

Análise Probabilística Aplicada à Previsão de Recalque por Adensamento para Fundação Direta

Ariane Cecato Cajaiba dos Santos

Mestranda, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Brasil, arianecajaiba@ufpr.br

Larissa de Brum Passini

Professora, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Brasil, larissapassini@ufpr.br

RESUMO: Diversas são as fontes de incertezas que influenciam os projetos geotécnicos, como os processos de amostragem, os ensaios e os parâmetros do solo. Neste artigo apresenta-se a aplicação da análise probabilística em previsões de recalque por adensamento. Assim, é preciso conhecer os parâmetros de compressibilidade para desenvolver projetos de engenharia com melhores soluções técnicas e com maior controle sobre as deformações do solo. Neste âmbito são analisadas estatisticamente as variáveis que influenciam as estimativas de recalques por adensamento para uma edificação assente sobre fundação direta na cidade de Santos, estado de São Paulo. O estudo se concentra em como esses parâmetros variáveis afetam as estimativas geotécnicas e a confiabilidade. A metodologia proposta consiste na aplicação de análise probabilística, com o método FORM, na equação de previsão de recalque de Terzaghi para um edifício de sete pavimentos que possui fundação em sapatas. A região apresenta uma camada superficial de areia seguida por uma espessa camada de argila mole, altamente compressível. As edificações devem ser verificadas especialmente quanto ao Estado Limite de Serviço (ELS) e ao Estado Limite Último (ELU), uma vez que a presença de solo muito deformável quando submetido a tensões induzem recalques. Por meio da análise de sensibilidade, a razão de pré-adensamento (OCR) foi o parâmetro geotécnico mais relevante no cálculo do recalque.

PALAVRAS-CHAVE: Estado limite de serviço, Fundação Superficial, Solo argiloso, Estatística, Sapata.

ABSTRACT: There are diverse sources of uncertainty which influence geotechnical projects, like sampling processes, soil rehearsals and parameters. In this article, the application of probabilistic analysis in settlement forecast by consolidation is introduced. Thus, it is necessary to know the parameters of compressibility in order to develop engineering projects with better technical solutions and greater control of the soil settlement. In this scope, there are carried out statistical analysis of variables that influence settlement rates throughout consolidation for a based building over a direct foundation in the city of Santos, in the state of São Paulo. The study focuses on how those variable parameters affect geotechnical rates and reliability. The methodology proposed consists on application of probabilistic analysis with the FORM method, in the equation of Terzaghi settlement forecast for a seven story building which possesses foundation in footings. The region presents a superficial layer of sand followed by a thick layer of soft clay, which is highly compressible. Thus, the buildings must be verified specially in relation to the Service Limit State (SLS) and Ultimate Limit State (ULS), once that the presence of deformable soil when submitted to stress leads to settlements. By means of sensitivity analysis, the over consolidation ratio (OCR) was the first most relevant geotechnical parameter in settlement calculation.

KEYWORDS: Service Limit State, Shallow foundation, Clay soil, Statistic, Footing.

1 INTRODUÇÃO

Os projetos de fundações são convencionalmente realizados seguindo a abordagem determinística, adotando-se a média para os parâmetros do solo e obtendo valores de recalques absolutos, recalques diferenciais e distorções angulares, sem levar em consideração a variação que existe em torno desses valores devido a incertezas intrínsecas ao solo, as técnicas de amostragem e ensaios disponíveis. Quando a fundação esta assente em região com presença de solo mole, ou seja, está sujeita a recalque por adensamento a análise no Estado Limite de Serviço (ELS) deve ser mais cuidadosa, pois as deformações do solo podem levar a danos estéticos, funcionais e estruturais, prejudicando o desempenho do edifício.

Assim, os Estados Limites de Serviço estão ligados a boa utilização da estrutura, já os Estados Limites Últimos (ELU) identificam as máximas cargas a qual um solo pode estar submetido sem que haja ruptura e a máxima deformação que uma estrutura pode suportar. Porém, determinar valores para recalques por adensamento é um problema complexo visto que os recalques toleráveis limites são afetados por muitos fatores como o tamanho, tipo de estrutura e interação solo-estrutura.

Neste artigo é aplicada a análise probabilística no cálculo do recalque por adensamento em fundações diretas, utilizando a equação proposta por Terzaghi e levando em consideração as variabilidades dos parâmetros nos solos. Assim, consiste em um estudo de caso envolvendo apenas uma sapata da edificação. Adotou-se como variáveis aleatórias a razão de pré-adensamento (OCR), o índice de compressão (C_c) e o índice de recompressão (C_r) e observa-se sua influência no recalque por adensamento, baseado no exemplo apresentado por DUNCAN (2000) apud RIBEIRO (2008).

2 O PROBLEMA

Um conjunto de parâmetros geotécnicos aleatórios são representados pelo vetor de variáveis aleatórias, $X = \{X_1, X_2, \dots, X_n\}$. O estado limite é quantificado pela chamada de equação de estado limite $g(X)$, definida de modo que a falha é representada por $X|g(X) \leq 0$ e a não falha é definida por $X|g(X) > 0$. A probabilidade de falha (P_f) é dada pela Equação 1: (SIACARA et al., 2020)

$$P_f = P[g(X) \leq 0] = \int_{g(X) \leq 0} f_X(x) dx \quad (1)$$

Em que,

$f_X(x)$ é a função densidade de probabilidade conjunta de x .

O método FORM – *First Order Reliability Method* - se desenvolve pela transformação das variáveis aleatórias no espaço de projeto para um espaço simétrico de variáveis normal padrão não correlacionadas. Neste espaço, é feita a busca pelo ponto sobre a equação de estado limite que mais se aproxima da origem do espaço, chamado ponto de projeto. Assim, a probabilidade de falha é estimada por $\Phi(-\beta)$, em que β é a distância entre a origem do espaço normal padrão e o ponto de projeto.

3. METODOLOGIA

3.1 Local de estudo

A edificação estudada possui 7 pavimentos e está apoiada em 18 pilares com cargas que variam de 2.930 kN a 1.5610 kN. O projeto de fundações é constituído por 6 sapatas entre sapatas corridas e sapatas isoladas com vigas de rigidez de 150 cm de altura por 50 cm de largura. Para a caracterização geotécnica foram retiradas amostras Shelby, para ensaios de caracterização e adensamento. Foram realizadas 4 sondagens de simples reconhecimento e 2 ensaios de piezocone, nos quais observou-se uma primeira camada de aterro areno argiloso com espessura de 0,5 a 1,5 metros, seguida por uma camada de areia fina siltosa cinza, com espessura variando entre 10,8 a 11,9 metros e valores de N_{spt} entre 8 e 47 e na sequência a camada de argila marinha siltosa com

18 metros de espessura e valores de N_{spt} entre 2 e 3 (OLIVEIRA, 2001). A previsão do recalque por adensamento, é analisado considerando a sapata submetida ao maior acréscimo de tensão da edificação de 7 pavimentos localizada a 800 metros da praia, na cidade de Santos, estado de São Paulo (OLIVEIRA, 2001). O problema está demonstrado na Figura 1, na qual é possível observar que trata-se de uma camada de argila mole solicitada pelo carregamento de uma sapata (S3) que recebe a carga de 1.5610 kN.

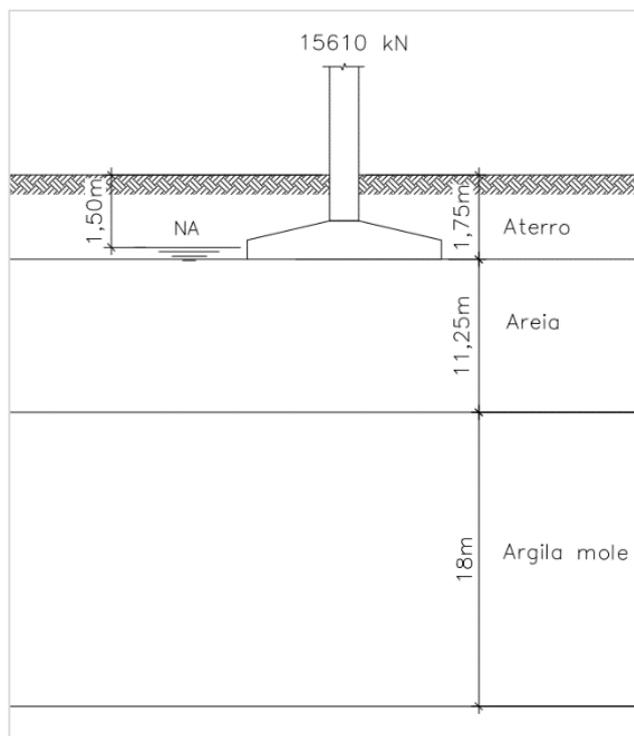


Figura 1. Perfil geotécnico e carregamento da sapata de interesse. Fonte: Os autores

3.2 Cálculo determinístico dos recalques

O recalque total é calculado, de maneira determinística, com base nos valores médios dos parâmetros geotécnicos, demonstrados na Tabela 1. Tais valores foram obtidos a partir de ensaios de caracterização e adensamento, realizados de amostras Shelby, extraídas do centro da camada de argila, a cerca de 22 m de profundidade.

Tabela 1. Dados para o cálculo do recalque.

Parâmetros	Média
H (m)	18
γ_n (kN/m ³)	14,75
e_0	2,36
σ'_{vm} (kPa)	187,50
$C_c/1 + e_0$	0,34
$C_r/1 + e_0$	0,05
$\Delta\sigma$ (kPa)	52,35
σ'_{v0} (kPa)	176,33
OCR	1,06

O recalque total final é estimado aplicando a equação de Terzaghi (Equação 2), obtendo-se um valor médio de 0,54 m para a sapata mais carregada (S3).

$$\rho = H \left[\frac{c_r}{1+e_0} \log \left(\frac{\sigma'_{vm}}{\sigma'_{v0}} \right) + \frac{c_c}{1+e_0} \log \left(\frac{\sigma'_{v0} + \Delta\sigma}{\sigma'_{vm}} \right) \right] \quad (2)$$

Em que,

H (m) é a espessura da camada de argila mole.

c_c representa o índice de compressão

e_0 é o índice de vazios inicial

σ'_{vm} representa a tensão de pré-adensamento

σ'_{v0} é a tensão efetiva inicial

c_r representa o índice de recompressão

$\Delta\sigma$ é o acréscimo de tensão no centro da camada de argila

Os recalques absolutos de todas as sapatas foram calculados a partir dos valores das cargas recebidas da superestrutura e dos ensaios de caracterização e adensamento (Tabela 1). Para comparação do recalque medido com o recalque calculado previsto (Tabela 2) o cálculo considerou o recalque no tempo, para tanto adotou-se o coeficiente de adensamento (C_v) igual a $2,1 \times 10^{-4}$ cm²/s, conforme estudo de OLIVEIRA (2001). A edificação teve os recalques monitorados pela instalação de 18 pinos de aço com rosca e para referência de nível das leituras um “*bench mark*” instalado a 53,85 metros de profundidade em camada de areia compacta. As leituras foram feitas até 8 meses após o término da obra (OLIVEIRA, 2001).

Tabela 2. Leitura de recalque medido (OLIVEIRA, 2001) e recalque calculado pela equação de Terzaghi.

Sapata	Recalque medido (cm)	Recalque calculado (cm)
S1	7,49	4,95
S2	6,56	4,35
S3	8,80	5,99
S4	7,53	4,43
S5	6,76	4,06
S6	7,43	3,95

Apresenta-se o emprego da confiabilidade na acurácia das previsões de recalque de sapatas devido ao adensamento do solo. Por meio da análise do recalque das 6 sapatas da edificação é analisado o coeficiente de variação em relação aos valores observado, uma vez que os recalques foram medidos no final da construção, ou seja, obtêm-se a variância do modelo de previsão de recalques.

3.3 Análise Probabilística FORM aplicada ao problema

Para aplicação de métodos probabilísticos deve-se considerar a média e a variância dos parâmetros geotécnicos adotados como variável aleatória. Porém, nem sempre o valor da variância é conhecido, neste caso é possível estimá-los por meio de estudos de diversos pesquisadores. Assim, os coeficientes de variação (COV) foram adotados conforme estudos de HARR (1984), KULHAWY (1992) e LACASSE; NADIM (1997) DUNCAN (2000). No desenvolvimento do FORM são adotadas as seguintes variáveis aleatórias e coeficientes de variação apresentados na Tabela 3.

Tabela 3. Variáveis aleatórias.

Variável	Símbolo	Distribuição	Coefficiente de variação (COV)
Índice de compressibilidade	$C_c / 1 + e_0$	Normal	15%
Índice de recompressão	$C_r / 1 + e_0$	Normal	15%
Razão de pré-adensamento	OCR	Normal	15%

A equação de estado limite é escrita na Equação 3, onde a falha é obtida quando $g(X) \leq 0$. Adotou-se $\sigma'_{vm} = OCR \cdot \sigma'_{v0}$:

$$g(X) = 1 - H \left[\frac{C_r}{1+e_0} \log \left(\frac{\sigma'_{vm}}{\sigma'_{v0}} \right) + \frac{C_c}{1+e_0} \log \left(\frac{\sigma'_{v0+\Delta\sigma}}{\sigma'_{vm}} \right) \right] \quad (3)$$

Com base na campanha de sondagem de simples reconhecimento, o projetista optou por apoiar o edifício em fundação direta. A fim de confirmar a opção escolhida, o proprietário solicitou um parecer técnico a consultores renomados, que alertaram para o fato de que, em 20 anos poderiam haver recalques da magnitude de até 1 m no pilar mais carregado e de 62 cm no pilar menos carregado. Esta ocorrência estaria associada a compressibilidade da camada de argila mole, caso os recalques fossem calculados com parâmetros de adensamento mais pessimistas. Para parâmetros de adensamento médios, valores de recalque chegariam a um máximo de 56 cm e 32 cm respectivamente (OLIVEIRA, 2001).

Portanto, para análise de confiabilidade realizada para sapata (S3) de interesse, ou seja, o que recebe o maior carregamento. Adotou-se recalque limite de 1 m, por ser a informação mais relevante disponível à época da construção. A aplicação do método FORM é feita pelo *software Matlab* com auxílio da estrutura *Uqlab*.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Análise de sensibilidade

O FORM possibilita realizar a análise da sensibilidade, mostrando a contribuição de cada variável aleatória na probabilidade de falha. Assim, a Figura 2 mostra a influência de cada variável na composição da variância do cálculo do recalque. A razão de pré-adensamento (OCR) exerce influência de 84%, enquanto o índice de compressão (C_c) 16% e o índice de recompressão (C_r) 0,027%.

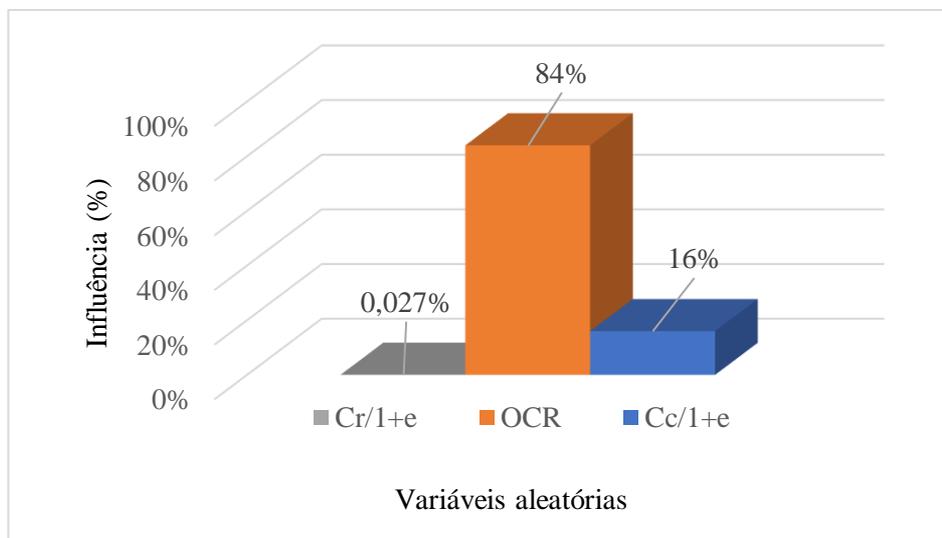


Figura 2. Influência da variável aleatória no cálculo do recalque. Fonte: Os autores

A probabilidade de o recalque calculado previsto ultrapassar o recalque limite é de aproximadamente 14%, ou seja, a probabilidade de falha (P_f) é igual a $1,43 \cdot 10^{-1}$ correspondente a um índice de confiabilidade (β) de 1,06.

O “*Probabilistic Model Code*” apresentado pelo *Join Committee on Structural Safety (JCSS)* no ano 2000 atribui índices de falha para o ELS irreversível com valores de P_f igual a 10^{-2} associado a um custo baixo em relação a medida de segurança (Tabela 4). Portanto, os valores obtidos no presente trabalho, analisado pelo método FORM, não são aceitáveis.

O JCSS (2000) também estabelece os limites de probabilidade de falha em estruturas para o ELU. Para obras com ruptura dúctil e ruína de consequência grande o valor de P_f é 10^{-4} . Assim, os valores obtidos da

análise FORM também não são aceitáveis. Pode-se, entretanto, inferir que não houve superação para o ELU e ELS visto que o prédio encontra-se em funcionamento atualmente.

Tabela 4. Índice de confiabilidade relacionado ao ELS irreversíveis JCSS (2000).

Custo Relativo à Medida de Segurança	Índice Associado (ELS irreversível)
Alto	$\beta=1,3$ ($P_f \approx 10^{-1}$)
Normal	$\beta=1,7$ ($P_f \approx 10^{-2}$)
Baixo	$\beta=2,3$ ($P_f \approx 10^{-2}$)

4.2 Recalques

A comparação dos recalque medidos com os recalques calculados previstos esta identificado na Figura 3. O coeficiente de variação (COV) associado aos valores calculados foi determinado, calculando o desvio padrão dos pontos em torno da linha em que o recalque medido (ρ_m) seria igual ao recalque calculado (ρ_c), ou seja, a linha $\rho_m = \rho_c$. Por meio da análise do recalque das 6 sapatas da edificação determinou-se que o método de Terzaghi apresenta coeficiente de variação de 62% em relação aos valores observados. Observa-se que os recalques calculados previstos foram menores que os recalques medidos.

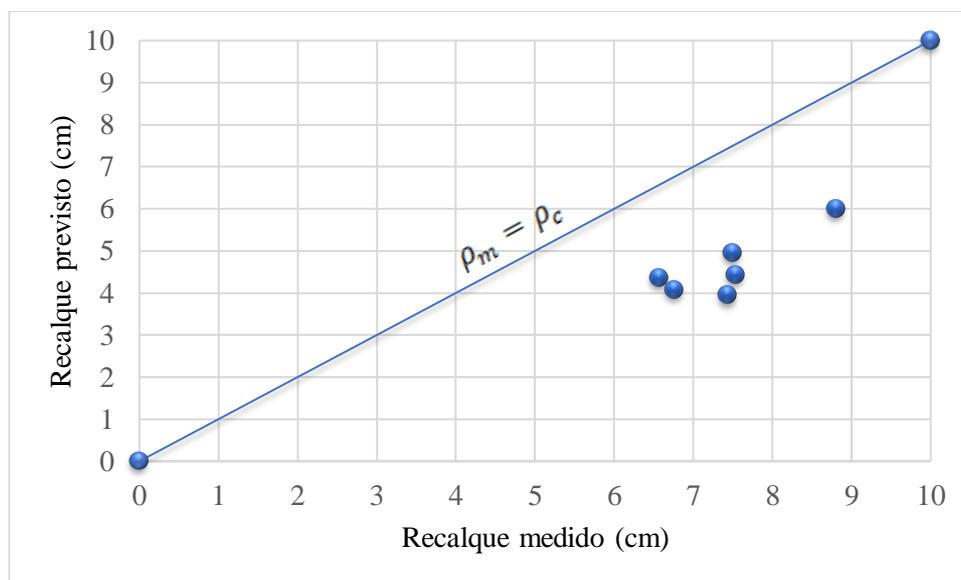


Figura 3. Comparativo entre recalque medido e calculado previsto. Fonte: Os autores

PINTO, (2006) ressalta que as condições de laboratório não são as mesmas para as situações reais de campo. Em campo, além da heterogeneidade do solo, há a possibilidade de drenagem pelas laterais da área carregada, ocasionando a dissipação da pressão neutra mais rapidamente do que as condições estabelecidas em laboratório.

Acrescenta-se também que, os recalques medidos são de pequena magnitude devido a medição realizada em curto intervalo de tempo decorrido no processo de adensamento. Assim, a leitura pode ofuscar erros expressivos. Neste caso, é importante a realização de leituras atualizadas, a fim de confrontar os recalques previstos com os recalques medidos, pois o tempo permite o desenvolvimento do adensamento do solo em campo.

5 CONCLUSÃO

Este artigo abordou a aplicação da confiabilidade a problemas de recalque por adensamento. Utilizando o método FORM na equação proposta por Terzaghi para uma edificação com fundação em sapata acentada em

camada superficial de areia, seguida de uma espessa camada de argila mole na região de Santos/SP. A análise da influência dos parâmetros na composição do cálculo do recalque demonstra que a razão de pré-adensamento (OCR) exerce uma influência significativa, cerca de 84% enquanto que o índice de compressão (C_c) tem valor em torno de 16%. A probabilidade de o recalque ultrapassar o valor adotado como limite, de cerca 1 metro, para a sapata mais carregada, considerando os parâmetros mais pessimistas do solo é de 14%, não aceitável para o ELS e ELU segundo o “*Probabilistic Model Code*” apresentado por JCSS (2000). Ressalta-se ainda, a importância de nova medição dos recalques, visto que o adensamento se desenvolve ao longo do tempo. Portanto, a nova medição pode ser comparada com o recalque previsto na fase de projeto. A análise do recalque de todas as sapatas da edificação, determinada pelo método de Terzaghi utilizado para o cálculo do recalque previsto, apresentou um coeficiente de variação de 62% em relação aos valores medidos em campo no tempo de 8 meses após o término da obra. Conclui-se que, o presente estudo contribuiu para melhor entendimento e controle dos parâmetros que contribuem no cálculo recalque por adensamento, possibilitando o desenvolvimento de projetos de engenharia com melhores soluções técnicas e segurança.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PPGEC) da Universidade Federal do Paraná (UFPR). Este trabalho foi desenvolvido com o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoas de Nível Superior-Brasil (CAPES).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- DUNCAN, J. M. 2000. Factors of Safety and Reliability in Geotechnical Engineering. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, v. v. 126, n. 4, p. 307–316.
- HARR, M. E. *Reliability-based design in civil engineering*. Shaw Lecture—Raleigh: North Carolina State University, 1984.
- Joint Committee on Structural Safety – JCSS (2000). *Probabilistic molde code*. Part I – Basis of desing. JCSS-OSTL/DIA/VROU. The Netherlands, 62
- KULHAWY, F. H. 1992. *On the evaluation of soil properties*. ASCE Geotech. Spec. Publ, n. 31, p. 95–115.
- LACASSE, S.; NADIM, F. 1997. *Uncertainties in characterising soil properties*. Norwegian Geotechnical Institute, v. 201, p. 49–75.
- OLIVEIRA, N. J. 2001. *Estudo comparativo de recalques observados e calculados utilizando a teoria de Terzaghi: o caso de um edifício situado em Santos*. Dissertação de Mestrado—São Paulo: Universidade de São Paulo.
- PINTO, C. DE S. 2006. *Curso básico de Mecânica dos Solos*. [s.l.] Oficina de Textos.
- RIBEIRO, R. C. H. 2008. *Aplicação de Probabilidade e Estatística em Análises Geotécnicas*. Tese de Doutorado—Rio de Janeiro, Brasil: Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.
- SIACARA, A. T. et al. 2020. Análise de confiabilidade de primeira ordem (FORM) aplicada à engenharia de barragens. Campinas: *ANAIS DO XX COBRAMSEG, 2022*.