

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

Análise Tensão-Deformação das Fundações de um Edifício em Concreto Armado

Paula Dayanne Lima Nascimento

Engenheira civil, Faculdade UNINASSAU, Caruaru-PE, Brasil, pauladayannenascimento@gmail.com

João Batista de Souza Neto

Engenheiro civil, Faculdade UNINASSAU, Caruaru-PE, Brasil, joaosouza223@gmail.com

Yago Ryan Pinheiro dos Santos

Doutorando em engenharia civil, Universidade Federal de Pernambuco, Caruaru-PE, Brasil, yago_ryan@hotmail.com

RESUMO: Uma edificação deve ser dimensionada levando em consideração variáveis, tais como a relação entre a estrutura e as cargas postas sobre o maciço e a influência que o terreno de fundação terá para resistir às tensões exercidas, sem comprometer a estabilidade da edificação. Nesta pesquisa foi utilizado o *software* SIGMA/W, desenvolvido pela GeoStudio para estimar, através do Método dos Elementos Finitos, as tensões e deformações no perfil de um solo de suporte para um edifício em concreto armado, caracterizando a influência das tensões nas sapatas a partir dos recalques gerados pelos pilares das seções. Foi possível observar a distribuição do bulbo de tensões no terreno, mostrando uma maior parcela de tensão nas regiões imediatamente inferiores aos elementos de fundação; quanto às deformações máximas obtidas, verificou-se um valor de recalque absoluto máximo de 31,66 mm e recalque diferencial máximo de 12,97 mm, ficando abaixo do limite estabelecido pela literatura para valores de recalques absolutos totais e diferenciais totais, o que pode indicar que, apesar da deformação existir, estas estão dentro dos limites de segurança, não acarretando no surgimento de patologias na superestrutura da edificação.

PALAVRAS-CHAVE: Fundações, Interação Solo-Estrutura, Recalque, SIGMA/W.

ABSTRACT: A construction must be dimensioned taking into account variables, such as the relationship between the structure and the loads placed on the massif and the influence that the foundation land will have to resist as stresses exerted, without compromising the stability of the building. In this research, the SIGMA / W software, developed by GeoStudio, was used to estimate, through the Finite Element Method, as stresses and deformations in the profile of a supporting soil for a reinforced concrete building, characterizing the influence of stresses on the footings from the settlements generated by the pillars. It was possible to observe the distribution of the stress bulb on the ground, showing that such distribution concentrates a greater portion of stress in the locations closest to the base elements; as for the necessary maximum deformations, a maximum absolute settlement value of 31.66 mm and a maximum differential settlement of 12.97 mm was found, being below the limit established by the literature for values of total and differential absolute settlements, which may, despite the indication of existing, these are within the safety limits, not causing the appearance of pathologies in the building's superstructure.

KEYWORDS: Foundations, Settlements, SIGMA/W, Soil-Structure interaction.

1 Introdução

A construção civil sempre teve o maciço de solo como o principal meio de erguer suas construções, porém na análise dos carregamentos, os projetistas consideram estas duas partes como independentes, onde, tradicionalmente, o calculista preocupa-se com a parte do sistema acima da superfície do terreno considerado como indeslocável e o projetista da fundação preocupa-se apenas com os elementos estruturais enterrados e o maciço de solos que o envolve (REIS, 2000).



Não considerar o relacionamento interdependente entre todas as partes do sistema conduz a resultados que se afastam do comportamento real da obra. O processo de transferências de cargas para o solo acontece de maneira conjunta, em que a estrutura transmite seus esforços para a fundação e por meio dela os esforços são distribuídos ao solo, relação conjunta que é definida como interação solo-estrutura (SOUSA, 2019).

Segundo Velloso e Lopes (2011), é necessário realizar uma análise de estrutura do solo, pois esta permite o estudo da forma como os elementos estruturais se comportam, tendo em vista a qualidade do projeto. A prática de considerar a interação da estrutura do solo tem por finalidade aproximar a teoria da realidade, com o intuito de garantir estabilidade à estrutura, funcionabilidade e durabilidade em sua vida útil.

Este estudo de caso analisa como a estrutura e o solo interagem entre si, levando em consideração as cargas da estrutura postas sobre o solo, e como elas se apresentam como reações de apoio que variam com as condições particulares do material de suporte, verificando a distribuição de tensões e deformações ao longo do perfil, e sua importância diante da temática da interação solo-estrutura.

2 Material e Métodos

2.1 Características do Empreendimento Estudado

O Edifício em estudo está localizado na rua Padre Antônio Tomaz, no Bairro Maurício de Nassau, na cidade de Caruaru-PE, do tipo residencial, composto por 18 pavimentos, sendo três postos como semienterrado, térreo e vazado, estes utilizados para garagem. Existindo ainda 13 pavimentos tipos, compostos por quatro apartamentos de 56m² cada.

2.2 Parâmetros Geotécnicos para as Análises de Tensão-Deformação

Os parâmetros geotécnicos utilizados como base do estudo de estimativa de tensão-deformação do terreno de fundações, foram os predominantes na cidade de Caruaru-PE, uma camada de areia muito compacta, afim de obter resultados mais próximos da realidade. O perfil de solo, Figura 1, mostra de forma hipotética, a camada de solo de areia muito compacta com uma profundidade de 10 m.

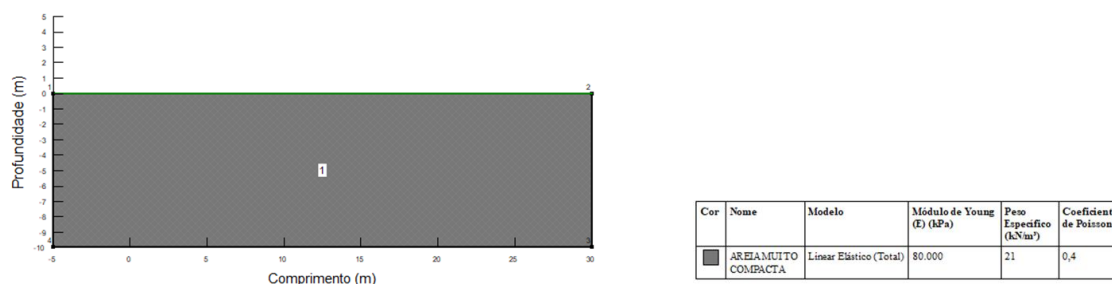


Figura 1. Perfil de Solo Estudado Feito por Meio do Sigma W.

O Peso Específico utilizado foi de 21 kN/m³ referente à de um solo arenoso muito compacto saturado, pois de acordo com Godoy (1972), se não houver ensaios de laboratório, pode-se adotar o peso específico efetivo do solo a partir dos valores aproximados conforme Tabela 1 (adaptado de MARANGON, 2009).

Tabela 1. Peso específico de solos arenosos (correlações empíricas – uso limitado a estudos preliminares).

Nº de Golpes	Consistência	Peso Específico (KN/m ³)		
		Areia seca	Umida	Saturada
< 5	Fofa	16	18	19
5-8	Pouco compacta			
9-18	Medianamente compacta	17	19	20
19-40	Compacta			
> 40	Muito compacta	18	20	21



Para o Coeficiente de Poisson, adotou-se 0,4 valor referente à areia compacta, pois Teixeira & Godoy (1996) também apresentam valores típicos para esse coeficiente, Tabela 2 (adaptado de MARANGON, 2009).

Tabela 2. Coeficiente de Poisson (Teixeira & Godoy 1996)

Solo	N
Areia pouco compacta	0,2
Areia compacta	0,4
Silte	0,3-0,5
Argila saturada	0,4-0,5
Argila não saturada	0,1-0,3

O Módulo de Elasticidade pode ser calculado através de ensaios onde seus resultados sejam o próprio módulo ou que possibilitem uma correlação para encontrar o valor correspondente ao módulo, ou até mesmo pode-se realizar uma estimativa do valor do módulo de elasticidade a partir de valores publicados na literatura, cujo corresponde ao método utilizado nesse trabalho, como apresentado na Tabela 3 (adaptado de MARANGON, 2009), adotou-se o valor de 80.000 KPa correspondente à um solo arenoso muito compacto.

Tabela 3. Avaliação dos Parâmetros de Resistência e de deformabilidade em Função do SPT (correlações empíricas – uso limitado a estudos preliminares)

(correlações empíricas - uso limitado a estudos preliminares)					
Areias e Solos Arenosos					
Compacidade	γ (t/m ³)	C (t/m ²)	Φ °	E (t/m ²)	N
Fofa	1,6	0	25-30	100-500	0,3 a 0,4
Pouco Compacta	1,8	0	30-35	500-1400	
Mediamente Compacta	1,9	0	35-40	1400-4000	
Compacta	2,0	0	40-45	4000-7000	
Muito Compacta	> 2,0	0	> 45	> 7000	
Argilas e Solos Argilosos					
Consistência	γ (t/m ³)	C (t/m ²)	Φ °	E' (t/m ²)	N
Muito Mole	1,3	0-1,2	0	30-120	0,4-0,5
Mole	1,5	1,2-2,5	0	120-280	
Média	1,7	2,5-5,0	0	280-500	
Rija	1,9	5,0-15,0	0	500-1500	
Dura	> 2,0	> 15,0	0	> 1500	

2.3 Utilização do Sigma/W para Análise Tensão-Deformação do Caso em Estudo

O SIGMA/W é um produto de software de elementos finitos utilizado para modelar tensões e deformações em solo, rocha e estruturas. As análises do podem variar de simples simulações lineares elásticas a problemas de interação solo-estrutura com modelos de materiais não lineares (GEOSLOPE, 2020). A literatura sugere que, inicialmente, seja feita uma análise linear-elástica, para facilitar a avaliação da modelagem quanto a etapas construtivas, parâmetros geotécnicos e condições de contorno (MENDES, 2010).

Para efetuar as análises no programa SIGMA/W, é preciso definir as condições de Geometria, Parâmetros dos Materiais, Condições de Contorno e a Malha de Elementos Finitos. Nesta análise, os deslocamentos horizontais (em vermelho) nas bordas dos perfis analisados foram restringidos ($dx=0$), o mesmo acontece com os deslocamentos horizontais e verticais (em vermelho) na base inferior do solo ($dx=0$ e $dy=0$). A Figura 2, demonstra o posicionamento das condições de contorno. A tensão aplicada sobre a base da sapata (em amarelo) bem como a tensão que representa o solo de embutimento das sapatas (em azul), também foram inseridas como condição de contorno. Em relação as Malhas de Elementos Finitos, o software determina automaticamente a malha de uma região assim que esta região é criada, possuindo a capacidade de ser refinada de acordo com o que se julgar necessário (ANGELO, 2016).

O retângulo que se encontra dentro do maciço de solo, conforme Figura 2, trata-se de uma região de refinamento da malha, afim de aprimorar a resolução dos resultados adquiridos nesta região, de modo a evitar



o sobrecarregamento do programa com excessos de cálculos em regiões de pouca influência. Ao refinar a malha do maciço de solo, foi possível garantir a qualidade dos cálculos gerados pelo programa nas regiões demarcadas de modo a se tornar o mais próximo possível da realidade. A versão estudantil do SIGMA/W possibilita ao usuário análises numéricas computacionais nos projetos de Análise de Tensão-Deformação, cuja versão empregada nesse estudo delimita-se a uma malha de elementos finitos de até 500 elementos.

Cor	Nome	Modelo	Módulo de Young (E) (kPa)	Peso Específico (kN/m ³)	Coefficiente de Poisson
■	ÁREA MUITO COMPACTA	Linear Elástico (Total)	80.000	21	0,4

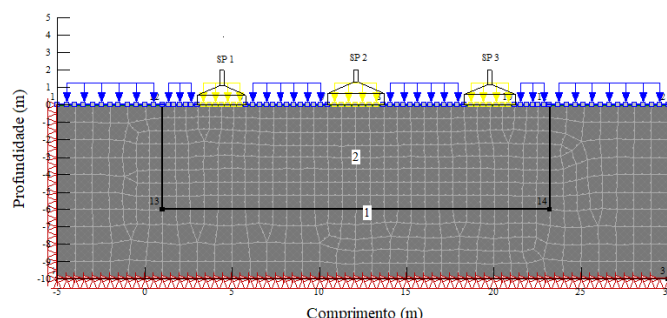


Figura 2. Modelo SIGMA/W para Malhas

2.4 Definições do Estudo de Caso

Neste trabalho foi utilizado o software que utiliza o método de elementos finitos para análise de comportamento tensão-deformação em problemas geotécnicos o SIGMA/W. Este programa estuda o comportamento do solo em função de sua geometria e suas propriedades, que são conectadas em nós e interagem entre si afim de obter uma estimativa de tensão e deformação do solo, foi analisado as sapatas correspondentes aos pilares do edifício de estudo como consta na Figura 3 (adaptado de SILVA Jr., 2018).

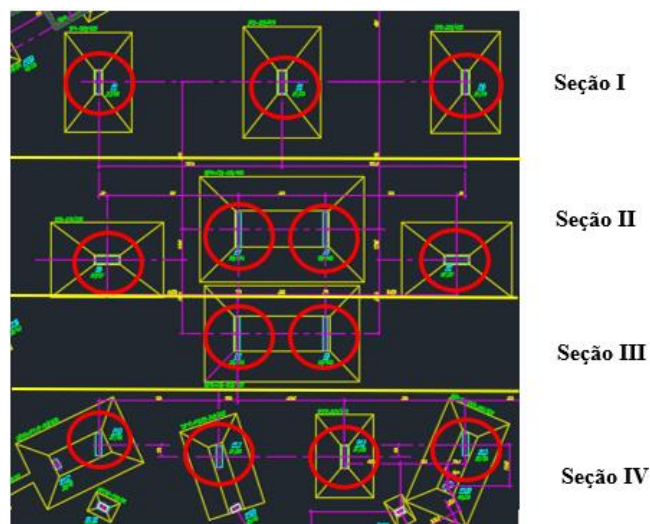


Figura 3. Sapatas e Pilares Analisados.

A Tabela 4 apresenta os valores das cargas dos pilares correspondetes as sapatas em estudo que transferem esses esforços ao solo. Para a modelagem no programa SIGMA/W, subdividimos o perfil da Figura 3 em quatro seções como representado nas Figura 4 foi necessário também transformar as cargas pontuais dos pilares da Tabela 4 em tensões para cada uma das sapatas em análise como apresentado também na Tabela 4.



Tabela 4. Especificações dos Pilares das Sapatas Analisadas.

Pilar	Seção (cm x cm)	Npos (kn)	Área da base da sapata (m ²)	Tensão do solo (kpa)	Tensão transmitida pelo pilar (kpa)	Tensão total transmitida pela sapata (kpa)
P 1	27 x 90	2705,65	11,76	60,35	230,07	290,42
P 2	27 x 90	3073,60	15,04	60,35	204,36	264,71
P 3	27 x 90	2805,00	12,47	60,35	224,94	285,29
P 4	24 x 140	4509,49	-	-	-	-
P 5	24 x 140	4335,23	-	-	-	-
P4+P5	-	-	30,14	60,35	149,62 + 143,84	353,81
P 6	27 x 90	4568,72	14,57	60,35	313,57	373,92
P 7	27 x 90	4376,61	14,26	60,35	306,91	367,26
P 8	24 x 140	3228,55	-	-	-	-
P 9	24 x 140	3315,33	-	-	-	-
P8+P9	-	-	26	60,35	124,17 + 127,51	312,04
P 10	27 x 90	2564,54	6,8625	60,35	373,70	434,05
P 11	27 x 90	2586,31	4,7775	60,35	541,35	601,70
P 12	27 x 90	2328,39	8,40	60,35	277,19	337,54
P 13	27 x 90	2304,96	6,4625	60,35	356,67	417,02

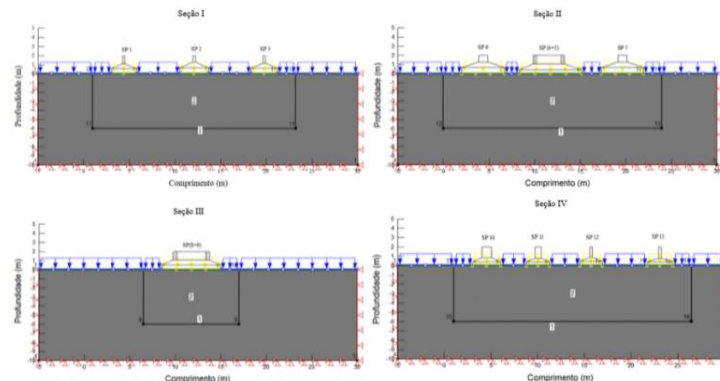


Figura 4. Representação das Seções das Sapatas Analisadas.

3 Resultados e Discussão

3.1 Análises de Recalques

A representação de recalque ilustrada com deformação de malha, Figura 6, demonstra de modo mais claro, o deslocamento do solo sob a influência das tensões transmitidas através das sapatas.

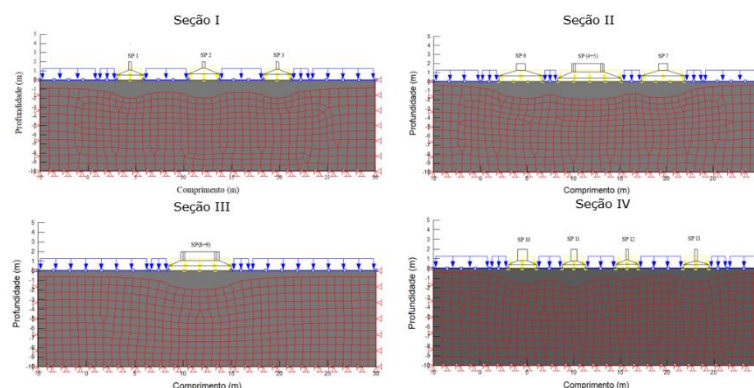


Figura 6. Representação do Deslocamento Vertical da Malha das Seções.



A Figura 7, apresenta o gráfico de recalques ocorridos em todas as seções analisadas de modo que na Seção I o maior recalque foi de aproximadamente 18,77 mm ocorrido na sapata SP 3, comprovado na Tabela 5. Já na Seção II obteve o maior recalque de aproximadamente 28,11 mm, da sapata SP (4+5). A Seção III teve recalque de 25,51 mm, enquanto que a Seção IV, obteve um recalque máximo na sapata SP 11 com valor de 31,66 mm, como comprovado na Tabela 5.

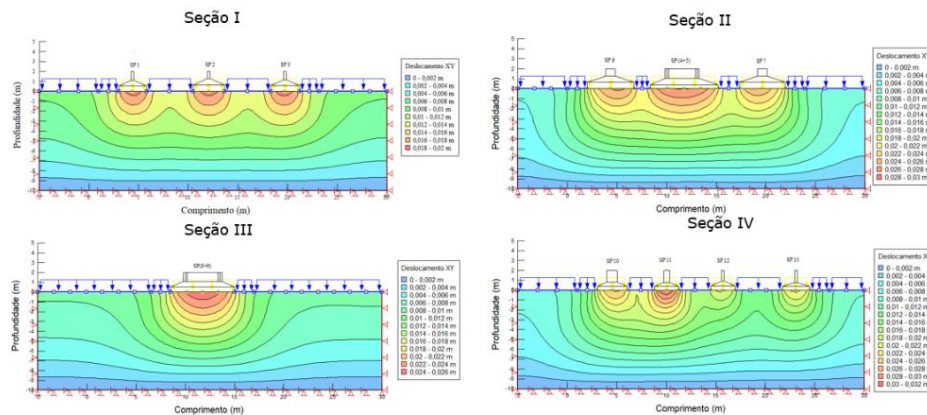


Figura 7. Recalque das Seções.

A Tabela 5 apresenta os recalques máximos ocorridos em cada uma das sapatas em estudo.

Tabela 5. Recalques Máximos nas Sapatas

Sapata	Deslocamento/recalque (mm)
SP 1	18,74
SP 2	18,69
SP 3	18,76
SP (4+5)	28,11
SP 6	26,38
SP 7	24,70
SP (8+9)	25,50
SP 10	26,41
SP 11	31,66
SP 12	20,36
SP 13	22,56

É possível verificar uma variação numa faixa de valores entre 18,69 mm (recalque absoluto mínimo) e 31,66 mm (recalque absoluto máximo), com um recalque diferencial máximo de 12,97 mm. É possível afirmar que estes estão abaixo dos limites de recalques diferenciais propostos por Burland *et al.* (1977) (20 mm) e Skempton e MacDonald (1956) (25 mm) e de recalques totais proposto por Skempton e MacDonald (1956) (45 mm) para solos granulares.

3.2 Análises das Tensões

A Figura 8 representa o bulbo de tensões totais das seções analisadas. A Seção I apresenta tensão mínima de 42,60 kPa e máxima do perfil com valor aproximado à 353,12 kPa. Já na Seção II apresenta tensão mínima de 6,23 kPa aproximadamente, e uma tensão máxima com valor aproximado à 491,55 kPa. Na Seção III apresenta uma tensão mínima de 42,40 kPa aproximadamente, e uma tensão máxima com valor aproximado à 393,64 kPa, enquanto que na Seção IV apresenta sua tensão máxima com valor aproximado à 657,16 kPa abaixo da sapata SP 11. A diferença de valores provém de uma reação do solo devido à distribuição de



carregamentos da estrutura, que transmite ao terreno diferentes valores de cargas de acordo com as ações atuantes na estrutura transmitidas por estes à planta da edificação.

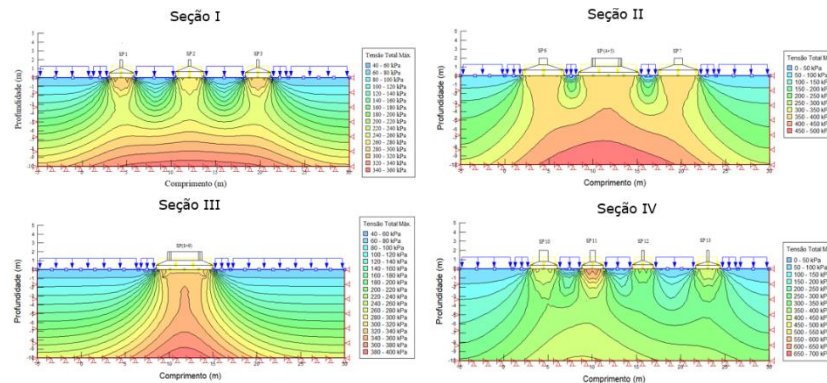


Figura 8: Bulbo de Tensões das Seções.

A Tabela 6, apresenta as tensões atuantes na base das sapatas mostrando a tensão máxima e mínima atuante em cada sapata juntamente com o seu nó correspondente. A tensão máxima obtida nesse estudo se encontra na sapata SP 11 da Seção IV com valor de 657,15 kPa, e a tensão mínima na sapata SP (4+5) de 73 kPa aproximadamente.

Tabela 6. Tensões Máximas e Mínimas das Sapatas.

Sapata	Tensão Mínima (kPa)	Tensão Máxima (kPa)
Sp 1	105,21	313,61
Sp 2	90,43	284,50
Sp 3	103,32	307,82
Sp (4+5)	72,98	380,89
Sp 6	91,55	403,10
Sp 7	96,18	395,65
Sp (8+9)	94,56	339,15
Sp 10	124,10	476,42
Sp 11	176,85	657,15
Sp 12	92,70	365,01
Sp 13	152,20	454,35

Nota-se a distribuição das tensões no perfil de solo por meio de bulbos de tensões, destaca-se ainda que, devido às limitações da versão de estudante do Sigma/W, algumas seções analisadas não apresentam bulbos tão definidos, podendo ser melhorado pelo aumento do número de elementos (refinamento da malha) ou pela mudança da geometria (estrutura) da malha empregada.

4 Conclusões

A partir dos resultados obtidos nesta pesquisa, foi possível concluir que os perfis de solo analisados apresentam similaridades de comportamento de recalque e em suas tensões no contato solo-estrutura.

Os resultados obtidos através do programa SIGMA/W, em relação ao deslocamento vertical dos perfis analisados, acontece de forma semelhante uma vez que todos os perfis são compostos pelo mesmo tipo de solo. Entretanto, percebe-se que na Sapata SP 11 da Seção IV o deslocamento vertical de 31,66 mm é maior que nas demais sapatas em estudo. Observou-se um recalque diferencial máximo de 12,97 mm, sendo possível afirmar que estes estão abaixo dos limites de recalques diferenciais máximos propostos pela literatura para o surgimento de patologias nos elementos estruturais da edificação. As tensões totais resultantes em cada seção



analisada geram um bulbo de tensões similar às demais seções, comportamento característico do terreno analisado na pesquisa.

A utilização do Método dos Elementos Finitos possibilita a realização de análises tensão-deformação de casos práticos de obras de fundações, tornando uma importante ferramenta para o entendimento do comportamento dos materiais utilizados como apoio de edificações, podendo ter seu uso ainda na fase de projeto para estimativas de distribuição de tensões e recalques, ou no pós-construção da edificação, para o diagnóstico de possíveis problemas de desempenho da estrutura relacionados à falta de capacidade de suporte e alta deformabilidade do terreno.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANGELO, Rafaela Machado (2016) *Análise numérica uma tubulação enterrada submetida a carregamentos móveis*. Dissertação de Mestrado, Curso de Engenharia Civil, Programa de Pós Graduação em Geotecnia, Escola de Engenharia de São Carlos/USP, 166 p.
- Burland *et al.* (1977) *Studies of the influence of non-linear stress-strain characteristics in soil-structure interaction* *Journal of Geotechnical Engineering* 36, no. 3, 377-396.
- GEOSLOPE. (2020) *SIGMA/W*. Disponível em: < <https://www.geoslope.com/products/sigma-w> > Acesso em: 11 nov. 2020.
- Godoy, N. S. (1972) *Fundações*. Notas de aula, curso de Graduação. Escola de Engenharia de São Carlos/USP.
- Marangon, M. (2009) *Parâmetros dos Solos para Cálculo de Fundações*. Disponível em <<https://www.ufjf.br/nugeo/files/2009/11/GF03-Par%C3%A2metros-dos-Solos-para-C%C3%A1lculo-de-Funda%C3%A7%C3%B5es.pdf>>. Acesso em: 10 nov. 2020.
- MENDES, Fernando Borges (2010) *O uso de ferramenta computacional na avaliação e dimensionamento de cortinas atirantadas*. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-graduação em Geotécnica, Curso de Engenharia Geotécnica, Universidade Federal de Ouro Preto/UFOP, 179 p.
- Reis, J. H. (2000) *Interação solo-estrutura de grupo de edificações com fundações superficiais em argila mole*. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Departamento de Geotecnia, Escola de Engenharia de São Carlos/USP, 139 p.
- Silva Jr., Raimundo Paulo da. (2018) *Cálculo de capacidade de carga e dimensionamento de fundações profundas para um edifício com múltiplos*. Dissertação de conclusão de curso em Engenharia Civil, Centro Acadêmico do Agreste/CAA da Universidade Federal de Pernambuco/UFPE, 95 p.
- Skempton, A. W., Macdonald, D. H. (1956) *Allowed settlements of buildings*. Proceedings of the Institution of Civil Engineers Design and Construction, London, v. 5, pt 3, p. 727-768.
- Souza, G. S. B. (2019) *Análise dos efeitos da interação solo-estrutura em edificação de médio porte localizada no distrito federal*. Dissertação de conclusão de curso em Engenharia Civil, Centro Universitário de Brasília/ UniCEUB, 58 p.
- Teixeira, A. T., Godoy, N. S. (1996) *Análise, Projeto e Execução de Fundações Rasas*. *Fundações: teoria e prática*. Hachich et al, Pini, São Paulo, SP, BRA, 758 p.
- Velloso, d. A.; Lopes, F. R. (2011) *Fundações*, 2nd ed., Oficina de Textos, São Paulo, SP, BRA, 240 p.