CRV – Sapatas e Tubulões

Para considerar a influência do solo junto à fundação, usou-se a hipótese de Winkler, onde se estabelece que as pressões aplicadas sejam proporcionais, em uma relação escalar, ao recalque mobilizado. Não havendo influência entre o ponto de aplicação desta pressão com sua vizinhança.

Considerando esta hipótese, estabelece uma relação discreta (pontual) entre fundação-solo, mediante a definição de uma constante de mola que representará a rigidez do maciço. Para isto, é necessário definir o valor de Kv o qual é denominado de Coeficiente de Reação Vertical (CRV). Este é um valor escalar que representa o coeficiente de rigidez que o solo possui para resistir ao deslocamento mobilizado por uma pressão imposta. Ele é análogo ao coeficiente de mola, mas não relacionado a uma força, mas sim a uma pressão (força por área), de acordo com o exemplo esquemático na figura 1:

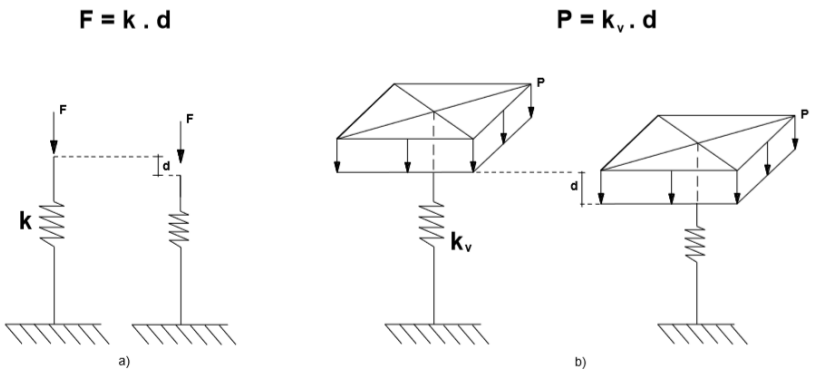


Figura 5.1

a) coeficiente de mola, quociente entre força – deslocamento;

b) coeficiente de reação vertical, quociente entre pressão – deslocamento.

Neste sentido, este texto descreve vários métodos, os quais foram implementados no SISEs, para obtenção deste coeficiente. Ele pode ser obtido por três diferentes maneiras: 1) Valores padronizados; 2) Ensaio de Placa; e 3) Recalque vertical estimado.

A seguir, são definidas e apresentadas cada uma dessas categorias, bem como seus métodos e particularidades, que foram implementados no SISEs.

Métodos Implementados

Os métodos implementados no SISEs para a determinação do coeficiente de reação vertical (CRV) do solo são:

1. VALORES PADRONIZADOS (VP)

Vários pesquisadores apresentam tabelas e ábacos que relacionam o módulo de reação vertical com o tipo de solo. Estes valores foram obtidos em ensaios in situ em regiões e condições específicas, conforme podem ser averiguados nas referências bibliográficas indicadas. Assim, os seus valores podem não ser representativos em certas condições, devendo ficar a critério do profissional o seu uso. Foram considerados três métodos nesta categoria, os quais são:

1.a) Tipo de Solo;

1.b) SPT – Tensão Admissível;

1.c) Tipo de Solo - Tensão Admissível.

2. ENSAIO DE PLACA (EP)

São chamados também de métodos racionais, onde os parâmetros de deformabilidade são obtidos in situ ou em laboratórios mediante o ensaio de provas de carga ensaios mais conhecidos são os apresentados nas tabelas de:

2.a) Terzaghi;

2.b) Outros autores.

3. RECALQUE VERTICAL ESTIMADO (RE)

De acordo com a definição de módulo de reação vertical, que pode ser escrito como:

$$k_v = P/d$$

é possível estimar o coeficiente vertical (Kv) a partir do cálculo do recalque da fundação sobre o maciço mobilizado por uma pressão unitária. Os métodos desenvolvidos então nesta categoria foram:

3.a) Teoria da Elasticidade / Valor Típico;

3.b) Teoria da Elasticidade / Schmertmann;

3.c) Teoria da Elasticidade / Teixeira & Godoy;

3.d) Método de Schultze & Sherif;

3.e) Método de Parry;

) Método de Boussinesq;

3.g) Método de Rausch & Cestelli Guidi;

3.h) Módulo Edométrico – Tabelas;

3.i) Módulo Edométrico – SPT.

Valores Padronizados

Tipo de Solo

Neste método, os valores do coeficiente de reação vertical (Kv), em F/L³, são relacionados ao tipo de solo indicados na Tabela de Béton – Kalender de 1962, vide Tabela 5.1.

Referência bibliográfica: MORAES (1981).

Valores de Kv (em kgf/cm³)	
Turva leve-solo pantanoso	1,0
Turva pesada-solo pantanoso	1,5
Areia fina de praia	1,5
Aterro de silte, areia e cascalho	2,0
Argila molhada	3,0
Argila úmida	5,0
Argila seca	8,0
Argila seca endurecida	10,0
Silte compactado com areia e pedra	10,0
Silte compactado com areia e muita pedra	12,0
Cascalho miúdo com areia fina	12,0
Cascalho médio com areia fina	12,0
Cascalho grosso com areia grossa	15,0

Cascalho grosso com pouca areia	20,0
Cascalho grosso com pouca areia compactada	25,0

Tabela 5.1 – Valores de Kv da tabela de Béton – Kalender

SPT – Tensão Admissível

Neste método, obtêm-se a média dos valores do SPT compreendidos dentro do bulbo de pressões, vide Figura 5.2. Nesta figura, o escalar "cte" é a profundidade para determinar o bulbo de pressão, e é indicado no arquivo de critérios de projeto ou no editor de fundações que pode variar de 3. Com o valor do número de golpes médio, calcula-se a tensão admissível pela conhecida relação empírica:

$$\overline{\sigma}_{solo} = 0{,}20 \cdot SPT_{médio} \qquad (\mathrm{kgf/cm^2})$$

Com as tensões admissíveis estimadas, retira-se da tabela SAFE, MORRISON (1993), o valor de Kv em kgf/cm³, Tabela 5.2.2.

Referência bibliográfica: MORRISON (1993).

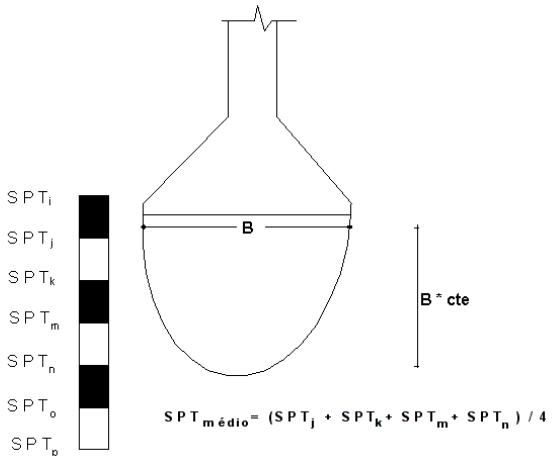


Figura 5.2 – Exemplificação do cálculo do valor médio do SPT dentro do bulbo de pressões.

Tensão Admissível (kgf/cm²)	Kv (kgf/cm³)	Tensão Admissível (kgf/cm²)	Kv (kgf/cm³)
0,25	0,65	2,15	4,3
0,30	0,78	2,20	4,4
0,35	0,91	2,25	4,5
0,40	1,04	2,30	4,6
0,45	1,17	2,35	4,7
0,50	1,30	2,40	4,8
0,55	1,39	2,45	4,9
0,60	1,48	2,50	5,0
0,65	1,57	2,55	5,1

0,70	1,66	2,60	5,2
0,75	1,75	2,65	5,3
0,80	1,84	2,70	5,4
0,85	1,93	2,75	5,5
0,90	2,02	2,80	5,6
0,95	2,11	2,85	5,7
1,00	2,2	2,90	5,8
1,05	2,29	2,95	5,9
1,10	2,38	3,00	6,0
1,15	2,47	3,05	6,1
1,20	2,56	3,10	6,2
1,25	2,65	3,15	6,3
1,30	2,74	3,20	6,4
1,35	2,83	3,25	6,5
1,40	2,92	3,30	6,6
1,45	3,01	3,35	6,7
1,50	3,10	3,40	6,8
1,55	3,19	3,45	6,9
1,60	3,28	3,50	7,0
1,65	3,37	3,55	7,1
1,70	3,46	3,60	7,2
1,75	3,55	3,65	7,3
1,80	3,64	3,70	7,4
1,85	3,73	3,75	7,5
1,90	3,82	3,80	7,6
1,95	3,91	3,85	7,7
2,00	4,0	3,90	7,8
2,05	4,1	3,95	7,9
2,10	4,2	4,0	8,0

Tabela 5.2.2 - Valores para Kv ; SAFE, MORRISON (1993)

Como limitou o intervalo de SPT entre 1 e 40, o Sises aplica uma aproximação linear para valores de tensão que estejam fora dessa tabela 5.2.2 de Morrison (1993).

Tipo de Solo – Tensão Admissível

Neste método, em função do tipo de solo da camada, retira-se o valor da tensão básica conforme apresentado na Tabela 4 da NBR 6122:1996, ou na Tabela 5.3, fazendo as correções de profundidade e de geometria conforme preconiza esta mesma norma para solos granulares e argilosos.

Com as tensões admissíveis estimadas, retira-se da tabela SAFE, MORRISON (1993), o valor de Kv em kgf/cm³.

A tabela seguir, que relaciona a descrição do solo e sua tensão admissível, é reproduzida no SISEs, item arquivo de critérios. Duas novas linhas são adicionadas a esta tabela, linhas referentes ao item "Conforme SPT" para areia e argila que, em função da cota de assentamento da fundação e de seu respectivo valor de SPT, busca – para cada caso de areia e/ou argila – a sua classificação de consistência e compacidade conforme a tabela 7.1 e o valor da tensão admissível.

Referência bibliográfica: CINTRA et al. (2003), MORRISON (1993).

Descrição do tipo de solo **	σ_s (MPa)
Rocha sã, maciça, sem laminação	3,0
Rocha laminada, com pequenas fissuras	1,5
Solos granulares concrecionados, conglomerados	1,0
Pedregulho fofo	0,3
Pedregulho compacto a muito compacto	0,6
Argila dura (SPT >19)	0,3
Argila média ($6 \leqslant$ SPT $\leqslant 10$)	0,1
Argila rija ($11 \leqslant$ SPT $\leqslant 19$)	0,2
Areia muito compacta (SPT >40)	0,5
Areia compacta ($19 \leqslant$ SPT $\leqslant 40$)	0,4
Areia med. compacta ($9 \leqslant$ SPT $\leqslant 18$)	0,2
Silte muito compacto (ou duros)	0,3
Silte compactos (ou rijos)	0,3
Silte médio (medianamente compacto)	0,1

** valores válidos para largura de , em outros casos deve-se fazer correção

Tabela 5.3 – Valores das Tensões básicas (NBR 6122:1996)

Os valores da tabela de tensões básicas devem ser modificados em função das dimensões e da profundidade do elemento de fundação, além do tipo de solo, conforme prescrições da NBR 6122:1996.

i) Prescrição Especial para Solos Granulares

Se solo abaixo até 2 vezes a largura da cota de apoio do elemento de fundação é do tipo (solo granular e areias), corrige-se a tensão básica em função de sua largura (B), de duas maneiras:

1 - Construções não sensíveis a recalques,

Realiza-se uma redução proporcional à menor largura da fundação, com o uso da expressão:

$$\sigma_0^{'} = \sigma_0 \left[1 + \frac{1,5}{8}(B-2) \right] \leq 2,5 \cdot \sigma_0 \quad (B \leq 10m)$$

2 - Construções sensíveis a recalques:

Caso B > 2m, a NBR 6122/96 recomenda fazer uma verificação dos eventuais efeitos de recalques. Não se corrige as tensões básicas.

Caso B < 2m, emprega-se a redução proporcional indicada em “Construções não sensíveis a recalques”.

Dentro do SISEs, no arquivo de critérios de projeto, é possível definir se a construção é sensível ou não a recalques, conforme indicação do usuário (default: é sensível a recalque).

ii) Prescrição Especial para Solos Argilosos

Para solos que sejam argilosos (conforme definido pelo usuário em sondagem), devem-se reduzir os valores da tabela com a expressão:

$$\sigma_0' = \sigma_0 \sqrt{\frac{10}{A}}$$

A: área da fundação ($A \geq 10m^2$)

Esta redução pode ser rigorosa em alguns casos, e no SISEs, seguindo recomendações indicadas na versão anterior da norma de Fundações, caso este valor reduzido seja menor que a metade do valor da tabela, usa este último como redução:

$$\sigma_0' = \sigma_0 \sqrt{\frac{10}{A}} \leq \sigma_0 / 2$$

Resumo dos Diversos Métodos –Valores Padronizados

Abaixo é apresentada uma tabela resumindo os diversos métodos para cálculo do Coeficiente de Reação Vertical com algumas características importantes de cada um, tais como: consideração de camadas, propagação de tensões, associação de camadas, grau de dependência do SPT, etc. Esta tabela tem o objetivo de auxiliar a seleção do método desejado e apresentar o número de variáveis a serem definidas na associação às camadas da sondagem.

Método para calculo doCRV	Tipo Solo	ConsideraDiversasCamadas?	Propaga-ção deTensões	Associa-çãoCamadaSonda-gempelo SPT	Associa-ção CamadaSonda-gempelo Titulo	Variáve-is a definirporcamada	Depen-dência doMétodo/ SPT
Tipo de Solo	Qquer	Não	Não	Não	Sim	CRV	Nenhum
SPT – TensãoAdmissível	Qquer	Sim-Bulbo	Não	Sim	Não	---	Total
Tipo do SoloTensão Admissível	Qquer	Não	Não	Não	Sim	T.Adm.	Nenhum
	AreiaArgila	Não	Não	Sim	Não	T.Adm.	Parcial

Ensaio de Placa

Tabela de TERZAGHI

Neste método, os valores de Kv (kgf/cm³) são relacionados ao tipo de solo fornecido por TERZAGHI (1955) e indicados na Tabela 5.4. Estes valores foram obtidos no ensaio de uma placa quadrada de lado um pé (30 cm), por isso indicados por k30. Deve ser então corrigido para considerar o efeito de dimensão e forma, conforme indicação nas relações abaixo:

Para argilas:

$$k_v = \left(30/B\right) \cdot k_{30}$$

Para areias:

$$k_v = \left(\frac{B+30}{2B} \right)^2 \cdot k_{30}$$

onde B é o lado menor da sapata, em centímetros.

Referência bibliográfica: VELLOSO & LOPES (1996), TERZAGHI (1955).

Argila	Rija	Muito rija	Dura
faixas de valores	1,6 – 3,2	3,2 – 6,4	> 6,4
valores propostos	2,4	4,8	9,6
Areia	Fofa	Med. compacta	Compacta
acima do NA	1,3	4,2	16
abaixo do NA	0,8	2,6	9,6

Tabela 5.4 – Valores de k30 da tabela TERZAGHI (kgf/cm³)

Tabela de Outros Autores

Neste método, os valores de Kv (kgf/cm³) propostos por outros autores são relacionados ao tipo de solo. Os valores de k30 são apresentados na Tabela 5.5 e também devem ser corrigidos conforme as expressões do método 5.3.1:

Descrição do tipo de solo	k30 (kgf/cm³)
Areia fina de praia	1,5
Areia fofa seca úmida	3,0
Areia média seca úmida	9,0
Areia compacta seca úmida	20,0
Areia pedregulhosa fofa	8,0
Areia pedregulhosa compacta	25,0
Pedregulho arenoso fofo	12,0
Pedregulho arenoso compacto	30,0
Rochas brandas ou alteradas (saprólito)	500,0
Rocha sã	30.000

Tabela 5.5 – Valores de k30 propostos por outros autores

Referência bibliográfica: ACI (1988), CALAVERA (2000), BOWLES (1997).

Resumo dos Diversos Métodos – Ensaios de Placas

Abaixo é apresentada uma tabela resumindo os diversos métodos para cálculo do Coeficiente de Reação Vertical com algumas características importantes de cada um, tais como: consideração de camadas, propagação de tensões, associação de camadas, grau de dependência do SPT, etc. Esta tabela tem o objetivo de auxiliar a seleção do método desejado e apresentar o número de variáveis a serem definidas na associação às camadas da sondagem.

Método para calculo do CRV	Tipo Solo	Considera Diversas Camadas?	Propaga-ção de Tensões	Associa-ção Camada Sonda-gem pelo SPT	Associa-ção Camada Sonda-gem pelo Titulo	Variáve-is a definir por camada	Depen-dência do Método / SPT
Terzaghi	Qquer	Não	Não	Não	Sim	K30	Nenhum
Outros Autores	Qquer	Não	Não	Não	Sim	K30	Nenhum

Recalque Vertical Estimado

Teoria da Elasticidade / Valor Típico

Nesta opção, empregam-se as expressões analíticas de MINDLIN, indicadas em POULOS & DAVIS (1974), que são as respostas exatas de deslocamentos (d) dentro do meio contínuo semi-infinito homogêneo para um dado carregamento. No caso de se simular o meio heterogêneo e com o plano do indeslocável em uma posição conhecida, Figura 5.3b, usa-se o procedimento de STEINBRENNER, POULOS (1967), o qual é descrito no item 11 desse manual. Para isto é necessário conhecer o módulo de elasticidade e o coeficiente de Poisson do solo em cada camada.

O módulo de elasticidade é obtido conforme os valores sugeridos pela tabela 5.6. O coeficiente de Poisson do solo é indicado na tabela 5.7, valores sugeridos por TEIXEIRA & GODOY (1996).

Referência bibliográfica: TEIXEIRA & GODOY (1996), POULOS & DAVIS (1974), POULOS (1967).

Descrição do tipo de solo	E (kgf/cm²)
Argila conforme SPT	*
Areia conforme SPT	*
Areia normal adensada	E = 5 (SPT+5)
Areia sobreadensada	E = 180+(7,5.SPT)
Argila terciária de SP	E = 55,4+(25,9.SPT)
Areia fofa (SPT ≤ 4)	50
Areia pouco compacta (SPT 5 a 8)	200
Areia medianamente compacta (SPT 9 a 18)	500
Areia compacta (SPT 19 a 40)	700
Areia muito compacta (SPT > 40)	900
Argila muito mole (SPT ≤ 2)	10
Argila mole (SPT 2 a 5)	20
Argila média (SPT 6 a10)	50
Argila rija (SPT 11 a 19)	80
Argila dura (SPT > 19)	150

Tabela 5.6 – Valores típicos para o módulo de elasticidade do solo

Descrição do tipo de solo	
Argila conforme SPT	*
Areia conforme SPT	*
Areia fofa (SPT ≤ 4)	0,35
Areia pouco compacta (SPT 5 a 8)	0,35
Areia medianamente compacta (SPT 18)	0,35
Areia compacta (SPT 19 a 40)	0,35
Areia muito compacta (SPT > 40)	0,35
Argila muito mole (SPT ≤ 2)	0,3
Argila mole (SPT 2 a 5)	0,3
Argila média (SPT 6 a 10)	0,3
Argila rija (SPT 11 a 19)	0,3
Argila dura (SPT > 19)	0,3

Tabela 5.7 – Valores sugeridos para o coeficiente de Poisson do solo

O recalque (d) abaixo do vértice de uma área retangular carregada com carga uniformemente constante - Figura 5.3a - é dado pela equação indicada em Poulos & Davis (1974), descrita a seguir:

$$d = \frac{4 \cdot p \cdot b}{E} \cdot \left(1 - \nu^2\right) \cdot \left(A - \frac{1 - 2\nu}{1 - \nu} \cdot B \right)$$

Onde:

$$A = \frac{1}{2\pi} \left[\ell n \left(\frac{\sqrt{1 + m^2 + n^2} + m^2}{\sqrt{1 + m^2 + n^2} - m^2} \right) \right] + m \cdot \ell n \left(\frac{\sqrt{1 + m^2 + n^2} + 1}{\sqrt{1 + m^2 + n^2} - 1} \right)$$

$$B = \frac{n}{2\pi} \cdot arctg \left(\frac{m}{n \cdot \sqrt{1 + m^2 + n^2}} \right)$$

$$m = L/b$$

$$n = z/b$$

Com

p: carga uniformemente distribuída, no SISEs; p = 1 kgf/cm² ;

b: menor largura da fundação;

L: maior comprimento da fundação;

E: módulo de elasticidade;

: coeficiente de Poisson;

d: recalque calculado

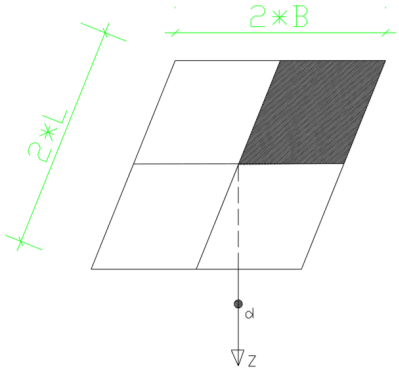


Figura 5.3a – Localização e variáveis para cálculo do recalque de uma área retangular.

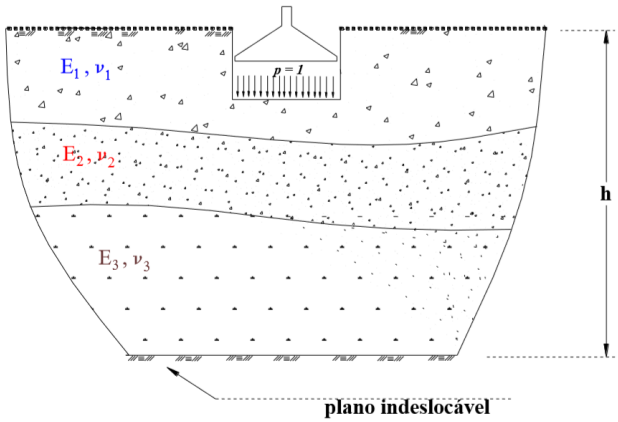


Figura 5.3b – Maciço de solos heterogêneo e com plano indeslocável a distância h.

Teoria da Elasticidade / Schmertmann

Este método utiliza a mesma formulação do item 5.4.1, empregando também o procedimento de Steinbrenner. Mas o módulo de elasticidade é obtido conforme proposto por SCHMERTMANN (1978), sendo dado pela relação:

$$E = 3 \cdot K \cdot SPT \quad (MPa)$$

onde K depende do tipo de solo. Na Tabela 5.8 são apresentados seus valores típicos propostos por TEIXEIRA (1993):

Descrição do tipo de solo	K (MPa)
Areia com pedregulhos	1,10
Areia	0,90
Areia Siltosa	0,70
Areia argilosa	0,55
Silte arenoso	0,45
Silte	0,35
Argila arenosa	0,30
Silte argiloso	0,25
Argila siltosa	0,20

Tabela 5.8 – Valores sugeridos de K

Referência bibliográfica: CINTRA et al. (2003), SCHMERTMANN (1978), TEIXEIRA (1993).

Teoria da Elasticidade / TEIXEIRA & GODOY

Este método utiliza a mesma formulação do item 5.4.1, empregando também o procedimento de Steinbrenner. Mas o módulo de elasticidade é obtido conforme proposto por TEIXIERA & GODOY (1996) que estabelece a seguinte relação para fundações diretas:

$$E = \alpha \cdot K \cdot SPT \quad (MPa)$$

onde é um coeficiente que correlaciona a resistência de ponta (qc) com o SPT. Seus valores para a areia e argila foram propostos por TROFIMENKOV (1974) e são apresentados na Tabela 5.9. O coeficiente K é o mesmo utilizado no item 5.4.2 e apresentado na Tabela 5.8.

Descrição do tipo de solo	
Areia	3
Silte	5
Argila	7

Tabela 5.9 – Valores sugeridos de .

Referência bibliográfica: CINTRA et al. (2003), SCHMERTMANN (1978), TEIXEIRA (1993).

Método de SCHULTZE & SHERIF

Este modelo é utilizado para a estimativa de recalques em solos arenosos, sendo a expressão utilizada para o cálculo do valor deste recalque dada por:

$$d = \frac{S \cdot P \cdot Fr}{SPT_{médio}^{0,87} \cdot (1 + 0,4 \cdot {D_r}/{B})}$$

Com:

d – recalque vertical (cm);

S – o coeficiente de recalque (cm³/kgf), conforme Figura 5.4;

Dr – profundidade da fundação (m);

B – largura da fundação (m);

P – pressão aplicada pela fundação sobre o solo (kgf/cm²);

SPTmédio – valor médio obtido conforme descrito e exemplificado na Figura 5.2;

Fr – fator de redução, conforme Tabela 5.10;

DS – espessura entre a cota de assentamento da fundação e a cota do indeslocável (m);

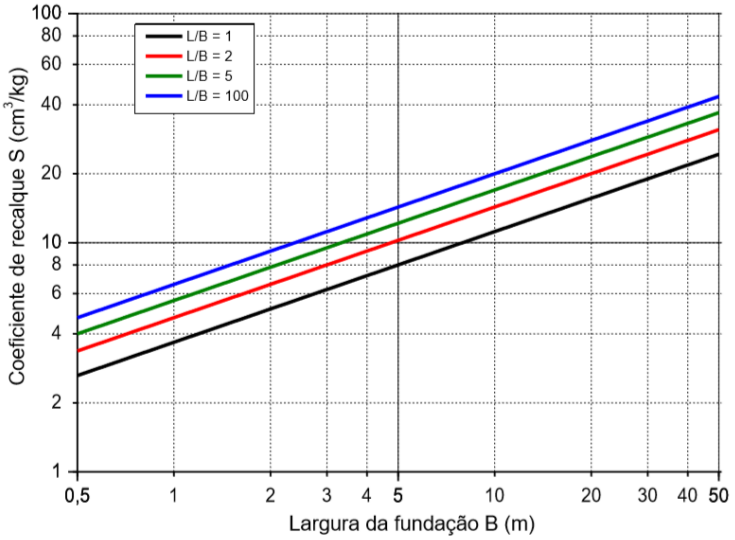


Figura 5.4 – Relação entre o coeficiente de recalque versus largura da fundação do método de Schultze & Sherif.

Ds / B \ L / B	1	2	5	100
≧ 2	1	1	1	1
1,5	0,91	0,89	0,87	0,85
1,0	0,76	0,72	0,69	0,65
0,5	0,52	0,48	0,43	0,39

Tabela 5.10 – Valores dos fatores de redução - Fr

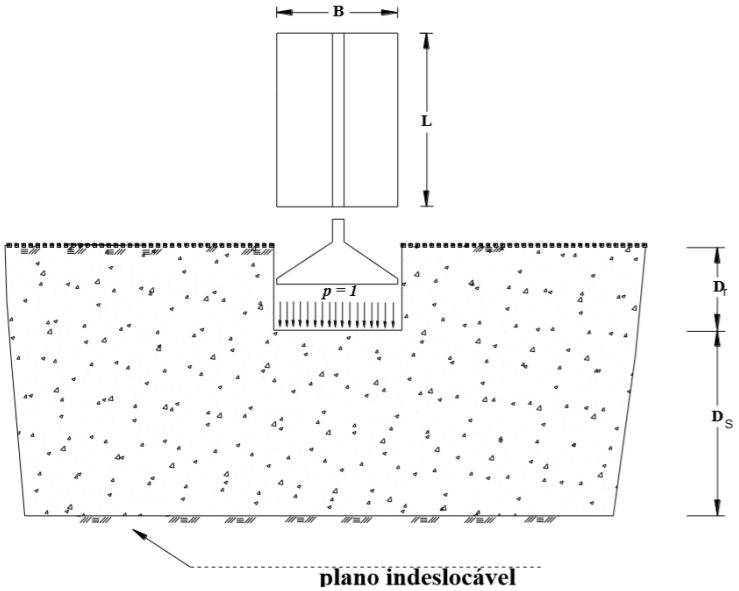


Figura 5.5 – Definição dos parâmetros empregados no método de SCHULTZE & SHERIF.

Referência bibliográfica: SCHULTZE & SHERIF (1973), MOURA (1995).

Método de PARRY

Este modelo é utilizado para a estimativa de recalques em solos arenosos, sendo a expressão utilizada para o cálculo do valor deste recalque dada por:

$$d = \frac{\overline{SPT}_{Parry}}{B \cdot a \cdot C_W \cdot C_D \cdot C_T}$$

Com:

d – recalque vertical (m);

$\overline{SPT}_{Parry}$ – valor médio do SPT;

B – largura da fundação (m), vide Figura 5.6;

a – constante igual a 3x10– 4 (m²/kN);

CD – coeficiente de influência da profundidade, vide figura 5.7;

CT – coeficiente de correção da espessura da camada compressível, vide Figura 5.8;

CW – coeficiente de correção da influência do lençol freático, veja relações a seguir.

O valor de $\overline{SPT}_{Parry}$ é obtido mediante o emprego da seguinte relação:

$$\overline{SPT}_{Parry} = \frac{3 \cdot N_1 + 2 \cdot N_2 + N_3}{6}$$

onde se deve considerar os valores de N1, N2 e N3 conforme esquematizado na Figura 5.9.

Os valores de CW são dados de acordo com as expressões abaixo:

$$C_W = 1 + \frac{D_w}{D_e + 0{,}75 \cdot B}$$

quando $0 \le D_w \le D_e$

$$C_W = 1 + \frac{D_w \cdot (2 \cdot B + D_e - D_w)}{2 \cdot B \cdot (D_e + 0{,}75 \cdot B)}$$

quando $D_e < D_w \le 2 \cdot B$

$$C_W = 1$$

quando $2 \cdot B < D_w$

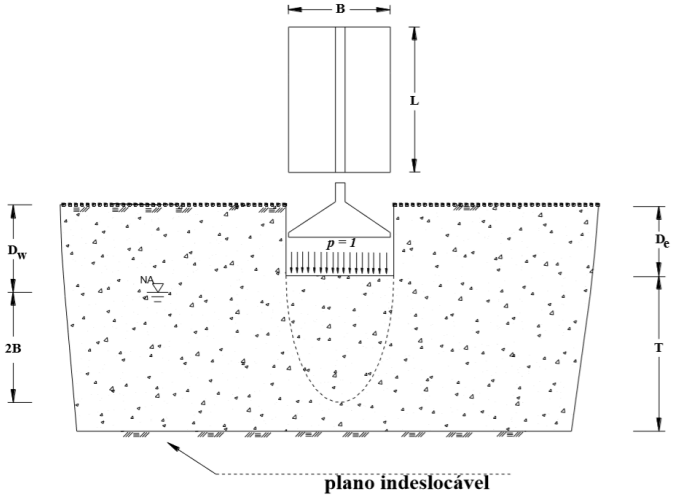


Figura 5.6 – Definição dos parâmetros empregados no método de Parry.

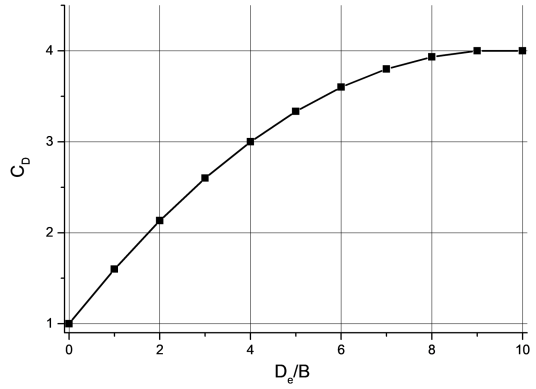


Figura 5.7 – Coeficiente de influência da profundidade, PARRY (1971).

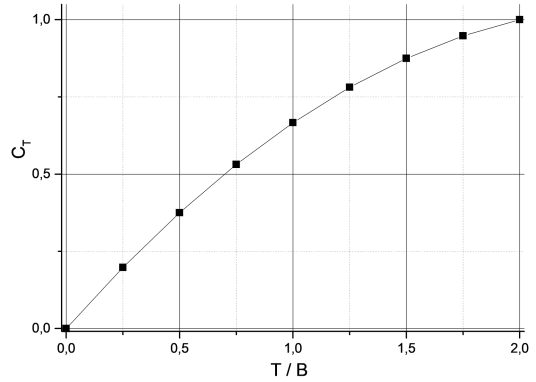


Figura 5.8 – Coeficiente de correção da espessura da camada compressível, PARRY (1971).

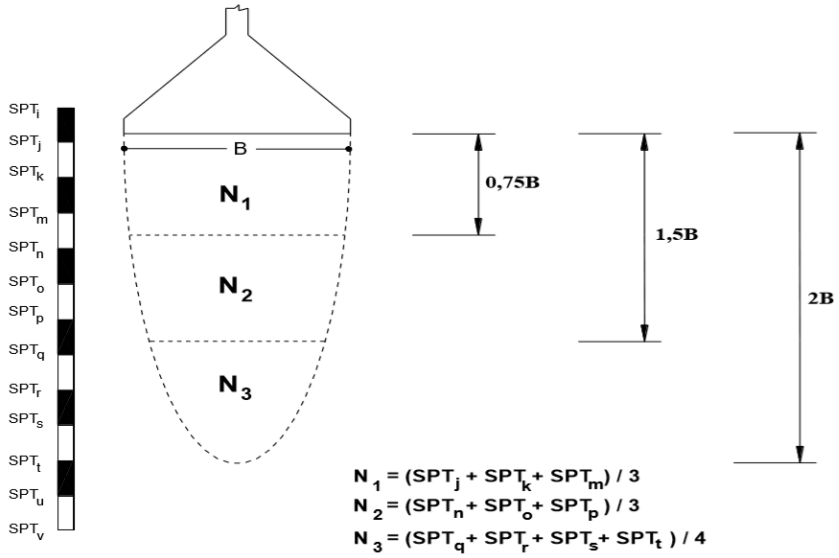


Figura 5.9 – Exemplificação do cálculo do valor médio do SPT dentro do bulbo de pressões para o método de PARRY.

Referência bibliográfica: PARRY (1971), PARRY (1978), MOURA (1995).

Método de BOUSSINESQ

Neste método, calcula-se o recalque do meio elástico mediante a expressão de BOUSSINESQ, aplicada a uma placa circular admitida rígida e submetida a uma pressão constante. A relação é dada por:

$$k_v = \frac{2 \cdot E_0}{R \cdot \pi \cdot (1 - \nu^2)} \quad (\text{kgf/cm}^3)$$

Com:

E0 : módulo edométrico do solo, obtido conforme a tabela 5.11;

R: raio da placa de fundação, para as fundações retangulares, usou-se um raio equivalente (cm);

ν: coeficiente de Poisson, obtido conforme tabela 5.7.

Descrição do tipo de solo	E0 (kgf/cm²)
Turfa	5
Argila molhada	40
Argila plástica	80
Argila endurecida – plástica	150
Areia solta	200
Areia compacta	800

Tabela 5.11 – Valores do módulo edométrico sugeridos por CESTELLI GUIDI (Moraes, 1981)

Referência bibliográfica: MORAES (1981).

Método de RAUSCH & CESTELLI GUIDI

Neste método os valores de Kv (kgf/cm3) são obtidos mediante o uso da expressão:

$$k_v = \frac{E_0}{f \cdot \sqrt{F}} \quad (\text{tf/m}^3)$$

Com:

E0: módulo edométrico do solo, obtido conforme a tabela 5.11;

f: coeficiente adimensional que depende da área da fundação, de valor admitido constante igual a 0,4;

F: área da fundação em m².

Referência bibliográfica: MORAES (1981).

Módulo Edométrico – Tabelas

Neste método, o recalque é estimado com o uso da expressão:

$$d = \sum_{i=k}^{NSPT} \frac{\Delta\sigma_i \cdot H_i}{(E_0)_i}$$

Com:

NSPT: número total de golpes medidos na sondagem;

k: primeira camada subjacente a cota de assentamento da fundação;

$\Delta\sigma_i$: valor da tensão na cota i que resulta da aplicação da pressão unitária na cota k;

Hi: espessura da camada i, que é igual a 1m;

$(E_0)_i$: módulo edométrico da camada i do solo, obtido conforme a tabela 5.11.

A expressão acima indica que se deve calcular a contribuição de cada camada para o recalque total. Assim, em função da pressão unitária admitida aplicada na cota de assentamento da fundação, obtêm-se a tensão mobilizada ao longo de todas as camadas subjacentes, bem como o seu módulo edométrico e sua espessura. Admite-se a espessura como a distância entre a medida de um SPT e seu adjacente, ou seja, igual a 1m.

Com a medida final do recalque e admitindo uma pressão unitária aplicada, pode-se chegar ao valor do módulo de reação vertical, usando a definição de Winkler:

$$k_v = P/d = 1/d$$

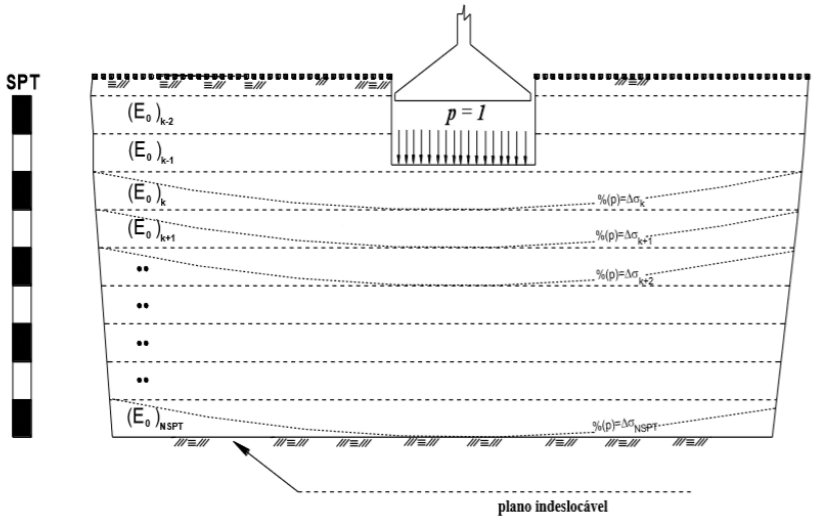


Figura 5.10 – Exemplificação dos parâmetros empregados no método Módulo Edométrico.

É possível fazer a determinação da propagação de tensões ao longo das camadas por três procedimentos, os quais são usados no SISEs:

i) método Simplificado;

ii) método de Boussinesq;

iii) método de Love.

Cada um deles é descrito a seguir.

i) Método Simplificado

A propagação da tensão é feita tomando-se como hipótese um decréscimo linear de seu valor ao longo da profundidade, de razão definida a priori pelo usuário. Assim, seja a Figura 5.11, a tensão aplicada na base da fundação é dada por:

$$\sigma_0 = F/B \cdot L$$

Ao longo da profundidade esta tensão é propagada linearmente, valendo para uma cota genérica z:

$$\Delta\sigma_Z = \frac{F}{\left(B + \frac{2 \cdot Z}{X}\right) \cdot \left(L + \frac{2 \cdot Z}{X}\right)} = \sigma_0 \cdot \frac{B \cdot L}{\left(B + \frac{2 \cdot Z}{X}\right) \cdot \left(L + \frac{2 \cdot Z}{X}\right)}$$

O valor da variável "X" é fornecido no arquivo de critérios de projeto sendo que $\frac{B \cdot L}{\left(B + \frac{2 \cdot Z}{X}\right) \cdot \left(L + \frac{2 \cdot Z}{X}\right)} \leq 1$ e indica o índice de propagação da tensão ao longo da profundidade.

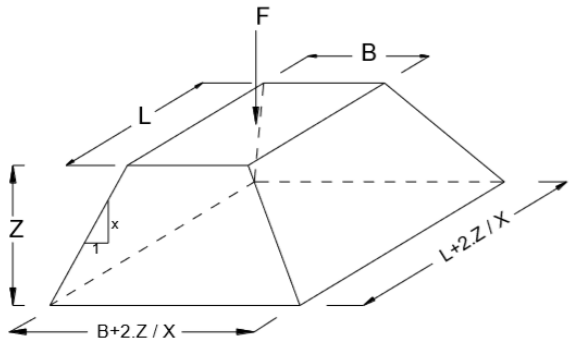


Figura 5.11 – Propagação de tensão com hipótese de decréscimo linear.

ii) Método de Boussinesq

Em BOUSSINESQ (1885) são apresentadas primeiramente as expressões, obtidas via resolução das relações da elasticidade, para cálculo de deslocamentos e tensões dentro de um meio homogêneo, elástico e semi-infinito mobilizados ao se aplicar uma força vertical concentrada na superfície livre deste meio. A partir de então vários autores generalizaram estas expressões, considerando casos como pressões distribuídas em uma área retangular, circular, parabólica, cônico, etc.

Assim, têm-se as expressões de HOLL (1940) que apresenta as relações de tensões e deslocamentos mobilizados no meio em conseqüência de um carregamento vertical, retangular e uniforme aplicado na superfície, conforme exemplificado na Figura 5.12 indicado na expressão abaixo:

$$\Delta\sigma_z(h) = \frac{p}{2\cdot\pi}\cdot\left\{arctg\left[\frac{L\cdot B}{h\cdot R_3}+\frac{L\cdot B\cdot h}{R_3}\cdot\left(\frac{1}{R_1^2}+\frac{1}{R_2^2}\right)\right]\right\}$$

Com:

$$R_1 = \sqrt{\left(L^2+h^2\right)}$$
$$R_2 = \sqrt{\left(B^2+h^2\right)}$$
$$R_3 = \sqrt{L^2+B^2+h^2}$$

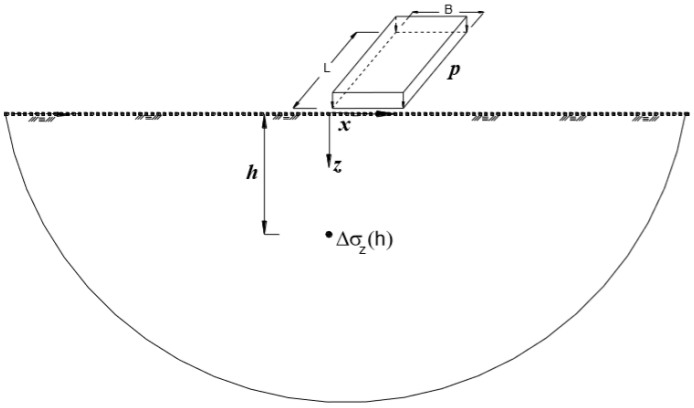


Figura 5.12 – Meio elástico, homogêneo e semi-infinito sujeito a um carregamento vertical, retangular e uniforme.

Referência bibliográfica: BOUSSINESQ (1885), HOLL (1940), POULOS & DAVIS (1974).

iii) Método de Love

LOVE (1945) apresentou as relações obtidas pela teoria da elasticidade, também derivadas de BOUSSINESQ (1885), para o caso da aplicação de um carregamento vertical, circular e uniforme, onde a expressão para a tensão na direção z é dada por:

$$\Delta\sigma_z(h) = p \cdot \left\{ 1 - \left[\frac{1}{1 + \left(a/h\right)^2} \right]^{3/2} \right\}$$

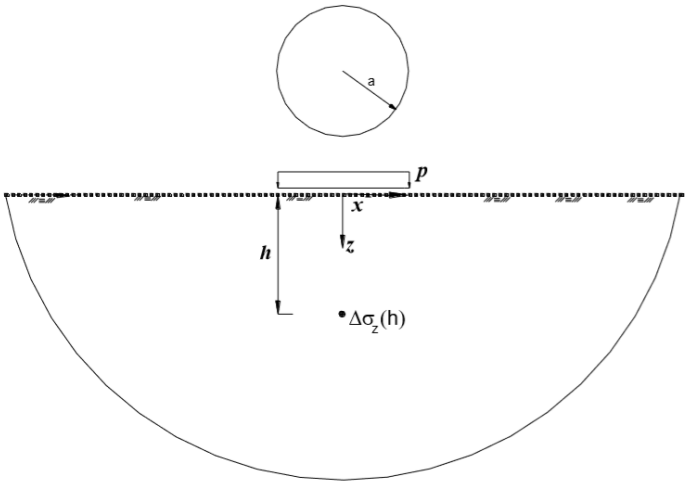


Figura 5.13 – Meio elástico, homogêneo e semi-infinito sujeito a um carregamento vertical, circular e uniforme.

Módulo Edométrico – SPT

Este método é similar ao apresentado no item 5.4.8, mas o módulo edométrico é calculado mediante uma correlação com o número de golpes, o SPT, o qual fora proposto por SCHULTZE & MENZENBACH (1961). A relação é dada por:

$$\left(E_0\right)_i = \left(C_1 + C_2 \cdot SPT\right)_i$$

onde i é uma camada genérica do maciço. As constantes C1 e C2 são indicadas na tabela 5.12.

Descrição do tipo de solo	C1	C2
Areia fina abaixo do lençol de água	71	4,9
Areia fina acima do lençol de água	52	3,3
Areia	39	4,5
Areia argilosa	43,8	11,8
Areia e argila	38	10,5
Areia fofa	24	5,3

Tabela 5.12 – Constantes (bar/golpe) usadas na determinação do módulo edométrico mediante o SPT

Referência bibliográfica: SCHULTZE & MENZENBACH (1961).

Resumo dos Diversos Métodos – Recalque Vertical

Abaixo é apresentada uma tabela resumindo os diversos métodos para cálculo do Coeficiente de Reação Vertical com algumas características importantes de cada um, tais como: consideração de camadas, propagação de tensões, associação de camadas, grau de dependência do SPT, etc. Esta tabela tem o objetivo de auxiliar a seleção do método desejado e apresentar o número de variáveis a serem definidas na associação às camadas da sondagem.

Método para cálculo do CRV	Tipo Solo	Considera Diversas Camadas?	Propagação de Tensões	Associa-ção Camada Sondagem pelo SPT	Associação Camada Sondagem pelo Titulo	Variáveis a definir por camada	Dependência do Método / SPT
Elasticidade Valor Típico	Areia Argila	Sim-St/Po	Não	Sim	Não	---	Total
	Areia Argila Outro	Sim-St/Po	Não	Não	Sim	E, Ni	Nenhum
Elasticidade Schmertmann	Qquer	Sim-St/Po	Não	Sim	Sim	K e Ni	Parcial
Elasticidade Teixeira Godoy	Qquer	Sim-St/Po	Não	Sim	Sim	Alfa, KNi	Parcial
Schultze &Sherif	Areia	Sim-Bulbo	Não	Sim	Não	---	Total
Parry	Areia	Sim-Bulbo	Não	Sim	Não	---	Total
Boussinesq	Qquer	Não	Não	Não	Sim	Eo e Ni	Nenhum
Rausch & Cestelli Guidi	Qquer	Não	Não	Não	Sim	Eo	Nenhum
Módulo Edométrico Tabelas	Qquer	Sim	Sim	Não	Sim	Eo	Nenhum
Módulo EdométricoSPT	Qquer	Sim	Sim	Sim	Sim	C1 e C2	Parcial

St/Po: Recalque através de proposição por Steinbrenner, Poulos (1967)