

ANÁLISE DE FUNDAÇÃO SUPERFICIAL RASA SOBRE SOLO COLAPSÍVEL

RASA SURFACE FOUNDATION ANALYSIS ON COLLAPSIBLE SOIL

JOÃO HENRIQUE DE FREITAS¹, LUCAS LEITE CAVALHEIRO², ALLAN TOMIO PERUSSO HORIKAWA^{3*}, JESELY HEMETÉRIO CORDEIRO DOS REIS^{4*}, ALAN RIZZATO ESPESSATO^{5*}

1. Graduação em Engenharia de Civil pela UEM, Mestrado pela Universidade Estadual de Maringá (PCV), Pós-graduando em Avaliações em Perícias na engenharia pela FEITEP; 2. Graduação em Engenharia de Civil pela UNINGA-MARINGÁ, Pós-graduando em Avaliações em Perícias na engenharia pela FEITEP; 3. Graduação em arquitetura e Urbanismo pela UEL, Graduação em engenharia civil pela UNOPAR, Especialização em docência do ensino superior pela UNOPAR, Especialização em auditoria avaliações e perícias na engenharia civil pela IPOG; 4. Prof. Dr. Associado, Universidade Estadual de Maringá; 5. Graduação em Engenharia de Civil pela UEM, Mestrado pela Universidade Estadual de Maringá (PCV), Professor na Faculdade de Engenharia e Inovação Técnico Profissional (FEITEP).

* R. Humaitá, 186, Cianorte, Paraná, Brasil. CEP: 87200000. joaohenriquedefreitas@hmail.com.br

Recebido em 30/09/2021. Aceito para publicação em 19/10/2021

RESUMO

Atualmente, o uso de fundação superficial rasa tem se mostrado como solução economicamente viável em diversos cenários, entre eles o mercado de edificações populares. No entanto, em nosso país, essas edificações têm sido construídas sem maiores exigências técnicas e com ausência de análise e interpretação do subleito. A constituição do subleito da cidade de Maringá - PR. É de argila siltosa porosa, e na presença de água, quando submetido a sobrecarga sofre colapso com bruscas reduções de volumes. Este trabalho tem como objetivo o estudo do solo da região de Maringá - PR como apoio para radier. O estudo contou com os ensaio de prova de carga em placa realizada por Freitas (2020), na condição de umidade natural e inundado. Os parâmetros médios desse solo são obtidos por meio das provas de carga. Observar que o valor de modulo de reação vertical do solo (kv) para o subleito na condição natural e inundado é respectivamente 62 (MPa/m) e 36 (MPa/m) que implica em uma redução de 41% de sua capacidade de reação. Pelas relações obtidas referente ao modulo de reação vertical, conclui-se que a alteração de umidade implica em deformabilidade do solo, quando mantido o mesmo nível de carga, sendo um possível caminho de falha estrutural no radier.

PALAVRAS-CHAVE: Radier, subleito, modulo de reação vertical do solo (kv)

ABSTRACT

Currently, the use of shallow foundations has proven to be an economically viable solutions in several scenarios, including to popular buildings market. However, in brazil, these buildings have been built without major technical requirements and with lack of analysis and interpretation to sub-grade layer. The composition of the subgrade from Maringá city's subgrade soil is porous silty clay which in presence of water, is subjected to overload, that collapses suddenly whit volume reductions. This work aims to study Maringá-pr's soil

region as a support for the radiator. This study included freitas's load test on board, in natural humidity and flooded's condition. The average parameters of this soil are obtained through load tests. It is important to note that values of vertical reaction's soil modulus (kv) for the subgrade in the natural and flooded condition is respectively 62 (MPa/m) and 36 (MPa/m) which implies a 41% reduction in its reaction capacity. From the relations obtained regarding the vertical reaction module, it is concluded that changes in moisture implies in deformability of the soil, when the same level of load is maintained, being a possible path of structural failure in the radiator.

KEYWORDS: Radier, subgrade, vertical soil reaction module (kv)

1. INTRODUÇÃO

Os radiers são definidos como elementos de fundação rasa dotado de rigidez para receber e distribuir mais do que 70 % das cargas de uma estrutura. O radier deve ser projetado de tal modo a possuir uma estrutura de múltiplas camadas usando materiais com rigidez para distribuir as cargas da estrutura para o maciço de solos, sendo muitas vezes, necessário o uso de camadas de base e/ou sub-base¹.

O radier se apresenta como uma boa alternativa para edificações de pequeno porte, de caráter modular, devido redução no processo de escavação e perfuração, pois é formado por uma placa ou laje de concreto armado apoiado diretamente em camadas de substrato com capacidade de suporte adequadas, devendo em seu projeto levar em consideração as características geomecânicas dos materiais de base.

Deficiências na camada de base ou no subleito ocasionam falhas mecânicas no radier, estas falhas vão resultar em trincas e rachaduras. A execução de radier em camadas de solo colapsável traz um histórico de

ocorrências de patologia, fator a qual imprime a necessidade de um melhor reconhecimento do comportamento superficial do solo, evitando possíveis ocorrência de recalque.

Em argilas tem-se que o recalque diferencial máximo de projeto deve estar na ordem de 40 mm, temos também os recalques absolutos limites de 65 mm para sapatas isoladas e de 65 a 100 mm para radiers². Com isso podemos entender que os solos respondem de maneira variável, devido às grandes distinções entre si, tornando imperativo a realização de investigações geotécnicas, bem como, a busca pela representação do seu comportamento.

O Modelo Winkler, é simples e eficiente na representação do comportamento carga deslocamento, porém não simula com precisão as características de uma fundação. A deficiência no Modelo Winkler está na representação descontínua do deslocamento da superfície carregada, desconsiderando a resistência de atrito entre as camadas adjacentes, Figura 1.

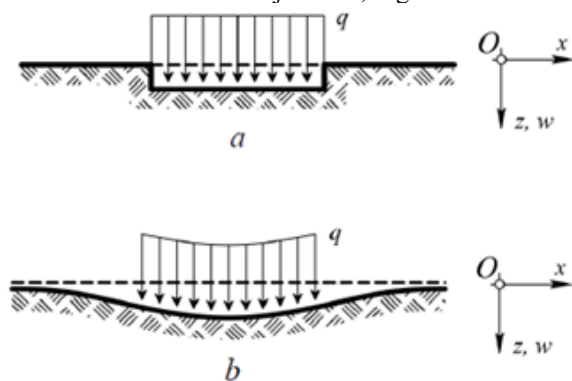


Figura 1. Deformação de uma superfície com carga constante: a) Modelo de Winkler; b) Modelo com Deformação Contínua. **Fonte:** Teodoru (2009)³.

Este modelo de comportamento admite que as pressões de contato são proporcionais ao deslocamento (w) de qualquer ponto situado na superfície do solo quando carregado. Para o caso de deformação vertical, a tensão é dada pela Equação 1:

$$\sigma = k_v \cdot w \quad (1)$$

Em que:

σ : Tensão de contato média na base da fundação.

w : Deslocamento vertical (recalque).

k_v : Módulo de reação vertical.

O colapsível tem que ser estudado, pois seu comportamento carga deslocamento está relacionado ao seu caráter poroso, o qual quando inundado ou umedecido até certo nível, apresenta redução de volume, implicando em recalque, ou seja, caracterizam-se por apresentarem uma mudança brusca de comportamento quando ocorre infiltração de água no solo^{4,5,6}.

Não é raro casos de obras que durante muito tempo apresentaram bom desempenho, repentinamente, começaram a apresentar problemas de trincas, fissuras e de rachaduras, sendo especialmente maiores as ocorrências nos meses de chuvas intensas.

Existem hoje, na região de Maringá, inúmeros casos

de edificações que sofreram recalques diferenciais em sua estrutura, após ter ocorrido um aumento do grau de saturação do solo de apoio, como por exemplo, situações de rompimento de condutos de água de abastecimento próximo às edificações.

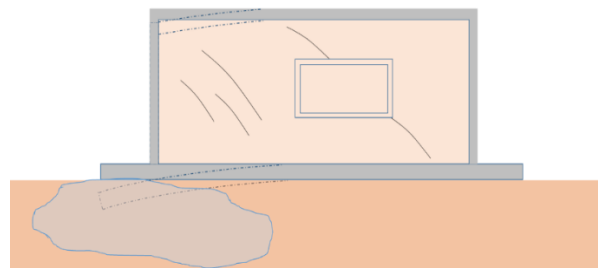


Figura 2: Esquema estrutural de uma edificação em radier sujeito a recalque diferencial, deflexão na estrutura (radier, viga e pilar) com abertura de fissuras na alvenaria. **Fonte:** os Autores.

A constituição do subsolo da cidade de Maringá - PR, é de um solo argiloso tropical, possuindo, nos locais de alta e média vertente uma camada superficial de solo evoluído. Esta camada é constituída de argila siltosa porosa, sendo de espessura variável, podendo chegar à profundidade de até 12 metros ou mais. Seus valores de resistência à penetração N do SPT são relativamente baixos na parte superior da camada, em geral nos primeiros 4 ou 5 metros de profundidade, tendo valores inferiores a 3 ou até mesmo a 1^{7,8,9}.

Como pode ser constatado na vasta literatura sobre solos colapsáveis, o mecanismo de ruptura é caracterizado pelo aumento do teor de umidade, que reduz a resistência ao cisalhamento e provoca reduções de volume do solo, quando sob tensão, implicando em aparecimento de patologias.

Nesse contexto, esse trabalho apresenta os resultados das provas de carga em placa de Freitas (2020)¹⁰, realizadas em matrizes de solo colapsável, executadas em campo nas dimensões reais de uso como base de radier submetido a carregamento estático lento por meio de prova de carga em placa descrito pela ASTM, (2016)¹¹.

Utilizou-se dois modelos de camadas de solo colapsável, uma na condição natural e a outra na condição inundada, ambas as camadas foram regularizadas para a aplicação da carga. A carga de ruptura foi avaliada a partir dos resultados da prova de carga.

Desse modo, a pesquisa foi desenvolvida no sentido de ampliar o entendimento sobre o comportamento do solo colapsível, sujeito a inundação, obtendo valores de (K_v) e (CBR) e suas respectivas porcentagem de perda de capacidade de carga quando inundado.

2. MATERIAL E MÉTODOS

As provas de carga em placa foram realizadas no campo experimental de geotecnia da Universidade Estadual de Maringá (UEM), localizado na zona urbana da Cidade de Maringá - PR, bairro Vila Esperança, latitude 23°25'S, longitude 51°57'W. O solo utilizado na pesquisa é o subsolo do Campo experimental de

geotecnia da UEM, é constituído por argila siltosa. A Figura 3 ilustra o perfil do solo.

Prof.	Descricao do solo	NSPT		
		Médio	Mínimo	Máximo
1	Argila siltosa Marron avermelhado consistencia: de mole à média Solo evoluído	1,99	1,74	2,34
2		1,98	1,73	2,17
3		2,79	2,31	3,13
4		3,48	2,98	4,33
5		4,08	3,24	4,75
6		4,8	4,16	5,31
7		4,97	4,18	5,9
8		6,2	5,13	8,13
9	Argila siltosa Variegada (de roxo e marron avermelhado à amarelado) consistência: de média a rija Solo residual de basalto vesicular-amigdaloidal	6,59	5,9	7,76
10		8,89	5,59	11,88
11		10,4	7,71	12,7
12		11,14	10,08	12,35
13		13,49	11,74	15,27
14		13,76	12,19	15,6
15		13,07	8,63	23,25
16		19,54	18,43	21,19
17		35,22	31	39

Figura 3. Perfil do solo no Campo Experimental de Geotecnia da UEM. **Fonte:** adaptado de Belincanta (1998)¹².

O comportamento das camadas de solo foi analisado pelos métodos da determinação da capacidade de carga e do módulo de reação vertical (kv).

Freitas (2020)¹⁰, realizou duas provas de carga estática com carregamento lento aplicado sobre uma placa circular de 340 mm de diâmetro, sendo a primeira sobre uma camada de solo natural regularizada, a segunda sobre a camada de solo regularizado, porém, na condição inundada. A Figura 4, ilustra o sistema de inundação e a realização da prova de carga.

Os autores devem detalhar os recursos materiais e metodológicos utilizados para realização do trabalho. Abreviaturas: para unidades de medida, utilize somente as unidades do Sistema Internacional de Unidades (SI). Utilize apenas abreviaturas e símbolos já padronizados, evitando incluí-las no título do manuscrito e no resumo. O termo completo deve preceder a abreviatura quando ela for empregada pela primeira vez, salvo no caso de unidades comuns de medida.



Figura 4. Imagem superior: Vista frontal do processo de inundação do subleito; Imagem inferior: vista frontal do subleito sendo ensaiado. **Fonte:** adaptada de Freitas (2020)¹⁰.

A Figura 5 e 6 mostra as curvas carga-recalque para os modelos ensaiados, com carregamento estático em placa circular realizado na camada do subleito natural e inundado.

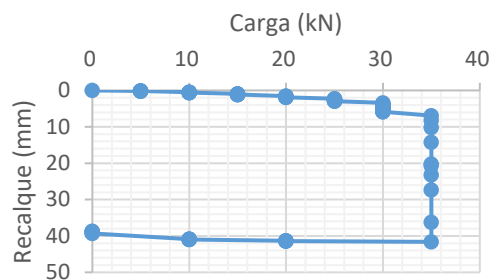


Figura 5. Curva carga recalque subleito. **Fonte:** Freitas (2020)¹⁰.

Como pode ser observado na curva carga-recalque para o solo natural, a ruptura ocorreu para uma pressão de 0,38 MPa e um deslocamento correspondente de 6 mm (2% do diâmetro da placa) caracterizando uma ruptura do tipo física. No descarregamento, observa-se que o deslocamento recuperável foi da ordem de 2 mm demonstrando também que praticamente todos os deslocamentos medidos após a ruptura eram deslocamentos permanentes. Observa-se para a camada de solo natural, que o deslocamento de referência (1,27 mm) equivale a uma tensão de 0,19 MPa.

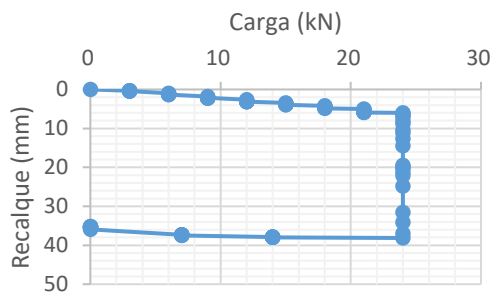


Figura 6. Curva carga recalque subleito inundado. **Fonte:** Freitas (2020)¹⁰.

A curva carga-recalque para o solo na condição inundado, a ruptura ocorreu para uma pressão de 0,26 MPa e um deslocamento correspondente de 6 mm (2% do diâmetro da placa).

do diâmetro da placa) caracterizando uma ruptura do tipo física. No descarregamento, observa-se que o deslocamento recuperável foi da ordem de 2 mm demonstrando também que praticamente todos os deslocamentos medidos após a ruptura eram deslocamentos permanentes. Pode-se observar que a camada de solo inundado apresentou uma tensão de 0,06 MPa para o deslocamento de referência (1,27 mm). Pode-se observar que o solo na condição inundada apresentou 32% de redução de carga de ruptura comparado com a condição natural, destaca-se que o deslocamento que corresponde a carga de ruptura foi igual para as duas condições (6 mm). Destaca-se que a tensão para o deslocamento de referência (1,27 mm) para a condição inundada apresentou 31% de redução de carga de serviço, quando comparado com a condição natural do solo.

Modelagem

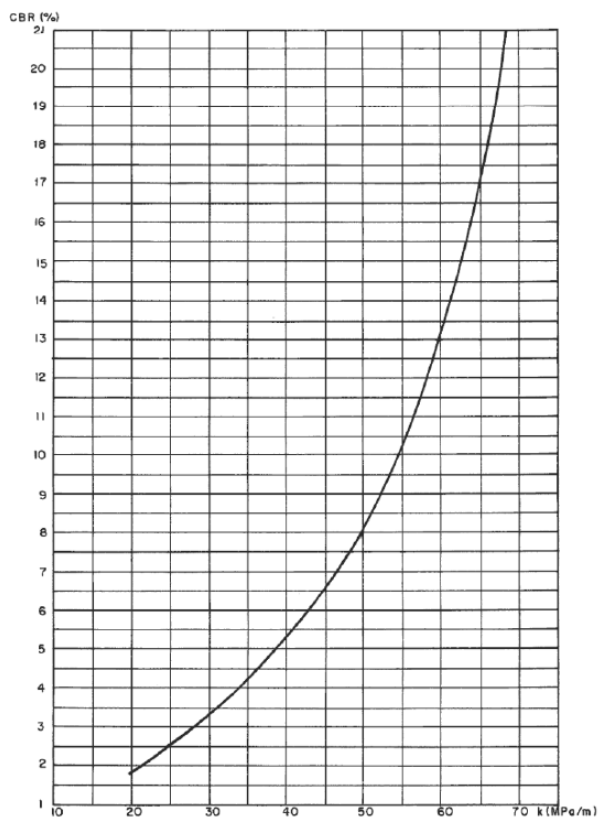


Figura 7. Curva CBR x Módulo de reação do terreno de fundação (k).
Fonte: Rodrigues e Pitta, (1997)¹³.

A tensão equivalente a 5 mm, foi obtida por meio do gráfico, já o cálculo do módulo de reação vertical (kv) foi obtido pela equação 1.

$$k_v = \frac{p_1 - \frac{p_{ad}}{2}}{w} \quad (1)$$

Em que

kv: Módulo de reação vertical (MPa/m);

p1: Pressão correspondente ao deslocamento de 5 mm;

pad; Pressão de condicionamento do ensaio;

w: Deslocamento de 5 mm.

O estágio de carregamento de referência ou de

serviço para o solo no estado natural e inundado foi adotado em função do deslocamento correspondente a este nível de carga, obtido nos ensaios de provas de carga figuras 5 e 6, que foi da ordem de 5 mm, sendo, portanto, o valor de referência para cálculo do coeficiente de reação vertical e sua tensão correspondente $\sigma(5\text{mm})$

Neste trabalho, o valor do módulo de reação (kv) foi correlacionado com CBR (*California Bearing Ratio*). A Figura 7 registra o valor do módulo de reação em função do CBR.

3. RESULTADOS

Por meio das figuras 5, 6 e 7 foi obtido os valores de kv (MPa/m), CBR (%) e $\sigma(5\text{mm})$. A tabela 1 apresenta os dados comparativos do solo da região de Maringá-PR.

Tabela 1. Dados do subleito e subleito inundado.

Camada	kv (MPa/m)	CBR (%)	$\sigma(5\text{mm})$ (Mpa)	Umidade (%) média do subleito
Subleito	62	$\leq 13,5$	0,33	34,25
Subleito inundado	36	$\leq 4,5$	0,23	36,3

Fonte: os Autores.

Pode-se observar que o valor de kv para o subleito em sua condição natural apresentou um valor de 62 (MPa/m) para condição inundada tem-se um valor de 36 (MPa/m) que implica em uma redução de 41%. A variação de umidade na camada superficial remete em alteração do comportamento do módulo de reação do solo.

Pode-se verificar que o valor de CBR (%) obtido pela relação entre CBR (%) por kv apresentou um valor de CBR (%) 13,5 e 4,5, respectivamente para o solo na condição natural e inundado, que implica em uma redução de 33%.

A tensão para o deslocamento de 5 mm obtida por meio das figuras 5 e 6 para o solo em sua condição natural foi de 0,33 MPa e para condição inundada foi de 0,23 (MPa), temos assim uma redução de capacidade de suporte do solo na ordem de 33 %.

4. DISCUSSÃO

No dimensionamento de fundação superficial rasa: radier de concreto, a capacidade de suporte do subleito é caracterizada pelo módulo de reação vertical (kv), sendo este parâmetro determinante no cálculo da espessura (h) e das armaduras do radier, quando necessárias.

Vale ressaltar que o módulo de reação (kv), obtido diretamente através de ensaios de placa ou através de correlações com o CBR (%), indica a capacidade de suporte da camada superficial do subleito.

Existem dois tipos de problemas fundamentais em projetos e execuções de fundações, que são: as deformações e a ruptura de uma massa de solo¹⁴. Em

geral, para tensões baixas, o solo pode ser considerado como um material elasto-plástico. Isso significa que, com o aumento de carregamento, ele possui uma região elástica, seguida de uma região plástica antes da sua ruptura.

Na região elástica, a Lei de Hooke é válida, diante disso, a presente pesquisa aplica os conceitos de Winkler¹⁵ Eq. 1 como base de interpretação do solo da região de Maringá, a Figura 8 representa o modelo físico proposto pela pesquisa.

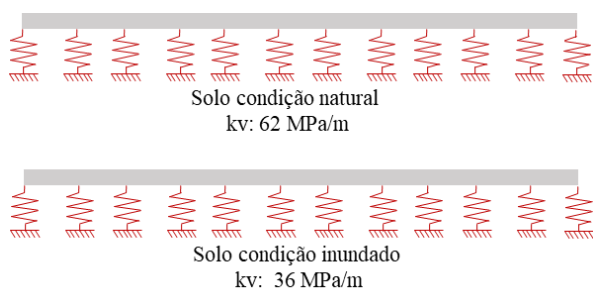


Figura 8. Representação de apoio elástico sob placa de fundação: radier. **Fonte:** os Autores.

A pesquisa busca esclarecer critérios de dimensionamento afim de evitar patologia no radier. A obtenção de um modelo de subleito adequado está vinculado com a interpretação dos resultados das provas de cargas. A Figura 8 descreve dois modelos de dimensionamento, um para o solo na condição natural e o outro para inundado.

Os momentos fletores máximos ($M_{\max}$) e as deflexões máximas ($y_{\max}$) do radier de concreto quando submetidas à ação direta de carregamentos, podem ser analisados por modelos unidimensionais (vigas) com o emprego do programa FTOOL (<https://www.tecgraf.puc-rio.br/ftool/>).

Essa análise torna-se possível ao se aplicar a analogia de grelha que é um método bastante usado para análise de lajes, principalmente devido à sua facilidade de compreensão e utilização. O procedimento de analogia de grelha consiste em substituir o radier por uma malha equivalente de vigas (grelha equivalente), conforme ilustra a Figura 9.

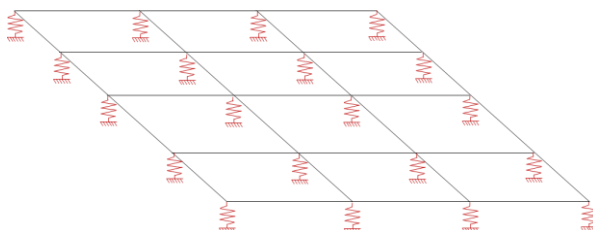


Figura 9. Radier representado por grelha equivalente e apoiado no solo através de coeficientes de mola. **Fonte:** os Autores.

5. CONCLUSÃO

O dimensionamento do radier depende da teoria do cálculo de estruturas de concreto e da teoria da mecânica dos solos, sendo que o conhecimento da interação entre eles (solo-estrutura) é ponto determinante do problema.

Pode-se dizer que a pesquisa busca oferecer valores

aceitáveis de módulo de reação vertical (k_v) e CBR(%) para a camada superficial da região de Maringá, com propósito de auxiliar possíveis interpretações do solo em periciais e projetos.

Pode-se concluir que o solo da região de Maringá apresenta uma perda de capacidade de carga brusca, quando sujeito a alteração de umidade, fator vinculado à sua possibilidade de colapso, verificado na obtenção dos valores de k_v na condição natural e inundada.

Destaca-se que, quanto maior o valor de k_v , menor intensidade de esforços internos causados pela menor deformação do solo sobre o qual o radier se apoia. Contudo, observa-se que a alteração de umidade no solo remete em uma redução do valor de k_v em 41%, fator preocupante, quando não considerado em projeto, pois quanto menor o valor de k_v maior a deformação do solo sobre o qual o radier se apoia, implicando em maior intensidade de esforços internos.

Pelas relações obtidas referente ao k_v (natural) e k_v (inundado), conclui-se que a alteração de umidade implica em deformabilidade do solo, sendo assim um possível caminho de falha estrutural no radier, uma vez que o projetista não considerou o cenário de inundação do solo.

6. REFERÊNCIAS

- [1] NBR 6122, Projeto e execução de fundações, ABNT. 2019.
- [2] Velloso, D.; Lopes, F. R.; Fundações: critérios de projeto, investigação do subsolo, fundações superficiais, fundações profundas- São Paulo: Oficina de Textos. 2012.
- [3] Teodoru, I. B. Beams On Elastic Foundation The Simplified Continuum Approach. Universitatea Tehnică. LV (LIX). 2009; Fasc. 4.
- [4] Hachich, W.; Falconi, F.F.; Saes, J. L.; et al. Fundações : teoria e prática. 2. ed. - São Paulo: Pini, 1998.
- [5] Cintra, J.C.A. (1998) - Fundações em solos colapsíveis. Projeto Reenger, EESC/USP, São Carlos/SP, 116p.
- [6] Lobo, A.S.; Ferreira, C.V.; Renofio, A. Muros de arrimo em solos colapsíveis provenientes do arenito Bauru: problemas executivos e influência em edificações vizinhas em áreas urbanas. Acta Scientiarum, Maringá, v. 25, no. 2, p. 169-177, 2003.
- [7] Belincanta, A.; Ferras, R. L.; Gutierrez, N. H. M. Uma abordagem geral sobre fundações profundas de uso corrente na região de Maringá. In: Encontro Tecnológico Da Engenharia Civil E Arquitetura, 1. 2000, Maringá, anais. Maringá: Universidade Estadual de Maringá, 2000.
- [8] Gutierrez, N. H. M.; Belincanta, A., Características físicas e geotécnicas de perfis de solos da cidade de Maringá. In: I Encontro Geotécnico Do Terceiro Planalto Paranaense, Engeopar 2003, Maringá – Pr. Universidade Estadual de Maringá.
- [9] Gutierrez, N. H. M.; Belincanta, A. Características básicas dos solos constituintes do subsolo da cidade de Maringá: locais de alta e média vertente. In: IV Simpósio De Prática De Engenharia Geotécnica Da Região Sul, Geosul 2004, Curitiba – Pr. ABMS. Vol 1, P. 39 –46.

- [10] Freitas, J. H.; Avaliação do comportamento de sub-bases executadas com solo-cimento, solo-cimento e pó de pedra e solo-fibra de PET, por meio de prova de carga em placa. Maringá. (Tese de mestrado) - Universidade Estadual de Maringá (UEM).2019.
- [11] ASTM D1196 / D1196M - Standard Test Method for Nonrepetitive Static Plate Tests of Soils and Flexible Pavement Components for Use in Evaluation and Design of Airport and Highway Pavements.2016
- [12] Belincanta, A. Avaliação de fatores intervenientes no índice de resistência à penetração SPT. São Carlos. (Tese Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo. Vol 1 e 2.361p.1998.
- [13] Rodrigues, P. P. F. e Pitta, M. R. Dimensionamento de pavimentos de concreto estruturalmente armados. Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP) e Instituto Brasileiro de Telas Soldadas (IBTS). São Paulo, 1997.
- [14] Caputo, H.P. Mecânica dos solos e suas aplicações: fundamentos. 6.ed. Rio de Janeiro, Livros Técnicos e Científicos, 1988. 234p.
- [15] Winkler, E. 1867. Theory of elasticity and strength. Dominicus Prague, Czechoslovakia.