

ESTUDO TÉCNICO PARA VIABILIDADE DE USO DE RADIER SOBRE SOLOS COLAPSÍVEIS EM OBRA DE HABITAÇÃO POPULAR

TECHNICAL STUDY FOR THE FEASIBILITY OF USING RADIER OVER COLLAPSIBLE SOILS IN A POPULAR HOUSING PROJECT

André Luiz Oliveira Arantes,
Fernando Rodrigo de Aquino

RESUMO

O solo do Distrito Federal é constituído em sua grande maioria por um manto superficial poroso, e colapsível, apresentando baixa capacidade de carga. Levando a pequenas edificações a adotar geralmente fundações profundas. O presente trabalho tem como objetivo de viabilizar a fundação do tipo radier. A pesquisa dividiu-se em duas etapas. Uma experimental, a qual foram realizados ensaios de caracterização geotécnica e prova de cargas para avaliação do comportamento tensão-recalque. Utilizou-se uma sapata de 150x150cm e sistema de reação composto por 6 vigas de concreto armado, para o solo natural. E para o solo compactado, o sistema de reação compreendia estacas de reação unidas por uma viga de reação metálica. A segunda etapa consistiu na análise dos resultados, através da curva tensão-recalque, no qual foi aplicado critério para definir a tensão de ruptura, e considerações sobre a previsão de recalque e efeito escala. Foi possível fazer uma modelagem em programa de elementos finitos, a fim de verificar o comportamento do radier e concluir sobre a possibilidade da sua utilização.

Palavra Chave: Radier, Solo Colapsível, Viabilidade

ABSTRACT

The soil of the Federal District is largely composed of a porous and collapsible surface mantle, presenting low load capacity. Leading small buildings to generally adopt deep foundations. The present work aims to enable the foundation of the radier type. The research was divided into two stages. An experimental one, which was performed geotechnical characterization tests and load tests to evaluate the stress-repression behavior. A 150x150cm shoe was used and a reaction system composed of 6 reinforced concrete beams for the natural soil. And for compacted soil, the reaction system comprised reaction piles joined by a metal reaction beam. The second stage consisted of the analysis of the results through the stress-strain curve, in which criterion was applied to define the rupture stress, and considerations on the prediction of stress and scale effect. It was possible to do a finite element modeling in order to verify the radier behavior and to conclude on the possibility of its use.

Keywords: Slab-on-grade / floating slab, Collapsible Soil, Feasibility

INTRODUÇÃO

Devido ao grande crescimento populacional de forma desordenada, e a tendência da verticalização para melhor aproveitamento do uso do espaço, o estado diante de novas políticas habitacionais, tem estimulado a construção de empreendimentos de médio porte (até 4 pavimentos). Devido às características do solo do Distrito Federal que é coberto por um manto de solo resultante do intemperismo, apresentando baixa capacidade de carga. Levando a pequenas edificações a adotar geralmente fundações profundas, podendo gerar altos custos para a execução e um maior tempo para que o serviço seja executado.

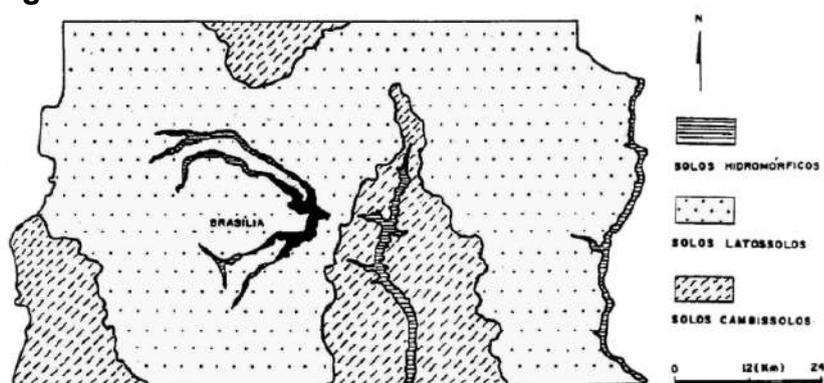
Reconhecendo que a engenharia de fundações não é uma ciência exata e que riscos são inerentes a toda e qualquer atividade que envolva fenômenos ou materiais da natureza” (NBR 6122, 2019), se faz necessário a verificação através de métodos de ensaio de simulação real do elemento solo-estrutura, para a utilização de outras técnicas de execução da fundação, podendo ser utilizadas fundações rasas onde pode-se gerar uma maior economia para o empreendimento, além de diminuir o tempo de execução.

Nesta pesquisa foi utilizada a fundação do tipo radier com emprego de uma camada de solo reforçada com processo de compactação por equipamento mecânico. A camada compactada tem o intuito de dissipação da tensão de trabalho até o solo natural. Para a obtenção das tensões de colapso em cada condição do solo, foram realizadas provas de carga direta em terreno de fundação.

SOLOS DO DISTRITO FEDERAL

O solo do Distrito Federal (DF) possui características peculiares, uma vez que, é coberto por um manto de solo resultante do intemperismo. Dessa forma, segundo Ortigão (1994) apud Dos Santos (2003) são encontradas chapadas com predominância de um relevo residual ou coluvionar, solo transportado e com aplainamentos, com um relevo coberto em grande parte por uma camada de latossolos e solos lateríticos vermelhos argilosos, conforme mostrado na figura 1. Com as características de solo tropical, segundo Guimarães et al. (1997) apud Delgado (2002), o solo do DF apresenta propriedades, estrutura e características hidráulicas e mecânicas bem características.

Figura 01 – MAPAS DE SOLOS DO DISTRITO FEDERAL



FONTE: CODEPLAN, 1984, MODIFICADO POR MORTARI, 1994

Devido ao alto grau de intemperismo e lixiviação, fatores esses responsáveis pela formação de um solo com alto índices de vazios, o manto superficial do solo do distrito federal é conhecido no meio geotécnico como argila porosa de Brasília. Segundo Delgado (2002), esses solos foram submetidos ao processo de laterização com o predomínio de argilo minerais, onde a maioria das bases sofreu com processo de lixiviação, restando materiais com grande estado de intemperismo que apresentam estrutura porosa com partículas ligadas por pontes de argila, conferindo a este tipo de solo elevada porosidade e comportamento de permeabilidade similar aos solos granulares finos.

Segundo Guimarães (2002), a argila porosa de Brasília apresenta características de baixa resistência ao ensaio de SPT, devido às ligações cimentícias e, a estrutura altamente instável quando submetida ao aumento de umidade e/ou a alteração do estado de tensões, indicando na maioria das vezes a brusca variação de volume, que é denominada de colapso.

Segundo Camapum de Carvalho et al. (1993) apud Delgado (2002), a argila porosa apresenta as seguintes características:

- SPT inferior a 6 golpes;
- Limite de liquidez entre 25 e 78%;
- Limite de plasticidade entre 18 e 58%;
- Índice de plasticidade entre 4 e 38%; e
- Índice de Vazios entre 1,2 e 2,2.

SOLOS COLAPSÍVEIS

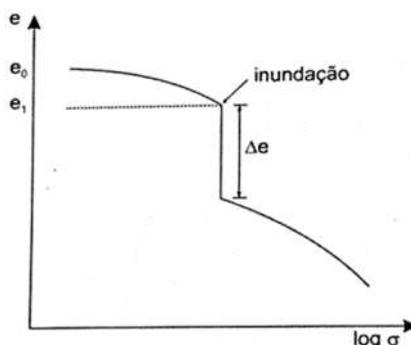
Solo caracterizado pela alta porosidade formado tanto por argila como por areia, segundo Pinto (1998), apresentam rápida redução do volume quando submetidos a um aumento de umidade, sem variação da tensão total que está submetido.

Para Cintra & Aoki (2009) são colapsíveis os solos, com alta porosidade, com altos índices de vazios, não saturados e com baixo teor de umidade, que podem sofrer com colapso em sua estrutura devido ao aumento do teor de umidade ou grau de saturação, mantendo a tensão aplicada. Ainda segundo o autor, o solo colapsível apresenta uma estrutura instável com uma rigidez mantida pela sucção matricial, que ocorrendo à inundação provoca uma dissipação da sucção, anulando uma parte da coesão, reduzindo de forma significativa a resistência ao cisalhamento.

Quanto à sua estrutura Teixeira & Godoy (1998) mencionam que, para os solos colapsíveis suas partículas são cimentadas entre si por materiais ligantes ou argila coloidal, onde pode ocorrer à destruição dessa cimentação intragranular com a penetração da água, seja superficial ou elevação do lençol freático, ocorrendo um colapso bruto da estrutura do solo, causando recalques mesmo sem haver aumento de pressões por carregamento externo.

Para Cintra & Aoki (2009), a evidência do fenômeno de colapso pode ser reproduzida em laboratório por ensaios oedométricos, com a inundação do solo em determinados estágios de carregamento, conforme mostra a figura 2, que ilustra a significativa redução do índice de vazios que ocorre na tensão de inundação.

Figura 02 – Representação do colapso em ensaio oedométrico

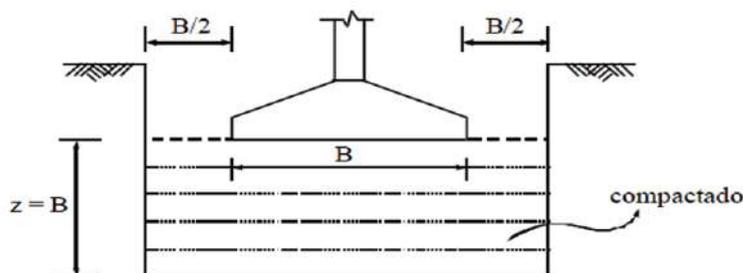


FONTE: Cintra & Aoki, 2009

Para Cintra & Aoki (2009) uma solução para viabilizar o uso de fundações por sapatas e reduzir os recalques de colapso, consiste em uma melhoria do solo com a compactação até a metade do bulbo de tensões, conforme fonte: *cintra & aoki, 2009*

. Onde pode haver a comprovação da eficácia da compactação em modelos realizados por Cintra et al. (1986) apud Cintra & Aoki (2009) onde realizou provas de carga com inundação, em solo compactado, com grau de compactação de 90%, até a metade do bulbo de tensões e em solo não compactado, atingindo uma redução do recalque de colapso em 86%. Segundo o próprio autor, “quanto mais espessa a camada compactada, maior a eficácia da solução”.

Figura 03 – Utilização de sapata em solo colapsível compactado



FONTE: Cintra & Aoki, 2009

FUNDAÇÕES EM RADIER

As fundações são elementos estruturais com a função de transmitir ao maciço de solo as cargas da estrutura. Devem ter resistência para suportar as tensões causadas pelos esforços solicitantes.

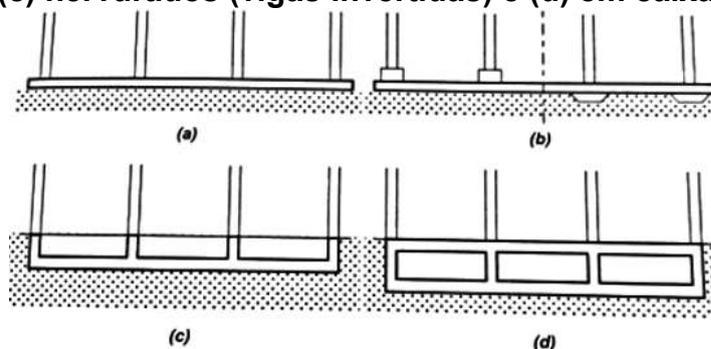
O sistema de fundações é formado pelo elemento estrutural do edifício que se localiza abaixo do solo (podendo ser constituído por bloco de coroamento, estaca ou tubulão, por exemplo) e o maciço de solo envolvente sob a base e ao longo do fuste.

As fundações são classificadas em fundações diretas/rasas e indiretas/profundas: As fundações diretas ou rasas são aquelas em que a carga da estrutura é distribuída sob a base e que a profundidade de assentamento é inferior a duas vezes a menor dimensão da fundação (YAZIGI, 2011), e se encontre a menos de 3 m de profundidade, já as fundações indiretas ou profundas são aquelas que

transferem a carga por efeito de atrito lateral ou pela ponta, ou pela combinação dos dois (YAZIGI, 2011). São aquelas cuja suas bases ou pontas devem estar implantadas ao dobro da sua menor dimensão em planta e no mínimo a 3 m de profundidade.

O radier é um tipo de fundação rasa que funciona como uma laje contínua de concreto armado em toda a área da edificação, conforme figura 4, e segundo Budhu (2013) transmite as cargas da estrutura direto para o terreno, podem ser executados em concreto armado, protendido ou em concreto reforçado com fibra de aço. Apresenta vantagens como baixo custo e rapidez na execução, além de redução de mão de obra comparada a outros tipos de fundação superficiais ou rasas.

Figura 04 – Tipos de radier: (a) lisos, (b) com pedestais ou em laje cogumelo, (c) nervurados (vigas invertidas) e (d) em caixão



FONTE: FONTE: Velloso & Lopes, 2011

Para que o uso do radier seja adotado, segundo Budhu (2013) e Velloso & Lopes (2011), a área da sapata corrida seja maior que a metade da área da construção, Budhu (2013) complementa ainda, quando o solo for mole com baixa resistência de carga, ocorrência de solos moles variáveis pela projeção da estrutura, quando os estados de limites último e de serviço das sapatas corridas são excedidos e combater sobrepressão hidrostática.

Para as condições de projeto são necessárias algumas considerações, segundo Budhu (2013), as cargas a serem suportadas, a escolha do tipo de radier, as cargas muito elevadas podem requerer que a laje esteja completa ou parcialmente enterrada, a sensibilidade ao recalque da estrutura ou de quaisquer máquinas, determinação dos estados de limites quanto a capacidade de carga e de recalques, e análise estrutural quanto a distribuição de tensão, os esforços cortantes e momentos fletores.

CAPACIDADE DE CARGA E RECALQUE

A capacidade de carga de um radier é calculado de forma similar de uma sapata corrida, segundo Budhu (2013) o principal é saber como as tensões estão distribuídas abaixo do radier para estimar, a ruptura por cisalhamento, sempre com as considerações de segurança.

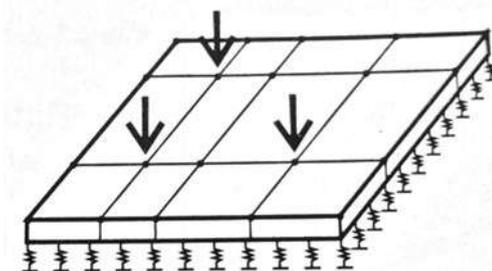
A estimativa do recalque do radier é mais complexa do que da capacidade de carga, segundo Budhu (2013) depende muito da rigidez do radier e da estrutura do solo que o suporta, dos tipos de solos, da homogeneidade do solo, das condições das águas subterrâneas, do tipo de radier e do método construtivo, com recalques toleráveis de 25mm a 50mm.

Para a capacidade e o recalque se satisfaça existem dois tipos de radier, o flexível e o rígido. O radier flexível, segundo Budhu (2013), as tensões estão sujeitas a serem distribuídas de forma uniforme, mas o recalque não será, com deslocamento tolerável de 1/250 a 1/360. O radier rígido, segundo Budhu (2013), pode sofrer grandes rotações sem danificar a estrutura, o dano causado é devido ao deslocamento relativo e não pela rotação, com deslocamento tolerável de 1/600 a 1/1000.

MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

Segundo Velloso & Lopes (2011) a utilização dos métodos dos elementos finitos se dá por meio de utilização de programas comerciais, onde são feitas as análises linear bi e tridimensional de estruturas, com elementos de placas disponíveis e com possibilidade de apoio elástico, para a análise do radier, é utilizado um elemento de placa representando o radier e para representação do solo apoios elásticos ou de mola, conforme figura 5.

Figura 05 – Tipos de radier: (a) lisos, (b) com pedestais ou em laje cogumelo, (c) nervurados (vigas invertidas) e (d) em caixão



FONTE: FONTE: Velloso & Lopes, 2011

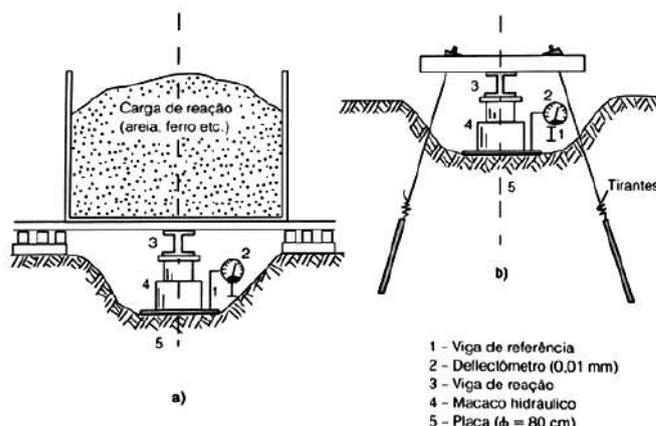
PROVA DE CARGA DIRETA SOBRE TERRENO DE FUNDAÇÃO

A prova de carga sobre terreno de fundação é um ensaio de campo realizado na superfície onde estará localizada a edificação, com a principal finalidade de verificação do comportamento do elemento de fundação com um carregamento de compressão, para estimativa da resistência do maciço de solo e os recalques decorrentes dos carregamentos em que a edificação estará aplicando no decorrer dos anos futuros.

Seria conveniente que a prova de carga fosse realizada em tamanho real a edificação, para um melhor parâmetro na definição dos elementos de fundação, e que os recalques pudessem ser observados em sua totalidade, podendo as cargas aplicadas serem aumentadas até que ocorresse o colapso do solo. No entanto não seria comumente usada devido ao custo elevado para sua execução, e a criação de um modelo nas mesmas características a da edificação em estudo, demandaria um tempo elevado para a execução. Desta forma, o uso do ensaio sobre placa normatizado pela NBR 6489 de 1984, é a melhor alternativa para determinação dos parâmetros e de todos os comportamentos do sistema, esta placa funciona como um modelo reduzido da base de uma fundação (NIYAMA et al., 1998).

Segundo Niyama et al. (1998), “Os ensaios realizados são utilizados principalmente como verificação de desempenho de um elemento estrutural de fundação, quanto à ruptura e recalques. São também realizados para fins de estudo, pesquisas e projetos. [...]” os ensaios consistem em várias etapas de execução, para interpretação dos resultados. Segundo Alonso (2011), o ensaio costuma ser realizado sobre uma placa rígida com área não inferior a 0,5m², com carregamento sendo realizado por meio de um macaco hidráulico reagindo contra uma carga ou contra sistemas de tirantes ancorados no solo, conforme figura 6.

Figura 06 – Realização de prova de carga em placa: a) Sistema reagindo contra carga b) Sistema com tirantes ancorados no solo



FONTE: FONTE: Alonso, 2011

CARGA DE COLAPSO

Segundo Cintra & Aoki (2009), carga de colapso é o valor mínimo de carga aplicado ao elemento de fundação em solo colapsível, para que aconteça o colapso. Para que se obtenham os valores de capacidade de carga (σ_r) e de tensão de colapso (σ_c) se faz necessário a execução de provas de carga em placas nas condições não inundada e pré-inundada. Para a verificação do recalque, a tensão admissível (σ_a) deverá ser:

$$\sigma_a \leq \left\{ \frac{\sigma_r/2,0}{\sigma_c/1,5} \right. \quad \text{Eq.1}$$

Conforme Cintra & Aoki (2009) com o uso de métodos teóricos, como de Terzaghi, a tensão de colapso pode ser obtida com a utilização dos parâmetros do solo na condição inundado, com isso os coeficientes de segurança mudam e a tensão de colapso passa a ser:

$$\sigma_a \leq \left\{ \frac{\sigma_r/3,0}{\sigma_c/2,25} \right. \quad \text{Eq.2}$$

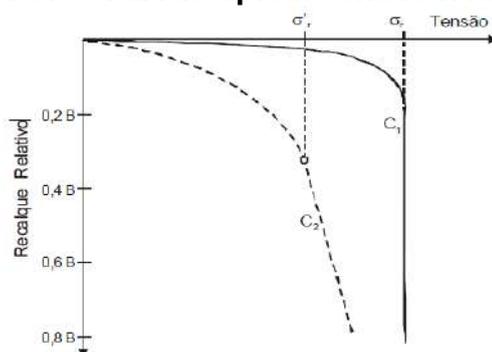
Ainda ressaltando segundo Cintra & Aoki (2009) a verificação do recalque admissível deverá ser feita com a situação mais crítica, a de solo inundado.

CURVA TENSÃO VS RECALQUE

Em uma prova de carga ao longo do ensaio é medido os recalques gerados pelas tensões aplicadas em estágios, mantidas por um tempo indeterminado até que se encontre estável aos recalques medidos. Com isso, é possível traçar uma curva

de tensão aplicada e os recalques gerados. Segundo Terzagui (1943) apud Tsuha (2003), existem dois tipos de ruptura do solo, ilustrados na figura 7, mostrando duas curvas típicas da relação C1 e C2. Segundo Tsuha (2003), para solos compactos ou rijos (C1) a ruptura é caracterizada pela abscissa σ_r da tangente vertical à curva. Para solos fofos ou moles (C2), a tensão de ruptura σ_r corresponde ao ponto em que a curva tensão x recalque passa a exibir um comportamento linear.

Figura 07 – Curvas típicas tensão x recalque



FONTE: Terzagui, 1943 apud Tsuha, 2003

Segundo Terzagui (1943) apud Costa (1999) a ruptura de uma fundação direta ocorre quando é atingida a resistência de cisalhamento do solo, com dois tipos de rupturas: a generalizada e a localizada.

Segundo Costa (1999) quando há ruptura generalizada, a tensão de ruptura pode ser obtida de forma direta com a curva tensão recalque, que é a tensão correspondente ao acréscimo de recalque sem acréscimo de carga.

Ainda segundo o autor, quando a definição nítida da tensão de ruptura não é alcançada, por uma série de fatores no ensaio, é comum deparar-se com representações intermediárias nas curvas. Dessa forma, não é possível obter a tensão de ruptura na curva tensão-recalque, sendo necessária a utilização de critério para sua determinação, sendo classificados em quatro grupos distintos por Niyama et al (1996) apud Costa (1999):

- a. Critérios limite do deslocamento total: a tensão de ruptura é fixada em um deslocamento pré-determinado. Com destaques para os critérios de Davisson (1972), NBR 6122 (1996), de Terzagui (1943), e código da cidade de Boston, onde a determinação da tensão admissível é considerada o menor valor das seguintes equações:

$$\sigma_{a \rightarrow d} = 10 \text{ mm} \quad \text{Eq.3}$$

$$\sigma_{a \rightarrow d} = \frac{25 \text{ mm}}{2} \quad \text{Eq.1}$$

Para a primeira expressão define a tensão correspondente a um recalque admissível, e a segunda um critério de ruptura.

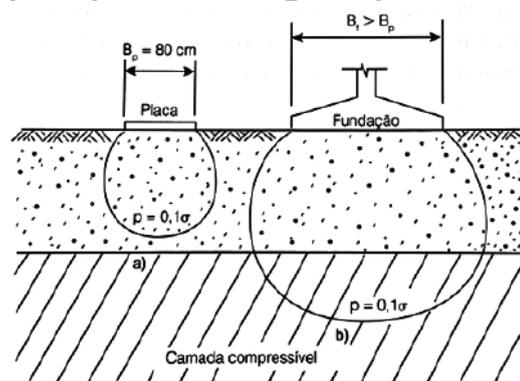
- b. Critérios da deformabilidade limite: a tensão de ruptura se equivale à máxima relação entre a tensão e o deslocamento, destacando o critério de Fuller & Hoy (1970).
- c. Critérios de interseção das fases elástica e plástica: a curva tensão-recalque traçada em escala logarítmica, na intersecção das duas retas define a carga de ruptura, destacando os métodos de De Beer (1967) e Butler & Hoy (1977).
- d. Critérios matemáticos: ajuste da curva tensão-recalque com expressões matemáticas para obter tensão de ruptura, destacam-se os métodos de Chin (1970), Mazurkiewicz (1972) e Van Der Veen (1953).

EFEITO DE ESCALA

Uma grande dificuldade em estabelecer as relações entre a capacidade de carga da fundação e o ensaio de placa, está na diferença de escala dos dois, sendo que fica mais visível essa situação em caso de solos arenosos, conforme Teixeira (1966) apud Russi (2007).

Segundo Alonso (2011) para que a capacidade de carga verificada através da prova de carga possa ser estendida para a fundação, é necessário que os bulbos de pressões da placa e da fundação estejam englobados nas mesmas características de resistência e de deformabilidade. Se houver camada de solo compressível em profundidade não solicitada pela placa, mas que haja solicitação da fundação, a prova de carga não terá valores válidos, sendo necessário o aumento da placa (figura 8) para que o bulbo de pressões englobe essa camada compressível.

Figura 8 – Caso em que a prova de carga na placa não se aplica à fundação

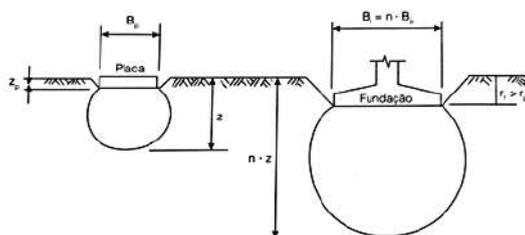


FONTE: Alonso, 2011

Com a certeza que os resultados da prova de carga podem ser extrapolados para a fundação, mesmo assim é necessário corrigir a curva pressão x recalque, (ALONSO, 2011).

Com base no trabalho de Terzagui (1955) apud Alonso (2011), existe uma razão de proporcionalidade entre a largura e o bulbo de pressão da fundação para a largura da placa ($B_F = n * B_P$), conforme figura 9.

Figura 9 – Correlação entre placas de diferentes tamanhos num mesmo solo



FONTE: Alonso, 2011

Em testes realizados em areias, verificou-se que o módulo de elasticidade cresce linearmente com a profundidade Terzagui (1955) apud Alonso (2011), onde a placa sofrerá um recalque r_p e a fundação um recalque médio $r_f > r_p$, forneceu a equação:

$$r_F = r_p * \left(\frac{2 * B_F}{B_F + B_p} \right)^2 \quad \text{Eq.5}$$

Onde:

r_F = recalque da fundação

r_p = recalque da placa

B_F = base da fundação

B_p = base da placa

Em argilas normalmente adensadas, ou argilas moles, a formulação acima é válida, já que neste tipo de solo o módulo de elasticidade cresce linearmente com a profundidade.

METODOLOGIA

Visando obter os parâmetros de resistência do solo para o estudo da viabilidade da solução de fundação em radier foram realizadas 3 provas de carga, sendo duas realizadas assente em terreno natural, uma na condição de umidade natural e outra na condição inundada, e a terceira em terreno com reforço de solo compactado com inundação realizada após a estabilização do carregamento de 10 toneladas.

Para a realização do ensaio, foi projetado um sistema de cargueira, dimensionada para uma tensão de 1kgf/cm², tensão determinada pelo projetista de fundação, de modo que fosse viável a utilização de radier como elemento de fundação para as edificações. Para cada tipo de prova de carga foi elaborado um projeto específico. Em todos os ensaios foram aplicados os carregamentos necessários para que ocorresse a ruptura do solo ensaiado.

ENSAIO EM TERRENO NATURAL

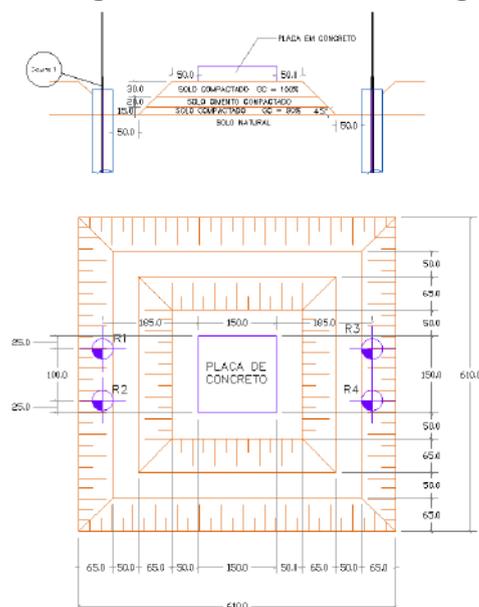
Para a realização do ensaio em terreno natural o projeto (figura 3.7) consiste de um sistema de reação para a prova de cargas de 6 vigas de concreto armado (figura 3.8), medindo 5 metros de comprimento, 1 metro de altura e 0,7 metros de espessura, com peso estimado de 8,5 tf cada, totalizando uma cargueira de aproximadamente 48 toneladas.



ENSAIO EM TERRENO COMPACTADO INUNDADO

Para a realização do ensaio o projeto (figura 12) consiste de um sistema de reação para a prova de carga de uma viga metálica de 6 metros de comprimento, 1,0 metro de altura e 0,6 metros de espessura, ancorada em quatro mono-barras rosqueadas que estarão soldadas em barras de aço comum, concretadas no interior de estacas escavadas, sendo duas estacas em cada extremidade da viga.

Figura 12 – - Prova de carga em terreno compactado inundada



A prova de carga foi realizada sobre uma sapata de concreto armado com seção transversal de 150 cm x 150 cm (22.500 cm² de área), assente sobre um aterro compactado. Destaca-se que as dimensões do aterro tal como suas especificações de compactação, foram definidas pelo projetista de fundações e foram executadas pela obra.

Para o ensaio com inundação, foi utilizada uma caixa d'água com volume de 10 mil litros, sendo este processo iniciado após a tensão de 0,44kgf/cm² atingida no carregamento, com monitoramento da prova de carga pelo período de 72 horas ininterrupto. Durante todo o ensaio, foi mantida uma lâmina d'água constante dentro da trincheira, para que a inundação do solo fosse mantida.

APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

Nas figuras 13 e 14 são apresentados os ensaios realizados em terreno natural, cujos resultados estão em termos do recalque último medido em função das tensões aplicadas.

Figura 13 – Curva tensão x recalque – umidade natural

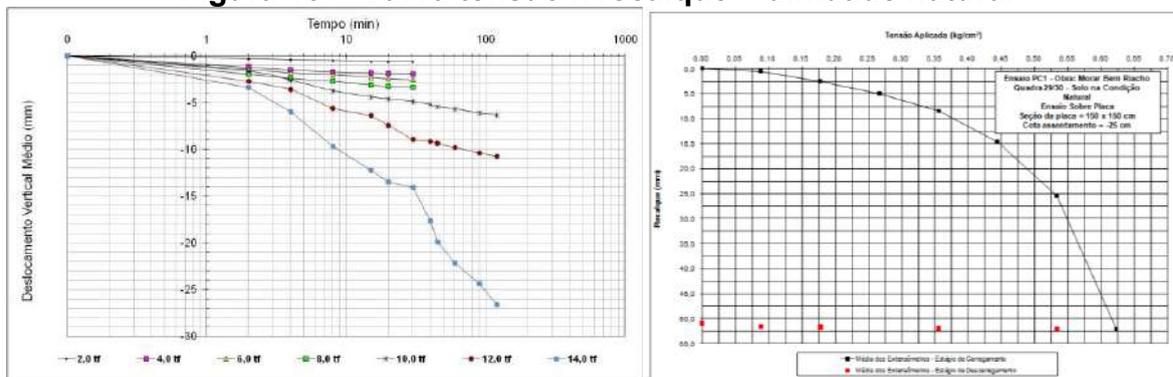
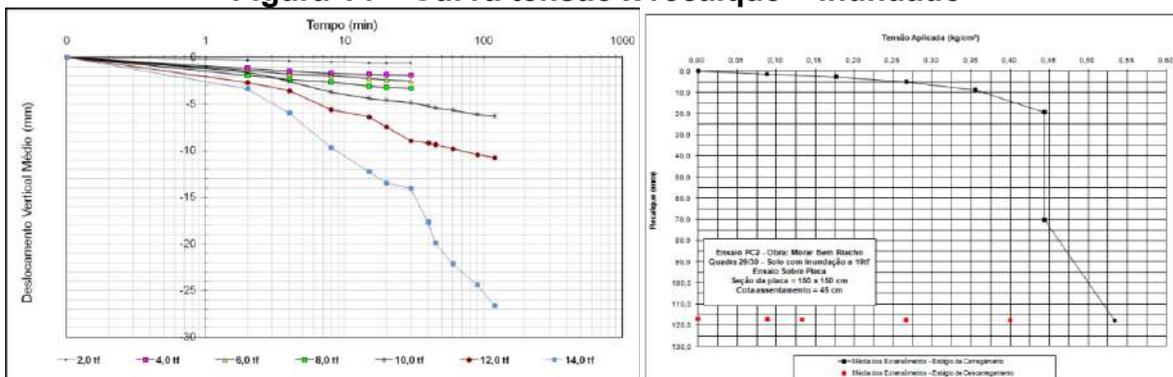
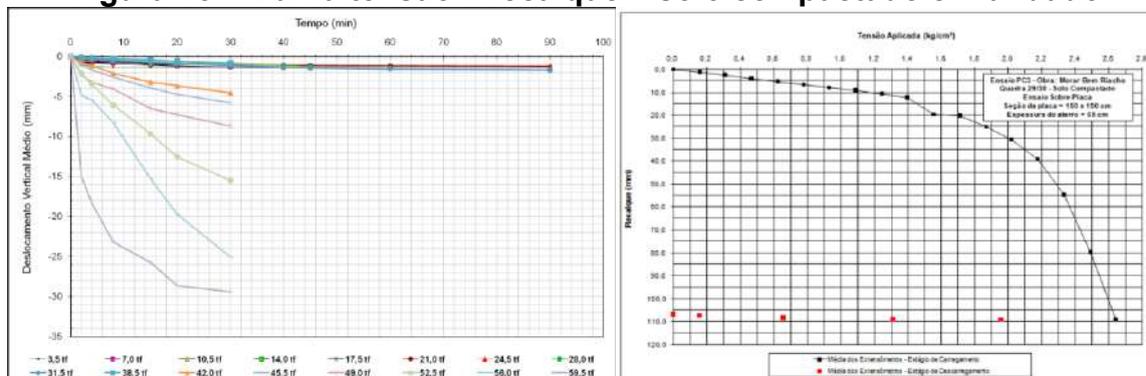


Figura 14 – Curva tensão x recalque – inundado



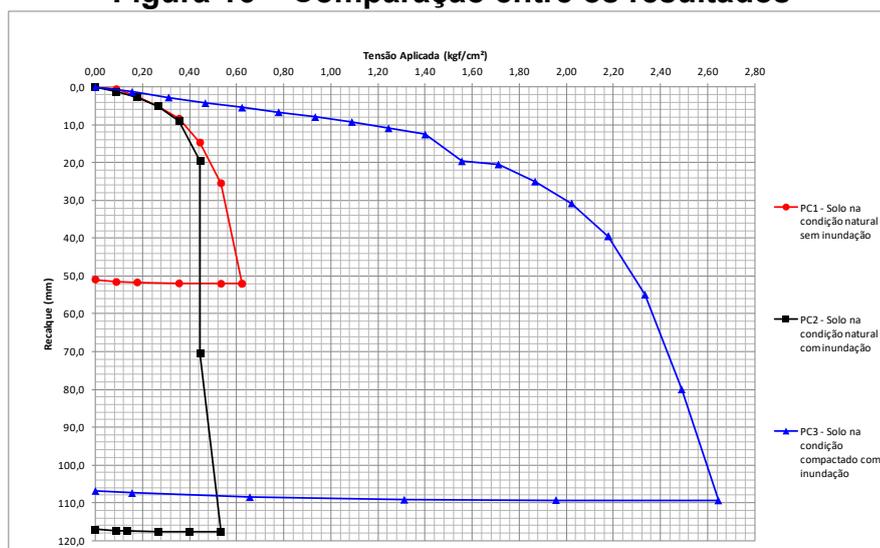
Na figura 15 é mostrado para o ensaio realizado em terreno compactado, os resultados em termos do recalque último medido em função das tensões aplicadas.

Figura 15 – Curva tensão x recalque – solo compactado e inundado



A figura 16 **Erro! Fonte de referência não encontrada.**, apresenta um comparativo do comportamento dos 3 ensaios realizados. Fica evidente a melhora do comportamento, mesmo na condição inundada, do solo compactado.

Figura 16 – Comparação entre os resultados



ANÁLISE DAS TENSÕES DEFORMAÇÕES

Para a placa em questão, a tensão admissível encontrada é igual à tensão de ruptura dividida por 1,5. Nesse caso o valor seria $2,6 / 1,5 = 1,73 \text{ kgf/cm}^2$.

Outra avaliação para a tensão admissível seria de acordo com Código da Cidade de Boston, muito utilizada no Brasil, para dimensionamento de fundações superficiais.

Nesse caso a tensão admissível seria a menor tensão encontrada no ensaio de placa de 80 cm de diâmetro, entre a tensão para 10 mm de deformação e a tensão para 25mm de deformação, considerada ruptura, dividida por 2, nesse caso dividida por 1,5, já que é prova de carga com inundação.

Para que a capacidade de carga verificada através da prova de carga possa ser estendida para a fundação, é necessária a utilização da fórmula de efeito escala. Deve-se transformar as deformações encontradas na prova de carga, em deformações da sapata, por meio da equação 2.5:

$$r_F = r_p * \left(\frac{2 * B_F}{B_F + B_p} \right)^2$$

Onde:

r_p e r_F são, respectivamente, o recalque da placa e o recalque da sapata.

B_p e B_F são, respectivamente, as menores dimensões da placa e a menor da sapata, no caso $B_p = 0,8\text{m}$ e $B_F = 1,5\text{m}$

Para 1 cm de deformação da placa, teremos:

$$r_F = 1 * \left(\frac{2 * 1,5}{1,5 + 0,8} \right)^2$$

$$r_F = 1 * (1,31)^2$$

$$r_F = 1,71\text{cm}$$

No gráfico da curva tensão x recalque da prova de carga em terreno compactado inundado, para essa deformação tem-se uma tensão de $1,50 \text{ kgf/cm}^2$.

Para 2,5cm de deformação da sapata, teremos:

$$r_F = 2,5 * \left(\frac{2 * 1,5}{1,5 + 0,8}\right)^2$$
$$r_F = 2,5 * (1,31)^2$$
$$r_F = 4,27\text{cm}$$

No gráfico da curva tensão x recalque da prova de carga em terreno compactado inundado, para essa deformação tem-se uma tensão de 2,2 kgf/cm².

Portanto:

$$\sigma_{10} = 1,50 \text{ kgf/cm}^2$$
$$\sigma_{25/1,5} = 2,2/1,5 = 1,46 \text{ kgf/cm}^2$$

Assim, a tensão admissível seria a menor, portanto $\sigma_{adm}=1,46 \text{ kgf/cm}^2$.

Utilizando o modelo do coeficiente vertical proposto por Winkler (1867), onde caracteriza o solo como uma série de molas elásticas lineares desconectadas, de tal modo que as deformações ocorrem somente onde existe carregamento. É assumido que a tensão e a deformação de cada ponto estão relacionadas por um módulo de reação ou coeficiente de recalque, denominado Kv. Relacionado pela equação:

$$P = K_v * d$$

Onde:

- P é a tensão aplicada
- d é a deformação
- Kv é o coeficiente de recalque ou reação vertical que pode ter como unidade kgf/cm³ ou tf/m³.

O coeficiente de reação vertical do solo Kv do radier, foi calculado pela equação 2.5 utilizando o Kv encontrado na prova de carga da sapata para 10mm de deformação, Kv 1.100tf/m³.

$$0,01 = r_p * \left(\frac{2 * 12,3}{12,3 + 1,5}\right)^2$$
$$0,01 = r_p * (1,78)^2$$
$$0,01 = r_p * 3,17$$
$$r_p = 0,00315\text{mm}$$

Para o recalque calculado do radier, no gráfico da curva tensão x recalque da prova de carga em terreno compactado inundado, para essa deformação tem-se uma tensão de $1,071 * 10^{-4} \text{ kgf/cm}^2$.

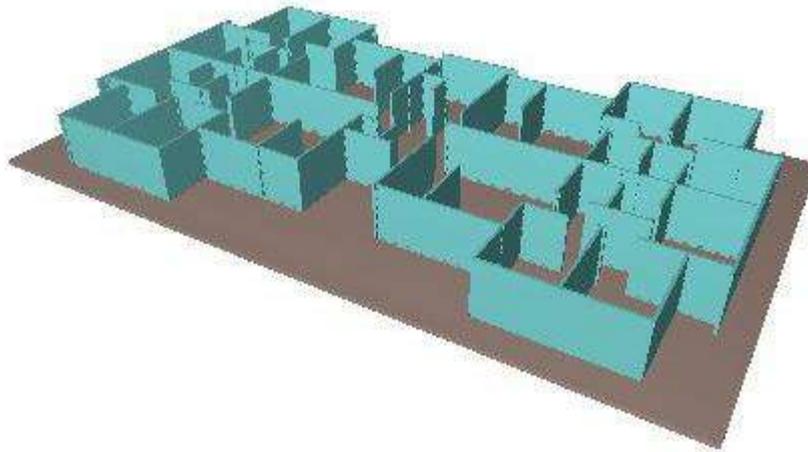
$$1,071 = K_v * 3,15 * 10^{-6}$$

$$K_v = 340.000 \text{ kgf/m}^3$$

$$K_v = 340 \text{ tf/m}^3$$

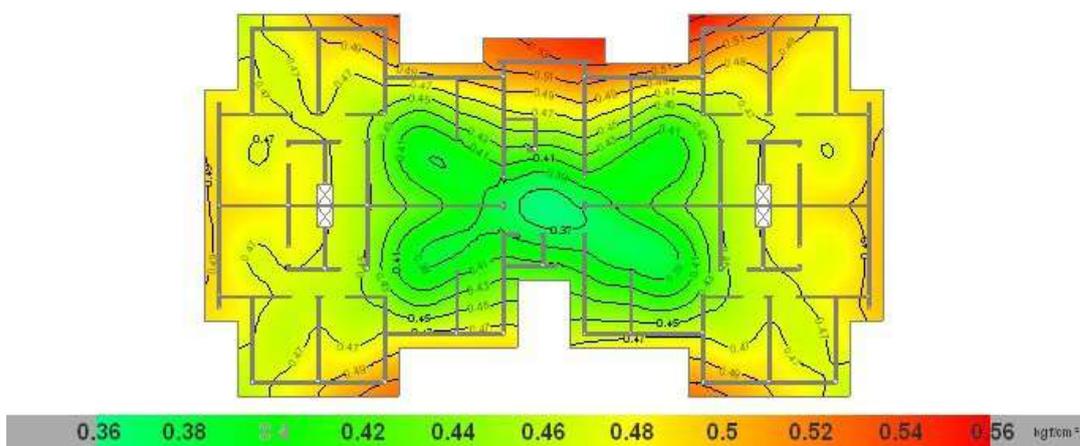
Foi elaborado modelagem do radier (figura 17) em programa de elementos finitos, utilizando coeficiente de reação vertical K_v de 340 tf/m^3 e cargas na parede da edificação.

Figura 17 – Imagem da modelagem do radier



Estas deformações geram tensões de trabalho no terreno de acordo com a figura 18, calculado pelo programa de elementos finitos.

Figura 18 – Tensões de trabalho no radier para deformações instantâneas



Deve-se verificar se as tensões de trabalho no radier estão adequadas com a tensão admissível encontrada na prova de carga.

Com isso temos as seguintes verificações:

$$\sigma_{\text{máxima}} = 0,56 \text{ kgf/cm}^2$$

$$\sigma_{\text{mínima}} = 0,36 \text{ kgf/cm}^2$$

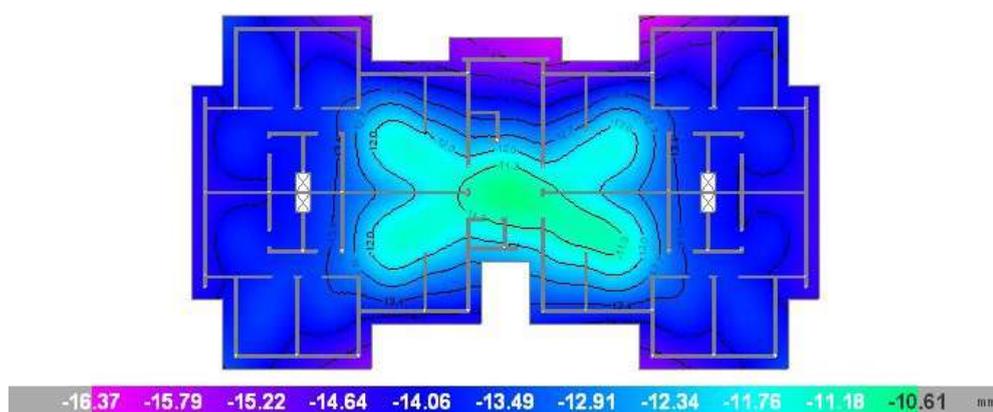
$$\sigma_{\text{adm}} = 1,46 \text{ kgf/cm}^2$$

$$\sigma_{\text{máxima}} \leq 1,3 \times \sigma_{\text{adm}} \rightarrow 0,56 \leq 1,90 \text{ OK.}$$

$$\sigma_{\text{média}} \leq \sigma_{\text{adm}} \rightarrow 0,46 \leq 1,46 \text{ OK.}$$

O diagrama de isodeformação obtido pela modelagem (figura 19) apresenta as deformações calculadas para o radier. A deformação máxima encontrada foi 16,37mm, adequada para este tipo de fundação, que conforme revisão bibliográfica pode chegar a 50mm. A deformação distorcional em nenhum dos pontos do radier apresentou valores acima de L/500, mostrando que o radier calculado não gerará patologias na edificação.

Figura 19 – Isodeformada KV=340



CONCLUSÕES

Os resultados de caracterização e dos ensaios de adensamento mostraram tratar-se de perfil de solo colapsível, para o qual o recalque por efeito de carga é importante, sendo relativamente pequeno aquele oriundo do efeito da inundação, devido à elevada umidade natural do perfil de solo. Apesar da já elevada umidade inicial presente ao longo dos perfis de solo, esses resultados tornam recomendável se evitar a infiltração de águas pluviais e em especial de águas servidas nas proximidades das fundações.

No gráfico comparativo entre as 3 provas de carga de tensão-deslocamento fica evidente a melhora do comportamento, da sapata em solo compactado, mesmo na condição inundado.

A modelagem pelo método de elementos finitos mostrou que a tensão de trabalho gerada por edificações de 4 pavimentos em parede de concreto é muito reduzida. No caso estudado chegou-se a tensão máxima de 0,56 kgf/cm², e tensão média de 0,47kgf/cm². Essas baixas tensões são devido ao reduzido carregamento de peso próprio do prédio de apenas 4 pavimentos, mas também devido a elevada rigidez estrutural do prédio apresentar uma melhor distribuição de cargas ao solo.

A tensão admissível encontrada na prova de carga em solo reforçado foi 1,46 kgf/cm². Essa tensão é bem superior a tensão de trabalho encontrada na modelagem pelo MEF. Conclui-se que a tensão de trabalho do radier está de acordo com a tensão admissível encontrada na prova de carga.

No entanto, para viabilizar o uso de radier em solos colapsíveis, deverá ser dimensionado o reforço de solo através de aterro compactado, nas condições em que a dissipação de tensão possa chegar ao terreno natural em valor de tensão menor que a tensão de colapso do terreno em condições inundadas.

O cálculo da distribuição de tensão em profundidade deve ser feito para que a camada de solo reforçado transfira uma tensão abaixo da tensão de colapso do solo. Isso foi feito pelo projetista utilizando teorias de distribuição de tensões em profundidade, e por meio de software tipo GEO5 ou PLAXIS, mas não faz parte do escopo desse trabalho. Com isso foi determinado a espessura da camada de solo reforçado.

O coeficiente de mola encontrado na prova de carga e transformado no K_v do radier foi 340tf/m³. É um coeficiente bastante reduzido, mas mesmo assim resultou em deformações admissíveis ao radier estudado. Deformação máxima de 16,71mm e uma deformação média de 13,97mm, bem adequada para radier flexível, como é o caso.

Não foi encontrado nenhum recalque distorcional maior que L/500, portanto, mostrando que as deformações do radier não gerarão fissuras na edificação.

REFERÊNCIAS

- ALONSO, U.R. (2011). Previsão e controle das fundações: uma introdução ao controle de qualidade em fundações. São Paulo, SP, Blucher, 2ª Edição, 149p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Projeto e execução de fundações, NBR 6122. Rio de Janeiro, 2010. 91 páginas.
- BUDHU, M., (2013). Fundações e estruturas de contenção. Tradução de Carneiro, L.A.V., Marques, M.E.S., Rio de Janeiro, RJ, Livros técnicos e científicos editora, 425p.
- CINTRA, J.C.A., AOKI, N. (2009). Projeto de Fundações em Solos Colapsíveis. , São Carlos, SP, EESC-USP, 108p.
- COSTA, Y.D.J (1999) Estudo do comportamento de solo não saturado através de prova de carga em placa. Dissertação de Mestrado, 138p, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Paulo, SP.
- DELGADO, A. K. C. (2002). Influência da sucção no comportamento de um perfil de solo tropical compactado. Dissertação de Mestrado, 200p, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF.
- DOS SANTOS, C.R.B. (2003). Influência da Modificação do Estado de Tensões e da Sazonalidade nos Parâmetros Geotécnicos Oriundos de Ensaio de Campo na Argila Porosa de Brasília. Dissertação de Mestrado, 118p, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF.
- GUIMARÃES, R. C. (2002). Análise das Propriedades e Comportamento de um Perfil de Solo Laterítico Aplicada ao Estudo do Desempenho de Estacas Escavadas. Dissertação de Mestrado, 183p, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF.
- NIYAMA, S., AOKI, N., CHAMENCKI, P.R., (1998) Verificação de desempenho, Fundações Teoria e Prática. Hachich, W., Falconi, F.F., Saes, J.L., Frota, R.G.Q., Carvalho, C.S & Niyama, S. 2nd Eds, Pini, São Paulo, SP. pp. 723-751.
- RUSSI, D. (2007). Estudo do comportamento de solos através de ensaios de placa de diferentes diâmetros. Dissertação de mestrado, 147p, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Área de Concentração em Construção Civil e Preservação Ambiental, Santa Maria, RS.
- TEIXEIRA, A.H., GODOY, N.S., (1998). Análise, projeto e execução de fundações profundas. Fundações Teoria e Prática. Hachich, W., Falconi, F.F., Saes, J.L., Frota, R.G.Q., Carvalho, C.S & Niyama, S. 2nd Eds, Pini, São Paulo, SP. pp. 227-264.
- TSUHA, C. H. C. (2003). Utilização de Penetrômetro Manual em Solo Colapsível e Comparação com Resultados de Provas de Carga em Placa e em Sapata. Dissertação Mestrado, 68p, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.
- VELLOSO, D.A., LOPES, F.R., (2011). Fundações – Volume 1. Rio de Janeiro, RJ, , Oficina de textos, 2ª Edição, 290p.
- YAZIGI, W., (2011). A técnica de edificar. São Paulo, SP, Pini , 11ª Edição, 807p.