

Estimativa de Recalque de Sapata Apoiada em Solo Argiloso Típico de Londrina/PR

Carlos José Marques da Costa Branco
Universidade Estadual de Londrina, Londrina, Brasil, costabranco@uel.br

Vytor Sala Zambom
Universidade Estadual de Londrina, Londrina, Brasil, vytor_zambon@hotmail.com

Victor Antonio Cancian
Universidade Estadual de Londrina, Londrina, Brasil, victorcancian@hotmail.com

Raquel Souza Teixeira
Universidade Estadual de Londrina, Londrina, Brasil, raquel@uel.br

RESUMO: Recalque de uma fundação é o deslocamento vertical para baixo sofrido pela base da fundação em relação à superfície do terreno e pode apresentar duas parcelas, denominadas recalque imediato e recalque por adensamento. Este estudo tem por finalidade, analisar o recalque final de fundação para uma obra habitacional popular típica. Para isto, foram utilizados resultados de investigação geotécnica do tipo SPT, provas de carga em mini placa e ensaios de adensamento, aplicados em fundações por sapatas para dois pilares, sendo um com a carga máxima e o outro com a carga mínima estimada para essa obra. A análise foi feita considerando a profundidade de apoio de 1 metro, num perfil geotécnico caracterizado pelos resultados obtidos no Campo Experimental de Engenharia Geotécnica (CEEG), da Universidade Estadual de Londrina (UEL). O perfil geotécnico do CEEG é considerado típico da cidade de Londrina/PR, apresentando comportamento laterítico e granulometria definida como argila siltosa de cor vermelha. Inicialmente, foram determinadas as tensões admissíveis para os métodos teórico de Terzaghi, semi-empírico, baseado nos valores do SPT, baseado na tensão admissível obtida a partir de provas de carga estáticas (PCEs) em mini placa e da pressão de pré-adensamento obtida em ensaios de adensamento. Para cada uma dessas tensões, foram estimados os respectivos recalques, imediato (Teoria da Elasticidade e PCEs) e por adensamento para ambos os pilares. A maior parcela dos recalques obtidos foi a referente ao recalque imediato, representando, no mínimo, 98% do recalque total. Em todos os casos, o recalque distorcional atendeu às prescrições da NBR-15575/2012 - Edificações habitacionais – Desempenho, exceto para as PCEs.

PALAVRAS-CHAVE: Recalque, Sapata isolada, Solo laterítico.

1 INTRODUÇÃO

O desenvolvimento do setor de habitação popular provocou o aumento significativo na demanda por obras desse tipo. Como essas unidades habitacionais são pequenas, mas executadas em grande quantidade, justifica-se a

necessidade de projetos mais racionais, adequando o tipo de fundação ao comportamento mecânico do solo.

Para tanto, o projeto deve contemplar o bom comportamento da edificação, com segurança e sem a manifestação de patologias, como as provenientes de recalques da fundação, que

podem apresentar duas parcelas. A primeira, denominada recalque imediato, decorre da mudança de forma do solo, sem variação de volume, como resposta imediata ao seu carregamento. A segunda, denominada recalque por adensamento, decorre da redução do volume do solo ao longo do tempo. Os recalques prejudiciais às obras são os diferenciais e, mais especificamente, os distorcionais, que são os diferenciais em relação ao vão compreendido.

Este trabalho tem por objetivo analisar os recalques distorcionais das fundações de dois pilares, sendo um com a carga máxima e o outro, com a carga mínima de uma edificação popular típica, obtidos por meio de alguns métodos de estimativa. Nessa análise, foi considerada a utilização de sapatas isoladas e apoiadas a 1 metro de profundidade, em um solo argiloso laterítico, característico da cidade de Londrina, representado pelo perfil geotécnico do Campo Experimental de Engenharia Geotécnica (CEEG) da Universidade Estadual de Londrina/PR (UEL). Os parâmetros geotécnicos utilizados foram obtidos a partir de ensaio de penetração padrão (SPT), de provas de carga em mini placa (Beraldo, 2012) e de ensaios de adensamento (Komori, 2012).

Inicialmente, foram determinadas as tensões admissíveis à ruptura, para os seguintes métodos:

- Teórico de Terzaghi;
- Semi-empírico, baseado nos valores do SPT;
- A partir da tensão admissível, obtida por meio das PCEs em mini placa;
- A partir da pressão de pré-adensamento do solo, obtida por meio dos ensaios de adensamento.

Para cada uma dessas tensões, foram estimados os recalques totais das sapatas dos dois pilares. Os recalques imediatos foram estimados por meio da Teoria da Elasticidade e por meio das PCEs em mini placa. Os recalques por adensamento foram calculados a partir dos resultados dos respectivos ensaios de laboratório. Por fim, foram obtidos os recalques distorcionais das fundações dos dois pilares.

2.1 Perfil geotécnico considerado

O perfil geotécnico considerado para as estimativas desse trabalho foi o característico da cidade de Londrina, representado pelo substrato de solo do CEEG. A Tabela 1 mostra o resultado da investigação do tipo SPT realizada em campo.

Tabela 1. SPT realizado no CEEG

Z (m)	N _{SPT}	Descrição do subsolo
1	3	Argila Siltosa Mole à Rija - marrom avermelhada
2	1	
3	3	
4	4	
5	4	
6	5	
7	4	
8	5	
9	6	
10	8	
11	9	
12	12	
13	10	
14	15	Argila Siltosa Rija - marrom
15	14	Silte Argiloso Rijo a Duro – marrom a róseo
15,40	24	Limite da sondagem

Fonte: Christoni e Teixeira (2013)

Dentre as características principais, referentes ao perfil, estão a profundidade elevada, variação da cor e granulometria, consistência da argila mole para silte rijo, variação do N_{SPT}, e a ausência de nível da água subterrâneo, na data do ensaio.

A Tabela 2 apresenta as características físicas desse perfil, até 5 m de profundidade.

Tabela 2. Características físicas do solo até 5 m do CEEG

Característica física	Valor
Massa específica dos sólidos (kN/m ³)	30,0
Massa específica do solo (kN/m ³)	14,0
Limite de Liquidez (%)	51,8
Limite de Plasticidade (%)	38,3
Índice de Plasticidade (%)	13,5
Argila (%)	55,5
Silte (%)	23,5
Areia Fina (%)	20,7
Areia Média (%)	0,30
Areia Grossa (%)	0,00
Pedregulho (%)	0,00
Classificação textural	Argila siltosa

FONTE: Beraldo (2012)

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.2 Determinação da tensão admissível em relação à ruptura

O ângulo de atrito interno, peso específico e coesão usados no cálculo da capacidade carga pelo método teórico de Terzaghi, foram os determinados por Réus *et al* (2012) a partir de ensaio de cisalhamento direto (Tabela 3).

Tabela 3. Massa específica do solo e parâmetros de resistência do solo.

Solo	γ (kN/m ³)	c (kPa)	ϕ (°)
Argila e areia inundadas	16,0	6,0	33,3
Argila e areia não inundadas	14,0	36,3	25,3

A primeira determinação foi feita por meio do método teórico de Terzaghi, que permite calcular a capacidade de carga (equação 1).

$$\sigma_r = c \cdot N_c \cdot S_c + q \cdot N_q \cdot S_q + 1/2 \cdot B \cdot \gamma \cdot N_\gamma \cdot S_\gamma \quad (1)$$

Onde:

σ_r é a capacidade carga

c é a coesão do solo

N_c , N_q e N_γ são os fatores de capacidade de carga

S_c , S_q e S_γ são os fatores de forma

q é a sobrecarga

B é a largura da sapata

γ é o peso específico do solo.

A tensão admissível em relação à ruptura foi, então, calculada utilizando um fator de segurança global igual a 3,0.

A segunda determinação foi feita por meio do método semi-empírico baseado no SPT, mostrado na equação 2.

$$\sigma_{adm} = N_{SPT \text{ méd}} \cdot 20 + q \quad (\text{kPa}) \quad 5 \leq N_{SPT} \leq 20 \quad (2)$$

Onde:

$N_{SPT \text{ méd}}$ é a média dos N_{SPTs} no bulbo

q é a sobrecarga de solo

A terceira determinação foi baseada nos resultados de PCEs em mini placa, realizadas no CEEG por Beraldo (2012). A análise das curvas tensão *versus* recalque permitiu a obtenção da tensão admissível, nas condições

de umidade natural e de inundação. Foi utilizado o método da interseção das tangentes que indicam a mudança de comportamento do solo, de forma a identificar a tensão admissível em relação à ruptura.

2.3 Determinação do recalque da fundação

A partir das tensões admissíveis em relação à ruptura foram estimados os recalques por meio de:

- Teoria de Elasticidade;
- PCEs em mini placa;
- Ensaio de adensamento.

A primeira estimativa, referente ao recalque imediato, foi feita por meio da Teoria da Elasticidade, com a utilização das equações 3.

$$\rho_i = \mu_o \cdot \mu_1 \cdot (\sigma \cdot B / E_s) \quad (3)$$

Onde:

μ_o é relativo ao embutimento da sapata;

μ_1 é relativo à espessura do estrato;

σ é a tensão aplicada no solo;

B é a largura da sapata;

E_s é o módulo de deformabilidade do solo.

Para essa estimativa, foram utilizadas as tensões admissíveis obtidas pelos métodos de Terzaghi e semi-empírico baseado no SPT.

A segunda estimativa, também referente ao recalque imediato, foi feita por meio das PCEs em mini placas, utilizando equação 4.

$$\rho_s = \rho_p \cdot B_s / B_p \quad (4)$$

Onde:

ρ_s é o recalque da sapata real;

ρ_p é o recalque da mini placa;

B_s é o diâmetro real da sapata;

B_p é o diâmetro da mini placa.

Finalmente, a terceira estimativa, referente ao recalque por adensamento, foi feita a partir dos resultados de ensaios de adensamento (Komori, 2012), com a utilização da equação 5.

$$\Delta H = [(C_c \cdot H) / (1 + e_i)] \log (\sigma_f / \sigma'_a) \quad (5)$$

Onde:

ΔH é o recalque;

C_c é o índice de compressão;

H é a altura da camada de solo que sofrerá o recalque;

e_i é o índice de vazios inicial antes do recalque;

σ_f é a tensão que a sapata distribui no solo;

σ'_a é a tensão efetiva de pré-adensamento.

2.4 Cargas dos pilares

Para o cálculo das cargas dos pilares (15x15cm) foi criado o anteprojeto de uma obra habitacional típica. Dentre os diversos pilares existentes no anteprojeto foram escolhidos o pilar com maior carga, no valor de 272 kN e o de menor carga, no valor de 95 kN (Tabela 4), com distância entre eixos de 4,44 m.

Tabela 4. Cargas dos pilares.

Dados dos pilares		
Pilar	P _{máx}	P _{mín}
A influência	7,54 m ²	2,65 m ²
Carga	272 kN	95 kN

Carregamento da edificação = 12,0 kPa

n° de pavimentos = 2 (Tér.+Sup.)

Peso próprio sapata = 10%

3 RESULTADOS

A Tabela 5 mostra o pré-dimensionamento das sapatas, considerando a tensão admissível inicial de 75 kPa, igual à tensão de pré-adensamento, para solos na condição natural de umidade (Komori, 2012).

Tabela 5. Pré-dimensionamento das sapatas.

σ_{adm}	Pilar	Dimensões das sapatas		
		Área	B	L
75 kPa	P _{máx}	3,98 m ²	195	195 cm
75 kPa	P _{mín}	1,40 m ²	115	115 cm

3.1 Estimativas de recalque

Após o pré-dimensionamento das sapatas, foram estimados os seus recalques usando o método da Teoria da Elasticidade e os resultados das provas de carga e dos ensaios de adensamento. Foram consideradas duas condições de umidade: inundada e não inundada.

Os resultados das tensões admissíveis obtidas pelos métodos de Terzaghi, semi-empírico (SPT) e a partir das PCEs, assim como, as respectivas estimativas de recalques para ambos os pilares estão nas Tabelas 6 e 7.

Tabela 6. Tensões admissíveis e estimativas de recalques para o pilar mais carregado.

P _{máx}							
Ruptura				Recalques			
Método	Textura	Umidade	σ_{adm}	Método	ρ_i	ρ_a	ρ_{total}
Terzaghi	Argila	Natural	153 kPa	T.E.	23,2 mm	0,5 mm	23,7 mm
		Inundado	62 kPa		15,0 mm	0,2 mm	15,1 mm
SPT	Argila	Natural	64 kPa	T.E.	15,4 mm	0,1 mm	15,5 mm
		Inundado	66 kPa		15,6 mm	0,2 mm	15,7 mm
PCEs	Argila	Natural	54 kPa	Ensaio de campo	24,1 mm		24,1 mm
		Inundado	20 kPa		43,5 mm		43,5 mm

ρ_i = recalque imediato; ρ_a = recalque por adensamento

Tabela 7. Tensões admissíveis e estimativas de recalques para o pilar menos carregado.

P _{mín}							
Ruptura				Recalques			
Método	Textura	Umidade	σ_{adm}	Método	ρ_i	ρ_a	ρ_{total}
Terzaghi	Argila	Natural	149 kPa	T.E.	15,0 mm	0,3 mm	15,3 mm
		Inundado	52 kPa		9,2 mm	0,0 mm	9,2 mm
SPT	Argila	Natural	44 kPa	T.E.	8,3 mm	0,0 mm	8,3 mm
		Inundado	46 kPa		8,7 mm	0,0 mm	8,7 mm
PCEs	Argila	Natural	54 kPa	Ensaio de campo	14,2 mm		14,2 mm
		Inundado	20 kPa		25,6 mm		25,6 mm

ρ_i = recalque imediato; ρ_a = recalque por adensamento

Das Tabelas 6 e 7 observa-se que os valores de tensão admissível, para os dois pilares, obtidos pelo método de Terzaghi foram cerca de três vezes superiores aos valores de tensão admissível obtidos pelo método semi-empírico (SPT) e as PCEs, na condição de umidade natural.

Para a condição de umidade de inundação as tensões admissíveis obtidas pelos métodos de Terzaghi e semi-empírico baseado no SPT foram duas vezes superiores ao valor obtido pelas PCEs.

O valor dos recalques imediatos dos pilares na condição de umidade natural, a partir das tensões admissíveis por Terzaghi, foram maiores que os valores obtidos na condição de inundação em função dos maiores valores das tensões.

No caso do método semi-empírico baseado no SPT, os recalques imediatos, nas condições de umidade natural e inundada, foram praticamente iguais. Os valores de N_{SPT} foram os mesmos, porque foi utilizada a mesma sondagem, para mesma condição de umidade no campo, variando-se, apenas o peso específico do solo.

Para as PCEs o recalque de campo na condição de inundada foi quase o dobro do recalque imediato para a condição natural, refletindo a mudança de comportamento mecânico do solo.

Os recalques por adensamento foram identificados para o pilar mais carregado e para o menos carregado, apenas na condição de umidade natural, por Terzaghi, representando,

no máximo, 2% dos respectivos recalques totais.

Nos casos em que os recalques por adensamento foram nulos, observa-se que as tensões admissíveis não atingiram a pressão de pré-adensamento.

3.2 Recalques distorcionais

Os recalques diferenciais ($\Delta\rho$) e distorcionais (δ) entre os pilares são mostrados na Tabela 8.

Tabela 8 - Recalques diferenciais e distorcionais entre os pilares:

Método	Textura	Umidade	$\Delta\rho$	δ
Terzaghi	Argila	Natural	8,4 mm	1/532
		Inundado	5,9 mm	1/747
SPT	Argila	Natural	7,2 mm	1/615
		Inundado	7,1 mm	1/630
PCEs	Argila	Natural	9,9 mm	1/448
		Inundado	17,9 mm	1/248

Os recalques distorcionais da Tabela 8, atenderam às prescrições da NBR-15575/2012 – Edificações habitacionais – Desempenho, exceto aqueles obtidos por meio das PCEs. No entanto, o recalque das PCEs, na condição de umidade natural ficou próximo ao prescrito (1/500).

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

As estimativas dos recalques totais e distorcionais de dois pilares de uma obra

habitacional típica foram obtidos para o solo típico da cidade de Londrina/PR, a uma profundidade de 1 m, usando a Teoria da Elasticidade, resultados de PCEs e ensaios de adensamento.

Os recalques imediatos representaram cerca de 98% do recalque total.

O maior recalque foi o medido nas PCEs na condição de umidade de inundação, refletindo a mudança de comportamento mecânico do solo nesta condição.

Os recalques intermediários foram para as PCEs e para a tensão admissível obtida por Terzaghi, ambos na condição de umidade natural.

Os menores recalques foram determinados para os outros casos.

Os maiores valores dos recalques diferenciais e distorcionais foram obtidos a partir das PCEs e não atenderam às prescrições da NBR-15575/2012 – Edificações habitacionais – Desempenho.

REFERÊNCIAS

Associação Brasileira de Normas Técnicas = *NBR 15575 – Edificações Habitacionais – Desempenho*. 2012. Rio de Janeiro. Brasil.

BERALDO, F. M. (2012). *Estudo de fundação rasa através de ensaio de mini placa, na região de Londrina*. Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Estadual de Londrina.

CHRISTONI, A. E TEIXEIRA, R.S. (2013) *Estudo das Características Químicas e Mineralógicas do Solo Tropical (Laterítico) do Campo Experimental de Engenharia Geotécnica/UEL*. EAIC. Foz do Iguaçu/PR.

CINTRA, J. C. A.; AOKI, N. e ALBIERO, J. H. (2003). *Tensão Admissível em Fundações Diretas* – São Carlos, RiMa, 135p.

KOMORI, E. T. (2012). *Estudo da Variabilidade dos Parâmetros de Deformabilidade do Solo de Londrina*. Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Estadual de Londrina.

RÉUS, T. F.; TEIXEIRA, R. S. e RODRIGUEZ, T. T. (2012). *Parâmetros de Resistência do Solo do Campo Experimental de Engenharia Geotécnica (CEEG)*. Encontro Anual de Iniciação Científica (EAIC2012). Maringá/PR.