

### **3**

## **Análises probabilísticas associadas a previsões de recalques**

### **3.1.**

#### **Introdução**

O presente capítulo versa sobre a aplicação de análises probabilísticas em previsões de recalques. Inicialmente, são desenvolvidos dois métodos probabilísticos para estimarem-se probabilidades associadas a recalques edométricos de uma camada de argila mole solicitada por um aterro. Em seguida, são realizadas estimativas de probabilidades referentes a recalques imediatos de fundações superficiais em areia. Neste segundo caso, é proposta uma nova metodologia probabilística.

Uma análise dos resultados e uma apreciação sobre a nova metodologia probabilística concluem o capítulo.

### **3.2.**

#### **Análise probabilística aplicada a previsões de recalques edométricos**

Para aplicarem-se os métodos probabilísticos do Segundo Momento e das Estimativas Pontuais em previsões de recalques edométricos, é utilizado um exemplo descrito por Duncan (1999), trata-se de uma camada de argila mole solicitada por um aterro, de acordo com a figura 3.1. Os valores de média e desvio padrão dos parâmetros geotécnicos pertinentes às previsões de recalque são mostrados na tabela 3.1.

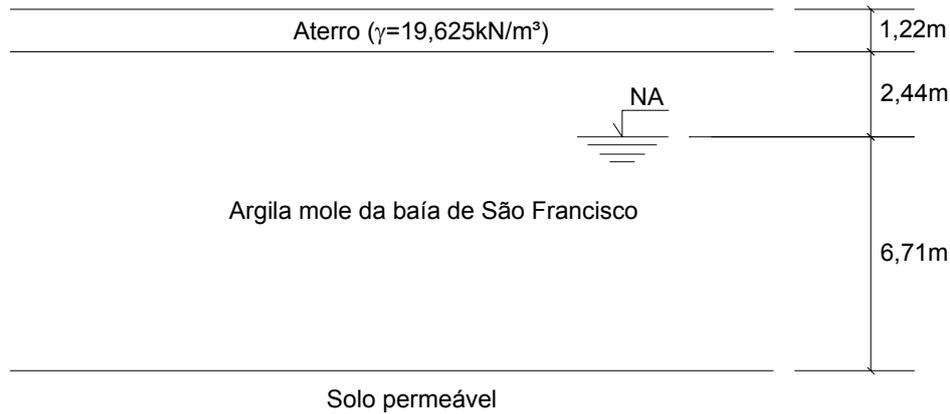


Figura 3.1. Perfil geotécnico e carregamento (aterro), Duncan (1999)

Tabela 3.1. Médias e desvios padrão dos parâmetros da argila mole, Duncan (1999)

Parâmetro	Média	Desvio Padrão
$Cc/(1+e)$	0,340	0,034
$Cr/(1+e)$	0,068	0,019
OCR	1,26	0,44
$\gamma_{\text{nat}}$ (kN/m <sup>3</sup> )	15,00	1,05

Onde:

$Cc$  = índice de compressão

$e$  = índice de vazios

$Cr$  = índice de recompressão

OCR = razão de sobre-adensamento

$\gamma_{\text{nat}}$  = peso específico natural

### 3.2.1. Aplicação do Método do Segundo Momento

Para o desenvolvimento do Método do Segundo Momento são adotados como variáveis aleatórias independentes os parâmetros geotécnicos descritos na tabela 3.1. A função de desempenho ou variável aleatória dependente é o recalque ( $\rho$ ), que de acordo com o acréscimo de tensão ( $\Delta\sigma$ ), com a tensão efetiva inicial ( $\sigma'_0$ ) e com a tensão de pré-adensamento ( $\sigma'_p$ ), pode ser estimado com base na equação 3.1, com parcelas de recompressão e de compressão virgem, ou pela equação 3.2, correspondente simplesmente a recalques de recompressão, ou através da equação 3.3, apenas para recalques de compressão virgem.

$$\rho = H \left[ \frac{Cr}{1+e} \log \left( \frac{\sigma'_p}{\sigma'_0} \right) + \frac{Cc}{1+e} \log \left( \frac{\sigma'_0 + \Delta\sigma}{\sigma'_p} \right) \right] \quad [3.1]$$

$$\rho = H \left[ \frac{Cr}{1+e} \log \left( \frac{\sigma'_0 + \Delta\sigma}{\sigma'_0} \right) \right] \quad [3.2]$$

$$\rho = H \left[ \frac{Cc}{1+e} \log \left( \frac{\sigma'_0 + \Delta\sigma}{\sigma'_0} \right) \right] \quad [3.3]$$

onde: H = espessura da camada

A previsão determinística do recalque é feita com base nos valores médios dos parâmetros geotécnicos, dividindo-se a camada de argila mole em duas partes, uma acima e outra abaixo do nível d'água. A tabela 3.2 mostra os dados determinísticos e os recalques, estimados para as duas partes da camada, que somados resultam em 0,326m.

Tabela 3.2. Dados para o cálculo determinístico do recalque

Acima do NA		Abaixo do NA	
H (m)	2,44	H (m)	6,71
$\gamma_{\text{nat}}$ (kN/m <sup>3</sup> )	15,00	$\gamma_{\text{nat}}$ (kN/m <sup>3</sup> )	15,00
Cr/(1+e)	0,068	Cr/(1+e)	0,068
Cc/(1+e)	0,340	Cc/(1+e)	0,340
$\sigma'_0$ (kPa)	30,5	$\sigma'_0$ (kPa)	53,4
OCR	1,26	OCR	1,26
$\sigma'_p$ (kPa)	38,4	$\sigma'_p$ (kPa)	67,3
$\Delta\sigma$ (kPa)	24,0	$\Delta\sigma$ (kPa)	24,0
$\rho$ (m)	0,143	$\rho$ (m)	0,183

A variância do recalque, de acordo com o Método do Segundo Momento e em função dos parâmetros geotécnicos adotados como variáveis aleatórias dependentes, é expressa por:

$$\begin{aligned}
V[\rho] = & \left[ \frac{\partial \rho}{\partial \frac{Cc}{1+e}} \right]^2 \cdot V \left[ \frac{Cc}{1+e} \right] + \left[ \frac{\partial \rho}{\partial \frac{Cr}{1+e}} \right]^2 \cdot V \left[ \frac{Cr}{1+e} \right] + \left[ \frac{\partial \rho}{\partial OCR} \right]^2 \cdot V[OCR] + \\
& + \left[ \frac{\partial \rho}{\partial \gamma_{nat}} \right]^2 \cdot V[\gamma_{nat}] \quad [3.4]
\end{aligned}$$

Para o cálculo das derivadas parciais de  $\rho$  em relação aos parâmetros geotécnicos, são feitas aproximações por diferenças divididas. Tais aproximações consistem em variar separadamente cada parâmetro, observando-se a variação correspondente de  $\rho$ . A aproximação da derivada parcial de cada parâmetro é então obtida através da razão entre a variação observada de  $\rho$  e a variação estipulada para cada parâmetro. A magnitude da variação de cada parâmetro é aplicada para atingir-se uma constância no valor de cada derivada parcial correspondente.

Portanto, para o cálculo da variância de  $\rho$  são necessárias quatro previsões de recalques. A tabela 3.3 mostra os valores dos termos necessários para o cálculo da variância de  $\rho$ .

Tabela 3.3. Termos para o cálculo da variância de  $\rho$

Parâmetros ( $x_i$ )	Variância ( $V[x_i]$ )	Varição dos Parâmetros ( $\delta x_i$ )	Varição do Recalque ( $\delta \rho_i$ )	$\delta \rho_i / \delta x_i$	$(\delta \rho_i / \delta x_i)^2 \cdot V[x_i]$
Cr/(1+e)	0,0004	0,01	-0,009	-0,925	0,0003
Cc/(1+e)	0,0012	0,5	-0,386	-0,772	0,0007
OCR	0,1951	0,002	0,002	0,856	0,1429
$\gamma_{nat}$	1,1025	0,05	0,002	0,040	0,0017
				$\Sigma$	0,1456

A influência de cada parâmetro na composição da variância do recalque é mostrada na figura 3.2. A razão de sobre-adensamento apresenta, neste caso, uma influência significativa no valor da variância de  $\rho$ , cerca de 98%. Essa influência pode ter sido gerada pela qualidade das amostras ou pela técnica de ensaio ou, eventualmente, por uma combinação desses dois fatores.

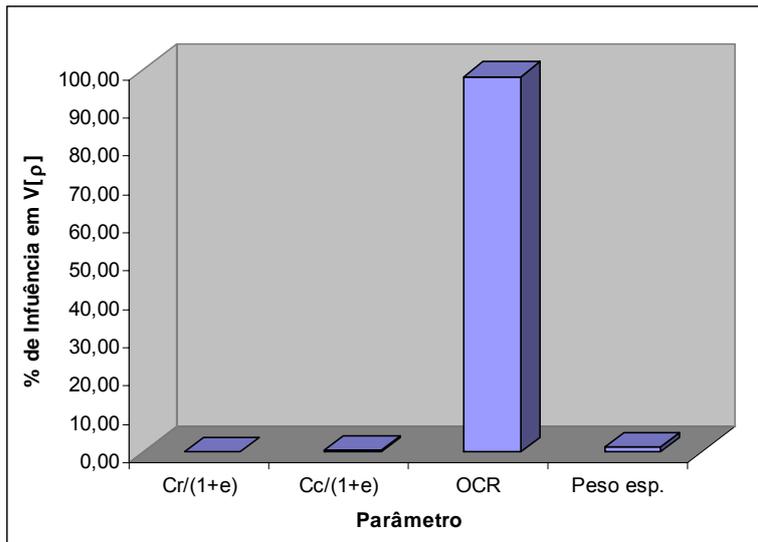


Figura 3.2. Influência dos parâmetros na variância do recalque

Com os valores de média e variância de  $\rho$  é possível obterem-se probabilidades associadas a recalques. Adotando-se uma distribuição normal para o recalque foi gerado o gráfico da figura 3.3, que mostra a variação da probabilidade de insucesso, associada ao risco do recalque ser inadmissível, de acordo com o recalque admissível ( $\rho_{adm}$ ). As probabilidades estimadas para gerar o gráfico da figura 3.3 foram obtidas por integração numérica.

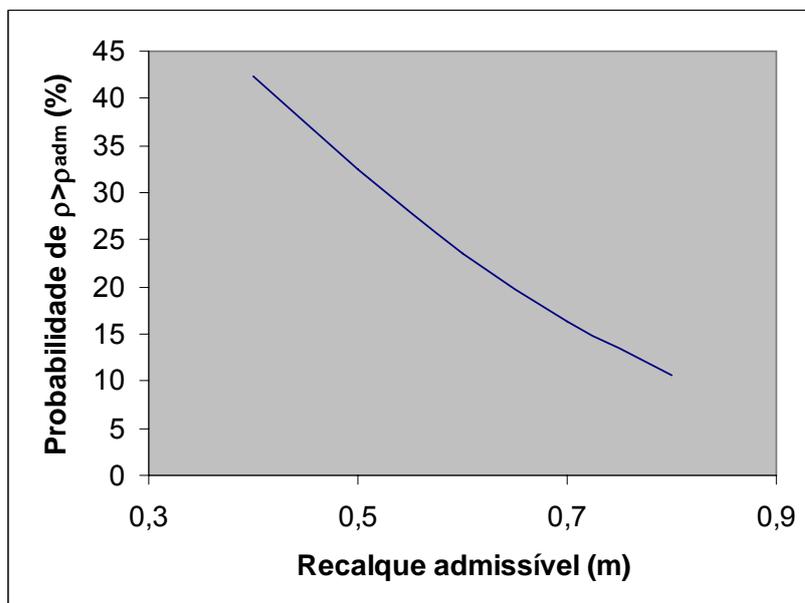


Figura 3.3. Gráfico para obtenção da probabilidade do recalque ser inadmissível com base no Método do Segundo Momento

Para ilustrar o processo de obtenção das probabilidades, apresenta-se na figura 3.4 a distribuição normal de  $\rho$  com média igual a 0,326m e variância igual a 0,146m<sup>2</sup>. Nesta figura, a área hachurada define a probabilidade de  $\rho > 0,5$ m, cujo valor é 32,4%.

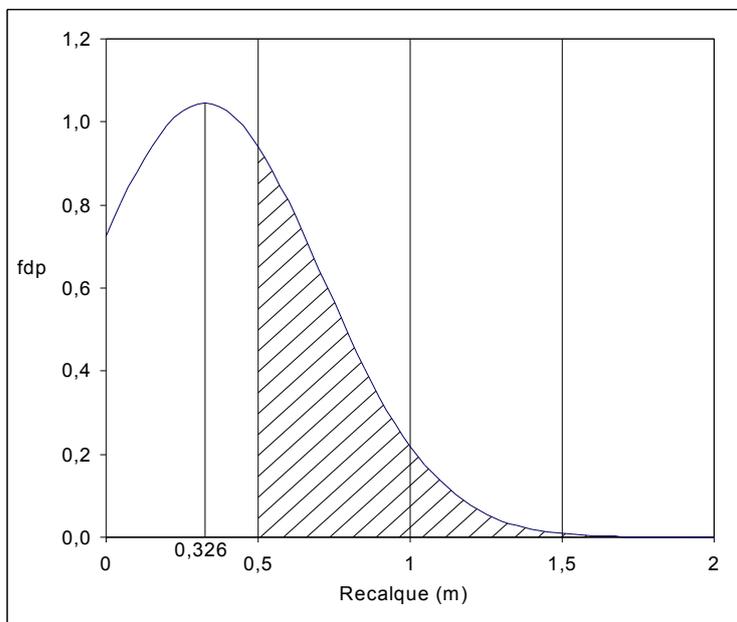


Figura 3.4. Distribuição probabilística do recalque com área hachurada para a determinação da probabilidade de  $\rho > 0,5$ m

### 3.2.2. Aplicação do Método das Estimativas Pontuais

Para a aplicação do Método das Estimativas Pontuais são necessárias dezesseis análises determinísticas, combinando-se os parâmetros, acrescidos ou subtraídos de seus respectivos desvios padrão. A tabela 3.4 compila os valores dos recalques correspondentes às dezesseis combinações.

O valor médio do recalque (0,489m) é obtido da razão entre a soma de todos os recalques e o número de combinações. A variância ( $V[\rho]=0,134\text{m}^2$ ) é determinada a partir da seguinte equação:

$$V[\rho] = \frac{\sum_{i=1}^{16} \rho_i^2}{16} - [\bar{\rho}]^2 \quad [3.5]$$

Tabela 3.4. Valores dos recalques correspondentes às dezesseis combinações

Combinação	Valores dos Parâmetros				Recalque (m)
	$\gamma_{nat}$ (kN/m <sup>3</sup> )	Cr/(1+e)	Cc/(1+e)	RSA	
1	16,05	0,087	0,374	1,7037	0,147
2	16,05	0,087	0,374	0,8203	0,887
3	16,05	0,087	0,306	1,7037	0,145
4	16,05	0,049	0,374	1,7037	0,088
5	13,95	0,087	0,374	1,7037	0,180
6	13,95	0,049	0,306	1,7037	0,108
7	13,95	0,049	0,374	0,8203	0,979
8	13,95	0,087	0,306	0,8203	0,801
9	16,05	0,049	0,306	0,8203	0,726
10	16,05	0,087	0,306	0,8203	0,726
11	13,95	0,049	0,374	1,7037	0,113
12	13,95	0,049	0,306	0,8203	0,801
13	16,05	0,049	0,374	0,8203	0,887
14	13,95	0,087	0,306	1,7037	0,175
15	16,05	0,049	0,306	1,7037	0,086
16	13,95	0,087	0,374	0,8203	0,979

Com os valores de média e variância de  $\rho$  são realizadas as estimativas de probabilidade adotando-se uma distribuição normal para o recalque. O gráfico da figura 3.5 mostra a variação da probabilidade de insucesso em função do recalque admissível.

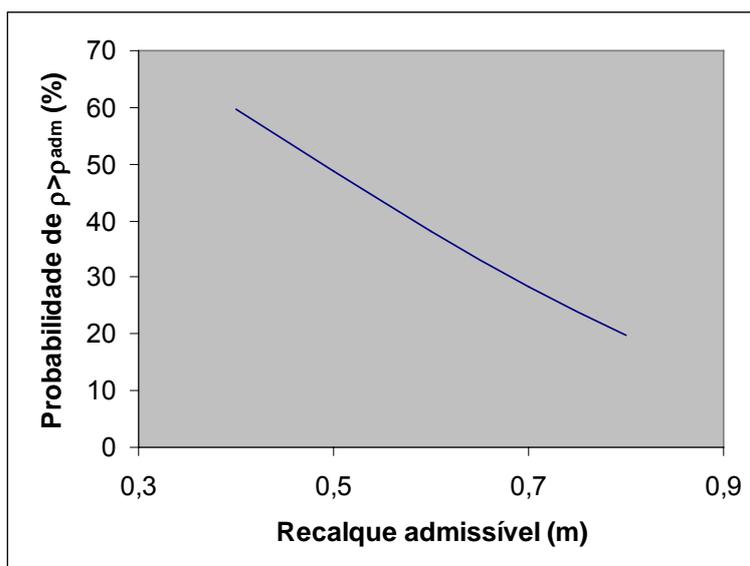


Figura 3.5. Gráfico para obtenção da probabilidade do recalque ser inadmissível com base no Método das Estimativas Pontuais

### 3.3.

#### Análise probabilística aplicada a previsões de recalques imediatos de fundações superficiais apoiadas em areia

Para apresentar uma nova metodologia probabilística, associada a previsões de recalques, são utilizados dados da dissertação de mestrado de Cordeiro (2004), intitulada “Obtenção de parâmetros geotécnicos de areias por meio de ensaios de campo e laboratório”. Tal dissertação foi desenvolvida com base em resultados obtidos em um terreno situado no bairro de Jardim Camburi, Vitória-ES.

A campanha de investigação geotécnica apresentada por Cordeiro (2004) foi executada em uma camada superficial de areia com 7m de espessura e constou de sondagens SPT, sondagens CPT, testes com penetrômetro dinâmico manual, ensaios para determinação do peso específico natural *in situ*, ensaios de caracterização e ensaios de cisalhamento direto. Nessa campanha experimental foram feitos ensaios antes do lançamento de um aterro de 4m de espessura e após a sua remoção.

O perfil geotécnico da área experimental, com base em uma sondagem de simples reconhecimento (SP05), é mostrado na figura 3.6. A tabela 3.5 apresenta resultados de quatro furos de sondagem CPT, realizados após a remoção do aterro de 4m.

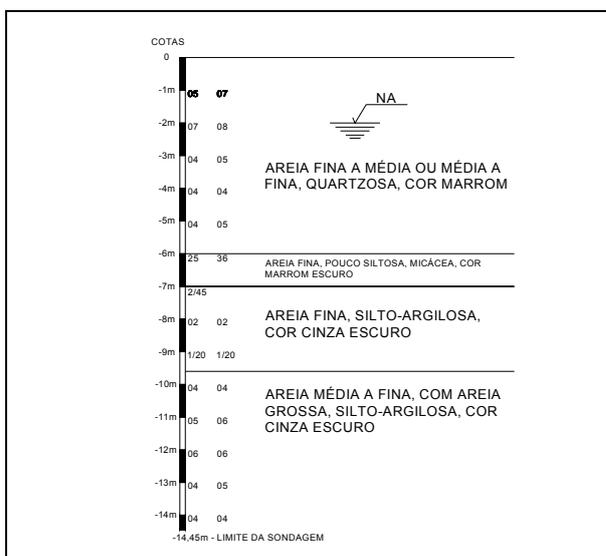


Figura 3.6. Perfil geotécnico da área experimental, Cordeiro (2004)

Tabela 3.5. Resultados dos ensaios CPT realizados após a remoção do aterro, Cordeiro (2004)

Profundidade (m)	Resistência de ponta, $q_c$ (MPa)			
	CPT1A	CPT2A	CPT3A	CPT4A
0,25	4,38	7,67	6,57	7,45
0,50	9,86	10,95	7,67	11,83
0,75	9,86	10,95	8,76	10,95
1,00	8,32	8,21	8,54	10,51
1,25	8,32	7,12	6,57	10,08
1,50	8,76	7,45	6,35	9,86
1,75	7,67	7,23	6,79	7,01
2,00	6,13	4,16	4,60	4,82
2,25	4,38	2,85	1,75	3,50
2,50	3,50	4,16	1,10	2,19
2,75	3,72	3,07	3,07	2,63
3,00	6,35	4,38	4,16	2,85
3,25	8,54	6,13	5,48	4,38
3,50	8,76	6,46	5,70	5,26
3,75	7,67	6,13	4,38	4,38
4,00	6,57	5,04	2,63	2,41
4,25	6,35	4,38	3,07	2,41
4,50	4,16	5,04	4,16	3,50
4,75	4,38	2,63	5,48	3,50
5,00	3,29	4,82	6,13	8,32
5,25	2,41	5,91	4,60	14,68
5,50	1,86	3,07	8,76	13,14
5,75	2,41	15,33	20,59	15,77
6,00	11,50	27,93	20,59	26,29
6,25	18,62	23,00	23,22	24,10
6,50	12,05	24,10	24,10	26,29

Os cálculos determinísticos e probabilísticos, mostrados a seguir, são feitos para cargas incidentes em 23 pilares de um edifício típico do bairro de Jardim Camburi, Vitória-ES. Localizado próximo ao terreno estudado por Cordeiro (2004), tal edifício possui um pavimento térreo, um pilotis, seis pavimentos tipo e dois pavimentos de cobertura, conforme mostra a figura 3.7. As cargas dos pilares são transmitidas ao terreno por meio de sapatas isoladas, embutidas 2m na camada de areia superficial mostrada na figura 3.6, todas com uma tensão aplicada de 200 kPa.

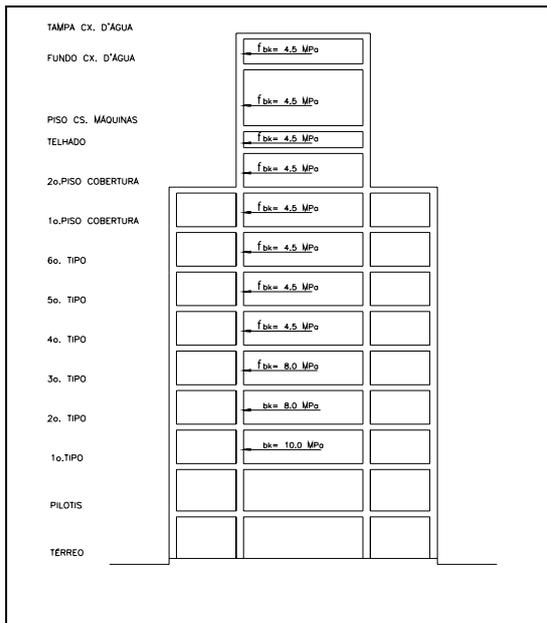


Figura 3.7. Edifício típico do bairro de Jardim Camburi, Vitória-ES

### 3.3.1. Análises determinísticas

A função de desempenho para previsões de recalques é neste caso representada pelo método semi-empírico de Schmertmann et al. (1978), descrito no item a seguir. No item 3.3.1.2 são apresentados os valores dos recalques da camada de areia solicitada pelo edifício típico.

#### 3.3.1.1. Método de Schmertmann

A partir de evidências experimentais, soluções determinísticas da teoria da elasticidade linear e resultados numéricos através do método dos elementos finitos, Schmertmann (1970) apresentou um método para estimar o recalque de fundações superficiais apoiadas em areias, que posteriormente (Schmertmann et al., 1978) sofreu pequenas adequações. O método baseou-se na distribuição de um fator de influência para recalques ( $I_\varepsilon$ ) sob o centro de uma fundação superficial, circular e rígida. Este fator foi definido como:

$$I_\varepsilon = \frac{\varepsilon_z E}{q} \quad [3.6]$$

onde:

$\varepsilon_z$  = deformação específica vertical

$E$  = módulo de elasticidade do solo de fundação

$q$  = tensão imposta ao solo pela fundação

A figura 3.8 apresenta a distribuição do fator de influência segundo a versão final do método de Schmertmann et al (1978), onde o fator de influência máximo situa-se a uma profundidade igual a  $B/2$  ( $B$  = diâmetro da sapata) e se anula a  $2B$ , para sapatas circulares ou quadradas. No caso de sapatas corridas o fator de influência máximo se dá a uma profundidade igual a  $B$  e se anula a  $4B$ .

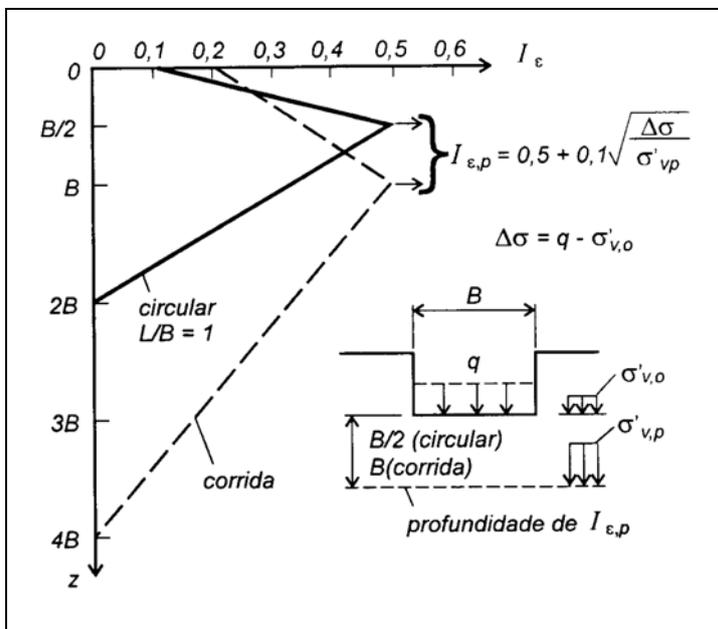


Figura 3.8. Distribuição do fator de influência (Schmertmann et al., 1978)

Nessa distribuição, o fator de influência máximo é função do acréscimo de tensão ( $\Delta\sigma$ ) em relação à tensão geostática efetiva no nível do pico ( $\sigma'_{v,p}$ ), de acordo com:

$$I_{\varepsilon, \text{pico}} = 0,5 + 0,1 \sqrt{\frac{\Delta\sigma}{\sigma'_{v,p}}} \quad [3.7]$$

Portanto, com a distribuição do fator de influência e o conhecimento do módulo de elasticidade, o recalque ( $\rho$ ) pode ser calculado através da seguinte equação:

$$\rho = \int_0^H \varepsilon_z dz = q \int_0^{2B} \frac{I_\varepsilon}{E} dz \cong q \sum_{i=1}^n \frac{I_\varepsilon}{E} \Delta z \quad [3.8]$$

Schmertmann (1970) propôs, ainda, duas correções para o recalque, e desta forma, o recalque final ( $\rho_f$ ), passou a ser:

$$\rho_f = \rho C_1 C_2 \quad [3.9]$$

A primeira correção se deve ao embutimento da sapata no solo e vale:

$$C_1 = 1 - 0,5 \frac{\sigma'_{v,0}}{q} \quad [3.10]$$

onde  $\sigma'_{v,0}$  é a tensão geostática efetiva na profundidade de assentamento da fundação.

A segunda se deve a deformações viscosas (creep) e vale:

$$C_2 = 1 + 0,2 \log\left(\frac{t}{0,1}\right) \quad [3.11]$$

onde  $t$  é o considerado tempo (em anos) que decorre a partir da incidência do carregamento.

### 3.3.1.2. Previsões determinísticas

Utilizando o método de Schmertmann et al. (1978) foram feitas as previsões determinísticas dos recalques da camada de areia com base nos resultados dos quatro furos de sondagem CPT mostrados na tabela 3.5. Entretanto, tendo em vista que o método de Schmertmann et al. (1978) utiliza como variáveis independentes os módulos de elasticidade do solo subjacente à fundação, uma correlação empírica entre módulo de elasticidade ( $E$ ) e resistência de ponta do cone ( $q_c$ ) se faz necessária. Tal correlação pode ser expressa por:

$$E = \alpha \cdot q_c \quad [3.12]$$

Segundo Schmertmann et al. (1978) o valor de  $\alpha$  para sapatas circulares ou quadradas é igual a 2,5 e para o caso de sapatas corridas,  $\alpha$  é igual a 3,5. Todavia, o próprio Schmertmann (1978) indica que em virtude de um evidente sobre-adensamento, o recalque previsto através de seu método pode ser conservativamente reduzido à metade, o que corresponde à utilização de  $\alpha = 5$  para sapatas quadradas e circulares e  $\alpha = 7$  para sapatas corridas.

Coduto (2001) apresenta valores de  $\alpha$ , mostrados na tabela 3.6, para alguns tipos de solo.

Tabela 3.6. Valores típicos de  $\alpha$ , Coduto (2001)

Descrição	Classificação	$\alpha$
Areia limpa, normalmente adensada, sem envelhecimento (<100 anos)	SW ou SP	2,5 - 3,5
Areia limpa, normalmente adensada, envelhecida (>3000 anos)	SW ou SP	3,5 - 6,0
Areia limpa, sobre-adensada	SW ou SP	6,0 - 10,0
Areia siltosa ou areia argilosa, normalmente adensada	SM ou SC	1,5
Areia siltosa ou areia argilosa, sobre-adensada	SM ou SC	3,0

Em função do evidente sobre-adensamento da camada de areia, os resultados mostrados nas tabelas A2.1, A2.2 e A2.3 do apêndice 2 são, respectivamente, referentes a previsões de recalques para valores adotados de  $\alpha = 5$  (Schmertmann, 1978),  $\alpha = 6$  e  $\alpha = 10$  (Coduto, 2001). Portanto, são realizadas

23 estimativas de recalque, uma para cada pilar, por furo de sondagem, ou seja, para cada valor de  $\alpha$  são obtidos 92 recalques.

Os valores médios dos recalques para  $\alpha = 5$ ,  $\alpha = 6$  e  $\alpha = 10$  são, respectivamente, 15,39mm, 12,83mm e 7,70mm.

### 3.3.2. Análise probabilística

Para o cálculo dos desvios padrão dos recalques, utilizou-se a equação básica de estatística:

$$s = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(\rho_i - \bar{\rho})^2}{n-1}} \quad [3.13]$$

sendo assim, os valores dos desvios padrão correspondentes aos recalques calculados com  $\alpha = 5$ ,  $\alpha = 6$  e  $\alpha = 10$  são:  $s = 11,36\text{mm}$ ,  $s = 9,47\text{mm}$  e  $s = 5,68\text{mm}$ .

Com base num estudo de casos de obra, Terzaghi e Peck (1967) concluem que, para sapatas contínuas carregadas uniformemente e sapatas quadradas isoladas, apoiadas em areias, o recalque diferencial não excede 75% do maior recalque observado. Esses autores também afirmam que um recalque diferencial de 20 mm é aceitável para edifícios comerciais, residenciais e industriais. Portanto, para um recalque máximo de 25 mm, o recalque diferencial máximo é aceitável. As probabilidades apresentadas, a seguir, correspondem ao risco do recalque previsto ser superior a um recalque admissível.

Adotando-se uma distribuição normal, as probabilidades de  $\rho \geq 25\text{mm}$  para  $\alpha = 5$ ,  $\alpha = 6$  e  $\alpha = 10$ , são respectivamente, 1:5, 1:10 e 1:840. Tais valores são correspondentes às áreas com hachuras mostradas nos gráficos das figuras 3.9, 3.10 e 3.11.

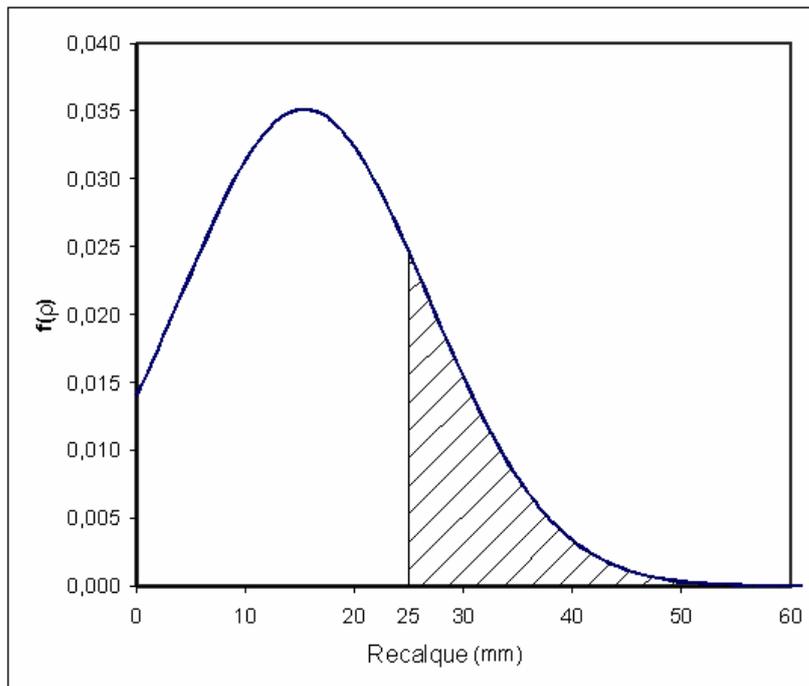


Figura 3.9. Gráfico para determinação da probabilidade de  $\rho \geq 25\text{mm}$ , com  $\alpha = 5$

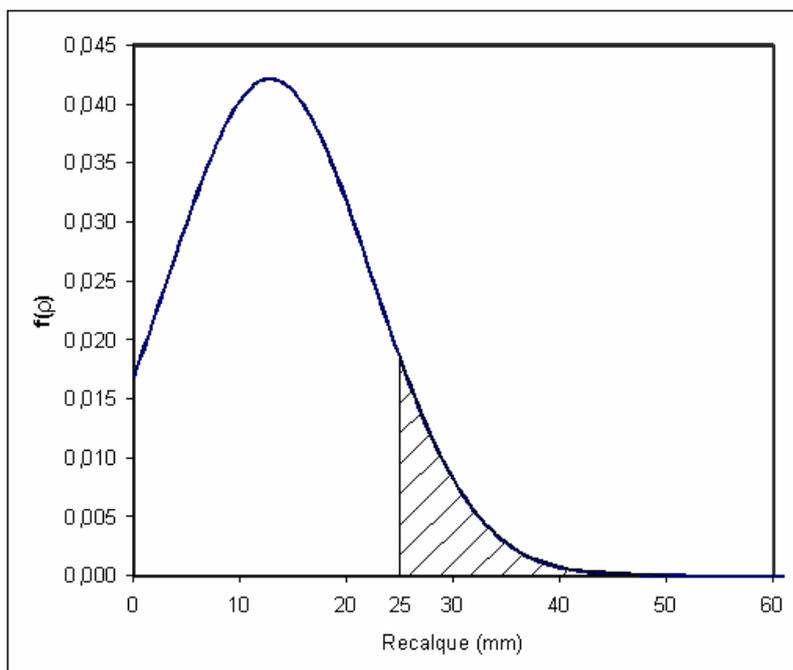


Figura 3.10. Gráfico para determinação da probabilidade de  $\rho \geq 25\text{mm}$ , com  $\alpha = 6$

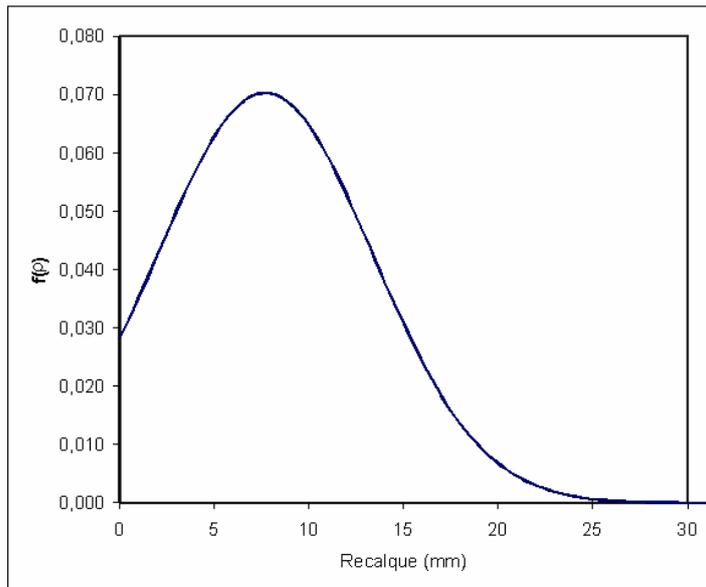


Figura 3.11. Gráfico para determinação da probabilidade de  $\rho \geq 25\text{mm}$ , com  $\alpha = 10$

Com base em uma distribuição lognormal, têm-se probabilidades de  $\rho \geq 25\text{mm}$  iguais a 1:7, 1:11 e 1:58, correspondentes a análises com  $\alpha = 5$ ,  $\alpha = 6$  e  $\alpha = 10$ .

Com o intuito de verificar se as distribuições adotadas, normal e lognormal, aproximam-se da função de frequência relativa dos 92 recalques previstos, para cada valor de  $\alpha$  foram gerados gráficos com o histograma e as distribuições adotadas. Esses gráficos são mostrados nas figuras 3.12, 3.13 e 3.14.

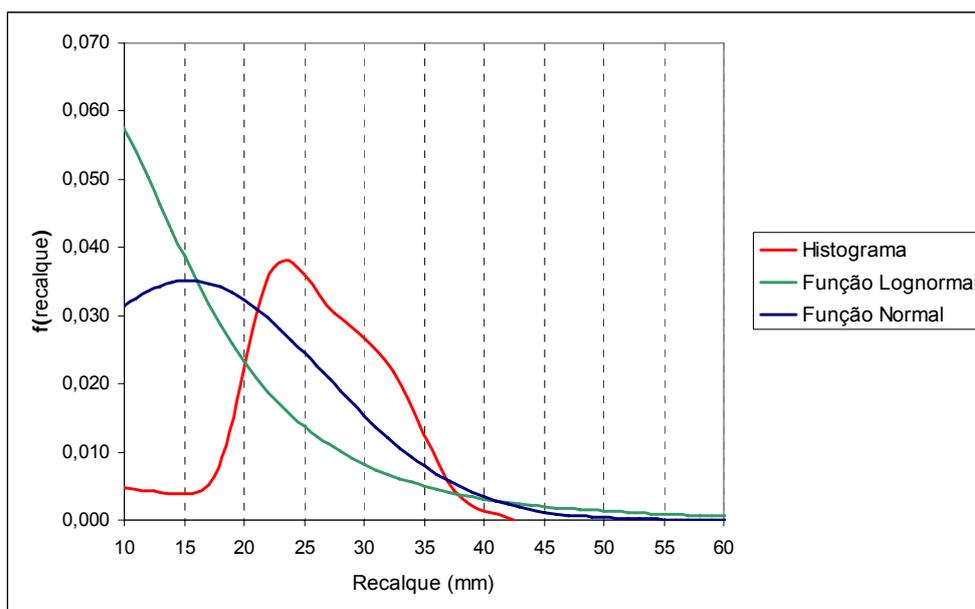


Figura 3.12. Comparação entre histograma e distribuições normal e lognormal, para  $\alpha = 5$

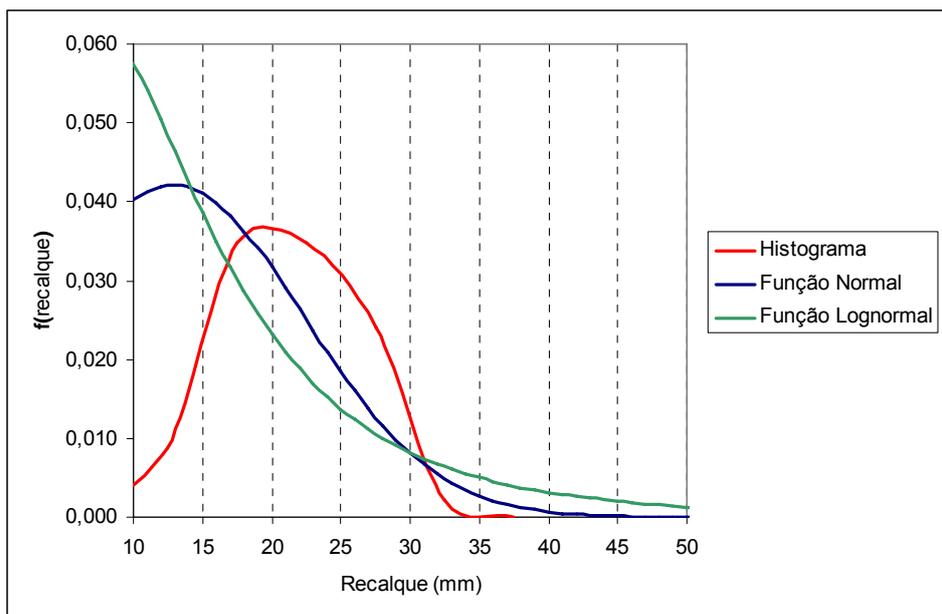


Figura 3.13. Comparação entre histograma e distribuições normal e lognormal, para  $\alpha = 6$

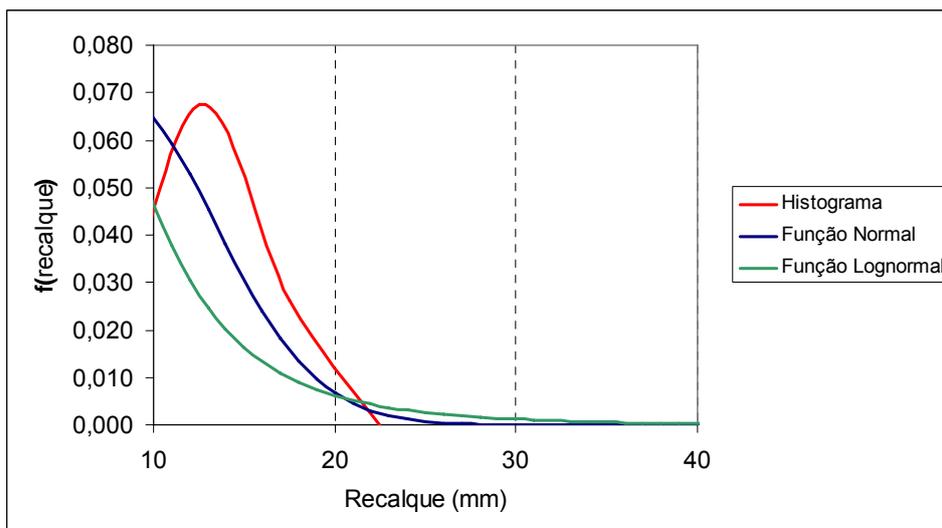


Figura 3.14. Comparação entre histograma e distribuições normal e lognormal, para  $\alpha = 10$

### 3.4. Análise dos resultados

#### 3.4.1. Análise dos resultados referentes a probabilidades associadas a recalques edométricos

As probabilidades estimadas pelo método do Segundo Momento de Primeira Ordem são inferiores às probabilidades obtidas através do método das Estimativas

Pontuais. Neste âmbito, a diferença entre os resultados apresentados para esses dois métodos diminui ao passo que os valores limites para os recalques aumentam, ou seja, para a probabilidade de  $\rho \geq 0,4\text{m}$  a diferença é de 17,3%, enquanto que, para a probabilidade de  $\rho \geq 0,8\text{m}$  a diferença entre métodos é de 9,1%. O gráfico mostrado na figura 3.15 ilustra os resultados obtidos pelos dois métodos utilizados.

Os maiores valores de probabilidade, obtidos pelo método das Estimativas Pontuais, são influenciados primordialmente pelo valor médio do recalque, haja vista que a variância estimada por este método é inferior à prevista pelo método do Segundo Momento de Primeira Ordem.

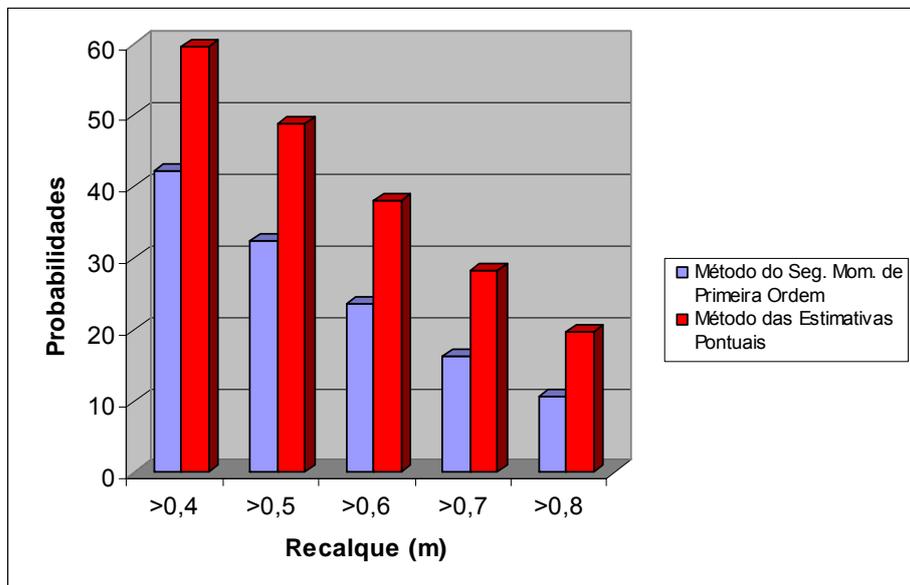


Figura 3.15. Probabilidades de recalque inadmissível segundo dois métodos probabilísticos

### 3.4.2.

#### **Análise dos resultados referentes a probabilidades de recalques imediatos de fundações superficiais em areias e apreciação da metodologia proposta**

Examinando os gráficos apresentados nas figuras 3.12, 3.13 e 3.14, verifica-se que a distribuição normal, em relação à lognormal, tem o formato que mais se aproxima do histograma de frequência relativa dos 92 recalques previstos.

Desta forma, todas as análises que seguem são feitas com base nos resultados obtidos com a adoção da distribuição normal.

Verifica-se que há uma significativa influência de  $\alpha$  na probabilidade de  $\rho \geq 25\text{mm}$ , uma variação no valor de  $\alpha$ , de 10 para 5, duplica o valor médio do recalque, enquanto que, a mesma variação de  $\alpha$  provoca um aumento de 168 vezes no valor da probabilidade de  $\rho \geq 25\text{mm}$ .

A metodologia proposta para estimarem-se probabilidades associadas a recalques imediatos de fundações superficiais em areias, sendo direta, é similar à simulação de Monte Carlo. Entretanto, a nova metodologia se diferencia da simulação de Monte Carlo na adoção das variáveis aleatórias independentes. No caso da simulação de Monte Carlo, os parâmetros são gerados de forma aleatória, com o auxílio de softwares, que têm como dados de entrada os seus valores de média e desvio padrão e a forma de suas distribuições. Para a nova metodologia utilizam-se na determinação dos valores de média e variância do recalque, os resultados reais das sondagens, representados neste caso pelos valores de  $q_c$  obtidos ao longo da profundidade, e desta forma são realizadas para cada carregamento,  $n$  análises determinísticas, onde  $n$  é o número de sondagens.

Os resultados obtidos pelo novo método são influenciados pela variabilidade espacial dos parâmetros geomecânicos do solo, pela variabilidade das cargas incidentes nos pilares e pelas tensões admissíveis atuantes no terreno.

A influência da variabilidade espacial do terreno na probabilidade de  $\rho \geq 25\text{mm}$  é evidente. Se o solo fosse horizontalmente homogêneo, representado pelos valores de  $q_c$  obtidos em CPT1A, por exemplo, utilizando-se todas as tensões iguais a 200 kPa com  $\alpha = 5$ , a probabilidade de  $\rho \geq 25\text{mm}$  decresceria, em relação à situação de heterogeneidade espacial, de 1:5 para 1:9 e no caso de  $\alpha = 10$ , a probabilidade de  $\rho \geq 25\text{mm}$  decresceria de 1:840 para 1:20424. Todavia, verifica-se que mesmo com todas as tensões iguais e com o solo horizontalmente homogêneo há probabilidade de  $\rho \geq 25\text{mm}$ , tendo em vista que existe uma variabilidade de cargas incidentes nos pilares. As dimensões das sapatas,

dependentes das cargas dos pilares, têm relação direta com a profundidade de influência dos recalques, que segundo a teoria da elasticidade é igual a duas vezes a dimensão em planta da sapata com geometria quadrada. Desta forma, para pilares com cargas diferentes, transmitindo ao terreno tensões iguais, têm-se sapatas com diferentes dimensões e, conseqüentemente, são influenciadas profundidades diferentes com diferentes módulos de elasticidade. Finalmente, mesmo com o solo horizontalmente homogêneo, recalques diferenciais e probabilidades de  $\rho \geq 25\text{mm}$  são gerados pela variabilidade de carga nos pilares.

No caso estudado, se fossem utilizadas duas tensões admissíveis para as sapatas, 200 kPa e 300 kPa, respectivamente correspondentes a pilares com cargas superiores e inferiores a 300kN, a probabilidade de  $\rho \geq 25\text{mm}$  para  $\alpha = 10$  decresceria de 1:840 (com todas as tensões iguais a 200 kPa) para 1:1263. Tal fato evidencia a influência da tensão admissível aplicada sobre o terreno na análise probabilística proposta neste trabalho. Examinando as tabelas A2.4, A2.5 e A2.6 do Apêndice 2, verifica-se que com a utilização de duas tensões admissíveis, os recalques médios aumentaram, entretanto, os valores de desvio padrão dos recalques sofreram redução, gerada pela diminuição da magnitude dos recalques diferenciais, em virtude do aumento dos recalques das menores sapatas. Conclui-se que a utilização de duas ou mais tensões admissíveis contribuiria para um melhor desempenho das fundações superficiais analisadas.