

Estimativa do Coeficiente do Recalque Através de Correlações Semi-Empíricas e Provas de Placas

Dickran Berberian

Infrasolo / Fundex Ltda, Brasília, Brasil, infrasoloengenharia@gmail.com

RESUMO: Em face do programa habitacional implantado no Brasil, ressurgiu a preferência em projetar fundações em radiers para Edificações de pequeno porte. Para definir as condições de apoio do radier, normalmente subdividido em faixas (vigas), torna-se necessário o claro conhecimento da rigidez relativa da viga, que por sua vez depende do Coeficiente de Recalque. Por esta razão, está ocorrendo uma grande procura para a determinação do Coeficiente de Recalque e também dos métodos computacionais aplicados ao projeto de Radiers e Vigas Sobre Base Elásticas. Persiste ainda dúvidas na definição e na correta utilização do Coeficiente de Recalque “unitário” k_b , obtido em provas de carga sobre placa de $1 \times 1 \text{ m}^2$, cuja unidade é kN/m^3 , quase sempre utilizado erroneamente nos projetos quando deveria ser utilizado o Módulo de Recalque K_B . K_B é o Coeficiente de recalque k_b corrigindo para a largura B e para a forma das fundações, passando então a ter unidade de tensão, kN/m^2 . Na análise dos métodos semi-empíricos adotou-se as recomendações de Bowles, correlacionando o coeficiente de recalque k_{30} com o SPT (N60), do Beton Kalender || DIN/ Karl H. Wolfel correlacionando o Coeficiente de Recalque para placas $30,48 \times 30,48 \text{ cm}$ com vários tipos de solos, de Berberian, que também correlaciona o Coeficiente de Recalque com o SPT e com o tipo de solo. Neste trabalho não se discute e nem se analisa programas de cálculo de radiers, vez que um dos seus objetivos principais é o de mostrar as suas bases teóricas procurando minimizar os erros na interpretação do Coeficiente de Recalque para os cálculos e softwares. Há casos nos quais a insegurança é tal que tem levado projetistas, por cautela, projetar armaduras iguais em ambas as faces da placa, ou seja, a mesma densidade de aço na face tracionada (positiva) como na comprimida (negativa). Tal fato tem ocorrido com mais frequência em placas circulares projetadas como fundações de reservatórios de combustíveis e silos.

PALAVRAS-CHAVE: Coeficiente de Recalque, Correlações, SPT, Módulo de Elasticidade, Provas de Placas, Correções

1 INTRODUÇÃO

Define-se **Coeficiente de Recalque (k_s)** como sendo a razão entre a pressão de contacto e o correspondente **recalque (y)** em um dado ponto da interface solo/viga, produzido pela aplicação da carga naquele ponto, Terzaghi & Peck (1955).

$$k_s = \frac{p}{y} \quad (1)$$

Em outras palavras, o coeficiente de recalque é a pressão unitária necessária para produzir um

recalque também unitário, Teng (1962).

k_s tem sido designado também por k_v , k_b , k_1 , k_{30} .

A unidade do Coeficiente de Recalque é quilo Newton por metro cúbico (kN/m^3), em geral se usa kg/cm^3 , coincidentemente, a mesma unidade de peso específico.

k_{30} , Idem para placa quadrada padrão da prova de carga de $30,48 \times 30,48 \text{ cm}$, mais apropriado para fundações (sapatas, vigas, placas, estacas, etc) muito longas $L > 10$ ou $20B$.

Para se dimensionar uma viga, laje, pilar etc, faz-se necessário conhecer:

1 - Condições de apoio

- 2 - Carregamento
- 3 - Módulo de Elasticidade, E_s
Coeficiente de Poisson, μ
- 4 - Resistência Característica do
Concreto à Compressão, f_{ck}

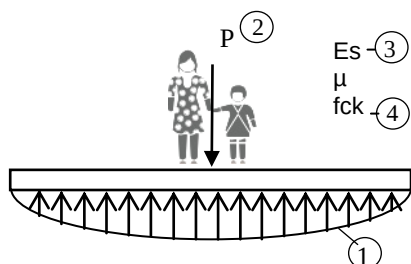


Figura.1.1 Bases para o dimensionamento de estruturas

Se o apoio da viga ou placa é o solo (base elástica), o apoio passa a ser distribuído (pressão de contato) cuja forma da distribuição e intensidade dependem da rigidez relativa solo/estrutura, que por sua vez depende do “Coeficiente de Recalque” k_s .

Coube a Winkler em 1867 a introdução do conceito de pressão de contato.

O Coeficiente de Recalque, também designado por Coeficiente de Reação, Coeficiente de Mola, Modulus of Subgrade Reaction, Modulus of Foundation, Subgrade Modulus, Coefficient of Subgrade Reaction, Coeficiente de Balastro ou ainda Coeficiente de Reaction de la Subrajante, é de fundamental importância para o estudo de:

- Cálculo dos Recalques
- Vigas e Grelhas sobre base Elástica
- Placas e Radiers, Idem Estaqueados
- Fundações Submetidas a Esforços Horizontais
- Pavimentos Rígidos
- Estruturas Enterradas, Metros, Galerias, etc.

O Coeficiente k_s depende das propriedades elásticas do terreno, das dimensões, forma e profundidade da área carregada.

Apesar de que as hipóteses simplificadoras que tratam deste tema não serem totalmente corretas, as teorias do Coeficiente de Recalque podem ser utilizadas para obtenção de soluções aproximadas em vários problemas encontrados

na prática da engenharia.

Entretanto para se obter valores razoavelmente precisos, o Coeficiente de Recalque deve estar compatível e representar as características do solo local.

Mesmo não sendo a preferência geral de alguns autores, Bowles (1996) em particular, mostra que a sua experiência utilizando os métodos dos elementos finitos MEF, considerando o meio elástico contínuo (E_s e μ) e o conceito do Coeficiente de Recalque, conclui que, pelo menos até que as pesquisas possam fornecer valores mais precisos do módulo de elasticidade E_s , o método do Coeficiente de Recalque é por ele preferido devido a grande facilidade em sua utilização, bem como a substancial redução no tempo de cálculo dos métodos computacionais.

O **Módulo de Recalque KB** ou Módulo de Reação é o coeficiente de recalque já levando em conta a largura B da viga, placa ou estaca, cuja unidade será portanto quiloNewton por metro quadrado, kN/m^2 ou kg/cm^2 . Alguns autores, a exemplo de Matlock & Reese, preferem o Módulo de Reação ao Coeficiente de Recalque.

As teorias do Coeficiente de Recalque Vertical e Horizontal estão baseadas em algumas hipóteses simplificadoras:

- O solo é elástico, obedecendo portanto a lei de Hooke.
- O valor de k_s é independente da magnitude da pressão p .
- O valor de k_s independe da rigidez relativa R_r da estrutura em relação ao solo, ou seja, k_s será considerado, nem sempre corretamente, constante para todo ponto de contato solo/placa.

Vários fatores afetam o valor do Coeficiente de Recalque. Terzaghi (1955), Teng (1962), Berberian (2010), Velloso & Lopes (2004), Vésic (1961), Reese & Matlock (1965), Jamiolkowski (1971) e tantos outros mais recentes, analisaram estes fatores recomendando.

2. CORREÇÕES DOS VALORES DE k_s

2.1 Correção da Largura B da Fundação

Gessener (1893) verificou que o valor de k_s diminui com o aumento da largura de vigas longas (flexíveis $L > 5B$ a $7B$.)

2.1.1 Para **solos coesivos** (C, M, C3S, M3S, CM e MC), rijos pré-adensados e/ou estruturados onde E_s e SPT não crescem com a profundidade

$$K_B = b \cdot \frac{k_b}{B} \quad (2)$$

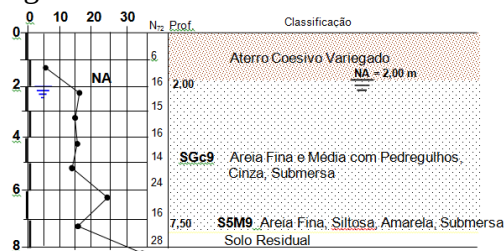
b = Largura da placa de ensaio, geralmente 1 pé x 1 pé (30.48x30.48cm)

B = Largura real da viga ou placa, corrigida

$K_B = k_b$ corrigindo para a largura da estaca para largura B .

Min.obs.: deve-se usar esta correção com muita cautela uma vez que k_b é inversamente proporcional a B , ou seja, k_b para uma viga de largura $B = 3.0m$, não poderia assumir um valor 1/10 do obtido para uma placa com largura $b = 0,3m$.

O usuário deverá segundo sua experiência, aumentar o valor de k_b como aliás se faz para Radiers onde B é muito grande. Segundo Terzaghi (1955) esta equação (2) é válida para solos argilosos onde a pressão de contacto é menor do que a metade da capacidade a rutura das argilas.



a) E_s SPT Constante

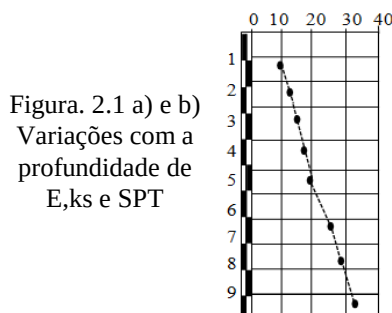


Figura. 2.1 a) e b)
Variações com a
profundidade de
 E_s , k_s e SPT

b) E_s SPT Crescente

- a) k_s constante com a profundidade
- b) k_s crescente com a profundidade

2.1.2 Para **Solos Arenosos e Argilas Normalmente Adensadas**, onde E_s , SPT e k_s crescem com a profundidade:

$$K_B = k_b \left(\frac{B + b}{2B} \right)^2 \quad b = 30cm, B \text{ na unidade } b \quad (3)$$

e para fundações profundas: $k_h = m \cdot h \cdot z$

Sendo m coeficiente que representa o crescimento (ou variação) do k_h com a profundidade. A figura abaixo mostra o caso onde k_b cresce de forma aleatória. Conforme sugere Reese, determina-se k_b através das curvas $p-y$, a cada metro.

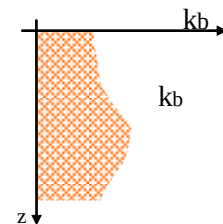


Figura 2.2 – Variação aleatória de k_h

Quando $B > 3b$ ambas as fórmulas acima descritas perdem a precisão

2.1.3. Efeito da Forma da Fundação

Para fundações com a mesma largura B , submetidos á mesma pressão q e apoiadas no mesmo terreno, o valor k_s decresce com o aumento do seu comprimento L , Terzaghi (1955). Para

$$k_m = k_b \left(\frac{1+m}{1,5m} \right) \quad (4)$$

k_m . Módulo de Recalque para Fundações retangulares tendo um comprimento L e largura B , com $m = L/B$.

$$k_m \leq 2/3 k_b \quad \text{ou} \quad k_m \leq 0,667 k_b \quad (5)$$

2.1.4. Efeito da Profundidade da Fundação

- a) Módulo de Recalque para Solos Arenosos e Siltes não plasticos

(S,SG, S3C, S3M)

O Módulo de elasticidade nas areias cresce com a profundidade z e consequentemente o recalque s diminui sabendo-se que o Coeficiente de Recalque é inversamente proporcional ao recalque, $k=q/s$, o seu valor deverá aumentar com a profundidade D da fundação.

$$K_z = k_b \left(1 + 2 \frac{z}{B} \right) \quad \text{com} \quad K_z \leq 2 k_{30} \quad (6)$$

Para Solos Arenosos (S, SG, S3C, S3M), nos quais E_s e SPT crescem com a profundidade, o valor do Módulo de Reação Horizontal é determinado pela equação (6).

Esta equação mostra que o recalque de uma fundação reduz-se à metade se ela for implantada a uma profundidade $D=B/2$, Teng (1962, pág 187).

Vale observar que o afofamento do solo devido aos efeitos construtivos e ao alívio de tensões, o recalque de fundações superficiais será maior do que aqueles calculados considerando o solo de apoio como sendo indeformado, e consequentemente o coeficiente de recalque será menor.

Equação geral para areias, incluindo os efeitos da largura e da profundidade, assume o seguinte formato:

$$TNR \ K_{BD} = k_b \left(\frac{B+1}{2B} \right) \left(\frac{B+2D}{B} \right) \quad (7)$$

o valor de K_{BD} não deve exceder a

$$TNR \ 2 k_b \left(\frac{B+1}{2B} \right) \quad (8)$$

- b)** Efeito da profundidade no Módulo de Recalque para solos puramente Coesivos Argilas e Siltes Plásticos (C, M, CM e MC).

O módulo de elasticidade para solos Coesivos rijos uniformes, é praticamente constante ao longo da profundidade não afetando o valor do Módulo do Recalque K_B , sendo portanto desnecessária sua correção.

3. CORRELAÇÕES COM O SPT

Apesar de todas as restrições inerentes a sondagens a percussão standard SPT e face a dificuldade para se obter valores de k_b , mais precisos em laboratório e/ou em provas de placa, as correlações com o SPT, Tabela 3.1, brasileiro (N_{72}), com eficiência girando no entorno de 72%, é ainda, na prática da engenharia o meio mais utilizado para obtenção do Coeficiente de Recalque. Vale observar que 99% das obras brasileiras são projetadas e executadas somente com base no SPT (N_{72}). Espera-se que em breve os ensaios do SPT-T, do Cone, do Dilatômetro, do Pressiometro e laboratoriais passem socorrer o SPT, permitindo maior confiabilidade aos valores de k_b .

Para atender às inúmeras solicitações, Berberian interpolou linearmente os intervalos dos valores apresentados por alguns autores consagrados.

Os valores do N_{60} apresentados por pesquisadores estrangeiros já foram corrigidos quanto a eficiência:

$$E_i = \left(\frac{N_{72}}{N_{60}} \right) = 1,2 \quad (9)$$

Recomenda-se corrigir-se os valores N_{72} para solos arenosos, com relação a tensão geostática (profundidade), conforme:

$$N' = N_{72} \cdot C_N$$

$$C_N = \sqrt{\frac{\sigma'_{oct}}{\sigma''_{oct}}} \quad \text{ou} \quad C_N = \sqrt{\frac{q'_0}{q''_0}} \quad (10)$$

N' . adm valor corrigido do SPT

σ'_{oct} kg/cm² tensão geostática de referência
=100kPa = 1kg/cm² = 10t/m²

σ''_{oct} kg/cm² tensão geostática octaédrica na profundidade do ensaio = $\sum \gamma_i h_i$

Desta forma, para se obter por exemplo o Coeficiente de Recalque de uma areia através da sondagem brasileira N_{72} , mas utilizando-se correlações americanas, o N_{60} a utilizar seria

$$N'_{60} = 1,2 \cdot C_N \cdot N_{72} \quad (11)$$

Tabela 3.1. SPT x Coeficiente de Recalque.

Solo S – Areia					
Autor	N ₇₂	ks = k ₃₀ = k _b			
		Úmidas		Saturadas	
		kg/cm ³	kN/m ³	kg/cm ³	kN/m ³
Bowles	1	0,57	5700	0,57	5700
Teng	1	0,66	6600	0,66	6600
Terzaghi	1	0,77	7700	0,96	9600
Bowles	3	0,72	7200	0,72	7200
Teng	3	1,03	10300	1,03	10300
Terzaghi	3	0,96	9600	1,06	10600
Bowles	5	0,86	8600	0,86	8600
Teng	5	1,32	13200	1,32	13200
Terzaghi	5	1,35	13500	1,11	11000
Bowles	7	0,99	9900	0,99	9900
Teng	7	1,67	16700	1,67	16700
Terzaghi	7	1,67	16700	1,16	11600
Bowles	9	2,48	24800	2,48	24800
Teng	9	1,91	19100	1,91	19100
Terzaghi	9	2,27	22700	1,22	12200
Bowles	11	4,16	41600	4,16	41600
Teng	11	2,80	28000	2,80	28000
Terzaghi	11	3,13	31300	1,29	12900
Bowles	13	6,29	62900	6,29	62900
Teng	13	3,89	38900	3,89	38900
Terzaghi	13	4,13	41300	1,38	41300
Bowles	15	8,03	80300	8,03	80300
Teng	15	4,81	48100	4,81	48100
Terzaghi	15	5,01	50100	1,52	15200
Bowles	17	8,13	81300	8,13	81300
Teng	17	5,86	58600	5,86	58600
Terzaghi	17	5,99	59900	1,63	16300
Bowles	19	8,64	86400	8,64	86400
Teng	19	6,80	68000	6,80	68000
Terzaghi	19	6,87	68700	1,76	17600
Bowles	21	9,13	91300	9,13	91300
Teng	21	7,74	77400	7,74	77400
Terzaghi	21	7,77	77700	1,89	18900
Bowles	23	9,44	94400	9,44	94400
Teng	23	8,78	87800	8,78	87800
Terzaghi	23	8,74	87400	2,00	20000
Bowles	25	9,92	99200	9,92	99200
Teng	25	9,72	97200	9,72	97200
Terzaghi	25	9,63	96300	2,13	21300
Bowles	27	12,25	122500	12,25	122500
Terzaghi	27	13,97	139700	2,95	29500
Bowles	29	10,72	107200	10,72	107200
Terzaghi	29	16,38	163800	3,57	35700
Bowles	31-40	11,19	111900	11,19	111900
Terzaghi	31-40	19,46	194600	4,20	42000

Solo S5C – Areia Argilosa					
Autor	N ₇₂	ks = k ₃₀ = k _b			
		Úmidas		Saturadas	
		kg/cm ³	kN/m ³	kg/cm ³	kN/m ³
Bowles	9	3,20	32000	3,20	32000
Bowles	10	3,50	35000	3,50	35000
Bowles	11	3,80	38000	3,80	38000
Bowles	12	4,10	41000	4,10	41000
Bowles	13	4,40	44000	4,40	44000
Bowles	14	4,70	47000	4,70	47000
Bowles	15	5,00	50000	5,00	50000
Bowles	16	5,30	53000	5,30	53000
Bowles	17	5,60	56000	5,60	56000
Bowles	18	5,90	59000	5,90	59000
Bowles	19	6,20	62000	6,20	62000
Bowles	20	6,50	65000	6,50	65000
Bowles	21	6,80	68000	6,80	68000
Bowles	22	7,10	71000	7,10	71000
Bowles	23	7,40	74000	7,40	74000
Bowles	24	7,70	77000	7,70	77000
Bowles	25	8,00	80000	8,00	80000

Solo M – Silte					
Autor	N ₇₂	ks = k ₃₀ = k _b			

		Úmidas		Saturadas	
		kg/cm ³	kN/m ³	kg/cm ³	kN/m ³
Bowles	9	2,40	24000	2,40	24000
Bowles	10	2,55	25500	2,55	25500
Bowles	11	2,70	27000	2,70	27000
Bowles	12	2,85	28500	2,85	28500
Bowles	13	3,00	30000	3,00	30000
Bowles	14	3,15	31500	3,15	31500
Bowles	15	3,30	33000	3,30	33000
Bowles	16	3,45	34500	3,45	34500
Bowles	17	3,60	36000	3,60	36000
Bowles	18	3,75	37500	3,75	37500
Bowles	19	3,90	39000	3,90	39000
Bowles	20	4,05	40500	4,05	40500
Bowles	21	4,20	42000	4,20	42000
Bowles	22	4,35	43500	4,35	43500
Bowles	23	4,50	45000	4,50	45000
Bowles	24	4,65	46500	4,65	46500
Bowles	25	4,80	48000	4,80	48000

Solo C – Argila					
Autor	N ₇₂	ks = k ₃₀ = k _b			
		Úmidas		Saturadas	
		kg/cm ³	kN/m ³	kg/cm ³	kN/m ³
Bowles	9	1,6	16000	1,6	16000
Terzaghi	9	1,76	17600	-	-
Bowles	11	2,13	21300	2,13	21300
Terzaghi	11	2,26	22600	-	-
Bowles	13	2,66	26600	2,66	26600
Terzaghi	13	2,75	27500	-	-
Bowles	15	3,20	32000	3,20	32000
Terzaghi	15	3,24	324000	-	-
Bowles	17	3,42	34200	3,42	34200
Terzaghi	17	3,53	35300	-	-
Bowles	19	3,86	38600	3,86	38600
Terzaghi	19	4,07	40700	-	-
Bowles	21	4,34	43400	4,34	43400
Terzaghi	21	4,61	46100	-	-
Bowles	23	4,80	48000	4,80	48000
Terzaghi	23	5,16	51600	-	-
Bowles	25	5,24	52400	5,24	52400
Terzaghi	25	5,70	57000	-	-
Bowles	27	5,68	56800	5,68	56800
Terzaghi	27	6,24	62400	-	-
Bowles	29	6,12	61200	6,12	61200
Terzaghi	29	6,79	67900	-	-
Bowles	31-40	6,40	64000	6,40	6400
Terzaghi	31-40	7,06	70600	-	-

4 ENSAIO DE PLACA

A melhor forma para determinação do Coeficiente de Recalque é sem dúvida o ensaio de placa.

Este ensaio deve ser realizado, em princípio, sobre uma placa rígida quadrada de 30,48 cm de lato (1pé); ou maior, **também rígida de largura b**, obtendo-se a curva carga x recalque (p-y), segundo metodologia prescrita na NBR 6489:1984, para Prova de Carga em Fundações Superficiais. No caso de provas de cargas em profundidades, recomenda-se executar os ensaios de placa em várias profundidades, sobre o solo real das fundações que se quer projetar. Nunca se deve executar o ensaio na superfície do terreno, devendo sempre executá-la em profundidade para prover-lhe uma certa sobrecarga no perímetro da placa de ensaio,

evitando-se uma rutura precoce causada pelo escoamento plástico do terreno nas bordas.

A curva carga x recalque **p-y** nunca será linear. O valor de k_s recomendado, ou seja, aquele que melhor simula o protótipo real, pode ser obtido através da reta secante inicial, passando pela origem e a 50% da deformação de rutura Figura 4.1, ou se possível a reta secante que passa pelo valor da tensão prevista e reinante na obra. Bowles (1996) recomenda-se adotar k_s como valor inicial para análise, obtido através da secante que passa pela origem e pelo ponto de abscissa $y = 2,54$ cm, Figura 4.1. tomados no primeiro ou segundo ciclo (após estabilizada a inclinação da reta de E).

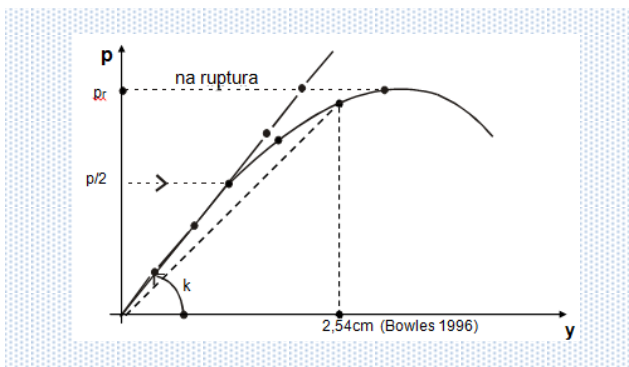


Fig. 4.1 Obtenção de k . Módulo Secante correspondente a $y = 2,54$ cm

A norma DIN, 1962 || DIN / Karl H. Wölfer (1965) recomenda obter-se k_s e o módulo de deformação E_s nas provas de placas com descarregamentos através de ensaios triaxiais cíclicos (2 ou 3 ciclos). Figura 4.2.

O módulo E_s ou k devem ser tomado no primeiro ou segundo ciclo (após a estabilização da inclinação da reta de E).

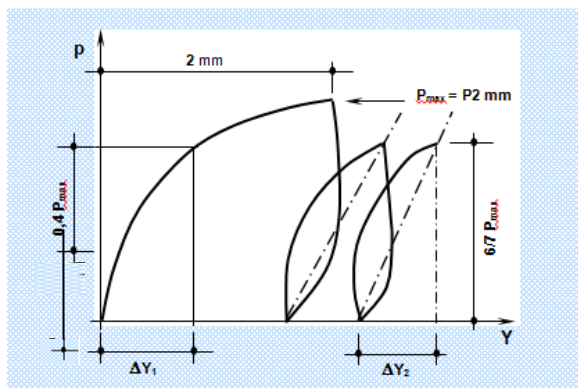


Fig.4.2 Recomend. da Norma DIN para obtenção de k_s

Para o caso em que se quer obter o Coeficiente de Recalque Horizontal, recomenda-se, quando possível, execução de vários ensaios de placa em profundidade, segundo metodologia desenvolvida por Berberian (1982) para o traçado das curvas $p - y$ segundo Reese et al.

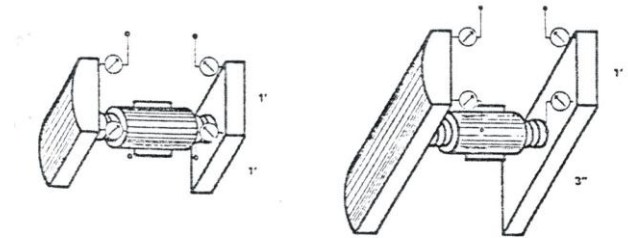


Fig. 4.3 Verificação da forma da placa no coeficiente e recalque. Berberian (1982)

5 CORRELAÇÕES de K com E e μ

Segundo Boussinesq

$$y = pB \frac{1-\mu^2}{E_s} \cdot I_s, \quad \text{sendo } p = k y \quad (12)$$

$$\text{logo, } K_B = \frac{E_s}{B F_s (1-\mu^2) I_s} \quad \text{onde} \quad (13)$$

E_s . módulo de Young

I_s . fator de influência de recalques

Harr (1966), apud Berberian (1990).

Vesic (1961) também recomenda :

$$k_B = \frac{0,65 E_s}{B (1-\mu^2)} \sqrt[12]{\frac{E_s B^4}{E_c I_c}}, \quad \text{sendo} \quad (14)$$

E_c . kg/cm². módulo de elasticidade do material da fundação concreto

I_c . cm⁴ . momento de inércia da seção da fundação.

Como para efeitos práticos a raiz décima segunda dos parâmetros para obras mais comuns $\times 0,65 \sim 1,0$, simplificando teríamos:

$$K_B = \frac{E_s}{B (1-\mu^2)} \quad (14)$$

6 CORRELAÇÕES de k_s com SPT (N_{72})

Da fig.2.1 verifica-se que o terreno de apoio da viga é constituído por areia fina média cinza com pedregulho, submersa - S4G9c, Berberian (2016), com um SPT médio $N_{72}=15$ até 7,0m de profundidade. Pode-se obter através do SPT, Tab. 3.1, os valores de k_s segundo: Bowles 8,08, Teng 5,46 e Terzaghi 5,63 obtendo um valor médio $k_{s\text{médio}} = 6,39 \text{ Kg/cm}^3$, ou $6.39 \times 10^4 \text{ kN/m}^3$, filtrado por um desvio padrão $\mu=30\%$.

Em face da dificuldade, do custo e do tempo necessário para obtenção dos parâmetros do solo, Berberian (1972) ainda na COPPE/UFRJ ampliou o Sistema Unificado de Clasificação dos Solos para afinar as correlações possíveis, introduzindo dois dígitos numéricos ao símbolo do solo. O primeiro dígito numérico, após o primeiro dígito alfa, indica a proporção da mistura no solo. O segundo indica o teor aproximado de unidade, na tentativa de considerar o efeito da sucção. Tomou como base o número 5 como Medianamente e Úmido respectivamente. 6 como Muito, 7 como Demasiadamente e Saturado, 9 como Submerso. 4 como Pouco e 3 como Mto. Pouco e Seco. Estes valores podem ser obtidos no campo, tatil/visualmente por operadores treinados e experientes.

7 CORRELAÇÕES DE k_s E A CAPACIDADE DE CARGA DO SOLO

Considerando-se que nem sempre se dispõe de valores precisos de E_s , outras correlações podem ser usadas se o resultado final dos cálculos das flechas através de k_s , apresentar valores razoáveis.

Principalmente se considerarmos ainda que os momentos fletores e a pressão de contacto não são muito sensíveis às variações dos valores adotados do k_s , pelo fato de que a rigidez da placa é usualmente dez vezes maior do que a rigidez obtida através de k_s . Levando em conta estes fatos, Bowles (1996) e vários consultores geotécnicos sugerem:

$$k_s = 40 \text{ (FS)} \sigma_a \quad \text{kN/m}^3$$

$$k_s = 400 \text{ (FS)} \sigma_a \quad \text{kN/cm}^3$$

sendo σ_a , a tensão admissível do solo para um recalque de 25mm e $k_s = \sigma_{\text{rut}} / y$. O fator de segurança situa-se entre 2 e 3. Para recalques menores, por exemplo para 6, 12 e 20mm, k_s assume valores de 160, 80 e 50 (FS) σ_a

A seguir analisa-se os valores encontrados para k_s utilizando alguns métodos disponíveis.

Exemplo prático: Tomando-se como exemplo, uma viga em T, Velloso & Lopes (1996), carregada com cargas concentradas transformadas em uniformemente distribuída, com comprimento $L=12,50\text{m}$ e largura $B=2,5\text{m}$. Esta viga está assente a $Z_f=2,0\text{m}$ de profundidade.

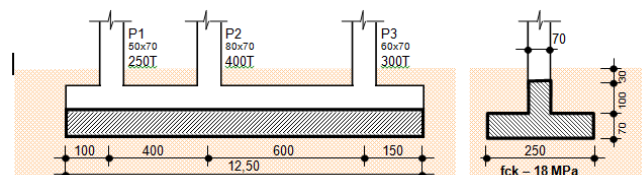


Fig. 7.1 Exemplo. Velloso & Lopes (1996)

Considerando-se como rígida recebendo uma carga total de 950t e peso próprio de 76,55 t, resultaria em uma pressão de contacto média transferida ao solo de $q=328 \text{ kN/m}^2$.

A **capacidade de carga** admissível pode ser obtida por métodos semi-empíricos/estatísticos, conforme Berberian (2016, Cap 3).

Segundo a NBR 2122: 1996; da Tab. 3.3.13 com: Areia e $N_{72}=15$ $\sigma_a=1,8 \text{ kg/cm}^2$ ou 180 KPa.

Segundo as recomendações de Berberian Tab. 3.3.1.5 com: Areia e $N_{72}=15$, $K_{\text{base}}=6,03$ $\sigma_a=15/6,03=2,49 \text{ kg/cm}^2$.

Segundo Albiero & Cintra $K_{\text{base}}=5$ $\sigma_a=15/5=3,0 \text{ kg/cm}^2$.

Segundo Victor de Mello

$$\sigma_a = \sqrt{N_{72} - 1} = \sqrt{15 - 1} = 3,74 \text{ kg/cm}^2.$$

Considerando-se também um desvio padrão de $\mu=30\%$, tem-se a primeira média $\sigma_a=2,745 \text{ kg/cm}^2$ que coincide com a segunda média. Logo k_s será $40 \times 3 \times 274,5$, que é igual a $k_{s\text{médio}} = 33.000 \text{ kN/m}^3$.

8 OBTENÇÃO Ks DE ATRAVÉS DO CÁLCULO DO RECALQUE S.

Para o cálculo do recalque, utilizaremos métodos semi-empíricos, considerando a viga como sendo rígida.

8.1 Recomendações de **Alpan (1964)**. Recalque

No método Alpan, utiliza-se a média dos SPTs (N_{corr}), corrigidos para a profundidade (tensão geostática), ao nível da base e a uma profundidade = B abaixo da base ($Z_f + B$).

Com base no SPT, obtem-se $\gamma_n = 17 \text{ kN/m}^3$ e $\gamma_{sub} = 8,0 \text{ kN/m}^3$, Berberian (2016, Cap. 4). Sabendo-se que $N_{corr} = C_N \cdot N_{72}$ e

$$C_N = \sqrt{\frac{q'_0}{q'_{10}}}$$

$q'_0 = 100 \text{ kPa}$ (valor de referência)

$q'_0 = 2 \times 17 = 34 \text{ kN/m}^2$ p/ $N_{72} = 15 \rightarrow N_{corr} = 40$

$q'_0 = 2 \times 17 + 2,5 \times 8 = 54 \text{ kN/m}^2$

p/ $N_{72} = 15 \rightarrow N_{corr} = 30$

Adota-se para o método de Alpan a média :
 $N_{corr} = 35$.

O recalque para $B = 2,5 \text{ m}$ e $b = 0,33 \text{ m}$, será:

$$S_B = m \cdot a_0 \cdot q \left(\frac{2B}{B+b} \right)^2$$

Para $L/B > 5,0 \text{ m} \rightarrow m = 1,94 \text{ m}$

$a_0 = 1,7 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{kN}$ tabelado

$b = 0,33 \text{ m}$ lado da placa de ensaio

$$S_B = 1,94 \times 1,7 \times 10^{-5} \times 328 \left(\frac{2 \times 2,5}{2,5 + 0,33} \right)^2$$

$$S_B = 0,031 \text{ m} = 31,0 \text{ mm}$$

8.2 Recomendações de **Burland e Burbidge (1985)**

$$S_B = q \cdot B^{0,7} \frac{1,71}{N^{1,4}} \cdot F_F \cdot F_H$$

$B = 2,5 \text{ m} \rightarrow Z_1 = 2,0 \text{ m}$

$N = 15 \rightarrow N_{corr} = 19$, corrigido somente quanto a eficiência

$$F_F = \left(\frac{1,25 \times 5}{5 + 0,25} \right)^2 = 1,42$$

$F_H = 1,0$

$$S_B = 328 \cdot 2,5^{0,7} \frac{1,71}{19^{1,4}} \cdot 1,42 \cdot 1,0 = 24,8 \text{ mm}$$

Na hipótese de Winkler $k_s = q/S = 328/0,0279 = 11,756 \text{ kN/m}^3 = 1,17 \text{ kg/cm}^3$.

Adotando-se valor médio para o SPT corrigido 35 e para areia S4G9c da condição saturada teríamos segundo Bowles (1996) $k_s = 11190$ e Terzaghi (1943) 4200, resultaria num valor médio de 7695 kN/m^3 , 50% menor que o valor obtido através do cálculo dos recalques. Porcentagem esta esperada (até a presente data).

9 CONCLUSÕES.

Em face das variações dos valores recomendados para k_s , apresentando um desvio padrão de até 50% do valor médio, sugere-se utilizar $k_s = 32.940,00 \text{ KN/m}^3$ ou seja $k_s = 3,29 \text{ kg/cm}^3$. A principal mensagem recai sobre a execução de um maior numero de provas de placa, se possível em placas com b maior do que a dimensão padrão (30x30cm).

BIBLIOGRAFIA

- Alpan, I., 1964. "Estimating the Settlement of Foundation on Sands." Civil Engineering and Public Works Review, Vol. 58, pp. 1415-1418
- Berberian, D. (1972), "Análise de Placas Circulares sobre Base Elástica", COPPE. Rio de Janeiro, 1972.
- Berberian, D. (1972) Sistema de Classificação dos Solos. COPPE/UFRJ
- Berberian, D. (2010) – Engenharia de Fundações Cap. 11. Infrasolo – GeotechPess.
- Bowles (1996), Foundation Analysis and Design, 5th ed., McGraw Hill, Peoria, IL, USA, 1996
- Burland, J.B. & Burbidge, M.C. 1985. Settlement of foundations on sand and gravel. Proceedings, Institution of Civil Engineers, 78(1): 1325-1381
- Teng, W. C. (1962), *Foundation Design*, 2nd ed., Prentice Hall, Inc, Englewood Cliffs, NJ, USA, 188 p
- Terzaghi, K. (1955), "Evaluation of Coefficient of Subgrade Reaction", *Geotechnique*, V, 4, 297. London, 1955..
- Vesic, A. B. (1961) "Beams on Elastic Subgrade and Winkler's Hypothesis," Proc. 5th Int. Conf. on Soil Mech. and Foundation Engineering, Paris: 845-850.