

XX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
IX Simpósio Brasileiro de Mecânica das Rochas
IX Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
VI Conferência Sul Americana de Engenheiros Geotécnicos Jovens
XI Congresso Luso Brasileiro de Geotecnia
23 a 26 de Agosto de 2022 – Campinas – SP



COBRAMSEG 2022
23 A 26 DE AGOSTO | CAMPINAS | SP | BRASIL
COBRAMSEG | SBMR | GEOJOVEM | CLBG

Ensaio de Placa em Terreno Natural e em Solo-Cimento para Determinação de Parâmetros de Projeto

Leonardo Garcia de Albuquerque Santana
Engenheiro Civil, Maceió, Brasil, leonardo.santana@ctec.ufal.br

Juliane Andréia Figueiredo Marques, D.Sc
Profa. Adjunto UFAL; Responsável Técnica da AGM Geotécnica Ltda, Maceió, Brasil,
julianemarques@hotmail.com

Ricardo Figueiredo Marques
Responsável Técnico da AGM Geotécnica Ltda, Maceió, Brasil, ricardo@agmgeotecnica.com.br

RESUMO: O presente trabalho analisa os resultados de três ensaios de placa, realizados de acordo com a NBR-6489/19, com a motivação de se verificar a viabilidade da implantação de uma fundação direta do tipo Radier, em um empreendimento habitacional com 8 blocos de apartamentos, na parte alta da cidade de Maceió-AL. Uma vez que, após a realização da investigação do subsolo por meio do SPT (*Standard Penetration Test*) encontrou-se um perfil de solo predominantemente argiloso, com baixa resistência nos primeiros metros, onde seria a cota de assentamento da fundação. Para isso, realizaram-se três ensaios em diferentes situações: solo-cimento pré-inundado (PC-01), solo natural (PC-02) e solo natural pré-inundado (PC-03), sendo este solo natural composto nas camadas superficiais de uma argila silto-arenosa, afim de garantir a caracterização do solo diante de diversas situações, prevendo a saturação do solo por alguma anomalia accidental. Com base nos resultados dos ensaios de placa e estimando os recalques totais para a pressão aplicada pelo Radier no solo ($7,2 \text{ tf/m}^2$), obtiveram-se valores satisfatórios para este tipo de fundação, viabilizando tecnicamente seu uso.

PALAVRAS-CHAVE: Fundação Direta, Fundação em Radier, Solo-Cimento, Ensaio de Placa, Recalques.

ABSTRACT: The paper analyzes three plate load tests and their results, those carried out according to NBR-6489/19, with the intuition of verifying the viability of a direct foundation in an 8 blocks housing project, in the upper part of the city of Maceió. AL. Once the building's underground soil was investigated, using an SPT (*Standard Penetration Test*), a low-resistance mostly clay soil was found in the first meters, where the radier foundation would occur, with no water level found. Thus, three load tests were carried out, each in a different situation: pre-flooded cement-soil(PC-01), natural soil(PC-02) and pre-flooded natural soil(PC-03), being this natural soil made of a silty-sandy clay, in the way of characterizing the soil in some situations, the saturation of the soil was made to predict any accidental anomalies. Based on the results of the plate tests and estimating the total settlements for the tension applied by the radier foundation in the soil ($7,2 \text{ tf/m}^2$), satisfactory values were obtained for this type of foundation, technically enabling its use.

KEYWORDS: Direct Foundation, Radier Foundations, Soil-Cement, Plate Load Test, Settlements;



1. Introdução

Na determinação do tipo adequado de fundação para uma construção, consideram-se aspectos técnicos (investigação do subsolo, cargas provenientes da estrutura), econômicos e regionais (maquinário disponível, construções vizinhas). Uma vez que, escolhida de maneira incoerente com a realidade, a fundação pode trazer desde gastos excessivos, até riscos aos moradores, como a ruína da estrutura. Diante disso, entram em cena as fundações diretas e profundas, descritas pela NBR – 6122 “Projeto e execução de fundações” (ABNT, 2019).

Complementando a NBR-6122, tem-se a necessidade de investigação do subsolo, costumeiramente feita por meio da sondagem de simples reconhecimento com SPT (*Standard Penetration Test*), em que entende-se o perfil do subsolo naquele ponto do ensaio, a cada metro, como citado na NBR – 6484/2020 “Solo – Sondagens de simples reconhecimento com SPT – Método de ensaio” descrevendo o solo em tipo, compacidade e/ou consistência, presença ou não do nível d’água e resistência (ABNT, 2020).

Para a concepção destes empreendimentos, deve-se interpretar de maneira assertiva os dados obtidos por meio sondagens e observações *in loco*, afim de evitar erros de projeto e execução, que podem ocasionar em patologias futuras (MILITITSKY et al, 2015). Além do uso de práticas construtivas e insumos que garantam a qualidade almejada e estejam de acordo com as normativas brasileiras, de modo a viabilizando economicamente a construção.

Se durante a fase de investigação geotécnica, for identificado um solo de baixa resistência em sua profundidade inicial e que a utilização de fundações profundas seja inviável tecnicamente ou economicamente, segundo Vitali (2008), uma possível solução para esta problemática é o melhoramento das propriedades do solo, através do tratamento com aditivos e compactação, sendo o mais utilizado o cimento Portland.

Com isso, na construção de um empreendimento voltado para habitação de baixo custo, fica o seguinte questionamento: ao se utilizar fundações diretas, haverão deformações acima das admissíveis na estrutura, mesmo com o melhoramento do solo? A resposta a esse questionamento é o objetivo principal do presente trabalho.

2. Características do Solo e do Empreendimento

O empreendimento em estudo possui 8 blocos de apartamentos residenciais, formados por 1 pavimento térreo e 5 pavimentos tipo. Possui caráter de habitação de baixo custo, localizando-se na Rua Mangueira, no bairro Cidade Universitária, em Maceió-AL, ao lado do shopping Pátio Maceió e de uma importante via de ligação da cidade, a Avenida Menino Marcelo.

Na área em estudo foram executados 10 furos de sondagem à percussão com SPT (*standard penetration test*) na área do empreendimento, a fim de caracterizar o perfil do solo e obter parâmetros de resistência e deformabilidade que subsidiaram o projetista na elaboração do projeto de fundações. Para a realização dos ensaios de placa, foram utilizados os resultados de dois furos, SP-01 e SP-03, com perfis semelhantes, próximos ao bloco residencial “A”.

Estes perfis apresentaram camadas de argilas silto-arenosas, com SPT’s de 6 e 4 golpes aos 2 metros de profundidade, respectivamente; crescendo para 11 e 12 golpes aos 6 metros e atingindo 29 e 22 golpes na profundidade de 10 metros. Abaixo deste nível, os SPT’s chegam a mais de 40 golpes aos 15 metros, como se vê no SP-03 pela figura 1. Além disso, não foi encontrado durante a sondagem o nível do lençol freático da região, que para a formação geológica predominante na região, a Formação Barreiras, esse nível está abaixo dos 30 metros nos tabuleiros (MARQUES, 2006).

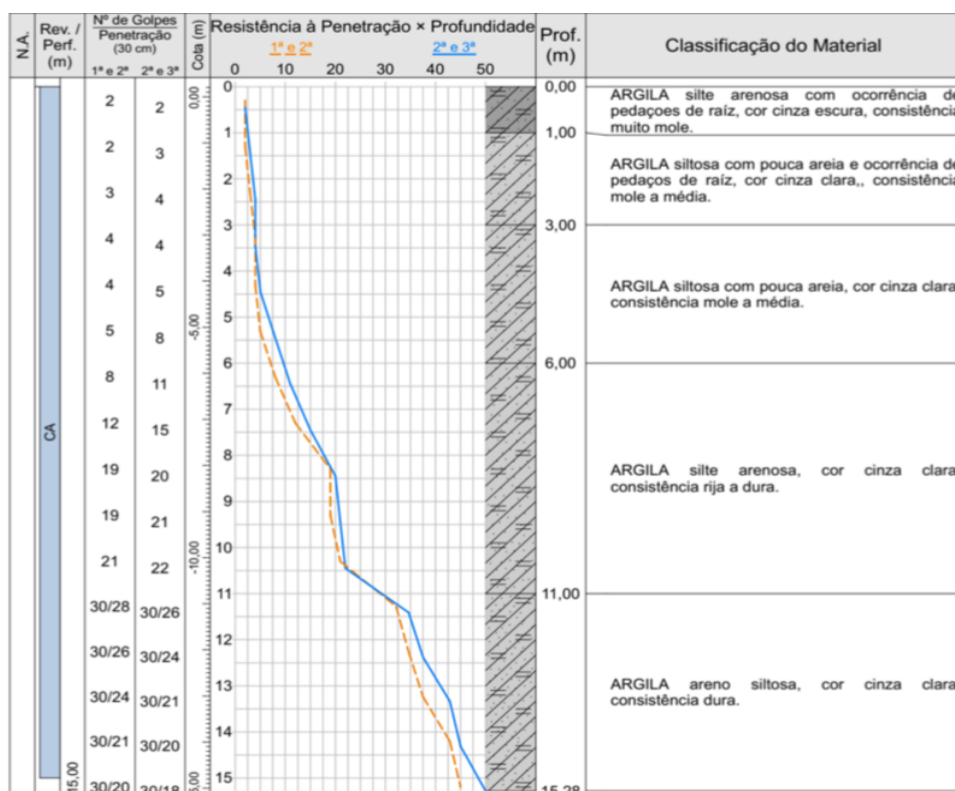


Figura 1: Perfil de sondagem do furo SP-03 (AGM, 2020)

3. Ensaios de Placa

3.1. Especificações do Ensaio

Para o caso deste trabalho, tem-se na NBR-6489/2019 – “Solo – Prova de carga estática em fundação direta” todas as referências para utilização deste ensaio de placa.

Estes carregamentos são aplicados até que: ocorra a ruptura do terreno; o deslocamento da placa atinja o limite estabelecido pelo projetista; ou a carga aplicada atinja o dobro do valor da taxa de trabalho admitida pelo solo.

Para a preparação do ensaio, devem-se ter: informações acerca das sondagens e que estas estejam próximas ao local de carregamento, a cota de carregamento como a cota de assentamento da fundação e a aparelhagem protegida de intempéries.

3.2. Considerações sobre os Ensaios

Para a melhor relação entre os ensaios de placa com a realidade do empreendimento a ser executado, deve-se dimensionar as formas de carregamento levando em consideração os conhecimentos teóricos e práticos acerca daquela região.

Leva-se em consideração os conhecimentos sobre o solo local, a partir de relatórios de sondagem, mas também o que Almeida (1999) conceitua como anomalia acidental, que são situações não previstas em projeto, mas que podem gerar patologias.

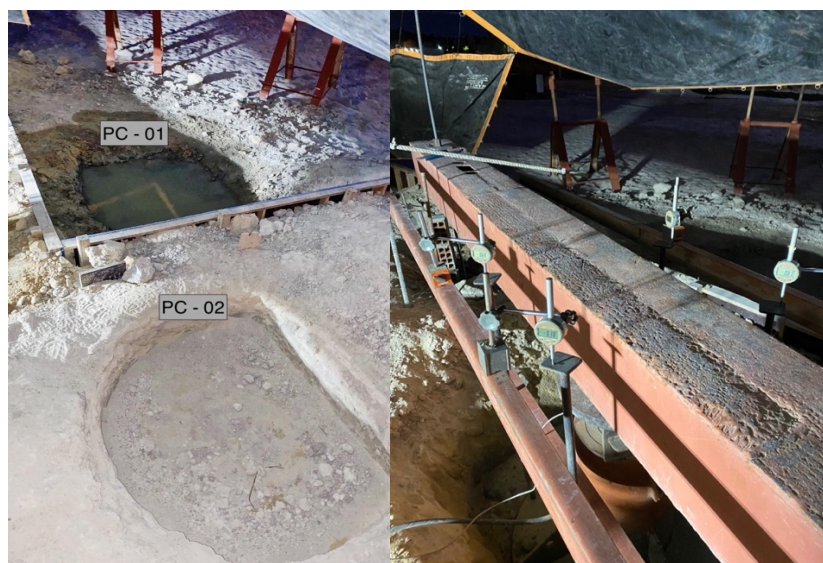
Deste modo, pode ser necessário analisar o solo na sua condição saturada, apesar daquele perfil não apresentar o nível de água. Tem-se como exemplos dessa situação o rompimento de tubulações de água, derrame contínuo de água de um reservatório e falta de calhas para destinação correta de água da chuva. Esse acúmulo de água não previsto pode provocar a saturação do solo, erodindo a sua parte mais frágil e provocando movimentações, influenciando principalmente as fundações superficiais (CARVALHO, 2010)



3.3. Ensaios Realizados

Realizaram-se 3 ensaios de placa, sendo o PC-01 executado sobre a camada de solo-cimento, com inundação prévia, o PC-02 sobre o terreno natural, sem inundação prévia e o PC-03 sobre o terreno natural com inundação prévia, como se vê nas figuras 2 e 3. Essas três condições distintas para o terreno durante os testes tem por objetivo conhecer o comportamento mecânico do solo em todos esses casos. Os locais de ensaio foram situados dentro da área de abrangência dos furos de sondagem SP-01 e SP-03, para se trabalhar com menos incertezas sobre a caracterização do solo.

Utilizou-se uma placa de 80cm de diâmetro, altura de escavação igual à de assentamento do Radier, de 30cm, macaco hidráulico para aplicar os carregamentos e duas estacas de reação por teste, com comprimento de 6m e diâmetro de 40cm.



Figuras 2 e 3: Escavações dos ensaios PC-01 e PC-02 e ensaio de placa do PC-03 sendo realizado. (Autor, 2020)

Para estimar a pressão aplicada pelo Radier ao solo, considerou-se a sobrecarga de 12kPa (1,2tf/m²) por pavimento, de acordo com os conhecimentos práticos de dimensionamento de estruturas de concreto armado, sendo então a pressão de cálculo aplicada pela superestrutura de 6 pavimentos igual a 72kPa (7,2tf/m²).

O tipo de carregamento escolhido foi o lento, o qual prevê que a carga de cada estágio deve ser mantida até a estabilização dos deslocamentos ou por no mínimo 30min, além de leitura imediata dos deslocamentos após a aplicação da carga (ABNT, 2019). Foram utilizados 6 estágios de pressão para a fase de carregamento, sendo 30 minutos o tempo total de cada estágio, já a fase de descarregamento foi feita em 4 estágios, com cada um deles variando em 15 minutos.

4. Solo-Cimento

Na área onde será erguido o empreendimento, foi realizado a substituição dos 2 metros iniciais do solo por solo-cimento compactado no traço de 20:1, em que para cada parte de cimento incorporada, tem-se 20 partes de solo natural e compactação a ser realizada em camadas de 20 centímetros.

Dessa forma, busca-se aumentar a rigidez do solo a partir de uma dupla camada, sendo a inicial formada pelo solo-cimento e a segunda por solo natural, a fim de diminuir os recalques totais da edificação e viabilizar a utilização de fundações diretas.

5. Resultados



5.1. Apresentação e Interpretação dos Resultados dos ensaios

A partir dos três ensaios de placa efetuados no solo, tem-se como resultado um gráfico Tensão x Recalque, mostrado na figura 4, formatado a partir dos valores das médias das leituras dos deflectômetros no início e no fim de cada estágio.

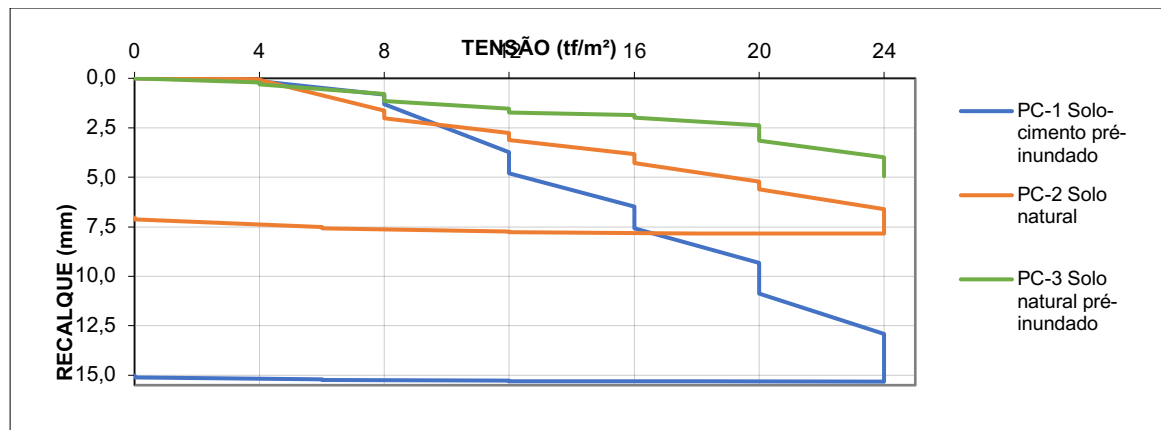


Figura 4: Gráficos Tensão x Recalque dos ensaios PC-01, PC-02 e PC-03. (Autor, 2021)

De posse destes dados, percebe-se que as três curvas em questão apresentam um comportamento semelhante até o segundo estágio de carregamento ($p=8 \text{ tf/m}^2$), com diferenças de recalques menores que 1mm, sendo o do PC-01 de 1,3mm, no PC-02 de 2,01mm e no PC-03 com 1,16mm. Deste modo, para o nível de pressão aplicado pela radier ($p_{adm}=7,2 \text{ tf/m}^2$), os valores de recalques encontrados para as condições de solo ensaiadas são próximos, como se vê na figura 5.

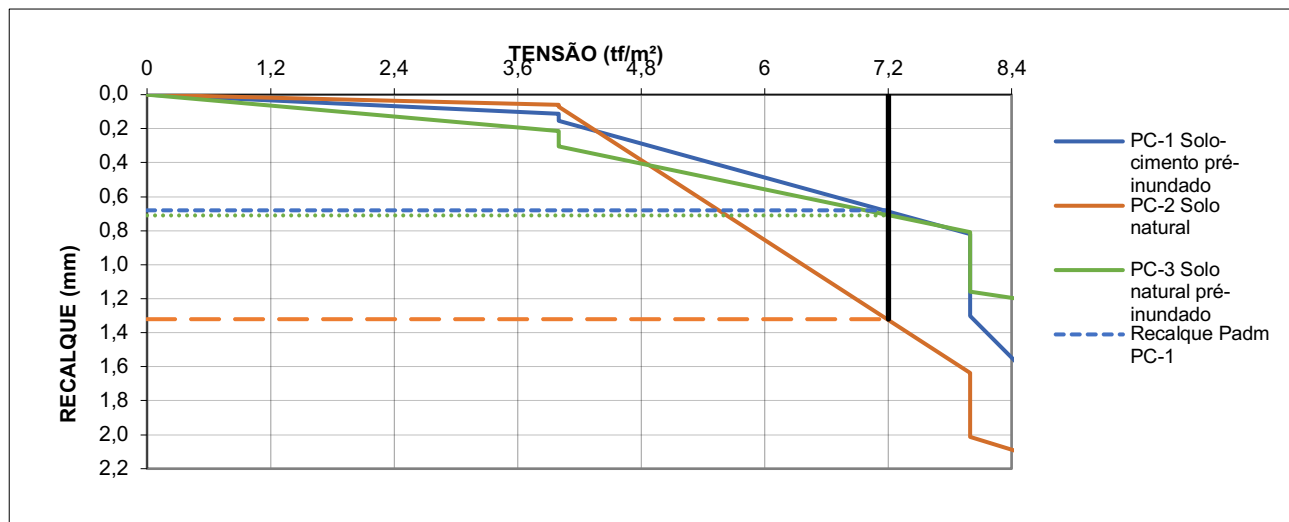


Figura 5: Pontos de Recalque para cálculo das curvas PC-01, PC-02 e PC-03 a partir da Pressão Admissível. (Autor, 2021)

Disso, tem-se que o recalque das curvas PC-01, PC-02 e PC-03, para a pressão admissível de $7,2 \text{ tf/m}^2$, podem ser aproximados para 0,68mm, 1,32mm e 0,71mm, respectivamente. Então, calculam-se os coeficientes de recalque a partir da equação 1, para as situações Ksc (solo-cimento pré-inundado), Ks (solo natural) e Ksi (solo natural pré-inundado):



$$K_s = \frac{\sigma}{\rho} \quad (1)$$

$$K_{sc} = \frac{7,2}{0,68 \times 10^{-3}} = 10.588,23 \left(\frac{\text{tf}}{\text{m}^2} \right); K_s = \frac{7,2}{1,32 \times 10^{-3}} = 5.454,54 \left(\frac{\text{tf}}{\text{m}^2} \right); K_{si} = \frac{7,2}{0,71 \times 10^{-3}} = 10.140,84 \left(\frac{\text{tf}}{\text{m}^2} \right)$$

Para estimar o módulo de deformabilidade (E_s) das camadas de solo, a partir da equação 2, é necessário adotar os valores do coeficiente de forma da placa rígida (I_p) e do coeficiente de Poisson. No caso dos ensaios de placa, onde se considera uma placa circular rígida, tem-se $I_p=0,79$, já o coeficiente de Poisson, por se ter uma argila saturada, no caso dos PC-01 e PC-03 (pré-inundados), e uma argila não saturada, no caso do PC-02, decidiu-se trabalhar com o valor de $\nu = 0,35$; e por fim, para o diâmetro da placa rígida utilizada, tem-se $B=0,80\text{m}$. Com essas considerações, pode-se estimar o módulo de deformabilidade do solo, sendo E_{sc} (solo-cimento pré-inundado), E_s (solo natural) e E_{si} (solo natural pré-inundado):

$$E_s = \frac{\sigma}{\rho_i} * B * (1 - \nu^2) * I_p \quad (2)$$

$$E_{sc} = \frac{7,2}{0,68 \times 10^{-3}} * 0,8 * (1 - 0,35^2) * 0,79 = 5.872,23 \text{ tf/m}^2;$$

$$E_s = \frac{7,2}{1,32 \times 10^{-3}} * 0,8 * (1 - 0,35^2) * 0,79 = 3.025,09 \frac{\text{tf}}{\text{m}^2};$$

$$E_{si} = \frac{7,2}{0,71 \times 10^{-3}} * 0,8 * (1 - 0,35^2) * 0,79 = 5.624,11 \text{ tf/m}^2.$$

Com o intuito de encontrar o resultado mais próximo da realidade, foi considerado um perfil estratigráfico do terreno em questão, levando em consideração os furos de sondagem previamente apresentados (SP-01 e SP-03) e incluindo a camada de solo-cimento, a ser realizada nos 2 metros iniciais abaixo do Radier.

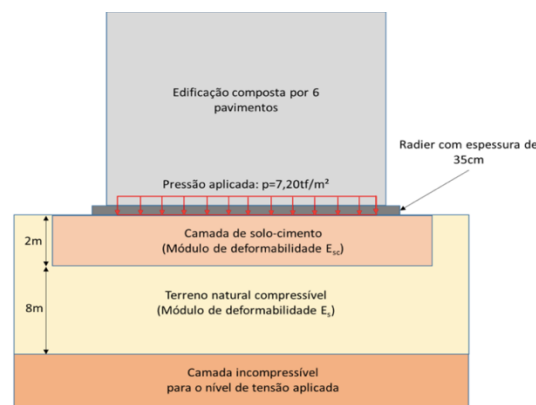


Figura 6: Perfil estratigráfico do terreno ensaiado. (AGM, 2020)

De forma conservadora, adotou-se que a pressão aplicada pelo Radier, assim como os módulos de deformabilidade do solo, se mantivessem constantes ao longo da profundidade, tanto na camada de solo-cimento quanto no solo natural abaixo desta. Com isso, foi calculado um único módulo de deformabilidade médio solo (E_m), representativo para os dois materiais por meio da média ponderada:

$$E_m = \frac{E_{sc} \times 2m + E_s \times 8m}{10m} = \frac{5.872,23 \times 2 + 3.025,09 \times 8}{10} \quad (3)$$

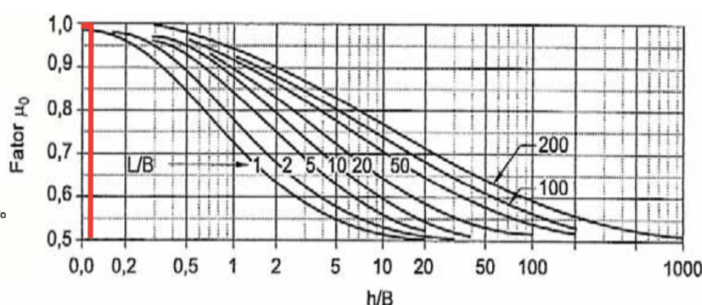
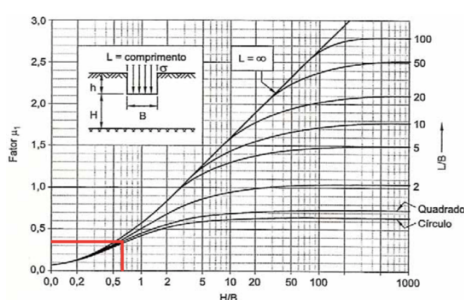
$$E_m = 3.594,52 \text{ tf/m}^2$$

As dimensões da laje do Radier são $B=16,20\text{m}$ e $L=36,30\text{m}$ e os fatores empíricos de influência do embutimento da fundação (μ_0) e da espessura da camada de solo compressível (μ_1) foram encontrados a partir da tabela 1 e figuras 7 e 8, e considerados os valores de 1,0 e 0,35, respectivamente.



Tabela 1: Valores para encontrar fatores μ_0 e μ_1 . (Autor, 2021)

Dimensões	
L (m)	36,3
B (m)	16,2
h (m)	0,3
H (m)	10
L/B	2,241
H/B	0,617
h/B	0,019



Figuras 7 e 8: Fatores μ_0 e μ_1 para o cálculo de recalques imediatos de fundação superficial flexível em camada de argila finita. (Cintra *et al*, 2003)

Assim, pôde-se estimar o recalque total da fundação em Radier a partir da equação 4:

$$\rho = \mu_0 * \mu_1 * \frac{\sigma * B}{E_s} \quad (4)$$

$$\rho = 1 \times 0,35 \times \frac{7,2 \times 16200}{3.594,52} = 11,36 \text{ mm}$$

O valor encontrado para o recalque total é satisfatório, uma vez que comparado aos limites recomendados por Skempton & MacDonald (1951), que é ρ_{lim} entre 65 e 100mm. Dessa forma, as fundações projetadas atendem aos critérios geotécnicos de desempenho, evitando assim o surgimento de patologias futuras na edificação.

6. Conclusão

De acordo com os resultados encontrados, concluiu-se que a consideração de duas camadas de solo, sendo esta primeira composta de solo-cimento com espessura de 2 metros, e a segunda de solo natural entre a profundidade de 2 a 10 metros, seria eficiente e segura para o tipo de terreno e para a ordem de grandeza dos carregamentos aplicados pelas edificações do empreendimento.

Os três ensaios de placa (PC-01, PC-02 e PC-03) executados no terreno, mostraram que tanto a camada de solo-cimento quanto o solo na condição pré-inundada apresentaram coeficientes de recalque muito próximos para o nível de pressão aplicado pelo radier. Entretanto, para o solo na condição natural a rigidez encontrada foi ligeiramente menor para este nível de tensão. Isto pode ser explicado pelo fato da inundação causar uma redução dos vazios devido à reorganização dos grãos de areia, tornando-se o solo mais denso. Por outro lado, o solo-cimento apresentou recalques maiores para níveis de tensões superiores a 10tf/m², provavelmente por deficiência da compactação das camadas ou não-uniformidade da mistura do cimento com o solo natural no momento do preparo.

XX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
 IX Simpósio Brasileiro de Mecânica das Rochas
 IX Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
 VI Conferência Sul Americana de Engenheiros Geotécnicos Jovens
 XI Congresso Luso Brasileiro de Geotecnia
 23 a 26 de Agosto de 2022 – Campinas – SP



COBRAMSEG 2022
 23 A 26 DE AGOSTO | CAMPINAS | SP | BRASIL
 COBRAMSEG | SBMR | GEOJOVEM | CLBG

Tomando-se como base os resultados dos ensaios, a previsão de recalques do radier foi realizada considerando os parâmetros de deformabilidade da camada de solo-cimento e do solo na sua condição natural, uma vez que o solo na umidade natural apresentou rigidez menor do que o solo pré-inundado. O recalque total estimado foi de 11,36mm para o nível de tensão aplicado pelo radier. Este valor pode ser considerado perfeitamente aceitável para o tipo de edificações em estudo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALMEIDA, D. F. *Patologia, Terapia e Profilaxia nas Edificações de Concreto – parte 1*. Qualidade na Construção, São Paulo, ano II, n. 14, p. 33-38, men. 1999.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 6122: Projeto e execução de fundações*. Rio de Janeiro, 2019.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 6489: Solo – Prova de carga estática em fundação direta*. Rio de Janeiro, 2019.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 6484: Solo – Sondagens de simples reconhecimento com SPT – Método de ensaio*. Rio de Janeiro, 2020.
- CARVALHO, D. M. C. *Patologias das Fundações: Fundações em Depósitos de Vertente na Cidade de Machico*. Dissertação. Universidade da Madeira, 2010.
- CINTRA, J. C. A.; AOKI, N.; ALBIERO, J. H. *Tensão Admissível em Fundações Diretas*. 1 ed. São Carlos: Rima Editora, 2003.
- MARQUES, R. F. *Estudo da capacidade de carga de estacas escavadas com bulbos, executadas em solo não saturado da Formação Barreiras da cidade de Maceió - AL*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife – PE. 2006.
- MARQUES, J. A. F; MARQUES, R. F; RAMOS, D. L. *Plate-Load-Tests on Soil from the Barreiras Formation in Maceió-AL – Case Study*. Maceió, 2015.
- MILITITSKY, J.; CONSOLI, N. C.; SCHNAID, F. *Patologia das Fundações*. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2015.
- SKEMPTON, A. W. *The bearing capacity of clays*. In: BUILDING RESEARCH CONGRESS, 1951, London. Proceedings... London, 1951. p. 180-189.
- VELLOSO, D. A.; LOPES, F. R. *Fundações Volume 1: Critérios de Projeto – Investigação do subsolo – Fundações superficiais*. 2 ed, São Paulo, 2014: Oficina de textos.
- VITALI, O. P. M. *Efeito da Composição de Misturas de Solo-Cimento nos Parâmetros de Rigidez e de Resistência*. Dissertação. Porto: FEUP, 2008.