

ANÁLISE SIMPLIFICADA DE RECALQUES DE UM RADIER ESTAQUEADO EM ARGILA DE LONDRES

A simplified settlement analysis of a piled raft in London Clay

Heitor Cardoso Bernardes^a, Renato Pinto da Cunha^a

^a Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília-DF, Brasil

RESUMO – O trabalho analisa a evolução de recalques do edifício Hyde Park Cavalry Barracks, em Londres, partindo de simulações numéricas axissimétricas em elementos finitos. A edificação apresenta uma fundação do tipo radier estaqueado, construído sobre uma espessa camada de argila, representada pelo modelo constitutivo Cam-Clay modificado. Dados da obra e parâmetros do solo foram obtidos através dos trabalhos de Hooper (1973) e Gasparre (2005). A sequência de etapas construtivas da fundação foi considerada e os recalques previstos foram comparados com dados de monitoramento e com as previsões numéricas de Hooper (1973), Hain e Lee (1978), Sales et al. (2010) e Bernardes et al. (2019). A análise proposta difere daquelas publicadas anteriormente por não utilizar parâmetros do solo retroanalizados dos dados de monitoramento de recalques da edificação. Os resultados indicam razoável concordância entre os valores previstos e medidos, ressaltando a escolha adequada do modelo constitutivo Cam-Clay modificado e a importância da definição da inclinação da reta de recompressão na análise de argilas muito sobreconsolidadas.

ABSTRACT – This paper analyzes the settlement behavior of the Hyde Park Cavalry Barracks building in London, using an axisymmetric finite element solution. The building features a piled raft foundation built in a thick layer of London clay, which is stress-strain behavior is represented using the modified Cam-Clay constitutive model. Hooper (1973) and Gasparre (2005) provided construction data and the soil parameters adopted in this paper. The stages of construction of the foundation were considered and predicted settlements were compared with field measurements and the numerical predictions reported by Hooper (1973), Hain and Lee (1978), Sales et al. (2010) and Bernardes et al. (2019). The proposed analysis differs from those published before since it does not use soil elastic parameters back analyzed from the field settlement measurements. The results show reasonable agreement between the predicted and the measured values, indicating the adequate choice of the modified Cam-Clay constitutive model and the importance of the definition of the recompression coefficient in the analysis of highly overconsolidated clays.

Palavras Chave – Radier Estaqueado, Recalque, Análise Numérica.

Keywords – Piled Raft, Settlement, Numerical Analysis.

1 – INTRODUÇÃO

Fundações do tipo radier estaqueado vêm sendo cada vez mais utilizadas devido a sua característica de associar a elevada capacidade de carga do radier com a ação das estacas como elementos redutores de recalque. Devido às complexas interações entre o radier, as estacas e o solo, análises do comportamento deste tipo de fundação exigem a utilização de ferramentas numéricas. Dentre os principais tipos de ferramentas utilizadas, destacam-se as análises tridimensionais (3D) em elementos finitos, pelo maior rigor na representação física do problema, e as formuladas a partir

E-mails: heitor_cabe@hotmail.com (H. Bernardes), rpcunha@unb.br (R. Cunha)

ORCID: orcid.org/0000-0003-2053-5240, orcid.org/0000-0002-2264-9711

de metodologias híbridas, cujas simplificações permitem análises com maior velocidade de processamento.

As metodologias híbridas geralmente consistem na simplificação do problema físico por uma placa, discretizada em elementos finitos tipo placa de Kirchhoff, apoiada sobre uma base elástica, na qual as interações entre as estacas e o solo são calculadas pela solução de Mindlin e/ou a partir de análises complementares, realizadas através do método dos elementos de contorno ou do método dos elementos finitos. Este tipo de abordagem apresenta como grande vantagem o reduzido tempo de processamento para as análises, já que sua simplificação não exige a discretização de todo o sistema composto pelo solo e as estacas. Dentre os principais trabalhos envolvendo metodologias híbridas, vale ressaltar os realizados por Hain e Lee (1978), Clancy e Randolph (1993), Poulos (1994), Russo (1998), Kitiyodom e Matsumoto (2002), Nguyen et al. (2013), Basile (2015) e Bernardes et al. (2019).

Por simplificarem o solo através de uma base elástica equivalente, os métodos híbridos possuem significativas limitações, como a limitação das análises ao regime elástico linear. Apesar de alguns trabalhos tratarem esta restrição com a utilização de estacas de rigidez variável, na qual seu comportamento carga versus recalque é simulado por uma função hiperbólica (Small e Poulos, 2007; Bernardes et al., 2019), esta simplificação ainda não contempla a análise de vários problemas geotécnicos corriqueiros, como os que envolvem capacidade de carga ou recalques por adensamento.

Desta forma, a utilização de análises pelo método dos elementos finitos (MEF) surge como uma solução para a melhor representação do problema físico. Análises tridimensionais pelo MEF foram utilizadas por Watcharasawe et al. (2014) e Samanta e Bhowmik (2017), para a previsão de recalques de radiers estaqueados construídos sobre solo argiloso. Dentre os programas de análise 3D disponíveis para a simulação deste tipo de fundação, destaca-se o software comercial Plaxis, utilizado por Vu et al. (2014) e Unsever et al. (2015).

Apesar da análise 3D se apresentar como a metodologia mais rigorosa, casos específicos permitem aproveitar a simetria do sistema de fundação, comumente encontrado em fundações de silos e reservatórios circulares, para a simplificação através de um problema axissimétrico, o que permite a redução do tempo de processamento necessário às análises. Hooper (1973) realizou previsões de recalque para o edifício Hyde Park Cavalry Barracks, em Londres, através de uma análise axissimétrica em elementos finitos. O mesmo edifício foi analisado por Hain e Lee (1978), Sales et al. (2010) e Bernardes et al. (2019), todos através de metodologias híbridas, representando a argila de Londres por um modelo constitutivo elástico linear.

A dependência entre a compressibilidade e a trajetória de tensões para a argila de Londres foi reportada por Costa Filho (1984). Fourie e Potts (1991) verificaram boa correlação entre resultados de ensaios triaxiais e simulações numéricas realizadas pelo modelo constitutivo Cam-Clay Modificado para os gráficos de trajetória de tensão versus deformação volumétrica de amostras de argila de Londres.

Desta forma, o presente artigo apresenta uma análise simplificada de recalques do edifício Hyde Park Cavalry Barracks, através de uma análise axissimétrica em elementos finitos, utilizando o modelo Cam-Clay Modificado para representar a camada de argila de Londres. Sendo o solo o principal elemento responsável pelo comportamento carga-recalque em um sistema de fundação, o artigo objetiva mostrar como a escolha e a calibração, adequadas, do modelo constitutivo adotado para o solo permite a modelagem de problemas complexos a partir de uma geometria simplificada. Os resultados serão comparados com as análises realizadas por Hooper (1973), Hain e Lee (1978), Sales et al. (2010), Bernardes et al. (2019) e com os dados de monitoramento de recalque da edificação.

2 – ANÁLISES NUMÉRICAS DO EDIFÍCIO HYDE PARK CAVALRY BARRACKS

O edifício Hyde Park Cavalry Barracks é um caso de fundação do tipo radier estaqueado que devido ao caráter pioneiro de sua instrumentação foi analisado em diversos trabalhos acadêmicos. Hooper (1973) conduziu as primeiras análises para a edificação, apresentando uma descrição completa da edificação e da fundação adotada. A edificação possui 90 m de altura e dois subsolos, suportados por um radier de concreto armado com 1,52 m de espessura, sobre 51 estacas escavadas com 24,8 m de comprimento, 0,91 m de diâmetro do fuste e base alargada com 2,44 m de diâmetro. Para a escavação do subsolo o autor descreve a utilização de uma estrutura de contenção em estacas prancha, com escoramentos em direção ao interior do subsolo. Doze ensaios de penetração de cone com medição de poropressão foram realizados no local, permitindo identificar uma espessa camada de argila de Londres, de 57,6 m de espessura, imediatamente abaixo de uma camada de 5 m de aterro composto por areia pedregulhosa. O nível d'água foi identificado a 4 m de profundidade. A Figura 1 mostra as características geométricas do radier estaqueado, os parâmetros dos materiais e o perfil de solo verificado nas sondagens.

Conforme mostra a Figura 1, o edifício teve seus recalques monitorados no centro (P1) e canto (P2) do radier, durante um período igual a 6 anos. Hooper (1973) aproveitou o arranjo simétrico das estacas, com disposição aproximadamente circular, para realizar uma análise de recalques a partir de um modelo axissimétrico em elementos finitos. Para isto, o autor utilizou um módulo de Young equivalente para as estacas, igual a 13,8 GPa, e adotou um radier circular de área equivalente ao radier original, igual a 642 m². O solo foi considerado como elástico linear, e teve seu módulo de Young determinado através da retroanálise dos resultados de monitoramento de recalque. Desta forma, Hooper (1973) propôs valores de módulo variáveis conforme com a profundidade (z), em metros. As Equações seguintes representam os módulos adotados pelo autor nas condições não-drenada (E_u) e drenada (E_d).

$$E_u = 10 + 5.2z \quad (1)$$

$$E_d = 0.75E_u \quad (2)$$

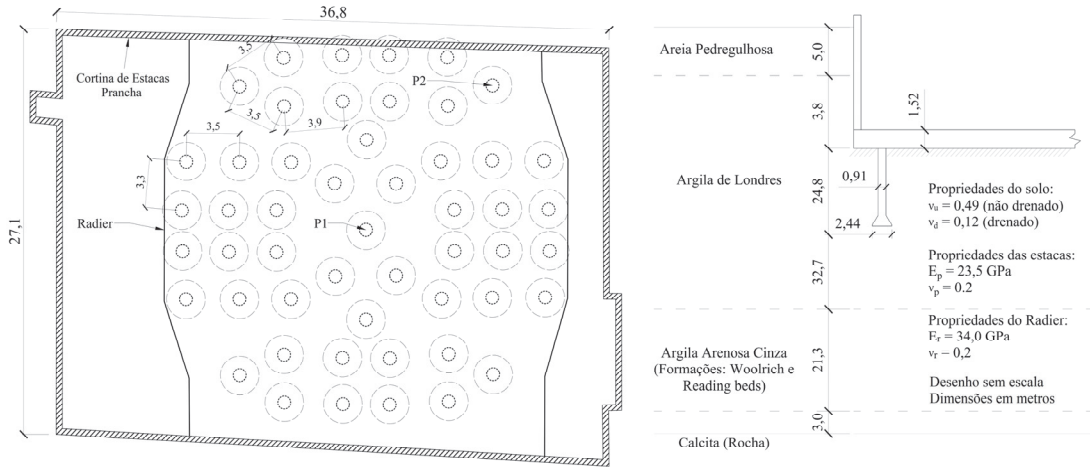


Fig. 1 – Características geométricas e parâmetros dos materiais da fundação analisada (modificado de Hooper, 1973 e Bernardes et al., 2019)

Hain e Lee (1978) analisaram os recalques da edificação por uma metodologia híbrida, que representa o radier por elementos finitos de placa de Kirchhoff e o sistema solo-estaca como um meio elástico, cujas interações envolvendo as estacas e/ou o solo são calculadas a partir da solução de Mindlin. Adotando os mesmos valores de módulo de elasticidade do solo que Hooper (1973), as previsões de recalque de Hain e Lee (1978) para a condição drenada foram aproximadamente 50% menores que os valores medidos.

Sales et al. (2010) também analisaram o edifício Hyde Park Cavalry Barracks através de um método híbrido que considera os efeitos da escavação no comportamento do radier estaqueado. Para isto utilizaram o software GARP (*Geotechnical Analysis of Raft with Piles* – Poulos, 1994), para simular o comportamento da fundação em cada estágio de construção, considerando os respectivos carregamentos, conforme exposto na Tabela 1. Apesar das limitações do software utilizado, que associa elementos finitos de placa com as soluções de Mindlin para analisar o sistema solo-estaca, os autores apresentaram boa concordância entre os recalques calculados e os medidos. Previsões de recalques por adensamento, após o término da construção do edifício, foram realizadas através do software CONS3D (Small e Liu, 2007).

Tabela 1 - Cargas aplicadas em cada estágio de construção, em MN (modificado de Sales et al., 2010 e Bernardes et al., 2019)

Tempo (meses)	Peso do Radier	Peso Próprio	Carga de utilização	Esforço de Subpressão	Peso do solo escavado	Carga Total
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	=(1+2+3)-(4+5)
4,4	22,00	37,70	-	0,99	77,30	-18,59
8,5	22,00	47,30	-	11,14	77,30	-19,14
10,25	22,00	70,72	-	15,42	77,30	0,00
12,7	22,00	103,50	-	21,53	77,30	26,67
15,7	22,00	159,30	-	28,96	77,30	75,04
18,8	22,00	168,80	-	29,70	77,30	83,80
24,8	22,00	205,00	-	29,70	77,30	120,00
40,0	22,00	206,00	17,00	29,70	77,30	138,00

Bernardes et al. (2019), também analisaram o edifício citado com razoável concordância, utilizando a ferramenta numérica híbrida denominada SoFIA (*Soil-Foundation Interaction Analysis*), que permite a análise do radier por elementos finitos de placa de Mindlin, apoiado em uma base elástica com rigidez calculada através de análises axissimétricas, também em elementos finitos, para o perfil de solo e as estacas da fundação. Conforme sugerido por Hooper (1973), os trabalhos de Sales et al. (2010) e Bernardes et al. (2019) adotaram uma rigidez à flexão 10 vezes maior que a rigidez original do radier para considerar o efeito da rigidez da superestrutura no comportamento da fundação.

3 – METODOLOGIA

A análise simplificada proposta consiste em uma modelagem axissimétrica em elementos finitos utilizando o software Plaxis 2D (Bentley Systems, 2019), que permite considerar os efeitos da escavação e analisar o comportamento da camada de argila de Londres pelo modelo constitutivo Cam-Clay modificado (CCM). A Figura 2 mostra a geometria e a malha adotada no modelo numérico, que apresenta maior densidade de elementos na região próxima às estacas, ao radier e à cortina, visando aumentar a precisão das análises.

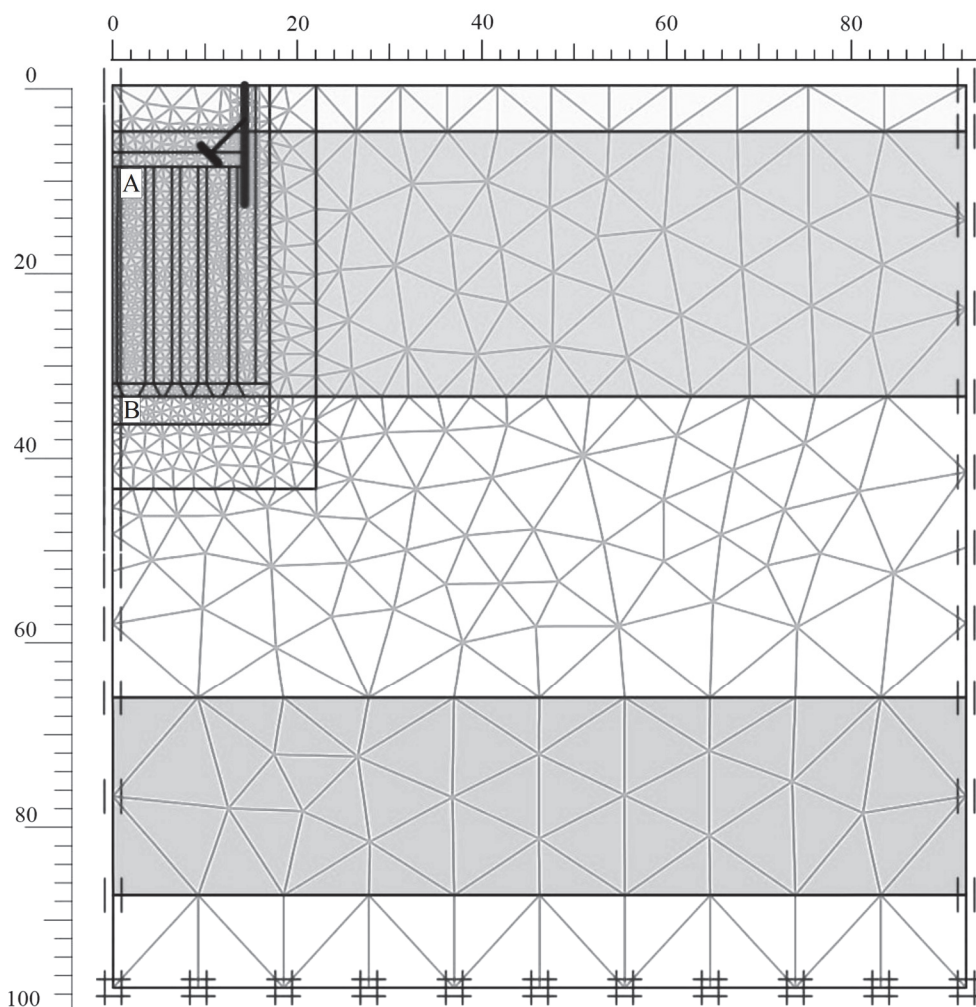


Fig. 2 – Malha de elementos finitos utilizada nas análises axissimétricas.

A malha foi composta por 1980 elementos triangulares de 15 nós para a representação do radier estaqueado e do solo. A representação das estacas no modelo axissimétrico foi realizada através de uma estaca central, seguida de quatro anéis concêntricos que representam de forma simplificada as estacas posicionadas a distâncias iguais em relação ao centro do radier. O espaçamento entre anéis foi definido segundo o espaçamento adotado entre estacas, considerando a direção radial, conforme a geometria proposta por Hooper (1973).

Considerando a direção circunferencial, verifica-se um espaçamento não uniforme entre as estacas (Figura 1). Na tentativa de minimizar estes efeitos no modelo axissimétrico adotado, a rigidez (força requerida para um deslocamento unitário) de cada anel foi calculada como sendo igual ao somatório dos valores de rigidez de cada estaca situada no referido anel, o que conduziu a um módulo de Young equivalente para o concreto das estacas, igual 13,8 GPa (Hooper, 1973).

Devido a sua pequena espessura, a cortina de estacas prancha foi representada por elementos tipo placa e o escoramento por elementos tipo mola, com 1 nó e rigidez constante. A condição de

contorno horizontal foi adotada como maior que 3 vezes a largura da fundação e a condição de contorno vertical foi considerada como a profundidade da camada rochosa de calcita. Para reduzir a concentração de tensões nos contatos estaca-solo, radier-solo e cortina-solo foram utilizados elementos de interface com 5 pares de nós.

Sendo a fundação apoiada na camada de argila de Londres, e devido a elevada espessura da mesma, apenas esta camada de solo foi representada pelo modelo CCM. A Tabela 2 apresenta os parâmetros adotados para o modelo. Os valores de coeficiente de adensamento e coeficiente de variação volumétrica foram obtidos através de ensaios oedométricos realizados em amostras indeformadas de 102mm de diâmetro, reportados por Hooper (1973). Tais dados permitiram a determinação do coeficiente de permeabilidade do solo. A inclinação da linha de compressão (λ) e de recompressão (κ), a inclinação da linha de estado crítico (M), o coeficiente de empuxo no repouso (K_0) e a razão de sobreadensamento (OCR) foram retirados do trabalho de Gasparre (2005), que conduziu extensos ensaios de caracterização, resistência e compressibilidade para amostras coletadas no Heathrow Airport Terminal 5, em Londres. Os mesmos parâmetros foram adotados por Gonzalez et al. (2012), para a modelagem numérica da escavação de um túnel no St. James Park, aproximadamente a 2 km de distância do Hyde Park.

A Tabela 3 mostra os parâmetros adotados para as demais camadas de solo. Os valores de peso específico dos grãos foram reportados por Hooper (1973) e os valores de coeficiente de permeabilidade estimados conforme os valores propostos por Das (2008).

Tabela 2 – Parâmetros adotados para as camadas de argila de Londres, representada pelo modelo CCM.

Camada (espessura)	γ_{sat} (kN/m³)	e_0	v	c (kPa)	ϕ (°)	K_0	OCR	$k_x = k_y$ (m/dia)	λ	κ	M
1ª (28,7 m)	19,7	0,73	0,3	16,5	22	1,26	9	9,98e-7	0,168	0,064	0,85
2ª (32,8 m)	19,7	0,66	0,3	16,5	22	1,84	5	9,98e-7	0,168	0,064	0,85

Tabela 3 – Parâmetros adotados para as demais camadas de solo.

Parâmetro	Areia Pedregulhosa	Argila Arenosa Cinza	Calcita
Modelo constitutivo	Mohr-Coulomb	Linear Elástico	Linear Elástico
Comportamento do material	Drenado	Drenado	Impermeável
Peso específico natural	20 kN/m³	20 kN/m³	21 kN/m³
Peso específico saturado	21,25 kN/m³	21 kN/m³	21 kN/m³
Coef. de permeabilidade horizontal	8,64 m/dia	8,64 m/dia	-
Coef. de permeabilidade vertical	8,64 m/dia	8,64 m/dia	-
Módulo de Young	17,25 MPa	311,5 MPa	1000 MPa
Coeficiente de Poisson	0,12	0,3	0,3
Coesão	1 kPa	-	-
Ângulo de atrito	30°	-	-
Ângulo de dilatação	0°	-	-
Fator de redução da interface	1,0 (Rígida)	-	-

Conforme sugerido por Hooper (1973), o coeficiente de Poisson para o concreto das estacas e do radier foi igual a 0,2. Os efeitos da interação solo-estrutura foram considerados adotando um radier com rigidez à flexão dez vezes maior que a original (Hooper, 1973).

De forma a analisar o problema conforme o processo executivo adotado na obra, as simulações numéricas foram realizadas conforme as seguintes etapas:

- I. Execução da cortina de estacas prancha e das estacas. As estacas foram concretadas até a sua cota de arrasamento.
- II. Primeira etapa de escavação, com espessura igual a 5 m.
- III. Execução do escoramento da cortina.
- IV. Segunda etapa de escavação, com espessura igual a 3,8 m, atingindo a cota de arrasamento das estacas.
- V. Execução do radier com 1,52 m de espessura.
- VI. Análise de adensamento com aplicação gradual dos carregamentos externos como cargas uniformemente distribuídas sobre o radier. Esta etapa foi subdividida em 8 subetapas de cálculo, seguindo os intervalos de tempo e a evolução dos carregamentos (peso próprio e carga de utilização) descritos na Tabela 1. As cargas referentes ao esforço de subpressão e ao peso do solo escavado foram consideradas durante as etapas de cálculo anteriores.

As etapas descritas nos itens de I a V consistiram em análises plásticas, enquanto as subetapas descritas no item VI foram análises de adensamento. Para considerar o efeito da estrutura de contenção impermeável, a opção de rebaixar o nível d'água no interior da fundação ("*cluster dry*") foi adotada durante as escavações. Os recalques do prédio foram monitorados a partir do quinto mês, logo não foram medidos valores de expansão e recalque provocados pelas etapas de escavação, construção da estrutura de contenção, construção da fundação e aplicação dos carregamentos iniciais. Para considerar esta característica do monitoramento, deslocamentos anteriores ao quinto mês não foram acumulados aos obtidos nas simulações dos períodos subsequentes.

4 – ANÁLISE DOS RESULTADOS

A Figura 3 mostra o levantamento do solo previsto ao término da escavação dos subsolos e do radier. Os resultados indicam valores elevados para a expansão da camada de argila, atingindo 60 mm na região central da fundação. Como a expansão do solo não foi monitorada na obra e considerando a magnitude do alívio de tensões provocado pelos 8,8 m de escavação executados, presume-se a razoabilidade dos resultados previstos.

Sendo o monitoramento de recalques realizado a partir do intervalo de tempo igual a 5,2 meses de obra, a Figura 4 visa mostrar os recalques ocorridos devidos ao peso próprio do radier e ao peso próprio da edificação construída até o referido tempo. O valor de carga para 5,2 meses foi calculado através da interpolação dos valores disponíveis na Tabela 1. Os resultados apresentam recalques médios no topo do radier de aproximadamente 9 mm, desconsiderando o levantamento do solo ocorrido durante as etapas de escavação.

A Figura 4 indica recalques até uma profundidade correspondente ao término da camada de argila de Londres, apresentando valores aproximadamente nulos na extremidade inferior desta camada. Tal comportamento justifica a representação das camadas subjacentes à argila de Londres por modelos constitutivos limitados, como o modelo linear elástico. O monitoramento de recalques foi iniciado nesta data, logo as previsões subsequentes não acumularam os deslocamentos verticais indicados na Figura 4.

Os gráficos das Figuras 5 e 6 mostram, respectivamente, a evolução dos recalques da edificação ao longo do tempo para nós localizados na borda e no centro do radier. Apesar das limitações inerentes à simplificação do problema por um modelo axissimétrico, as previsões realizadas

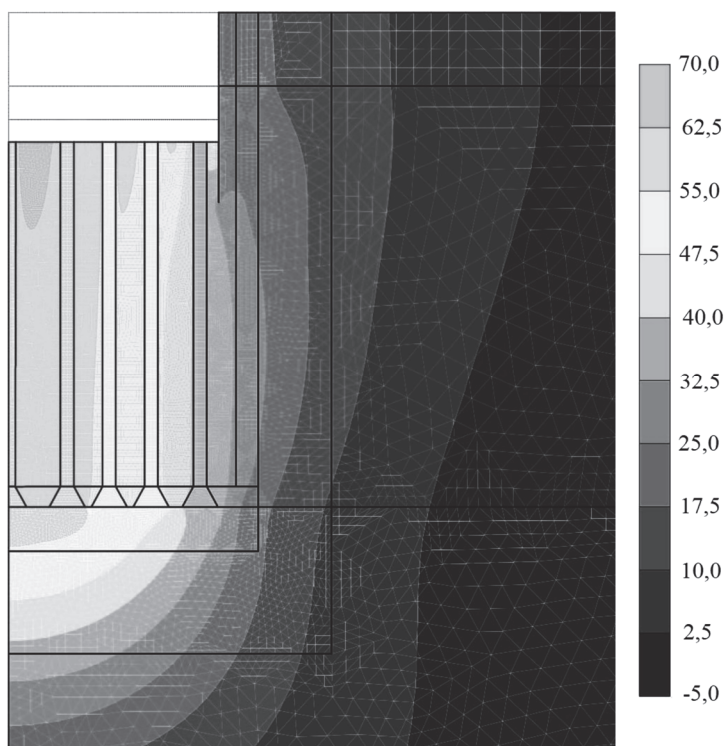


Fig. 3 – Previsão dos levantamentos do solo (em milímetros) após o término das escavações.

apresentaram razoável concordância com os valores medidos, superestimando os recalques em aproximadamente 50% e 25% para a borda e para o centro da fundação, respectivamente.

Os resultados obtidos por Bernardes et al. (2019) foram realizados utilizando módulos de elasticidade na condição drenada e não drenada, conforme as relações descritas nas Equações 1 e 2. Seus resultados apresentaram boa concordância com os valores medidos, sendo contornados pelos resultados das simulações drenadas e não drenadas. Hooper (1973) apresentou resultados semelhantes partindo de um modelo axissimétrico linear elástico. Os resultados de Hain e Lee (1978) foram realizados apenas em condições drenadas, apresentando recalques consideravelmente menores que os medidos.

Assim como os demais trabalhos, as análises de Sales et al. (2010) foram realizadas no regime linear elástico. Os autores consideraram um módulo de Young 5 vezes maior que o originalmente proposto por Hooper (1973) para o comportamento do solo no trecho de recompressão, visando considerar o alívio de tensões provocado pela escavação. Suas previsões apresentaram a melhor concordância entre as apresentadas.

Entretanto, uma significativa limitação comum às previsões de Hooper (1973), Hain e Lee (1978), Sales et al. (2010) e Bernardes et al. (2019) está na utilização de parâmetros elásticos obtidos através da retroanálise dos dados de monitoramento dos recalques da edificação. Este aspecto aumenta a relevância científica das simulações realizadas neste trabalho, que utilizaram parâmetros obtidos em ensaios de laboratório para amostras de argila de Londres. Desta forma, os resultados apresentados neste artigo poderiam ser calculados em etapa de projeto da edificação, ao contrário das demais previsões. Devido à sensibilidade do modelo constitutivo CCM a parâmetros como:

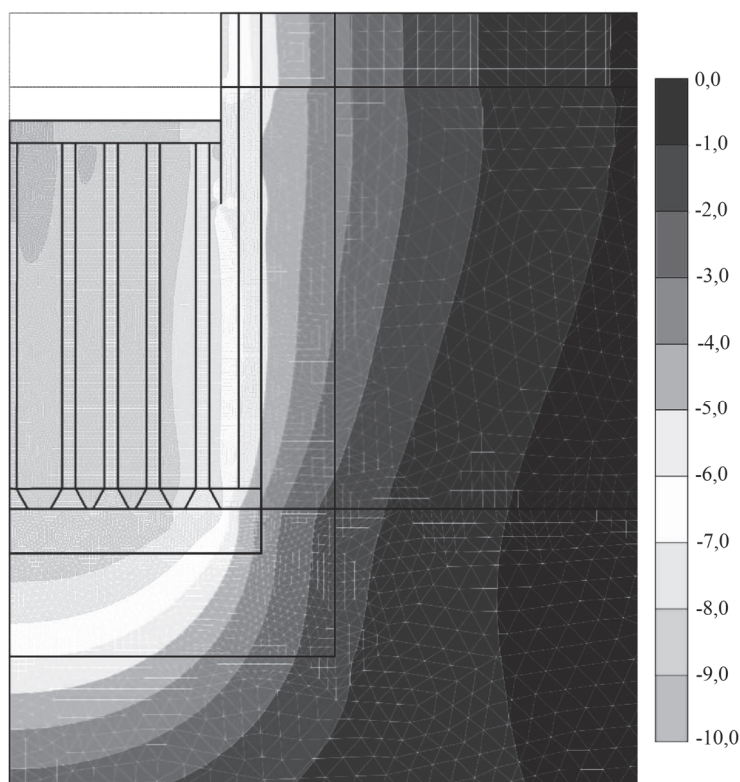


Fig. 4 – Recalques calculados (em milímetros) para um tempo igual a 5,2 meses.

razão de sobreadensamento e inclinação das linhas de compressão e recompressão, ensaios triaxiais realizados in loco poderiam melhorar significativamente as previsões realizadas.

Um comportamento comum a todas as previsões está na melhor concordância entre recalques previstos e monitorados para o centro do radier, conforme mostra a Figura 6, do que para os recalques medidos na borda (Figura 5). Este comportamento está provavelmente relacionado com o aumento da rigidez à flexão do radier, adotado para simular o efeito da interação solo-estrutura. A premissa empírica de Hooper (1973), de adotar uma rigidez à flexão dez vezes superior à original se mostra pouco apropriada para simular os recalques nas extremidades do radier, necessitando de calibração através de análises numéricas mais precisas, que considerem um modelo tridimensional para a superestrutura. A simplificação realizada para os carregamentos dos pilares, representados como cargas distribuídas sobre a superfície do radier, é outro ponto de interferência nos recalques diferenciais previstos para a fundação.

A Figura 7 mostra o excesso de poropressão para um tempo igual a 72 meses, referente ao término do monitoramento de recalques da edificação. O acúmulo de poropressão na região entre as estacas indica uma limitação da simplificação do problema por um sistema axissimétrico. Uma vez que neste modelo o grupo de estacas foi representado por anéis concêntricos, constituídos por material impermeável, a distância de percolação sofre um significativo aumento, gerando acúmulos de poropressão no solo presente entre as estacas e aumentando o tempo necessário para o adensamento da camada de argila.

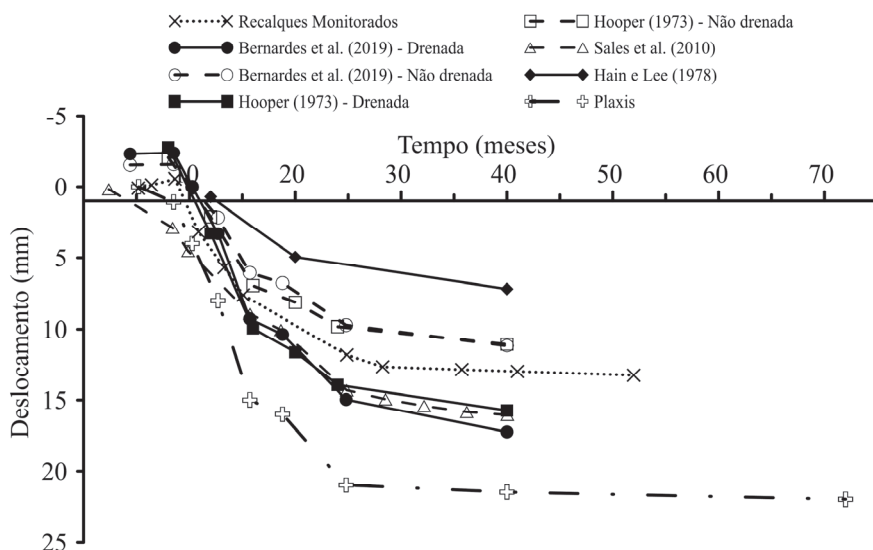


Fig. 5 – Previsões de recalque ao longo do tempo para a borda do radier estaqueado.

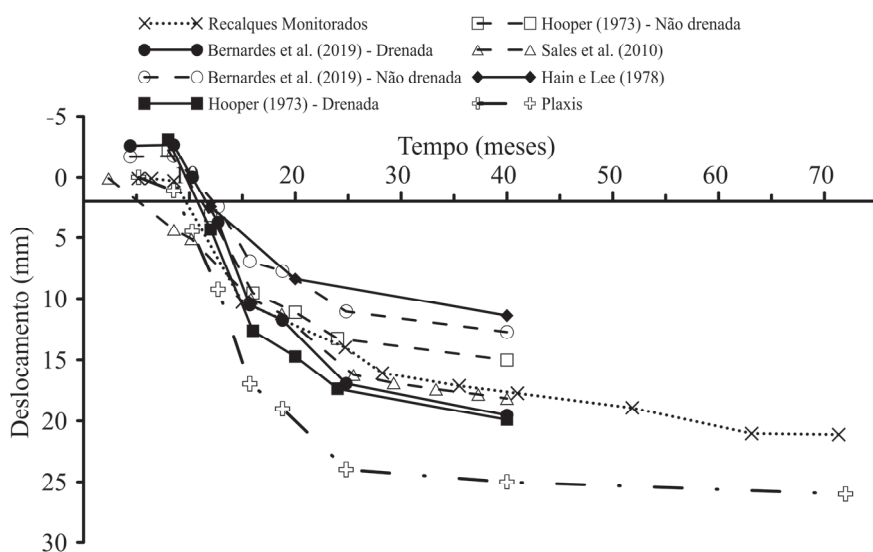


Fig. 6 – Previsões de recalque ao longo do tempo para o centro do radier estaqueado.

Apesar das limitações citadas, análises em termos de tensões efetivas para a totalidade da carga aplicada na fundação permitiram previsões de recalques totais para a fundação. O comportamento de longo prazo foi analisado através de uma análise de adensamento, para a condição de poropressão mínima, indicando um recalque máximo de 29,6 mm, na região central do radier. Comparando com os recalques indicados na Figura 6, verifica-se que para um tempo igual a 72 meses aproximadamente 88% dos recalques por adensamento já ocorreram.

As Figuras 8a e 8b mostram, respectivamente, as trajetórias de tensão para o ponto A (abaixo do radier – ver Figura 2) e o ponto B (abaixo da base das estacas – ver Figura 2), para diferentes tempos. Para o ponto A é possível verificar que a escavação provoca um significativo aumento na

poropressão negativa (sucção), tornando a tensão isotrópica efetiva (p') maior que a tensão isotrópica total (p). Conforme o aumento do tempo, as cargas da edificação provocam o aumento de p . As poropressões negativas provocadas pela escavação não atingem o ponto B, que apresenta valores positivos de poropressão, conforme mostra a Figura 8b. A trajetória de tensão neste caso é típica de argilas muito sobreadensadas em ensaios triaxiais do tipo consolidado não drenado, com as tensões desviadoras (q') aumentando sem variações significativas em p' .

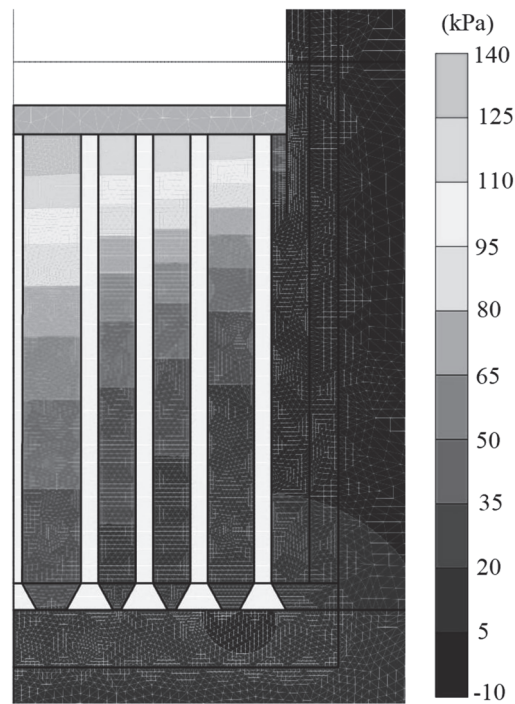


Fig. 7 - Excesso de poropressão verificado para o tempo máximo das medições, igual a 72 meses.

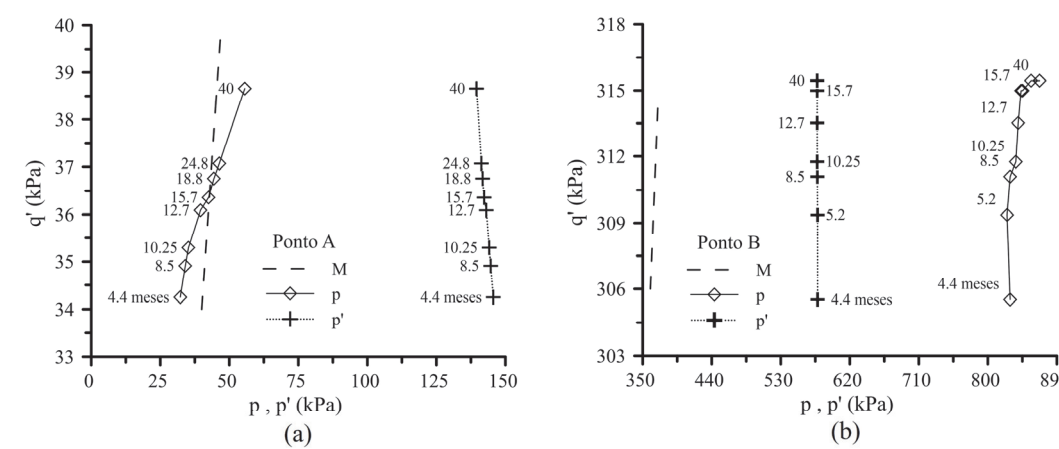


Fig. 8 – Trajetórias de tensões para um ponto sob o radier (a) e para um ponto abaixo da base das estacas (b), para diferentes tempos.

Sendo a argila de Londres um solo muito sobreadensado, as deformações devido à construção do edifício foram predominantemente elásticas. As análises não indicaram a presença de nenhum ponto da fundação atingindo a superfície de fluência ou a ruptura, conforme pode ser verificado pela posição da linha de estado crítico (M) em relação as trajetórias de tensões efetivas ($p' \times q'$) representadas nas Figuras 8a e 8b. Assim sendo, o ajuste da previsão de recalques da edificação pode ser realizado com melhor precisão a partir da modificação da inclinação da linha de recompressão (parâmetro κ) das camadas de argila de Londres.

A Figura 9 mostra uma nova previsão de recalques para a edificação, na qual o parâmetro κ das duas camadas de argila de Londres foi alterado para 0,017. Os resultados indicam uma ótima concordância entre os valores medidos e previstos até um tempo igual a 40 meses. A partir deste tempo os recalques monitorados no centro começam a se distanciar das previsões numéricas, o que pode estar relacionado com a ocorrência de recalques por adensamento secundário.

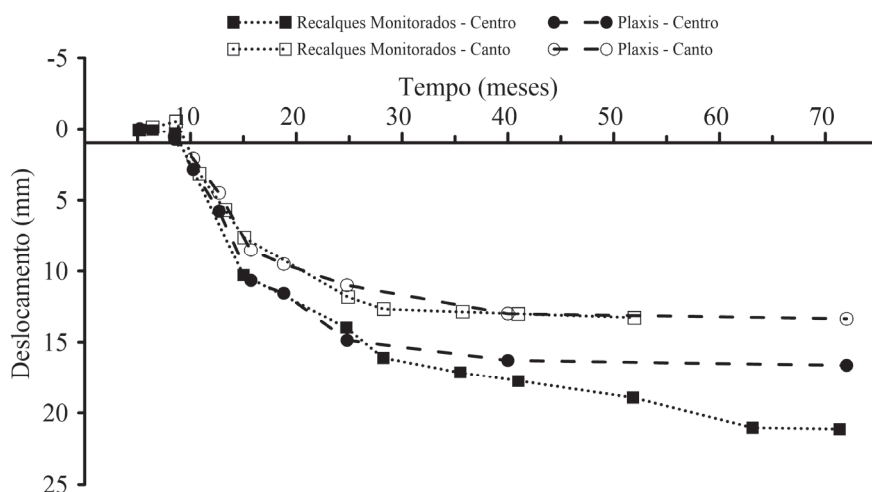


Fig. 9 – Previsões de recalque ao longo do tempo para o centro e a borda do radier estaqueado, para $\kappa = 0,017$.

5 – CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho apresenta uma análise de recalques do edifício Hyde Park Cavalry Barracks, em Londres, a partir de uma modelagem axissimétrica em elementos finitos. O trabalho se diferencia da análise original de Hooper (1973) e de outros autores por considerar as etapas construtivas da edificação, incluir a análise de adensamento e representar a camada de argila de Londres pelo modelo constitutivo CCM. Os resultados permitem as seguintes conclusões:

1. As limitações geométricas da modelagem axissimétrica e o consequente acúmulo de poropressão na região entre as estacas não inviabilizaram a simulação do problema. As análises indicam que o modelo utilizado apresentou resultados conservadores, sendo bastante eficiente para etapas de anteprojeto.

2. O modelo constitutivo CCM se mostrou apropriado para representar o comportamento da camada de argila de Londres. O modelo utilizou parâmetros do solo local, obtidos diretamente através de ensaios triaxiais realizados por Gasparre (2005), e foi capaz de fornecer previsões razoavelmente concordantes com os recalques medidos, dispensando a utilização de parâmetros retroanalizados.

3. O aumento de dez vezes da rigidez à flexão do radier, conforme sugerido por Hooper (1973) para considerar os efeitos da interação solo-estrutura, pode subestimar recalques diferenciais da edificação. Recomenda-se a utilização de análises tridimensionais em elementos finitos para uma melhor investigação deste efeito.

4. A simulação numérica a partir da retroanálise da inclinação da reta de recompressão (κ) foi capaz de aumentar consideravelmente a precisão da previsão de recalques. Este fato indica a necessidade de uma boa caracterização deste parâmetro para a previsão de recalques em argilas muito sobreadensadas.

5. As análises realizadas indicam a importância da representação adequada do comportamento tensão-deformação do solo, através da utilização de modelos constitutivos apropriados e devidamente calibrados. Isto posto, os resultados comprovam que boas previsões de comportamento carga-recalque podem ser obtidas mesmo com significativas simplificações geométricas.

6 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Basile, F. (2015). *Non-linear analysis of vertically loaded piled rafts*. Computers and Geotechnics vol. 63, pp. 73-82. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compgeo.2014.08.011>

Bentley Systems (2019). Plaxis 2D, Finite Element Software.

Bernardes, H.C.; Carvalho, S.L.; Sales, M.M.; Almeida, S.R.M.; Farias, M.M.; Pinho, F.A.X.C. (2019). *Hybrid numerical tool for nonlinear analysis of piled rafts*. Soils and Foundations, vol. 59, pp.1659-1674. <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2019.04.011>.

Clancy, P.; Randolph, M.F. (1993). *An approximate analysis procedure for piled raft foundations*. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, vol. 17, pp. 849-869. <http://dx.doi.org/10.1002/nag.1610171203>

Costa Filho L.M. (1984) Technical note: *A note on the influence of fissures on the deformation characteristics of London Clay*. Géotechnique, vol. 34, n° 2, pp. 2668-2672.

Das, B. M. (2008). *Advanced Soil Mechanics*. 3rd ed., Taylor & Francis, New York. 567p.

Fourie, A.B.; Potts, D.M. (1991). *A numerical and experimental study of London Clay subjected to passive stress relief*. Géotechnique, vol. 41, n° 1, pp. 1-15. <https://doi.org/10.1680/geot.1991.41.1.1>

Gasparre, A. (2005). *Advanced laboratory characterization of London Clay*. PhD thesis, Imperial College, London, UK.

Gonzalez N. M.; Rouainia M.; Arroyo M.; Gens A. (2012). *Analysis of tunnel excavation in London Clay incorporating soil structure*. Géotechnique, vol. 62, n° 12, pp. 1095-1109. <http://dx.doi.org/10.1680/geot.11.P.030>

Hain, S.J.; Lee, I.K. (1978). *The analysis of flexible raft-pile systems*. Géotechnique, vol. 28, n° 1, pp. 65-83. <http://dx.doi.org/10.1680/geot.1978.28.1.65>

Hooper, J.A. (1973). *Observations on the behavior of a piled raft foundation on London Clay*. Proceedings of the Institution of Civil Engineers 55, pp. 855-877.

Kitiyodom, P.; Matsumoto, T. (2002). *A simplified analysis method for piled raft and pile group foundations with batter piles*. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, vol. 26, pp. 1349-1369. <https://doi.org/10.1002/nag.248>

- Nguyen, D.D.C.; Jo, S.B.; Kim, D.S. (2013). *Design method of piled-raft foundations under vertical load considering interaction effects*. Computers and Geotechnics, vol. 47, pp. 16-27. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compgeo.2012.06.007>
- Poulos, H.G., (1994). An approximate numerical analysis of pile-raft interaction. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, vol. 18, 73-82. <http://dx.doi.org/10.1002/nag.1610180202>
- Russo, G. (1998). *Numerical analysis of piled rafts*. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, vol. 22, pp. 477-493.
- Sales, M.M.; Small, J.C.; Poulos, H.G. (2010). *Compensated piled rafts in clayey soils: behavior, measurements and predictions*. Canadian Geotechnical Journal, vol. 47, pp. 327-345. <http://dx.doi.org/10.1139/T09-106>
- Samanta, M.; Bhowmik, R. (2017). *3D numerical analysis of piled raft foundation in stone column improved soft soil*. International Journal of Geotechnical Engineering, pp. 1-11. <http://dx.doi.org/10.1080/19386362.2017.1368139>
- Small, J.C.; Liu, H.L.S. (2007). *Time-settlement behaviour of piled raft foundations using infinite elements*. Computers and Geotechnics, vol. 35, n° 2, pp. 187-195. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compgeo.2007.04.004>
- Small, J.C.; Poulos, H.G. (2007). *Non-linear Analyses of Piled Raft*. Contemporary issues in deep foundations - GSP 158, pp. 1-9. [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)9780784409022](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)9780784409022)
- Unsever, Y.S.; Matsumoto, T.; Özkan, M.Y. (2015). *Numerical analyses of load tests on model foundations in dry sand*. Computers and Geotechnics, vol. 63, pp. 255-266. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compgeo.2014.10.005>
- Vu, A.; Pham, D.; Nguyen, T.; He, Y. (2014). *3D Finite element analysis on behaviour of piled raft foundations*. Applied Mechanics and Materials. vols. 580-583, pp. 3-8.
- Watcharasawe, K.; Jongpradist, P.; Kitiyodom, P. (2014). *Numerical Analyses of Piled Raft Foundation in Soft Soil using 3D-FEM*. Proceedings of the International Conference on Advances in Civil Engineering for Sustainable Development, pp. 219-224.