SPT

Teixeira (1996a)

$$\sigma_{adm} = 20 \cdot \bar{N}_{SPT} \text{ [kPa]}$$

$$5 \leq \bar{N}_{SPT} \leq 20$$

Mello (1975)

$$\sigma_{adm} = 100 \cdot [\sqrt{\bar{N}_{SPT} - 1}] \text{ [kPa]}$$

$$4 \leq \bar{N}_{SPT} \leq 16$$

Teixeira (1996b)

$$\sigma_{adm} = 50 + (10 + 4 \cdot B) \cdot \bar{N}_{SPT} \text{ [kPa]}$$

$$5 \leq \bar{N}_{SPT} \leq 25$$

PEF 3405 - Engenharia Geotécnica e Fundações - Prof. Massao 30

30

USP POLI USP
 Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
 Departamento de Estruturas e Geotecnia

ESTIMATIVA TENSÃO ADMISSÍVEL

Métodos baseados em ensaio SPT

Terzaghi - solos argilosos

$$\sigma_{adm} = 1,3 \cdot \bar{N}_{SPT} \cdot \left(1 + \frac{0,3 \cdot B}{L}\right) \text{ [t/m}^2\text{]}$$

Terzaghi - solos arenosos

$$\sigma_{adm} = \frac{\bar{N}_{SPT}}{8} \text{ [kgf/cm}^2\text{]} \rightarrow B \leq 1,30\text{m}$$

$$\sigma_{adm} = \frac{\bar{N}_{SPT}}{10} \text{ [kgf/cm}^2\text{]} \rightarrow B \leq 1,30\text{m}$$

PEF 3405 - Engenharia Geotécnica e Fundações - Prof. Massao 31

31

USP POLI USP
 Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
 Departamento de Estruturas e Geotecnia

PROJETO GEOMÉTRICO: CÁLCULO E DIMENSIONAMENTO

- Circular
- Quadrada
- Retangular (L ≤ 5B)
- Corrida

$H \leq 2B$

Vista em corte

Vista em planta

Lastró: 5 cm (concreto magro)


PEF 3405 - Engenharia Geotécnica e Fundações - Prof. Massao 32

32

USP Escola Politécnica da Universidade de São Paulo Departamento de Estruturas e Geotecnia POLI USP

CONDIÇÕES GERAIS

- Avaliação da viabilidade: $A_{\text{sapatas}} < 70\% A_{\text{projetada}}$ ou $\sigma_{\text{adm}} > 1,5 \cdot \sigma_{\text{solicitante}}$
- Todas as sapatas devem atender condição de segurança
- $L/B \leq 2,5$
- Dimensões das formas (L e B) devem ser múltiplos de 5 cm
- Associações de pilares apenas quando não for possível evita-las
- Ordem dos carregamentos: tensão média na área projetada de 12kPa **por pavimento**
- Dimensão mínima de 0,4 a 0,6 m para residências e 0,8 a 1,0 m para edifícios



PEF 3405 - Engenharia Geotécnica e Fundações - Prof. Massao 33

33

USP Escola Politécnica da Universidade de São Paulo Departamento de Estruturas e Geotecnia POLI USP

SAPATAS ISOLADAS

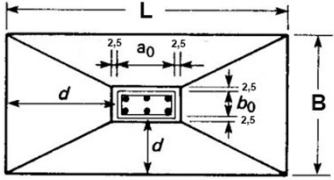
SEM interferência

$$A_{\text{mín}}(L \times B) = \frac{P_d}{\sigma_{\text{adm}}}$$

$$L - a_0 = B - b_0$$

Verificar:
 $L \leq 2,5 \cdot B$

Em que:
 P_d : carga estrutural de **cálculo**, acrescida de 5% (peso próprio)
 σ_{adm} : tensão admissível do solo
 L: lado maior da sapata
 B: lado menor da sapata
 a_0 : lado maior da seção do pilar
 b_0 : lado menor da seção do pilar



PEF 3405 - Engenharia Geotécnica e Fundações - Prof. Massao 34

34

USP Escola Politécnica da Universidade de São Paulo Departamento de Estruturas e Geotecnia POLI USP

SAPATAS ISOLADAS

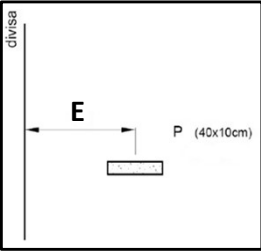
COM interferência

$$A_{\text{mín}}(L \times B) = \frac{P_d}{\sigma_{\text{adm}}}$$

Verificar:
 $L \leq 2,5 \cdot B$

$$\frac{L}{2} \leq E \quad \text{OU} \quad \frac{B}{2} \leq E$$

Em que:
 P_d : carga estrutural de **cálculo**, acrescida de 5% (peso próprio)
 σ_{adm} : tensão admissível do solo
 L: lado maior da sapata
 B: lado menor da sapata
 E: espaço disponível até a interferência



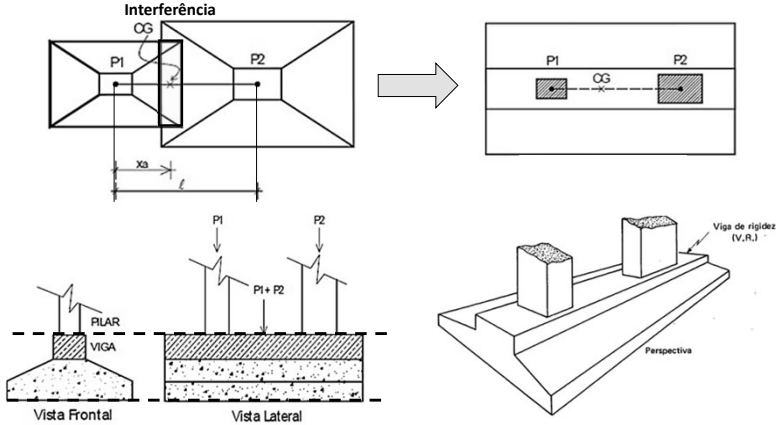
PEF 3405 - Engenharia Geotécnica e Fundações - Prof. Massao 35

35

USP Escola Politécnica da Universidade de São Paulo Departamento de Estruturas e Geotecnia POLI USP

SAPATAS ASSOCIADAS

Interferência



Vista Frontal Vista Lateral

PEF 3405 - Engenharia Geotécnica e Fundações - Prof. Massao 36

36

USP Escola Politécnica da Universidade de São Paulo Departamento de Estruturas e Geotecnia POLI USP

SAPATAS ASSOCIADAS

Necessidade de associação

$B_{P1,min}$ e $B_{P2,min} \rightarrow B_{P1-P2,min} = \sqrt{\frac{P_{d,P1,P2}}{2,5 \cdot \sigma_{adm}}}$

Em que:
 $B_{P1,min}$ e $B_{P2,min}$: menor dimensão (B) mínima da sapata
 P_d : carga estrutural de cálculo, acrescida de 5% (peso próprio)
 σ_{adm} : tensão admissível do solo

l (distância disponível)

$$l_{min} = \frac{B_{P1,min}}{2} + \frac{B_{P2,min}}{2} + f \begin{cases} \text{se } l < l_{min} \rightarrow \text{associar} \\ \text{se } l \geq l_{min} \rightarrow \text{sapatas isoladas} \end{cases}$$

f : é a largura da mesa
 l : distância entre os pilares

PEF 3405 - Engenharia Geotécnica e Fundações - Prof. Massao 37

37

USP Escola Politécnica da Universidade de São Paulo Departamento de Estruturas e Geotecnia POLI USP

SAPATAS ASSOCIADAS

Pilares com cargas IGUAIS

2) Determinar a dimensão do lado paralelo ao eixo da viga de rigidez

$$L_1 = \frac{5}{3} \cdot l$$

Fixação do balanço em L/5 para Dimensionamento econômico

3) Determinar a dimensão do lado perpendicular ao eixo da viga de rigidez

$$L_2 = \frac{A_{min}}{L_1} = \frac{2P}{L_1 \cdot \sigma_{adm}}$$

4) O maior dos dois lados será **L** e o menor **B**

Verificar:
 $L \leq 2,5 \cdot B$

1) Determinação do centro geométrico (C.G.)

$$x = y = \frac{l}{2}$$

PEF 3405 - Engenharia Geotécnica e Fundações - Prof. Massao 38

38

USP Escola Politécnica da Universidade de São Paulo Departamento de Estruturas e Geotecnia POLI USP

SAPATAS ASSOCIADAS

Pilares com cargas DIFERENTES

2) Determinar a dimensão do lado paralelo ao eixo da viga de rigidez

$$L_1 = 2 \cdot (b + (y/x)_{maior}) + P_{0,1}$$

Balanço (b): $50 \text{ cm} \leq b \leq 100 \text{ cm}$

O C.G. da Sapata deve coincidir com o da viga de rigidez, L deve ser múltiplo de 5 cm

3) Determinar a dimensão do lado perpendicular ao eixo da viga de rigidez

$$L_2 = \frac{A_{min}}{L_1} = \frac{P_1 + P_2}{L_1 \cdot \sigma_{adm}}$$

4) O maior dos dois lados será **L** e o menor **B**

Verificar:
 $L \leq 2,5 \cdot B$

1) Determinação do centro geométrico (C.G.)

$$x = \frac{P_1 \cdot l}{P_1 + P_2}$$

$$y = l - x$$

PEF 3405 - Engenharia Geotécnica e Fundações - Prof. Massao 39

39

USP Escola Politécnica da Universidade de São Paulo Departamento de Estruturas e Geotecnia POLI USP

SAPATAS ASSOCIADAS

Generalização

- Área da sapata, onde p_i = soma das cargas dos pilares

$$A = \frac{\sum p_i}{\sigma_s}$$

- Utilizar viga de rigidez para a distribuição de tensões
- C.G. dos pilares = C.G. sapata associada

$$X_{C.G.} = \frac{\sum p_i \cdot x_i}{\sum p_i} \quad Y_{C.G.} = \frac{\sum p_i \cdot y_i}{\sum p_i}$$

- Posicionar a viga de rigidez paralela a um dos lados

PEF 3405 - Engenharia Geotécnica e Fundações - Prof. Massao 40

40

USP Escola Politécnica da Universidade de São Paulo Departamento de Estruturas e Geotecnia POLI USP

SAPATAS ALAVANCADAS

41

41

USP Escola Politécnica da Universidade de São Paulo Departamento de Estruturas e Geotecnia POLI USP

SAPATAS ALAVANCADAS

Sapata de pilares de divisa alavancados

- 1) Determinação da largura da sapata

$$B_1 = \sqrt{\frac{P_{d,1}}{2 \cdot \sigma_{adm}}} \quad \text{Pressupõe } L = 2B$$
- 2) Determinação da excentricidade

$$e = \frac{B_1}{2} - \frac{b_{0,1}}{2} - f$$
- 3) Determinar a reação da sapata

$$R_1 = \frac{P_1 \cdot l}{l - e}$$
- 4) Determinação o comprimento da sapata

$$L_1 = \frac{R_1}{B_1 \cdot \sigma_{adm}}$$

Verificar: $L \leq 2,5 \cdot B$

42

42

USP Escola Politécnica da Universidade de São Paulo Departamento de Estruturas e Geotecnia POLI USP

SAPATAS ALAVANCADAS

Sapatas do pilar central

- 1) Determinar o alívio de carga

$$\Delta P \leq R_1 - P_1$$
- 2) Determinar a carga da sapata

$$R_{2,d} = P_2 - \frac{\Delta P}{2}$$
- 3) Dimensionar a sapata

$$A_{min} = \frac{R_{2,d}}{\sigma_{adm}} = L \cdot B$$

$$L - a_{0,2} = B - b_{0,2} \quad \text{Se não houver interferência}$$

$$\frac{L}{2} \leq E \quad \text{ou} \quad \frac{B}{2} \leq E \quad \text{Se houver interferência}$$

Verificar: $L \leq 2,5 \cdot B$

43

43

USP Escola Politécnica da Universidade de São Paulo Departamento de Estruturas e Geotecnia POLI USP

DIMENSIONAMENTO

Altura da sapata

A altura da sapata é determinada pela consideração quanto sua rigidez

$$h \geq \left(\frac{L - a_p}{3} \right) \quad \text{Sapata rígida}$$

$$h < \left(\frac{L - a_p}{3} \right) \quad \text{Sapata flexível}$$

Em que:
 a_p : dimensão da seção do pilar
 L: lado maior da sapata
 h: altura da sapata

$h_p \geq \begin{cases} h/3 \\ 20\text{cm} \end{cases}$

$0,5 \leq \tan \beta \leq 1,5 \quad (26,6^\circ \leq \beta \leq 56,3^\circ)$
 $\tan \beta = h / c$

$\tan \beta < 0,5 \rightarrow$ Sapata flexível
 $\tan \beta > 0,5 \rightarrow$ Não é sapata e sim bloco de fundação (CEB 1970)

44

44

USP Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
Departamento de Estruturas e Geotecnia POLI USP

DIMENSIONAMENTO

Sapatas apoiadas em cotas diferentes

Solos poucos resistentes: $\alpha \geq 60^\circ$;
Solos resistentes: $\alpha \geq 45^\circ$;
Rochas: $\alpha \geq 30^\circ$.

Fonte: NBR 6122 (Figura 6.4)

PEF 3405 - Engenharia Geotécnica e Fundações - Prof. Massao

45

45

USP Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
Departamento de Estruturas e Geotecnia POLI USP

DIMENSIONAMENTO

Pilares em diferentes formatos

Centrar a sapata no C.G. do pilar
Cálculo do $X_{C.G.}$ e $Y_{C.G.}$.

Fonte: ALONSO, 2019

PEF 3405 - Engenharia Geotécnica e Fundações - Prof. Massao

46

46

USP Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
Departamento de Estruturas e Geotecnia POLI USP

Sugestões de leitura

DAS, B., 2011, Principles of Foundation Engineering, Capítulo 3

CINTRA, J. C. A.; AOKI, N.; ALBIERO, J. H., 2011, Fundações diretas: Projeto geotécnico. Capítulo 2

ALONSO, U. R., 2019 Exercícios de fundações, Capítulos 1 e 2

PEF 3405 - Engenharia Geotécnica e Fundações - Prof. Massao

47

47