

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS
CENTRO DE TECNOLOGIA
ENGENHARIA CIVIL

Bruno Leite Ramires Saldanha

**ANÁLISE NUMÉRICA E EXPERIMENTAL DO COMPORTAMENTO TENSÃO-
RECALQUE DE SOLOS DA FORMAÇÃO BARREIRA**

Maceió

2021

Bruno Leite Ramires Saldanha

**ANÁLISE NUMÉRICA E EXPERIMENTAL DO COMPORTAMENTO TENSÃO-
RECALQUE DE SOLOS DA FORMAÇÃO BARREIRA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentando para o Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal de Alagoas como forma de obtenção do título de bacharel em Engenharia Civil.

Orientadora: Prof.^a Dr.^a Juliane Andréia Figueiredo Marques

Maceió

2021

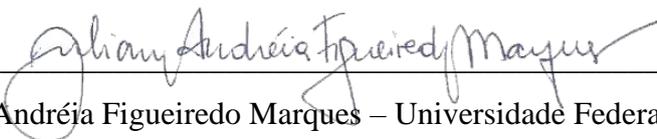
Folha de Aprovação

Bruno Leite Ramires Saldanha

ANÁLISE NUMÉRICA E EXPERIMENTAL DO COMPORTAMENTO TENSÃO- RECALQUE DE SOLOS DA FORMAÇÃO BARREIRA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentando para o Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal de Alagoas como forma de obtenção do título de bacharel em Engenharia Civil.

Trabalho aprovado em 11 de janeiro de 2021



Prof.^a. Dr.^a Juliane Andréia Figueiredo Marques – Universidade Federal de Alagoas.

Banca examinadora:



Me.^a. Ana Beatriz Araújo Nobre Dias – Universidade de Brasília.



Prof. Me. Luiz Carlos Vêras – Universidade Federal de Alagoas.

Catálogo na fonte
Universidade Federal de Alagoas
Biblioteca Central
Divisão de Tratamento Técnico
Bibliotecária: Taciana Sousa dos Santos – CRB-4 – 2062

- S162a Saldanha, Bruno Leite Ramires.
Análise numérica e experimental do comportamento tensão-recalque de solos da formação barreira / Bruno Leite Ramires Saldanha. – 2021.
73 f. : il., figs. e tabs. color.
- Orientadora: Juliane Andréia Figueiredo Marques.
Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Civil)
– Universidade Federal de Alagoas. Centro de Tecnologia. Maceió, 2021.
- Bibliografia: f. 71-72.
Anexo: f. 73.
1. Comportamento tensão-recalque. 2. Formação barreiras. 3. Plaxis 2D (Software). 4. Provas de carga sobre placas. I. Título.

CDU: 624.13

AGRADECIMENTOS

A definição de gratidão representa bastante meu sentimento nesse momento. Eu sempre associei a graduação com o desbravamento de uma floresta desconhecida: a gente entra nela e não sabe nem como nem quando sairá efetivamente. Ao longo do caminho, encontrei pessoas que estiveram dispostas a me ajudar por todos os obstáculos que encontrei, me levando para onde eu estou hoje. Sendo assim, este espaço é dedicado a todas essas pessoas que tiveram uma grande influência na minha trajetória.

Primeiramente, gostaria de agradecer à minha família, em especial aos meus pais, Elenice e Israel, e aos meus irmãos Artur e Natália, que me ensinaram todos os meus valores e me apoiaram em todas as minhas decisões.

Ao PET Engenharia Civil e a todos os seus membros, que tornaram meus dias de UFAL muito mais leves, me ensinaram o que é trabalho em grupo e me tornaram em um cidadão muito mais consciente.

A todos os meus amigos, em especial Anita, por ser a minha maior influência na graduação e com certeza a pessoa que mais me apoiou durante toda a minha trajetória. Ariana, Matheus, Kevin, Gabriel e Sanmara, por estarem sempre presentes no meu dia a dia e tornarem minha graduação muito mais dinâmica. E, por fim, Rafaella, Milena, Fernanda e Alícia, que me mostraram que a amizade vai muito além do convívio em sala de aula.

Aos meus orientadores da UFAL, Isnaldo, Romildo, Karol, Roberaldo, Viviane e Juliane, pelo voto de confiança que me foi dado e por todos os conhecimentos, desafios e oportunidades que me transformaram no estudante que eu sou hoje.

À AGM geotécnica LTDA, por todos os ensinamentos que me foram passados e por todo suporte técnico fundamental para a execução desse trabalho.

Por fim, à UFAL pelo zelo ao ensino público de qualidade e pela criação de um ambiente propício ao desenvolvimento dos seus estudantes.

RESUMO

O presente trabalho objetiva avaliar o comportamento tensão-recalque de solos representativos da Formação Barreiras por meio de simulações numéricas baseadas no método dos elementos finitos. Para isso, utilizou-se o *software* Plaxis 2D para a realização de quatro simulações de provas de carga sobre placa baseadas nos ensaios experimentais executados por Morais (2011), Falcão (2014) e Barreto (2015) no Campo Experimental de Geotecnia da Universidade Federal de Alagoas (CEG/UFAL). Avaliaram-se os resultados por meio de um estudo comparativo quanto à similaridade das curvas tensão-recalque e quanto à diferença percentual das tensões e recalques admissíveis resultantes das simulações com as obtidas pelos ensaios de prova de carga sobre placa realizadas por Falcão (2014) e Barreto (2015). As simulações 1, 3 e 4 apresentaram comportamentos condizentes aos experimentais, resultando em curvas semelhantes e em pequenas diferenças percentuais quanto às tensões e recalques admissíveis; já a simulação 2 expressou resultados divergentes do experimental, distinguindo-se nos excessivos valores de recalque. Sendo assim, a consistência nos resultados de três das quatro simulações apresenta o *software* Plaxis 2D como uma boa alternativa para simulação do comportamento tensão-recalque dos solos da formação barreira.

Palavras-Chave: Prova de carga sobre placa. Plaxis 2D. Tensão admissível do solo. Formação Barreiras.

ABSTRACT

The objective of the present study is to evaluate the stress-settlement behavior of Barreiras Formation soil through numerical simulations based on the Finite Elements Method. It was performed four plate test simulations based on the studies of Morais (2011), Falcão (2014) and Barreto (2015) on the Federal University of Alagoas Experimental Geotechnics Camp. The results were evaluated by comparing the similarities between the stress-settlement curves and the percentual difference between the allowable bearing capacity and the maximum allowable settlement obtained through simulations and the plate load tests executed by Falcão (2014) and Barreto (2015). The soil behavior presented by the simulations 1, 3 and 4 were similar by the ones obtained experimentally, resulting in similar curves and small percentual differences of the maximum allowable settlement and allowable bearing capacity. The second simulation presented great divergences between the two curves, resulting in higher settlement values. Therefore, it was concluded that the consistency between three of the four simulations presented by the *software* Plaxis 2D expressed a great alternative to simulate the stress-settlement behavior of the barreiras formations soil.

Keywords: Plate load test. Plaxis 2D. Allowable bearing capacity. Barreiras Formation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Fases da deformação do solo: a) Elástica, b) Plástica e c) Ruptura.....	18
Figura 2 - Gráfico tensão-recalque com ruptura: (a) Geral, (b) Localizada e (c) Puncionamento	18
Figura 3 - Fatores de carga propostos por Terzaghi	20
Figura 4 - Classificação das provas de carga quanto à localização. (a) Na superfície, (b) Em cavas e (c) Em furos	24
Figura 5 - Classificação do ensaio de prova de carga quanto ao tipo de placa. (a) Convencional e (b) Parafuso.....	25
Figura 6 - Classificação do ensaio de prova de carga quanto ao modo de carregamento. (a) Carga controlada, (b) Carga incremental mantida e (c) Carga cíclica.....	25
Figura 7 – Esquema de montagem dos sistemas de uma prova de carga sobre placa	26
Figura 8 - Curva tensão-recalque.....	27
Figura 9 - Diferenças entre as curvas tensão-recalque de ruptura geral e local	28
Figura 10 - Localização do CEG/UFAL em sua implementação	31
Figura 11 - Disposição dos furos de sondagem e provas de carga em relação ao centro de tecnologia	32
Figura 12 - Disposição dos furos de sondagem e dos ensaios de prova de carga no CEG/UFAL	33
Figura 13 - Interpretação dos ensaios SPT - 1 e SPT - 2.....	33
Figura 14 - Interpretação dos ensaios SPT - 3 e SPT - 4.....	34
Figura 15 - Modelos utilizados pelo plaxis. (a) Deformação Plana e (b) Axissimetria	35
Figura 16 - Exemplo de elementos triangulares de 15 nós. (a) Pontos de deslocamentos e (b) Pontos de tensão	36
Figura 17 - Exemplo de elementos triangulares de 6 nós. (a) Pontos de deslocamentos e (b) Pontos de tensão	36
Figura 18 - Demonstração de um refinamento de um elemento triangular	37
Figura 19 - Demonstração do elemento para atribuição dos parâmetros iniciais do Paxis 2D	37
Figura 20 - Exemplo de geometria de três camadas de solo utilizando a ferramenta <i>Geometry Line</i>	38
Figura 21 - Demonstração do elemento de criação de materiais. (a) <i>Aba general</i> e (b) <i>aba parameters</i>	38
Figura 22 - Malha de elementos finitos geradas na geometria de três camadas.....	39

Figura 23 - Geometria final resultante da aplicação da poropressão e das tensões iniciais	39
Figura 24 - Apresentação da rotina de cálculos.....	40
Figura 25 - Aplicação do comando <i>prescribed load</i> na geometria do problema	41
Figura 26 - Resultado do processo de refinamento da malha de elementos finitos.....	41
Figura 27 - Apresentação visual dos deslocamentos no solo modelado	42
Figura 28 - Apresentação da rotina de curvas	43
Figura 29 - Demonstração de uma curva tensão recalque gerada pelo <i>software</i> Plaxis 2D.....	43
Figura 30 - (a) Modelo geométrico final, (b) Malha gerada do modelo geométrico e (c) Estado de deformação final do modelo geométrico	49
Figura 31 - Curva tensão-recalque da simulação 1.....	49
Figura 32 - Curva obtida pela última iteração do método de Van der Veen pela simulação 1	50
Figura 33 - Apresentação da curva tensão-recalque obtida pela Simulação 1 e pela extrapolação de Van der Veen	51
Figura 34 - Comparação entre as curvas tensão-recalque da prova de carga 1 com a da simulação 1	53
Figura 35 - (a) Modelo geométrico final, (b) Malha gerada do modelo geométrico e (c) Estado de deformação final do modelo geométrico	55
Figura 36 - Curva tensão-recalque da simulação 2.....	55
Figura 37 - Curva obtida pela última iteração do método de Van der Veen da simulação 2 ...	56
Figura 38 - Apresentação da curva tensão-recalque obtida pela simulação 2 e pela extrapolação de Van der Veen	56
Figura 39 - Comparação entre as curvas tensão-recalque da prova de carga 2 com a da simulação 2	58
Figura 40 - (a) Modelo geométrico final, (b) Malha gerada do modelo geométrico e (c) Estado de deformação final do modelo geométrico	60
Figura 41 - Curva tensão-recalque da simulação 3.....	60
Figura 42 - Curva obtida pela última iteração do método de Van der Veen da simulação 3 ...	61
Figura 43 - Apresentação da curva tensão-recalque obtida pela simulação 3 e pela extrapolação de Van der Veen	61
Figura 44 - Comparação entre as curvas tensão-recalque da prova de carga 3 com a da simulação 3	63
Figura 45 - (a) Modelo geométrico final, (b) Malha gerada do modelo geométrico e (c) Estado de deformação final do modelo geométrico	65

Figura 46 - Curva tensão-recalque da simulação 4.....	65
Figura 47 - Curva obtida pela última iteração do método de Van der Veen da simulação 3 ...	66
Figura 48 - Apresentação da curva tensão-recalque obtida pela simulação 4 e pela extrapolação de Van der Veen	66
Figura 49 - Comparação entre as curvas tensão-recalque da prova de carga 4 com a da simulação 4	68

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Fatores de forma propostos por Terzaghi.....	20
Tabela 2 - Fatores de carga propostos por Vesic.....	21
Tabela 3 - Fatores de forma propostos por Vesic.....	21
Tabela 4 - Fatores de carga propostos por Brinch-Hansen.....	22
Tabela 5 - Fatores de forma propostos por Brinch-Hansen.....	22
Tabela 6 - Estimativa da coesão, ângulo de atrito e peso específico pela correlação com o índice N _{spt}	45
Tabela 7 - Coeficiente a.....	45
Tabela 8 - Coeficiente K.....	46
Tabela 9 - Coeficiente de Poisson	46
Tabela 10 - Apresentação dos parâmetros de entrada estimados para a simulação 1, onde N _{spt} é o índice SPT, γ o peso específico natural, c a coesão, φ o ângulo de atrito, Es o módulo de elasticidade do solo e v o coeficiente de Poisson	48
Tabela 11 - Tensões e recalques admissíveis obtidos pela Simulação 1 e pelos métodos teóricos e semiempíricos	52
Tabela 12 - Diferença percentual entre as tensões e recalques admissíveis obtidos pela simulação 1 com as obtidas por Falcão (2014)	53
Tabela 13 - Apresentação dos parâmetros de entrada estimados para a simulação 2 onde N _{spt} é o índice SPT, γ o peso específico natural, c a coesão, φ o ângulo de atrito, Es o módulo de elasticidade do solo e v o coeficiente de Poisson	54
Tabela 14 - Tensões e recalques admissíveis obtidos pela Simulação 2 e pelos métodos teóricos e semiempíricos	57
Tabela 15 - Diferença percentual entre as tensões e recalques admissíveis obtidos pela simulação 2 com as obtidas por Falcão (2014)	58
Tabela 16 - Apresentação dos parâmetros de entrada estimados para a simulação 3 onde onde N _{spt} é o índice SPT, γ o peso específico natural, c a coesão, φ o ângulo de atrito, Es o módulo de elasticidade do solo e v o coeficiente de Poisson	59
Tabela 17 - Tensões e recalques admissíveis obtidos pela Simulação 3 e pelos métodos teóricos e semiempíricos	62
Tabela 18 - Diferença percentual entre as tensões e recalques admissíveis obtidos pela simulação 3 com as obtidas por Barreto (2015)	63

Tabela 19 - Apresentação dos parâmetros de entrada estimados para a simulação 4 onde N_{spt} é o índice SPT, γ o peso específico natural, c a coesão, φ o ângulo de atrito, E_s o módulo de elasticidade do solo e ν o coeficiente de Poisson	64
Tabela 20 - Tensões e recalques admissíveis obtidos pela Simulação 4 e pelos métodos teóricos e semiempíricos	67
Tabela 21 - Diferença percentual entre as tensões e recalques admissíveis obtidos pela simulação 4 com as obtidas por Barreto (2015)	68

LISTA DE SÍMBOLOS

N_c, N_q, N_γ	Fatores de capacidade de carga;
N_{spt}	Índice SPT;
P_{adm}	Tensão admissível do solo;
Q	Carga aplicada;
Q_u	Capacidade de carga do solo;
S_c, S_q, S_γ	Fatores de forma;
ρ	Recalque;
ρ_a	Recalque admissível;
$\sigma_{\rho máx}$	Tensão que provoca o recalque máximo;
B	Menor largura da fundação;
D	Profundidade de assentamento da sapata;
FS	Fator de segurança global;
q	Pressão efetiva do solo na cota de apoio da fundação;
α	Coefficiente angular da curva de Van der Veen modificada por Aoki;
β	Coefficiente linear da curva de Van der Veen modificada por Aoki;
γ	Peso específico do solo;
c	Coesão;
φ	Ângulo de atrito do solo;
E_s	Módulo de Elasticidade do solo;
E_s	Módulo de Elasticidade do solo;
ν	Coefficiente de Poisson;
a	Coefficiente a para determinação do coeficiente de Poisson;
K	Coefficiente K para determinação do coeficiente de Poisson.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	14
1.2	OBJETIVOS	15
1.2.1	Objetivo Geral	15
1.2.2	Objetivos Específicos	15
1.3	JUSTIFICATIVA.....	15
1.4	METODOLOGIA DE PESQUISA.....	16
1.5	DELIMITAÇÃO DO TRABALHO	16
2	TENSÃO ADMISSÍVEL DO SOLO	17
2.1	INTRODUÇÃO	17
2.2	CAPACIDADE DE CARGA DAS FUNDAÇÕES.....	17
2.2.1	Métodos Teóricos	19
2.2.2	Métodos Semiempíricos	22
3	PROVAS DE CARGA SOBRE PLACA	24
3.1	INTRODUÇÃO	24
3.2	CLASSIFICAÇÃO	24
3.3	EQUIPAMENTOS.....	25
3.4	PROCEDIMENTO DE EXECUÇÃO	26
3.5	RESULTADOS E INTERPRETAÇÕES.....	27
3.5.1	Extrapolação da curva pelo Método de Van Der Veen	28
3.5.2	Tensão Admissível	29
4	METODOLOGIA	31
4.1	ÁREA DE ESTUDO	31
4.2	DADOS UTILIZADOS	32
4.2.1	Sondagem de Simples Reconhecimento	32
4.2.2	Provas de Carga	34

4.3	<i>SOFTWARE PLAXIS 2D</i>	34
4.3.1	Modelos numéricos	35
4.3.2	Entrada de dados (<i>Input</i>)	37
4.3.3	Cálculos (<i>Calculation</i>)	40
4.3.4	Saída de dados (<i>Output</i>)	42
4.3.5	Curvas (<i>Curves</i>)	43
4.3.6	Simulações no Plaxis 2D	44
4.4	ANÁLISE DOS RESULTADOS	46
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	48
5.1	SIMULAÇÃO 1	48
5.1.1	Extrapolação pelo método de Van der Veen modificado por Aoki	50
5.1.2	Tensões e recalques admissíveis	51
5.1.3	Análise comparativa	52
5.2	SIMULAÇÃO 2	54
5.2.1	Extrapolação pelo método de Van der Veen modificado por Aoki	55
5.2.2	Tensões e recalques admissíveis	57
5.2.3	Análise comparativa	57
5.3	SIMULAÇÃO 3	59
5.3.1	Extrapolação pelo método de Van der Veen modificado por Aoki	60
5.3.2	Tensões e recalques admissíveis	61
5.3.3	Análise comparativa	63
5.4	SIMULAÇÃO 4	64
5.4.1	Extrapolação pelo método de Van der Veen	65
5.4.2	Tensões e recalques admissíveis	67
5.4.3	Análise comparativa	67
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	69
	REFERÊNCIAS	71

ANEXO A – Localização geográfica dos ensaios realizados no CEG/UFAL.....	73
---	-----------

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Define-se como solos um conjunto de partículas sólidas oriundas do intemperismo de rochas que possuem ar e água entre seus espaços, resultando em materiais de grande variabilidade comportamental. Essa variabilidade é resultante da possibilidade de movimentação entre as partículas, divergindo dos mecanismos clássicos da Mecânica dos Sólidos Deformáveis, e, portanto, tornando necessário aprofundados estudos em relação ao seu comportamento perante as solicitações da Engenharia Geotécnica (PINTO, 2006).

No projeto de fundações superficiais, esse comportamento é medido por meio da tensão admissível do solo, representada por aquela que não causará a ruptura do solo nem ocasionará em recalques excessivos. Sendo assim, torna-se necessário para sua determinação a execução de duas etapas: primeiramente, a obtenção da tensão de ruptura do solo pela verificação do Estado Limite Último (ELU), utilizando os valores obtidos por provas de cargas sobre placas, métodos teóricos e métodos semiempíricos, e, posteriormente, pela análise dos deslocamentos máximos resultantes da aplicação dessa tensão pela verificação Estado Limite de Serviço (ELS) (ABNT, 2019).

Atualmente no Brasil, prefere-se os métodos teóricos e semiempíricos para a determinação da tensão admissível, já que eles apresentam resultados bastante satisfatórios por um custo razoável. Apesar disso, ainda considera-se as provas de carga como um dos métodos mais confiáveis, tendo em vista que se definem as condições do ensaio de acordo com as necessidades do projeto, sendo o principal viés para sua realização o alto custo, tempo de execução e necessidade de mão de obra qualificada (CINTRA; AOKI; ALBIERO, 2011).

Nesse cenário, a utilização do Métodos dos Elementos Finitos (MEF) por meio de *softwares* consiste em um método alternativo e economicamente viável para previsão da tensão admissível a ruptura e a recalques do solo, sendo apresentado por Freitas (2010) como uma das ferramentas mais utilizadas na atualidade devido à sua versatilidade e flexibilidade na simulação de problemas, permitindo a incorporação de diversas condições de contorno nos modelos construídos.

Os trabalhos desenvolvidos por: Costa (1999), Menegotto (2004), Moraes (2005), Duarte (2006), Russi (2007), Almeida (2009) tiveram grande enfoque no estudo das provas de carga sobre placa. Em Maceió, Falcão (2014) e Barreto (2015) deram início aos estudos no Campo

Experimental de Geotecnia da Universidade Federal de Alagoas (CEG/UFAL). Apesar disso, nenhuma análise numérica desses resultados foi realizada.

Sendo assim, o presente trabalho dá continuidade aos estudos referentes ao CEG/UFAL, por meio da análise numérica dos dados experimentais, com foco em tensões admissíveis e recalques da região.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

Estudar a aplicabilidade de utilização do *Software* de Elementos Finitos Geotécnico Plaxis 2D na determinação das tensões admissíveis a ruptura e a recalques de um solo da Formação Barreiras.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Estudar a aplicabilidade da utilização do Plaxis 2D na previsão da tensão admissível de um solo da Formação Barreiras;
- Estudar a aplicabilidade de utilização do Plaxis 2D na previsão de recalques de um solo da Formação Barreiras;
- Avaliar o comportamento tensão-recalque do solo obtidos por simulações no Plaxis 2D com resultados obtidos experimentalmente por provas de carga sobre placa.

1.3 JUSTIFICATIVA

As provas de carga, apesar de reproduzirem resultados bastante confiáveis quanto a dados para o estudo e dimensionamento de fundações superficiais, acarretam tanto em altos custos para a realização dos ensaios quanto na necessidade de disponibilização de certa quantidade de tempo (RUSSI, 2007).

Aliado a isso, a já existência de um banco de dados do CEG/UFAL permite a utilização de *softwares* baseados no Método Elementos Finitos como uma forma de previsão das tensões admissíveis a ruptura e dos recalques do solo de maneira mais rápida e de menor custo.

Por fim, o trabalho em questão servirá como um incremento do banco de dados de informações geotécnicas da região, apresentando estudos quanto a utilização de *softwares* baseados nos elementos finitos para a determinação do comportamento tensão-recalque dos solos.

1.4 METODOLOGIA DE PESQUISA

Desenvolveu-se o trabalho a partir da consulta de livros, artigos, dissertações, teses e normas. Posteriormente, realizou-se a coleta dos dados necessários para realização das simulações utilizando o *software* Plaxis 2D por meio da revisão dos trabalhos citados anteriormente. Por fim, analisou-se os resultados de acordo com as metodologias propostas no capítulo 5.

1.5 DELIMITAÇÃO DO TRABALHO

O referente trabalho se limita ao estudo numérico por meio do *software* de elementos finitos geotécnico Plaxis 2D das tensões admissíveis e recalques dos solos obtidas por simulações de carregamentos verticais aplicados em solos sedimentares do Terciário, Formação Barreiras, os quais compõem a região do Campo Experimental de Geotecnia da Universidade Federal de Alagoas.

2 TENSÃO ADMISSÍVEL DO SOLO

2.1 INTRODUÇÃO

Segundo a NBR 6122 (2019), a tensão admissível do solo (P_{adm}) consiste na máxima tensão aplicada ao terreno por uma fundação rasa ou base de tubulão que atende, com os fatores de segurança predeterminados, aos estados limites últimos e de serviço.

Nos projetos de fundações superficiais, sua utilização é bastante difundida por associar dois valores bastante presentes na literatura: a capacidade de carga (Q_u) e os fatores de segurança globais (FS), como exposto na Equação 1.

$$P_{adm} = \frac{Q_u}{FS} \quad (1)$$

Obtém-se a capacidade de carga pela interpretação de um ou mais dos seguintes métodos: prova de carga sobre placa, métodos teóricos e métodos semiempíricos. Já para os fatores de segurança globais, utiliza-se o valor de 2 para provas de carga e o valor de 3 para métodos empíricos e semiempíricos, como exposto na NBR 6122 (2019).

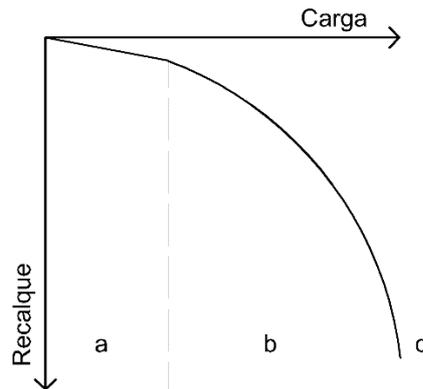
Sendo assim, apresentam-se nos próximos subcapítulos os métodos utilizados para determinação da capacidade de carga do solo e dos mecanismos necessários para um melhor entendimento sobre o tema.

2.2 CAPACIDADE DE CARGA DAS FUNDAÇÕES

Define-se como capacidade de carga o menor valor do esforço que ao aplicado no elemento de fundação ocasionará na sua ruptura ou no colapso/escoamento do solo que o suporta (ALONSO, 2003).

Entretanto, os mecanismos de ruptura do solo nem sempre permitem uma fácil observação desse valor. Primeiramente, é preciso se atentar ao fato da existência de três fases distintas em relação a deformação do solo (Figura 1): a fase inicial, de comportamento elástico; a intermediária, de comportamento plástico; e, por fim, a fase de ruptura (VELLOSO, LOPES, 2010).

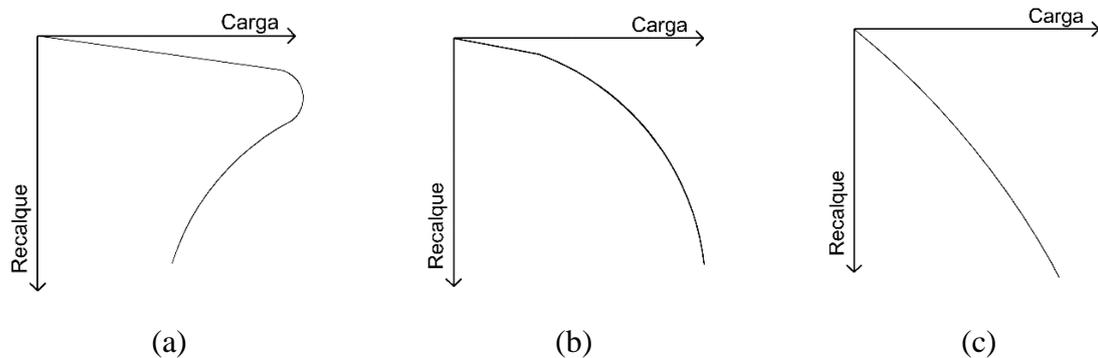
Figura 1 - Fases da deformação do solo: a) Elástica, b) Plástica e c) Ruptura



Fonte: Adaptado de Velloso e Lopes (2010)

Além disso, a própria fase de ruptura se comporta diferentemente de acordo com o tipo de solo, podendo ser de ruptura geral, quando associada aos solos mais resistentes, caracterizados por romperem bruscamente; por puncionamento, quando associada aos solos mais deformáveis, caracterizados por deslocarem verticalmente para baixo do elemento de fundação; e localizadas, quando associadas aos solos de média resistência, caracterizados por apresentarem os dois processos anteriores.

Figura 2 - Gráfico tensão-recalque com ruptura: (a) Geral, (b) Localizada e (c) Puncionamento



Fonte: Adaptado de Velloso e Lopes (2010)

Pelo exposto, verifica-se que a obtenção da capacidade de carga por métodos gráficos nem sempre é tão simples, tornando os métodos teóricos e semiempíricos soluções mais práticas para sua obtenção.

2.2.1 Métodos Teóricos

Atualmente, as teorias para obtenção da capacidade de carga se apresentam bastante difundidas na literatura, representando desde os casos mais simples, que desprezam a forma da fundação e esforços de cisalhamento, até os casos mais complexos, que consideram a inclinação do elemento e das solicitações.

A primeira teoria de grande reconhecimento foi proposta por Terzaghi (1943), limitada por carregamentos não excêntricos e verticais e desprezando a resistência ao cisalhamento do solo. Em seguida, Meyerhof (1951, 1963) apresenta um aperfeiçoamento da teoria de Terzaghi, incluindo na formulação a resistência ao cisalhamento do solo. Hansen (1961, 1970), apresenta uma solução para carregamentos excêntricos e inclinações das cargas e do terreno. Por fim, Vesic (1975) propõe a utilização de novos fatores para o cálculo da capacidade de carga (VELLOSO, LOPES, 2010).

Apesar das notórias evoluções nos equacionamentos da capacidade de carga, as provas de carga sobre placa apresentam somente carregamentos verticais não excêntricos, permitindo a utilização de equacionamentos mais simples. Sendo assim, apresenta-se a Equação 2, proposta por Terzaghi e Peck (1967), como uma solução ideal para o problema.

$$Q_u = c \cdot N_c \cdot S_c + q \cdot N_q \cdot S_q + \gamma \cdot \frac{B}{2} \cdot N_\gamma \cdot S_\gamma \quad (2)$$

Onde:

c = coesão do solo;

γ = peso específico do solo onde se apoia a fundação;

B = menor largura da fundação;

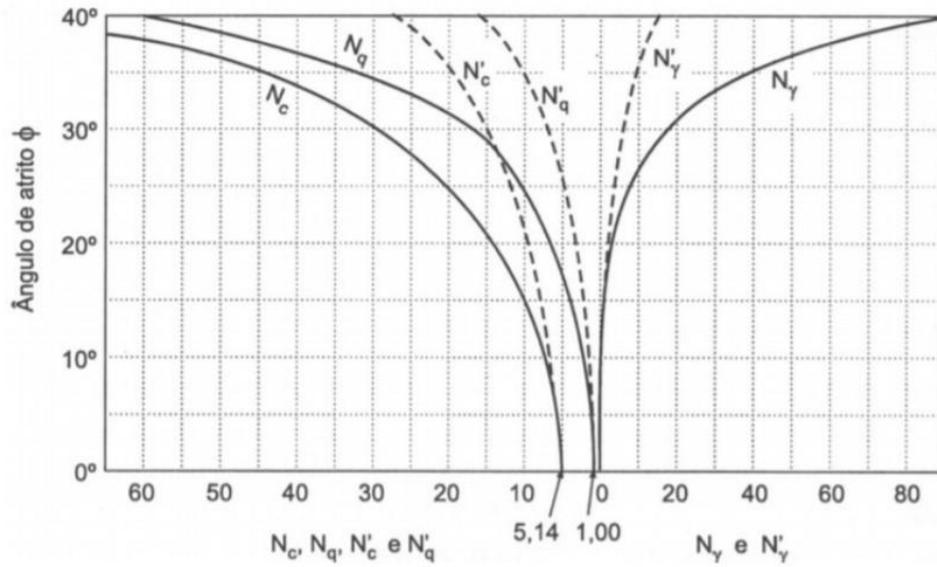
q = pressão efetiva do solo na cota de apoio da fundação;

N_c, N_q, N_γ = fatores de carga;

S_c, S_q, S_γ = fatores de forma.

Para os fatores de carga e fatores de forma, Terzaghi (Figura 3 e Tabela1), Vesic (Tabela 2 e Tabela 3) e Brinch-Hansen (Tabela 4 e Tabela 5) propuseram diferentes valores em função do ângulo de atrito do solo e do tipo de fundação.

Figura 3 - Fatores de carga propostos por Terzaghi



Fonte: Alonso (2019)

Tabela 1 - Fatores de forma propostos por Terzaghi

Forma da fundação	Fatores de Forma		
	S_c	S_q	S_γ
Corrida	1,0	1,0	1,0
Quadrada	1,3	0,8	1,0
Circular	1,3	0,6	1,0
Retangular	1,1	0,9	1,0

Fonte: Alonso (2019)

Tabela 2 - Fatores de carga propostos por Vesic

Ângulo de atrito – $\varphi(^{\circ})$	N_c	N_q	N_{γ}
0	5,14	1,00	0,00
5	6,49	1,57	0,45
10	8,35	2,47	1,22
15	10,98	3,94	2,65
20	14,83	6,40	5,39
25	20,72	10,66	10,88
30	30,14	18,40	22,40
35	46,12	33,30	48,03
40	75,31	64,20	109,41
45	133,88	134,88	271,76
50	266,89	319,07	762,89

Fonte: Cintra, Aoki e Albiero (2011)

Tabela 3 - Fatores de forma propostos por Vesic

Forma da fundação	S_c	S_q	S_{γ}
Corrida	1,00	1,00	1,00
Retangular	$1 + \left(\frac{B}{L}\right) \cdot \left(\frac{N_q}{N_c}\right)$	$1 + \left(\frac{B}{L}\right) \cdot \text{tg}\varphi$	$1 - 0,4 \cdot \left(\frac{B}{L}\right)$
Circular ou quadrada	$1 + \left(\frac{N_q}{N_c}\right)$	$1 + \text{tg}\varphi$	0,6

Fonte: Cintra, Aoki e Albiero (2011)

Tabela 4 - Fatores de carga propostos por Brinch-Hansen

$\varphi(^{\circ})$	0	5	10	15	20	22,5	27,5	30	32,5	35	37,5	40	42,5
N_c	5,1	6,5	8,3	11	14,8	17,5	24,9	30,1	37,0	46,1	58,4	75,3	99,2
N_q	1,0	1,6	2,5	3,9	6,4	8,2	13,9	18,4	24,6	33,3	45,8	64,2	91,9
N_{γ}	0,0	0,3	0,7	1,6	3,5	5,0	10,4	15,2	22,5	33,9	54,5	81,8	131,7

Fonte: Caputo (1988)

Tabela 5 - Fatores de forma propostos por Brinch-Hansen

Forma da fundação	Coeficiente de forma	
	S_c, S_q	S_{γ}
Corrida	1,0	1,0
Retangular ($b < a$)	$1 + \frac{0,3b}{a}$	$1 - \frac{0,4b}{a}$
Quadrada e Circular	1,3	0,6

Fonte: Caputo (1988)

2.2.2 Métodos Semiempíricos

Os métodos semiempíricos consistem em métodos que permitem estimar o comportamento tensão-recalque do solo por meio de correlações com resultados de ensaios que não visem a obtenção dessas propriedades, como por exemplo o SPT e CPT (VELLOSO; LOPES, 2010). Sendo assim, apresentam-se os métodos propostos pela correlação com o índice N_{spt} , devido à sua maior facilidade de obtenção.

Terzaghi e Peck (1948, 1967) foram os pioneiros na previsão dos recalques e das tensões admissíveis de sapatas em areias apresentando a Equação 3 para a obtenção da tensão admissível para um recalque de 1 polegada, e recomendando a redução pela metade para casos em que a profundidade do nível de água seja igual ao nível do terreno (VELLOSO; LOPES, 2010).

$$P_{adm} = 4,4 \cdot \left(\frac{N_{spt} - 3}{10} \right) \cdot \left(\frac{B + 1}{2 \cdot B} \right)^2 \quad (3)$$

Onde:

P_{adm} = tensão admissível, em kgf/cm²;

B = menor largura da fundação em pés (B > 4');

Em seguida, Meyerhof (1965) apresentou outras equações (Equação 4 e 5) para determinação da tensão admissível em kPa.

$$P_{adm} = \frac{N_{spt} \cdot \rho_a}{8} \text{ para } B \leq 4' \quad (4)$$

$$P_{adm} = \frac{N_{spt} \cdot \rho_a}{12} + \left(\frac{B+1}{B}\right)^2 \text{ para } B > 4' \quad (5)$$

Onde,

ρ_a = recalque admissível em polegadas.

Nas argilas, Skempton (1951) apresentou a Equação 6 para obtenção da tensão admissível em kPa.

$$P_{adm} = 20 \cdot N_{spt} \text{ para } 5 \leq N_{spt} \leq 20 \quad (6)$$

Posteriormente, Mello (1975) apresentou a Equação 7 para obtenção da tensão admissível em kPa para qualquer tipo de solo.

$$P_{adm} = 100 \cdot (\sqrt{N_{spt}} - 1) \text{ para } 4 \leq N_{spt} \leq 16 \quad (7)$$

Por fim, Teixeira (1996) desenvolveu a Equação 8 para obtenção da tensão admissível em kPa utilizando B em metros.

$$P_{adm} = 50 + (10 + 4 \cdot B) \cdot N_{spt} \quad (8)$$

3 PROVAS DE CARGA SOBRE PLACA

3.1 INTRODUÇÃO

As provas de carga sobre placa consistem em ensaios de campo que - diferentemente dos métodos teóricos e semiempíricos - se utilizam das especificidades do projeto de fundação para uma previsão dos parâmetros de tensão e deformação mais condizentes com a realidade e mais confiáveis para a obtenção da capacidade de carga (ALONSO, 2019).

Constata-se a versatilidade do ensaio em relação aos seus resultados. Com a realização de somente uma prova de carga, é possível prever não só a capacidade de carga de um solo, mas também diversos outros parâmetro, tais como o módulo de elasticidade, resistência não drenada, coeficiente de reação vertical e até dos recalques sofridos por uma fundação real (VELLOSO; LOPES, 2010).

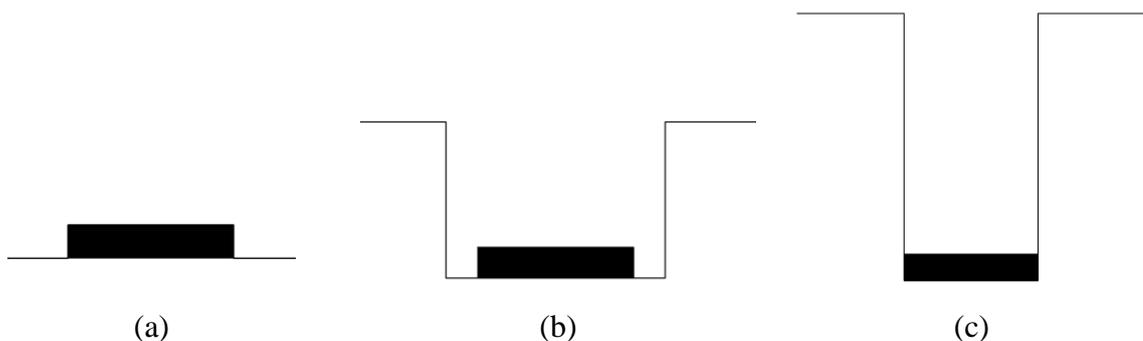
Em contrapartida, o ensaio é caracterizado pelo seu alto custo e longa duração. Segundo a NBR 6489 (ABNT, 2019), a carga máxima alcançada no ensaio deve ser mantida durante 12 horas, sendo necessário no mínimo um dia inteiro para sua realização. Aliado a isso, Falcão (2014) apresenta que cada prova de carga custou em média R\$6200,00, em valores a época da realização da pesquisa, ressaltando a limitação do ensaio quando avaliado o custo.

3.2 CLASSIFICAÇÃO

Velloso e Lopes (2010) classificam o ensaio de três formas: quanto à localização, ao tipo de placa e ao modo de carregamento.

Quanto à localização, classifica-se o ensaio de acordo com a posição da placa, podendo ser na superfície (Figura 4.a), em cavas (Figura 4.b) e em furos (Figura 4.c).

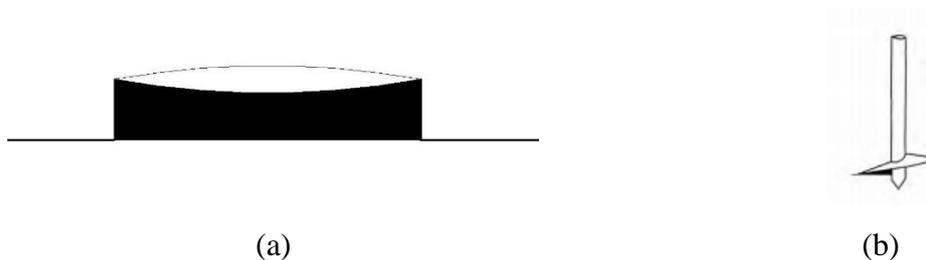
Figura 4 - Classificação das provas de carga quanto à localização. (a) Na superfície, (b) Em cavas e (c) Em furos



Fonte: Adaptado de Velloso e Lopes (2010)

Em relação ao tipo de placa, classifica-se em placa convencional (Figura 5.a) e placa parafuso (Figura 5.b).

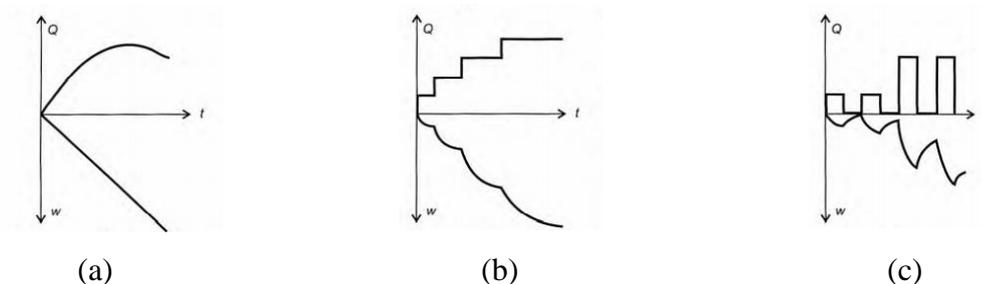
Figura 5 - Classificação do ensaio de prova de carga quanto ao tipo de placa. (a) Convencional e (b) Parafuso



Fonte: Adaptado de Velloso e Lopes (2010)

Por fim, em relação ao modo de carregamento, tem-se as cargas controladas (Figura 6.a) e as deformações controladas, sendo estas divididas entre carga incremental mantida (Figura 6.b), em que se mantém o carregamento até a estabilização dos recalques ou até um tempo preestabelecido, e carga cíclica (Figura 6.c), utilizada somente em situações excepcionais quando o projetista prevê um certo padrão de carregamento para o ensaio.

Figura 6 - Classificação do ensaio de prova de carga quanto ao modo de carregamento. (a) Carga controlada, (b) Carga incremental mantida e (c) Carga cíclica



Fonte: Velloso e Lopes (2010)

3.3 EQUIPAMENTOS

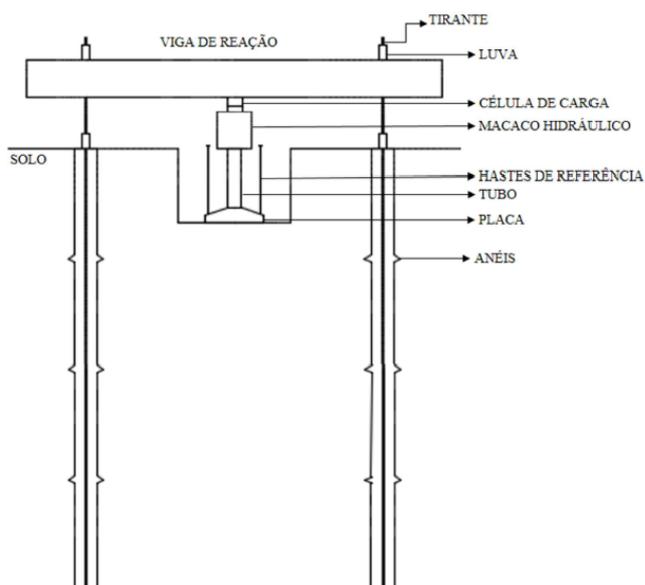
Segundo a NBR 6489 (ABNT, 2019), o ensaio consiste na instalação de uma placa rígida com área não inferior à 0,5 m², sendo usual a utilização de uma placa redonda de 0,8 m associada a três sistemas: reação, transmissão e leitura (Figura 7).

O sistema de reação garante ao sistema de transmissão uma reação que seja capaz de contrapor as cargas solicitadas pelo macaco hidráulico. Esse sistema pode ser constituído ou por uma cargueira, tais como uma caixa de areia ou caminhões, ou por elementos ancorados, isto é, estacas unidas por uma viga de reação.

O sistema de transmissão tem função de solicitar a placa, sendo constituído por uma célula de carga, um macaco hidráulico, um tubo transferidor de carga e a placa.

Por fim, o sistema de leitura é responsável pela aferição dos valores de recalque, sendo constituído por extensômetros fixados em uma viga de referência, que impede as perturbações dos outros sistemas e do solo ao redor da placa.

Figura 7 – Esquema de montagem dos sistemas de uma prova de carga sobre placa



Fonte: Falcão (2014)

3.4 PROCEDIMENTO DE EXECUÇÃO

Segundo a NBR 6489 (ABNT, 2019), alguns cuidados devem ser tomados previamente à execução dos ensaios, sendo estes:

- A placa para aplicação das cargas deve ser assentada no mesmo nível da base da sapata e nivelada sobre solo em estado natural ou ocupando a área total do fundo de um poço;
- O dispositivo de transmissão de carga deve aplicar o carregamento verticalmente e no centro da placa. Aconselha-se o uso de macaco hidráulico munido de bomba e manômetro reagindo contra uma carga de reação;
- A medição dos recalques deve ser feita por extensômetros sensível a 0,01 mm colocados em dois pontos diametralmente opostos da placa;
- O terreno deve ser aplainado e deve-se evitar alterações no grau de umidade natural e amolgamento do solo e evitar aplicação de cargas dentro de uma faixa de largura pelo menos igual ao diâmetro ou lado da placa;

- Evitar trepidações na execução do ensaio.

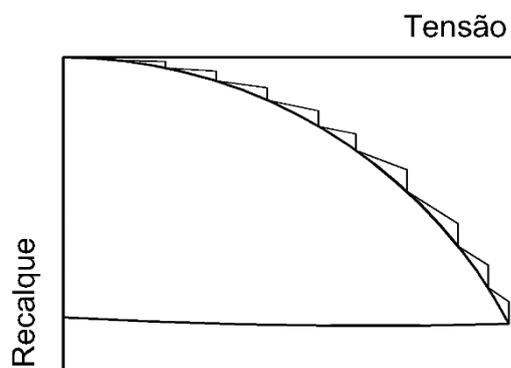
Em relação ao procedimento de execução, a NBR 6489 (ABNT, 2019) diz que:

- O terreno deve ser aplainado e deve-se evitar alterações no grau de umidade natural e amolgamento do solo e evitar aplicação de cargas dentro de uma faixa de largura pelo menos igual ao diâmetro ou lado da placa;
- Evitar trepidações na execução do ensaio;
- A placa deve ser carregada em estágios sucessivos de no máximo 20% da taxa admissível provável do solo;
- A leitura dos recalques é realizada no início e a cada intervalo de tempo que é sucessivamente dobrado (1, 2, 4, 8, 16,...). Um novo acréscimo de carga só é aplicado após a estabilização dos recalques com uma tolerância máxima de 5% do recalque entre leituras sucessivas;
- O ensaio só deve ser finalizado após se observar um recalque total de 25 mm ou até atingir-se o dobro da taxa admitida para o solo;
- Para o caso de não haver ruptura do solo, a carga máxima alcançada deve ser mantida durante 12h;
- A etapa de descarregamento deve ser feita em estágio sucessivos não superiores a 25% da carga total, seguindo o mesmo procedimento da fase de carregamento.

3.5 RESULTADOS E INTERPRETAÇÕES

O resultado consiste em uma curva tensão-recalque (Figura 8) que, como exposto na introdução do capítulo, possibilita diversas interpretações. Apesar disso, o enfoque do trabalho é a determinação da capacidade de carga do solo, sendo a principal interpretação para o ensaio.

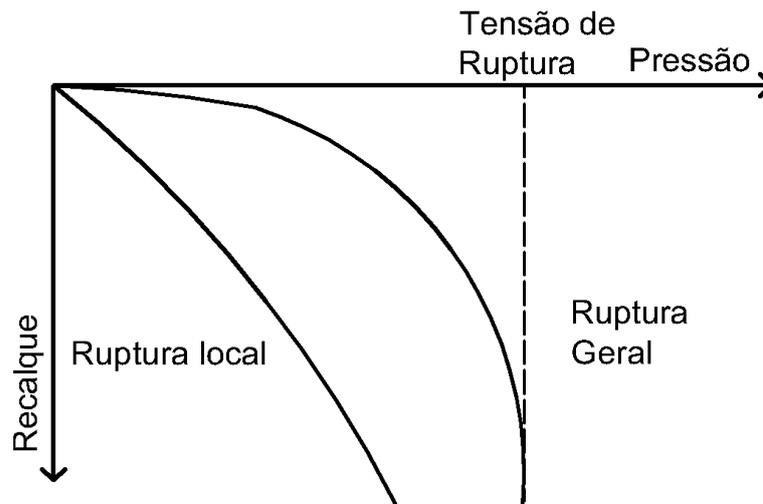
Figura 8 - Curva tensão-recalque



Fonte: Adaptado de Alonso (1983)

Como exposto no Capítulo 2, as curvas tensão-recalque apresentam diferentes configurações de acordo com o tipo de ruptura dos solos. Segundo Alonso (1983), os solos que apresentam ruptura geral são caracterizados por uma tensão de ruptura bem definida por uma curva vertical; já as de ruptura local apresentam um formato mais linear (Figura 9), tornando necessário a utilização de critérios de ruptura ou de extrapolações da curva para se obter essa tensão.

Figura 9 - Diferenças entre as curvas tensão-recalque de ruptura geral e local



Fonte: Adaptado de Alonso (1983)

3.5.1 Extrapolação da curva pelo Método de Van Der Veen

Utilizam-se os métodos de extrapolação das curvas quando não se alcança a carga de ruptura no ensaio de prova de carga, tornando necessário um ajuste à curva para que se possa obter a capacidade de carga de um maciço. Van der Veen (1953) propôs então uma curva exponencial (Equação 9) para prever essa ruptura.

$$Q = Q_{ult} \cdot (1 - e^{-\alpha\rho}) \quad (9)$$

Em que:

Q = Carga aplicada;

Q_{ult} = Carga de Ruptura;

α = Coeficiente que define a forma da curva;

ρ = Recalque correspondente a carga aplicada.

Aoki (1976) propõe a não obrigatoriedade em se passar pela origem do sistema de coordenadas, resultando na Equação 10.

$$Q = Q_{ult} \cdot (1 - e^{-\alpha\rho + \beta}) \quad (10)$$

Reorganizando a equação obtém-se a Equação 11.

$$\alpha \cdot \rho + \beta + \ln\left(1 - \frac{Q}{Q_{ult}}\right) = 0 \quad (11)$$

Caracteriza-se o método pela definição de uma carga de ruptura que apresenta o melhor valor de regressão linear entre os pares de valores $[\rho; \ln\left(1 - \frac{Q}{Q_{ult}}\right)]$. Define-se inicialmente um valor para a carga de ruptura, geralmente expressa como a carga máxima atingida pelo ensaio acrescido de 1 kN/m² para cada iteração do método. Traçam-se um conjunto de retas compostas pelos pares ordenados de $[\rho; \ln\left(1 - \frac{Q}{Q_{ult}}\right)]$, expressando para cada o valor do coeficiente angular e linear e do coeficiente R². Por fim, adota-se a reta de melhor regressão (coeficiente R² mais próximo de 1), obtendo-se os valores de α e β , respectivamente, pelo coeficiente angular e linear desta reta (ALMEIDA NETO, 2002).

3.5.2 Tensão Admissível

Existem diversos critérios para a determinação da capacidade de carga pelos ensaios de prova de carga. Falcão (2014) e Barreto (2015) utilizaram em seus trabalhos cinco desses critérios, sendo eles expostos nesse subcapítulo.

Utiliza-se o primeiro critério quando se obtém uma ruptura nítida nas curvas tensão-recalque, empregando-se a equação convencional da tensão admissível com um fator de segurança de 2, como exposto pela NBR 6122 (ABNT, 2019).

Os autores tomaram como segundo critério o de recalque admissível que não se encontra presente na norma vigente. O critério propõe que a tensão admissível seja representada pela tensão que provoca o recalque máximo ($\sigma_{\rho máx}$) dividida por um coeficiente de segurança de 1,5, como exposto pela Equação 12.

$$\sigma_a \leq \frac{\sigma_{\rho máx}}{1,5} \quad (12)$$

Cintra, Aoki e Albiero (2011) propõem três critérios - Boston, Terzaghi-Peck e Terzaghi, a serem utilizados quando não se evidencia uma ruptura nítida em solos arenosos.

O critério de Boston diz que a tensão admissível é o menor dos valores entre a metade da tensão que corresponde um recalque de 25 mm (σ_{25}) e a tensão que corresponde um recalque de 10mm (σ_{10}), como exposto na Equação 13.

$$\sigma_a \leq \begin{cases} \frac{\sigma_{25}}{2} \\ \sigma_{10} \end{cases} \quad (13)$$

O critério de Terzaghi-Peck considera como tensão admissível a que gera um valor de recalque de 25 mm na maior sapata da obra. Visto que o critério exige diversas adaptações para utilização em uma prova de carga sobre placa nos padrões brasileiros, optou-se pela não utilização desse critério no presente trabalho.

Por fim, o critério de Terzaghi considera a tensão de ruptura como o ponto a partir do qual a curva tensão-recalque se torna retilínea, sendo a tensão admissível obtida da mesma maneira que o primeiro critério.

4 METODOLOGIA

Neste capítulo, descreve-se a metodologia utilizada na realização das simulações e nos estudos analíticos necessários para o desenvolvimento do trabalho.

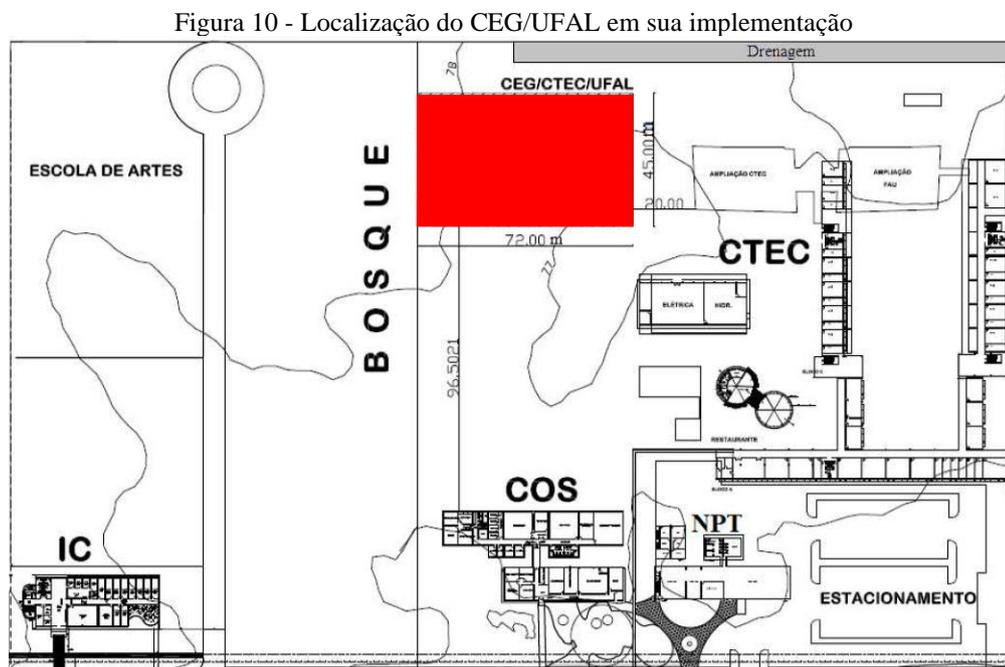
4.1 ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo desta pesquisa consiste no Campo Experimental de Geotecnia da Universidade Federal de Alagoas (CEG/UFAL).

O CEG/UFAL está inserido na Universidade Federal de Alagoas, localizada na parte alta da cidade de Maceió, no bairro Cidade Universitária, disposto sobre a Formação Geológica Barreiras. Sua implementação se deu a partir de estudos realizados por Morais (2011), que observou a necessidade de ampliação do conhecimento geotécnico sobre solos de subsuperfícies da região metropolitana de Maceió.

Segundo Morais (2011), a área selecionada está inserida nas imediações do Centro de Tecnologia (CTEC), e possui uma área de 3.240 m² (72 x 45 metros), com a superfície do terreno compreendida entre as cotas de 77 a 78 metros, podendo então ser considerada uma área plana.

A Figura 10 apresenta a planta de situação do CEG/UFAL.



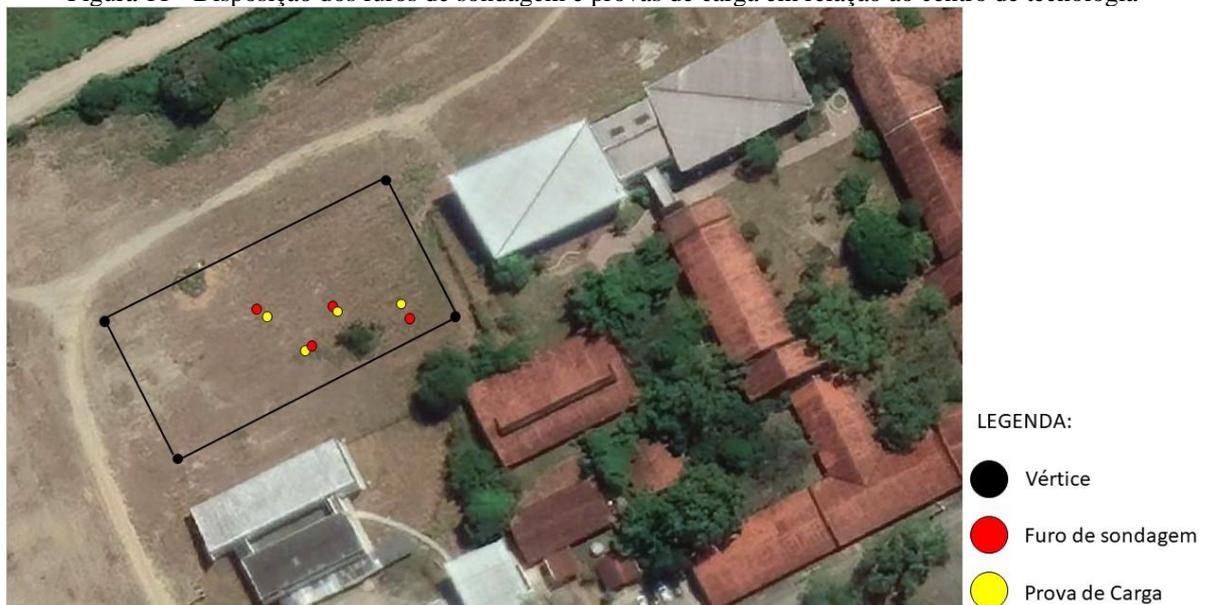
Fonte: Morais (2011)

4.2 DADOS UTILIZADOS

4.2.1 Sondagem de Simples Reconhecimento

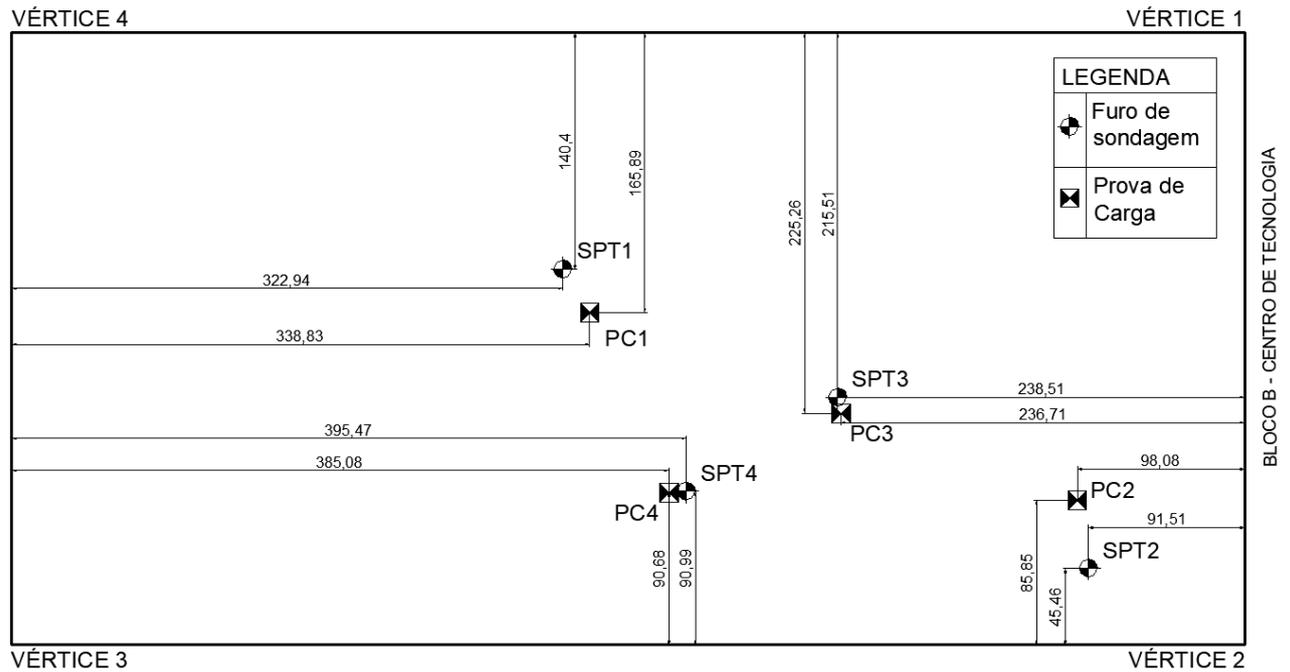
Morais (2011), Menezes (2014) e Barreto (2015) realizaram cinco sondagens de simples reconhecimento regidos pela NBR 6484 (ABNT, 2001). Nas Figura 11 e 12 apresenta-se a disposição dos furos de sondagem (SPT) e das provas de cargas (PC) realizadas no CEG/UFAL e que foram utilizados no presente trabalho. No Anexo A, encontra-se a localização geográfica de todos os ensaios realizados no CEG/UFAL.

Figura 11 - Disposição dos furos de sondagem e provas de carga em relação ao centro de tecnologia



Fonte: Arquivos Pessoais

Figura 12 - Disposição dos furos de sondagem e dos ensaios de prova de carga no CEG/UFAL



Fonte: Arquivos Pessoais

Para o referente trabalho, utilizou-se os perfis de sondagem dos ensaios de prova de carga de Falcão (2014) e Barreto (2015), ou seja, os furos SPT – 1, SPT – 2, SPT – 3 e SPT – 4, que podem ser observados nas Figura 13 e Figura 14.

Figura 13 - Interpretação dos ensaios SPT - 1 e SPT - 2

SP-01	N.T.	SP-02
6		6
7	ARGILA areno-siltosa, com pouca matéria orgânica, consistência média, marrom	ARGILA silte arenosa com pouca Ocorrência de pedaço de raiz, cores, Cinza escura e avermelhada, consistência Média a mole
6		17
7	ARGILA areno-siltosa, consistência média, marrom claro	5
7		10
8	ARGILA areno-siltosa, consistência média, marrom claro	12
10		16
13	ARGILA areno-siltosa com concreções, consistência Rija, avermelhada	27/29
14		21
17	ARGILA arenosa, pouco siltosa, consistência rija, Amarela e cinza	20
18	ARGILA arenosa, pouco siltosa, consistência rija, Amarelada	26

Fonte: Moraes (2011) e Menezes (2014)

Figura 14 - Interpretação dos ensaios SPT - 3 e SPT - 4

SPT - 4		NT	SPT - 3	
6	ARGILA silte arenosa, cor cinza escura, consistência média		ARGILA silte arenosa, cores cinza escura e variegada, consistência mole a média	4
4				8
5				7
5	ARGILA siltosa com pouca areia, cores amarela, creme e cinza clara, consistência mole a média		ARGILA siltosa com areia, cores amarela e creme, consistência média.	6
4				8
9				13
17	ARGILA silte arenosa, cor cinza clara, consistência rija.			16
22	ARGILA arenosa com silte e pouca ocorrência de pedregulho (seixo), cor variegada, consistência dura		ARGILA silte arenosa, cor variegada, consistência rija a dura.	17
30/25	ARGILA siltosa com pouca areia, cor cinza clara, consistência dura.			25
20				20
18	ARGILA arenosa com silte, cor variegada, consistência rija a dura.		ARGILA arenosa com silte e pouca ocorrência de pedregulho (seixo), cor variegada, consistência dura.	24

Fonte: Barreto (2015)

4.2.2 Provas de Carga

Analisou-se os resultados dos ensaios de prova de carga sobre placa obtidos por Falcão (2014) e Barreto (2015), sendo eles prova de carga 1 e 2 (PC – 1 e PC – 2) - realizadas por Falcão - e as provas 3 e 4 (PC – 3 e PC – 4) - realizadas por Barreto.

Segundo Falcão (2014), aplicou-se na Prova de Carga 1 quatro estágios de carga, chegando a uma tensão máximo de 280 kPa. Já na Prova de Carga 2, aplicou-se nove estágios, alcançando 900 kPa.

Segundo Barreto (2015), aplicou-se na Prova de Carga 3 três estágios de carga, atingindo o valor máximo de 300 kPa. Já a Prova de Carga 4 apresentou um comportamento similar à prova de carga anterior, atingindo também uma carga máxima de 300 kPa.

Levou-se ambos os ensaios até as cargas máximas possíveis, alcançando recalques na ordem de 100 mm. Além disso, mantiveram-se nos quatro casos as cargas máximas alcançadas durante o período de 12 horas para a realização do descarregamento.

4.3 SOFTWARE PLAXIS 2D

O *software* Plaxis 2D faz parte de um conjunto de *softwares* desenvolvidos pela Bentley Systems visando solucionar problemas de deformação e estabilidade da engenharia geotécnica, utilizando o método dos elementos finitos em análises bidimensionais.

Atualmente, o programa é dividido em quatro rotinas, que possibilitam desde a idealização do problema com as condições iniciais de geometria e carregamento até geração automática da malha de elementos finitos, possibilitando a integração entre o problema real com o modelo numérico de uma forma bastante rápida e prática.

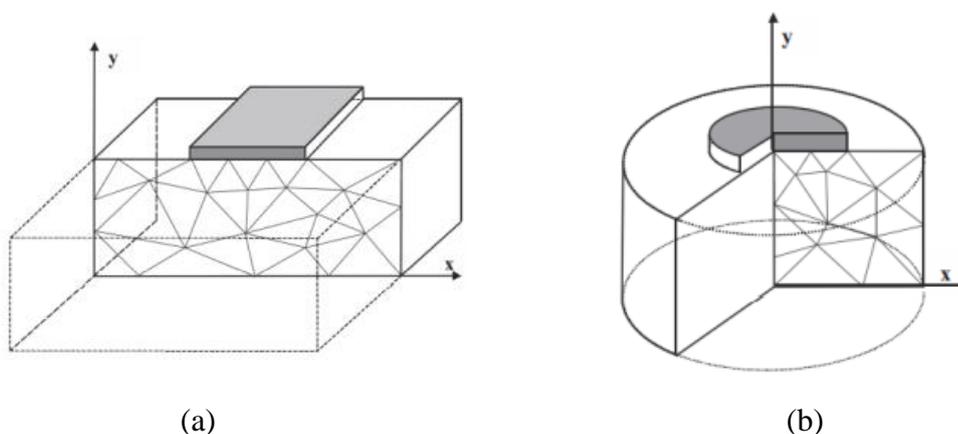
Sendo assim, este capítulo almeja explicar todo o processo de utilização do *software* na análise da capacidade de carga dos solos, abordando as temáticas necessárias para o seu entendimento e conseqüentemente servindo como subsídio para os projetos futuros.

4.3.1 Modelos numéricos

A utilização do Plaxis 2D é limitada a análises bidimensionais de problemas, podendo dividir os elementos em dois tipos: axissimétricos e de deformação plana.

Caracteriza-se os modelos baseados na deformação plana (Figura 15.a) pela não apresentação de deformações fora de um plano, sendo representados pela seção transversal de um elemento infinitamente longo. Por outro lado, caracteriza-se os modelos axissimétricos (Figura 15.b) pela presença dos mesmos estados de tensão e deformação ao longo de um eixo de rotação, sendo representados pela revolução de uma seção transversal pelo eixo vertical (GUNNVARD, 2016).

Figura 15 - Modelos utilizados pelo plaxis. (a) Deformação Plana e (b) Axissimetria

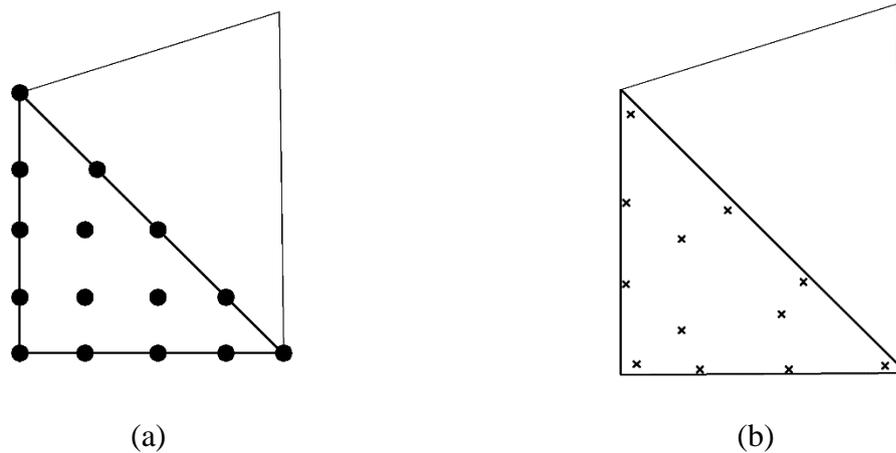


Fonte: Gunnvard (2016)

Em relação à forma dos elementos, o *software* se utiliza de malhas triangulares isoparamétricas, podendo ser tanto de 6 como de 15 nós.

Os triângulos de 15 nós (Figura 16) possibilitam o cálculo dos deslocamentos em quinze pontos diferentes e o cálculo das tensões em doze pontos, apresentando resultados mais precisos aos elementos de 6 nós. Em contrapartida, a sua utilização resulta em um maior custo computacional.

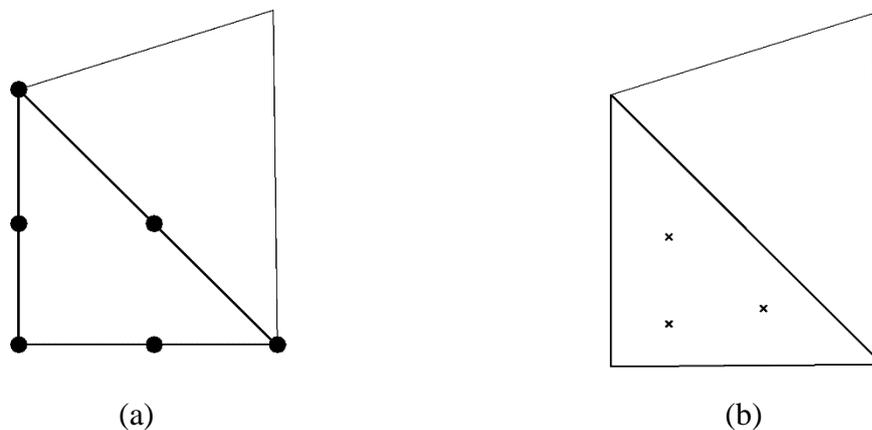
Figura 16 - Exemplo de elementos triangulares de 15 nós. (a) Pontos de deslocamentos e (b) Pontos de tensão



Fonte: Adaptado de Gunnvard (2016)

Já os triângulos de 6 nós (Figura 17) possibilitam o cálculo dos deslocamentos em seis pontos diferentes e das tensões em três pontos, resultando em menores gastos de recursos computacionais. Não se recomenda sua utilização para análise de falhas de estruturas nem para o cálculo da capacidade de carga, visto que, devido às simplificações, o método apresenta valores superestimados (GUNNVARD, 2016).

Figura 17 - Exemplo de elementos triangulares de 6 nós. (a) Pontos de deslocamentos e (b) Pontos de tensão

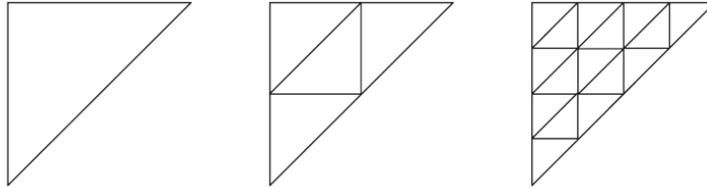


Fonte: Gunnvard (2016)

Em relação à geração das malhas, realiza-se o processo automaticamente, sendo necessário somente definir os locais que necessitem de um maior refinamento da malha. Esse processo é visualmente explicado pela Figura 18: quanto maior o refinamento, maior será a quantidade de subdivisões do elemento e, portanto, mais precisos serão os resultados. Em contrapartida, o aumento do número de triângulos ocasiona também em um acréscimo no tempo de

processamento, tornando necessário se atentar ao refinamento somente em locais críticos, tais como abaixo do ponto de aplicação do carregamento.

Figura 18 - Demonstração de um refinamento de um elemento triangular



Fonte: Fish e Belytschko (2007)

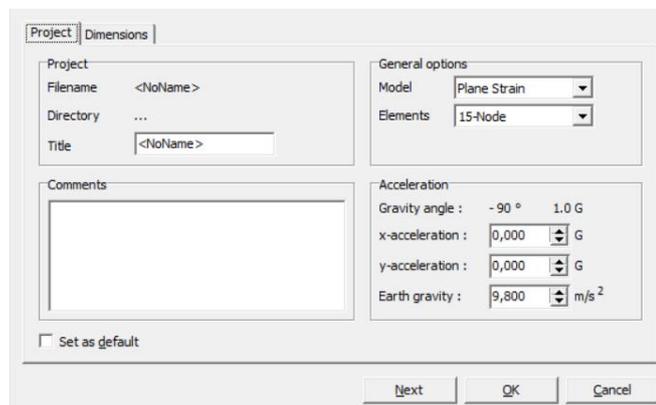
Constata-se que o *software* apresenta tamanhas limitações quanto todo o processo de geração e estruturação das malhas. Devido as poucas opções quanto a forma dos elementos disponíveis, os usuários ficam restritos à malhas que pouco se adaptam as especificidades dos problemas, ocasionando em aumentos desnecessários no custo computacional. Além disso, a impossibilidade de edição das malhas limita a sua estruturação, dificultando a execução de testes fundamentais para a avaliação da qualidade da simulação, tais como o teste de convergência.

4.3.2 Entrada de dados (*Input*)

A rotina de entrada de dados é responsável por toda as condições iniciais necessárias para a modelagem do problema, atribuindo geometria ao problema, as propriedades dos materiais utilizados, o modelo de comportamento do solo, as solicitações etc.

O primeiro passo consiste em atribuir ao projeto os parâmetros iniciais, compostos pelo nome, quantidade de nós dos elementos e modelo de análise tipo de análise como exposto na Figura 19.

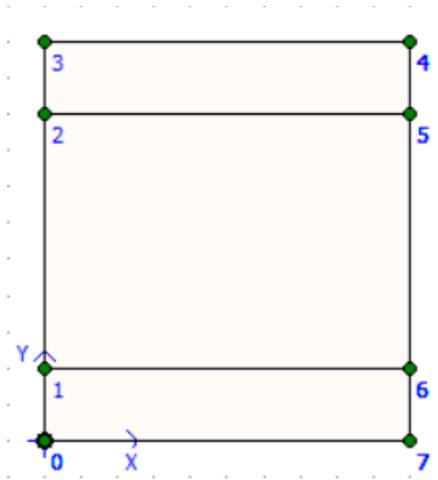
Figura 19 - Demonstração do elemento para atribuição dos parâmetros iniciais do Paxis 2D



Fonte: Arquivos pessoais

Após isso, inicia-se o processo de construção da geometria do problema. Para isso, utiliza-se a ferramenta *Geometry Line*, que permite desenhar as camadas do solo. Na Figura 20, observa-se um perfil de solo representado por 3 camadas.

Figura 20 - Exemplo de geometria de três camadas de solo utilizando a ferramenta *Geometry Line*



Fonte: Arquivos pessoais

Em seguida, realiza-se o processo de criação dos materiais, utilizando a ferramenta *materials*. Na aba *General* (Figura 21.a), informa-se a identificação do material, o modelo de comportamento (Mohr-Coulomb, Linear Elástico etc), o tipo de material (Drenado, não drenado, Poroso) e os valores dos pesos específicos naturais e saturados. Na aba *Parameters* (Figura 21.b), informa-se os valores do coeficiente de elasticidade, coeficiente de Poisson, coesão e ângulo de atrito interno do solo subsequente.

Figura 21 - Demonstração do elemento de criação de materiais. (a) Aba *general* e (b) aba *parameters*

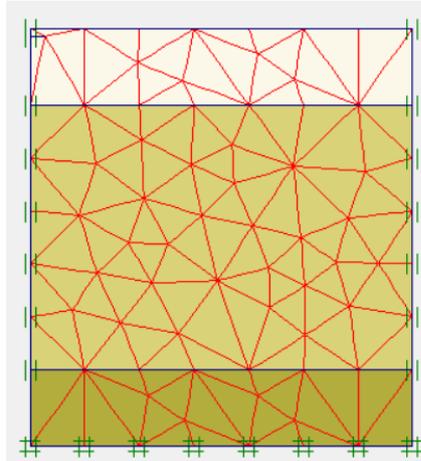
(a)

(b)

Fonte: Arquivos pessoais

O último passo da rotina consiste na geração da malha e das tensões geradas pela poropressão e pelo peso próprio. Realiza-se ambos os processos automaticamente, sendo a malha (Figura 22) gerada pelo comando *generate mesh*.

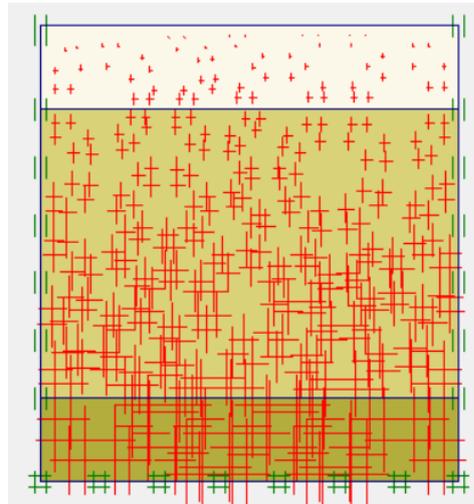
Figura 22 - Malha de elementos finitos geradas na geometria de três camadas



Fonte: Arquivos pessoais

Já para o processo de geração das tensões, é necessário utilizar o comando *inicial conditions* e os comandos *generate power pressure* e *generate initial stresses*, resultando na Figura 23.

Figura 23 - Geometria final resultante da aplicação da poropressão e das tensões iniciais



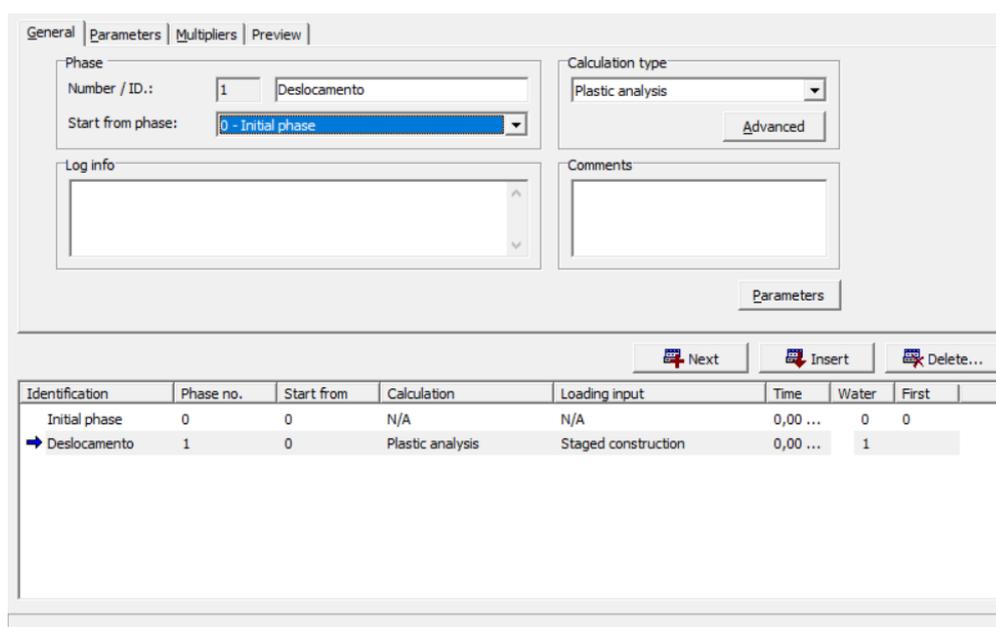
Fonte: Arquivos pessoais

Após todo esse processo, inicia-se a rotina de cálculos utilizando o comando *calculate*.

4.3.3 Cálculos (*Calculation*)

A rotina de cálculos (Figura 24) consiste na formulação do problema e na execução das simulações pelo Método dos Elementos Finitos. Essas podem ser de quatro tipos: Análise Plástica (*Plastic*), de Adensamento (*Consolidation*), Redução de Parâmetros de Resistência (*Phi/c Reduction*) e Análise Dinâmica (*Dynamic Analysis*).

Figura 24 - Apresentação da rotina de cálculos

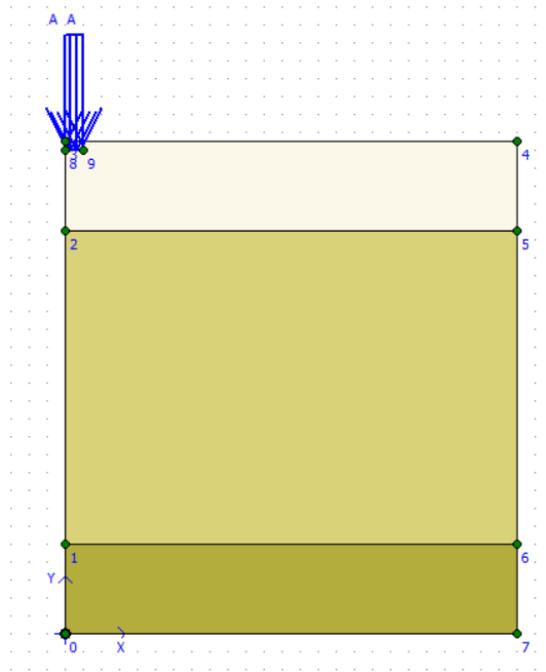


Fonte: Arquivos pessoais

Primeiramente, define-se o tipo de análise na aba *general*. Para a análise de tensão-recalque do solo, utiliza a análise plástica, procedendo-se de duas formas: ou com o comando *prescribed load* ou o comando *prescribed displacement*.

Para utilizar o comando *prescribed load*, deve-se definir uma tensão máxima que será alcançado por meio de estágios crescentes de tensão, calculando-se os valores de recalque para cada um desses incrementos. Já com o comando *prescribed displacement*, ocorre o processo inverso: define-se um valor de recalque máximo que será alcançado por meio de estágio crescentes de deslocamento e anota-se os valores da tensão para cada um desses incrementos.

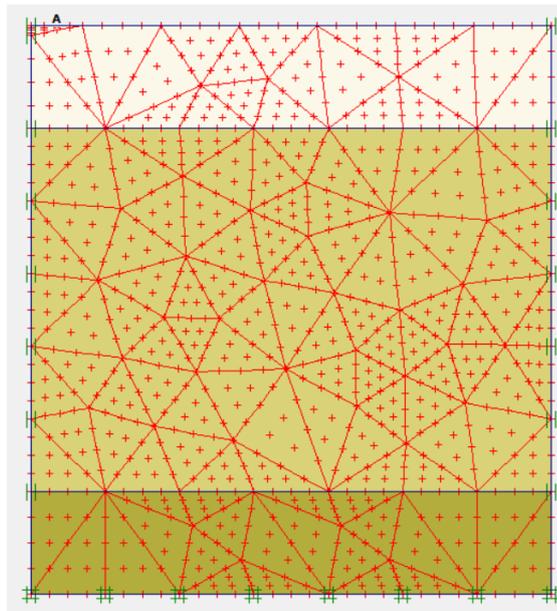
Apesar de os dois processos resultarem em uma curva tensão-recalque, os resultados não se apresentam iguais, tornando necessário padronizar as simulações para somente um desses métodos. Sendo assim, definiu-se a utilização do método *prescribed load* por se assemelhar mais com o ensaio de prova de carga sobre placa, resultando no modelo final da simulação como exposto na Figura 25.

Figura 25 - Aplicação do comando *prescribed load* na geometria do problema

Fonte: Arquivos pessoais

Após isso, realiza-se o procedimento de refinamento da malha, que consiste em escolher os pontos de maior interesse para o estudo. No caso do projeto, esse se apresenta logo abaixo do ponto de aplicação do carregamento, o ponto A da Figura 26.

Figura 26 - Resultado do processo de refinamento da malha de elementos finitos



Fonte: Arquivos pessoais

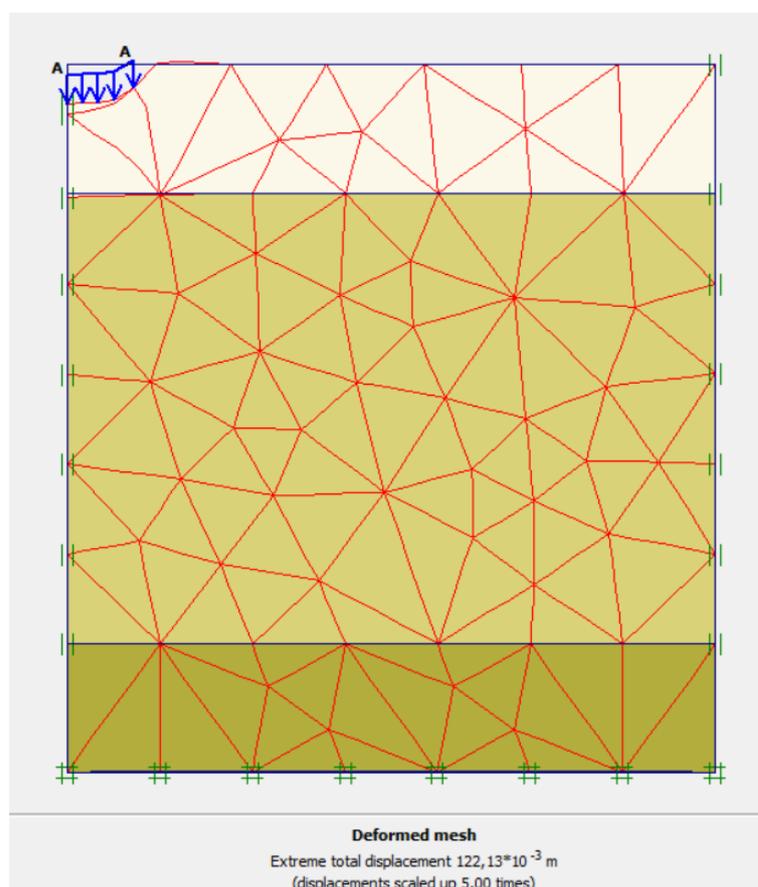
Por fim, inicia-se o processo de cálculo pela utilização do comando *calculate...*, que resultará na rotina de saída de dados (*output*).

4.3.4 Saída de dados (*Output*)

A rotina consiste na disponibilização do resultado gerado pela simulação. É possível observar os deslocamentos, deformações e tensões nos pontos, apresentados tanto visualmente, por meio da malha gerada, como pelos gráficos e tabelas.

Como observa-se na Figura 27, a rotina apresenta a deformação causada no modelo pela atuação do carregamento, demonstrando visualmente o estado final da geometria. Além disso, é possível observar abaixo da estrutura o valor do deslocamento máximo atingido na simulação.

Figura 27 - Apresentação visual dos deslocamentos no solo modelado



Fonte: Arquivos pessoais

Apesar da grande quantidade de informações obtidas da rotina, é de maior interesse para o estudo a utilização da rotina de curvas (*curves*), visto que esta apresenta a curva de tensão-recalque em formato semelhante aos ensaios de prova de carga. Sendo assim, utiliza-se o comando *go to curves* para iniciar o processo final da simulação.

4.3.5 Curvas (*Curves*)

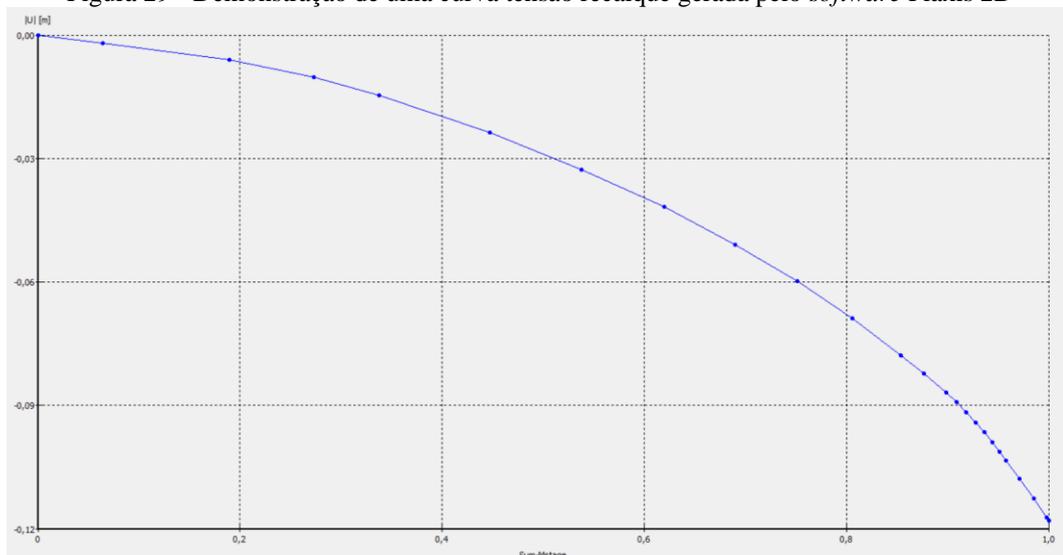
A última rotina permite a criação de curvas do tipo tensão-recalque, carga-deslocamento, tempo-deslocamento etc (Figura 28).

Figura 28 - Apresentação da rotina de curvas

Fonte: Arquivos pessoais

A utilização da rotina de curvas apresenta alguns problemas na análise dos dados. Primeiramente, percebe-se que os valores de tensão são apresentados em formato percentual do valor final (Figura 29), que, aliados à impossibilidade de se manipular os dados diretamente no programa, exigem que se utilize outros *softwares* para a apresentação dos resultados. Apesar disso, a rotina apresenta o comando *tables*, que possibilita a obtenção dos pares de tensão-recalque para manipulação em outros *softwares*. No caso do presente trabalho, definiu-se a utilização do Microsoft Excel.

Figura 29 - Demonstração de uma curva tensão recalque gerada pelo *software* Plaxis 2D



Fonte: Arquivos pessoais

4.3.6 Simulações no Plaxis 2D

Realizam-se quatro simulações de análise plástica utilizando elementos triangulares de 15 nós isoparamétricos com modelos axissimétricos. Reafirma-se que a utilização dos elementos triangulares de 15 nós tornou-se necessária devido as limitações do programa quanto aos tipos de elementos e refinamento das malhas, não havendo uma justificativa plausível para a utilização desses elementos nos problemas propostos.

Para cada simulação, modelou-se um perfil de solo considerando o modelo de Mohr-Coulomb com as mesmas espessuras e materiais obtidos pelos ensaios SPT realizados por Morais (2011), Menezes (2014), Falcão (2015) e Barreto (2015), sendo para simulação 1 utilizado o perfil SPT – 1, simulação 2 o perfil SPT – 2 e assim sucessivamente.

Em relação aos valores de coesão, ângulo de atrito, peso específico, coeficiente de Poisson e módulo de elasticidade utilizados como dados de entrada, realizou-se estimativas de acordo com a literatura.

Para a estimativa da coesão, ângulo de atrito e peso específico, Marques *et. al.* (2015) apresentam a Tabela 6 como uma opção para estimar os valores de coesão, ângulo de atrito e peso específico em relação ao índice N_{SPT} para diferentes tipos de solo. Velloso e Lopes (2010) atentam também à necessidade de se realizar uma redução de 2/3 nos parâmetros de resistência dos solos secundários, ou que apresentam ruptura localizada ou por puncionamento, para que seja feita uma aproximação mais fidedigna da realidade.

Tabela 6 - Estimativa da coesão, ângulo de atrito e peso específico pela correlação com o índice N_{spt}

Solos	N_{SPT}	Peso específico (tf/m³)	Coesão c (tf/m²)
Argila e silte argiloso			
Muito mole	≤ 2	-	$< 1,25$
Mole	3 a 5	1,5	1,25 – 2,5
Média (o)	6 a 10	1,6	2,5 – 5,0
Rija (o)	11 a 19	1,6	5,0 a 10,0
Dura (o)	> 19	1,7	> 10
Areia e Silte Arenoso			Ângulo de Atrito (φ)
Fofa (o)	≤ 4	$< 1,5$	$< 26^\circ$
Pouco Compacta (o)	5 a 8	1,5	$28^\circ - 32^\circ$
Medianamente Compacta (o)	9 a 18	1,6	$32^\circ - 36^\circ$
Compacta (o)	19 a 40	1,7	$36^\circ - 40^\circ$
Muito compacta (o)	> 40	1,8	$> 40^\circ$

Fonte: Marques *et. al.* (2015)

Para a estimativa do Módulo de Elasticidade do solo (E_s), Teixeira e Godoy (1996 *apud* CINTRA; AOKI; ALBIERO, 2011) apresentam a Equação 14.

$$E_s = a * K * N_{spt} \quad (14)$$

Onde, a e K são coeficientes empíricos dados pela Tabela 7 e pela Tabela 8, respectivamente, em função do tipo de solo.

Tabela 7 - Coeficiente a

Solo	a
Areia	3
Silte	5
Argila	7

Fonte: Cintra, Aoki e Albiero (2011)

Tabela 8 - Coeficiente K

Solo	K (MPa)
Areia com pedregulho	1,10
Areia	0,90
Areia siltosa	0,70
Areia argilosa	0,55
Silte arenoso	0,45
Silte	0,35
Argila arenosa	0,30
Silte argiloso	0,25
Argila siltosa	0,20

Fonte: Cintra, Aoki e Albiero (2011)

Por fim, para a estimativa do Coeficiente de Poisson (ν) Teixeira e Godoy (1996 *apud* CINTRA; AOKI; ALBIERO, 2011) apresentam a Tabela 9 com valores típicos para o coeficiente de acordo com o tipo de solo.

Tabela 9 - Coeficiente de Poisson

Solo	ν
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

Fonte: Cintra, Aoki e Albiero (2011)

Por fim, calculou-se os valores da capacidade de carga e tensão admissíveis seguindo os critérios expostos no Capítulo 3.

4.4 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Comparou-se os resultados da capacidade de carga e tensão admissível obtidos das simulações pelo *software* Plaxis 2D com os resultados dos ensaios de prova de carga, métodos teóricos e métodos semiempíricos obtidos por Falcão (2014) e Barreto (2015).

Primeiramente, comparou-se o valor da tensão admissível obtido pela utilização do método de Van der Veen modificado por Aoki nas curvas simulação pelo Plaxis 2D, comparando-o com os valores encontrados por Falcão (2014) e Barreto (2015) para os métodos teóricos e semiempíricos.

Em seguida, calculou-se a diferença percentual entre os valores de tensão e recalque admissíveis obtidos pela utilização do método de Van der Veen modificado por Aoki, e dos critérios de recalque máximo, Boston e Terzaghi, das curvas simuladas pelo *software* com as curvas obtidas experimentalmente pelos ensaios de prova de carga realizados por Falcão (2014) e Barreto (2015).

Por fim, comparou-se o comportamento geral das curvas tensão-recalque simuladas com os das curvas obtidas experimentalmente, de modo a analisar a diferença percentual entre os pares de pontos tensão-recalque e, conseqüentemente, atestar a viabilidade de utilização do Plaxis 2D na previsão com comportamento tensão-recalque do solo do CEG/UFAL.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 SIMULAÇÃO 1

Definiu-se a utilização do furo de sondagem SPT-1 (Figura 12) para a previsão dos parâmetros de entrada e a prova de carga PC-1 para o estudo comparativo do comportamento tensão-recalque.

O modelo geométrico da simulação 1 é composto por seis camadas, resultando em um perfil de 11m. Calculou-se para cada camada o N_{spt} médio para utilização nos equacionamentos propostos no Capítulo 5. Na Tabela 10 apresenta-se um resumo de todos os parâmetros utilizados.

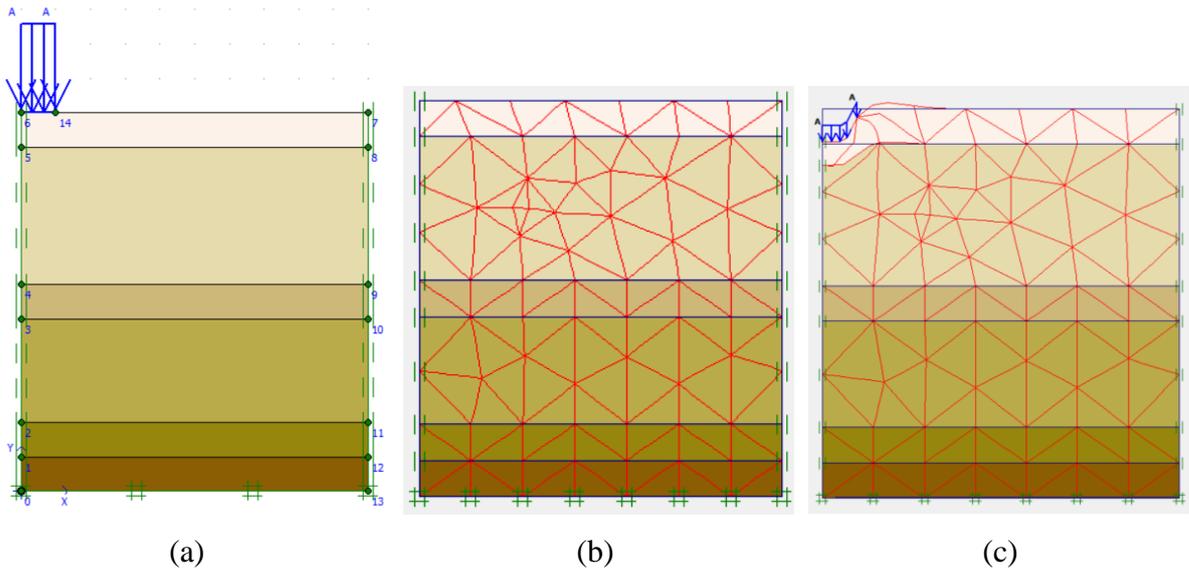
Tabela 10 - Apresentação dos parâmetros de entrada estimados para a simulação 1, onde N_{spt} é o índice SPT, γ o peso específico natural, c a coesão, φ o ângulo de atrito, E_s o módulo de elasticidade do solo e ν o coeficiente de Poisson

Camada	Espessura – h (m)	N_{spt}	γ (kN/m ³)	c (kN/m ²)	φ (°)	E_s (kN/m ²)	ν
1	1	6,5	16	16,7	18,67	13650	0,1
2	4	7	16	16,7	18,67	14700	0,1
3	1	9	16	33,3	21,33	18900	0,1
4	3	13,5	16	50	22,67	28350	0,1
5	1	17,5	16	100	24	36750	0,1
6	1	18	16	100	24	37800	0,1

Fonte: Arquivos pessoais

Seguiu-se para a realização da análise de tensão-recalque o método de análise plástica, utilizando o comando *prescribed load*, definindo-se a carga máxima como a atingida pelo último estágio da prova de carga 1; no caso 280 kPa. Observa-se na Figura 30 uma comparação entre a geometria original modelada, a malha de elementos finitos gerada e o estado de deformação final após o carregamento.

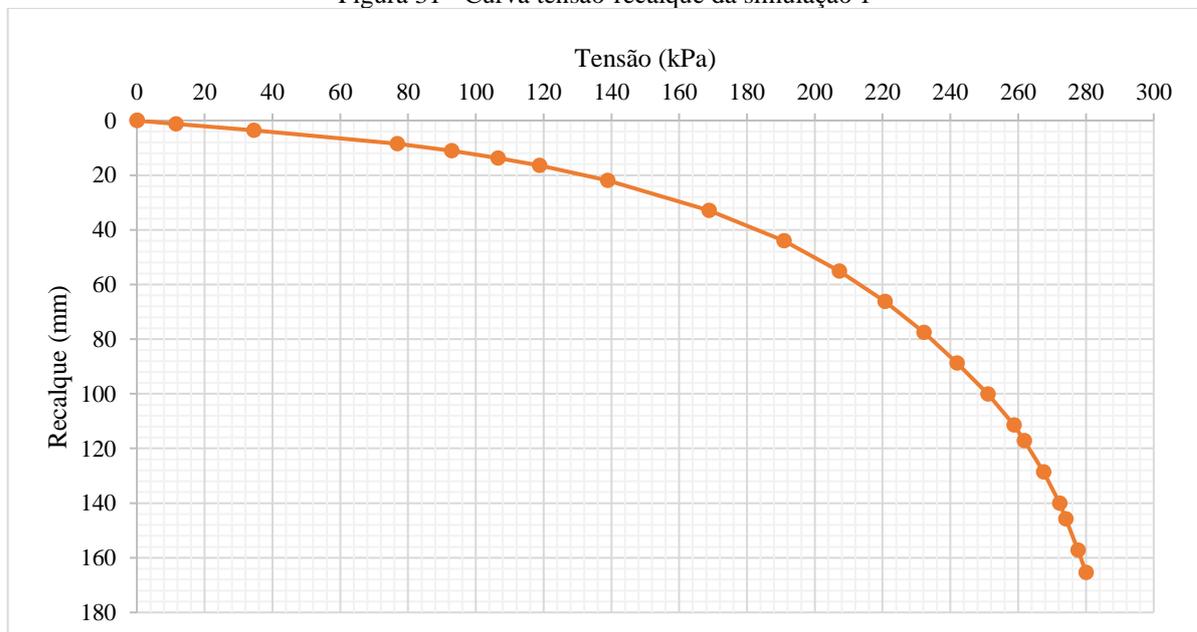
Figura 30 - (a) Modelo geométrico final, (b) Malha gerada do modelo geométrico e (c) Estado de deformação final do modelo geométrico



Fonte: Arquivos pessoais

Apresenta-se como primeiro resultado da simulação a curva tensão-recalque representada pela Figura 31, caracterizada pelo alcance de tensões próximas a 280 kPa, caracterizada como ponto de recalque máximo, apresentando valores na ordem de 160 mm.

Figura 31 - Curva tensão-recalque da simulação 1

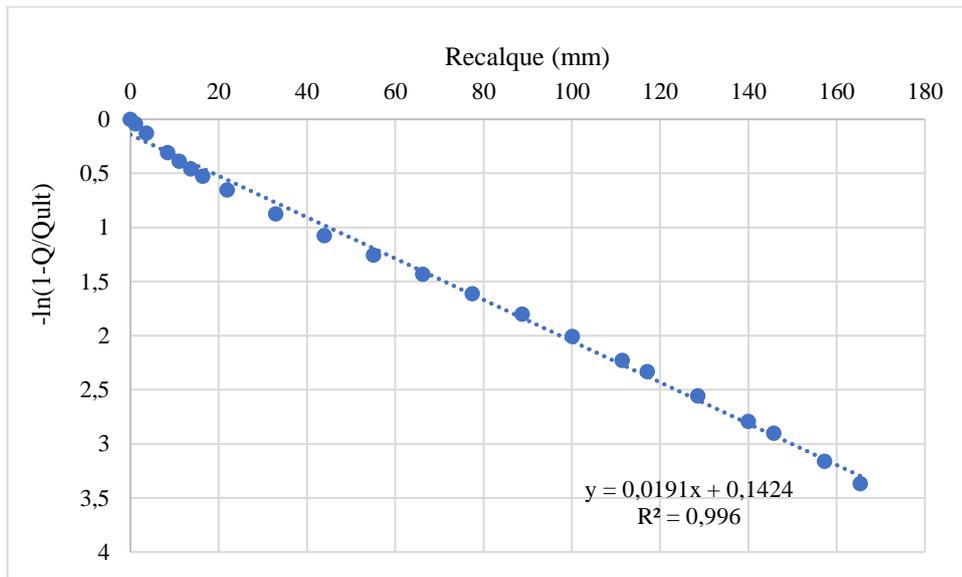


Fonte: Arquivos pessoais

5.1.1 Extrapolação pelo método de Van der Veen modificado por Aoki

A curva tensão-recalque obtida pela simulação 1 (Figura 31) não apresentou uma assíntota vertical evidente, tornando necessária a utilização de um método de extrapolação de curvas. Apresenta-se na Figura 32 a curva obtida pela última iteração do método de Van der Veen modificado por Aoki.

Figura 32 - Curva obtida pela última iteração do método de Van der Veen pela simulação 1

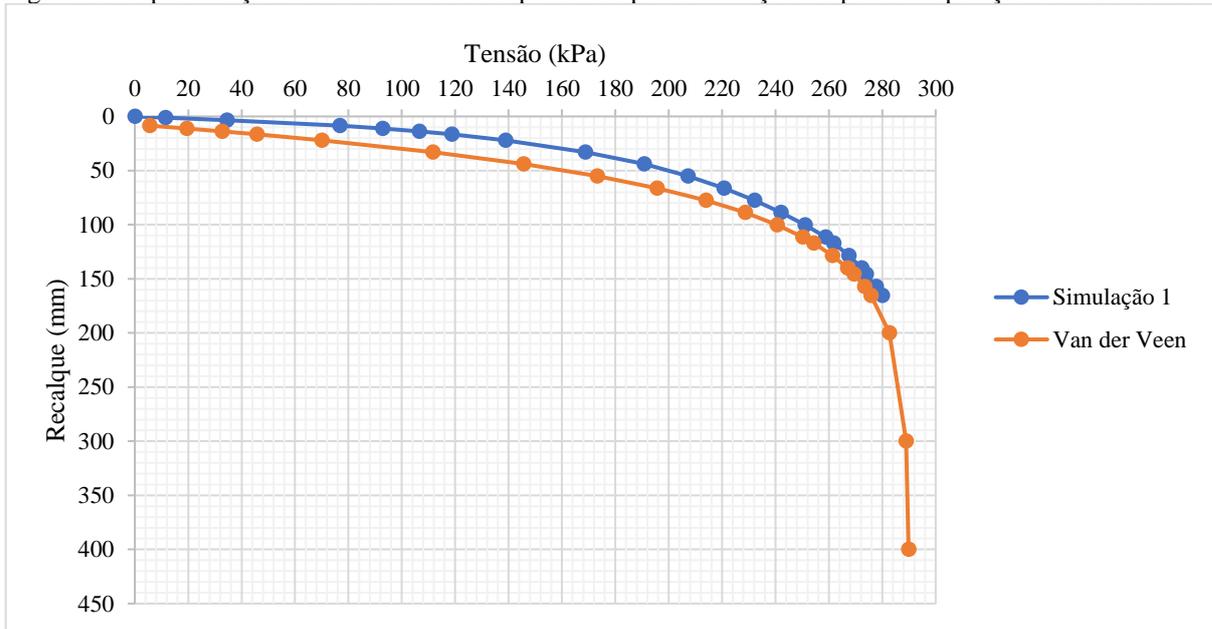


Fonte: Arquivos pessoais

Observa-se que a última iteração resultou em um coeficiente R^2 de 0,996, caracterizado por uma tensão de ruptura de 290 kPa, $\alpha = 0,0191$ e $\beta = 0,1424$. Aplicando-se esses valores na Equação 10 proposta por Van der Veen modificado por Aoki, obteve-se a curva exponencial de equação $Q = 290 \cdot (1 - e^{-0,0191\rho+0,1424})$.

Na Figura 33, apresentam-se a curva da Simulação 1 e a curva extrapolada.

Figura 33 - Apresentação da curva tensão-recalque obtida pela Simulação 1 e pela extrapolação de Van der Veen



Fonte: Arquivos pessoais

Ambas as curvas apresentaram configurações bastante semelhantes em relação aos comportamentos tensão-recalque, sendo a grande diferença a formação nítida de uma assíntota vertical por parte da curva extrapolada, que caracteriza a tensão de ruptura de 290 kPa.

5.1.2 Tensões e recalques admissíveis

Determinaram-se os valores da tensão admissível pelo método de Van der Veen e por mais três critérios utilizados por Falcão (2014): recalque máximo, critério de Boston e critério de Terzaghi. Para cada valor, obtiveram-se os recalques admissíveis expostos pelo recalque que causa tal tensão.

Para os métodos teóricos e semiempíricos, utilizaram-se os valores já obtidos por Falcão (2014) visto que os resultados não são influenciados pela simulação.

Na Tabela 11 apresenta-se os valores da tensão e recalque admissíveis e das capacidades de carga obtidos pela simulação e pelos métodos teóricos e semiempíricos, considerando um coeficiente de segurança de 2 para os valores obtidos pela simulação e 3 para os métodos teóricos e semiempíricos assim como exposto pela NBR 6122 (2019).

Tabela 11 - Tensões e recalques admissíveis obtidos pela Simulação 1 e pelos métodos teóricos e semiempíricos

Critério	Q_u (kPa)	P_{adm} (kPa)	ρ_a (mm)
Van der Veen	290	145	25,0
Recalque máximo	373	187	40,0
Boston	145	73	7,0
Terzaghi	274	137	20,0
Teórico de Terzaghi	430	143	18,0
Semiempírico de Meyerhof	525	175	27,5

Fonte: Arquivos pessoais

Considerou-se como valor de referência a tensão admissível obtida pelo método de Van der Veen por representar a tensão que ocasiona na ruptura nítida do solo, sendo então a mais condizente com a realidade.

Apresenta-se o método teórico de Terzaghi como o valor mais próximo da realidade e o critério de Boston, o método semiempírico de Meyerhof e o critério de recalque máximo como os mais discrepantes.

A tensão obtida pelo método teórico de Terzaghi resultou em tensões praticamente iguais às de Van der Veen. O critério de Boston resultou no valor mais conservador, expresso por metade da tensão de referência, enquanto o método semiempírico de Meyerhof e o critério de recalque máximo se mostraram menos conservadores.

Em relação aos recalques admissíveis, considerou-se todos os valores dentro dos limites de aceitabilidade. Segundo Burland *et. al.* (1977, *apud* Cintra *et. al.*, 2011), no projeto de sapatas isoladas, considera-se aceitável como valor limite de recalque, as recomendações de Skempton-MacDonald que limita esse em 40mm para areias e 65mm em argilas.

5.1.3 Análise comparativa

Apresenta-se na Tabela 12 a diferença percentual entre as tensões e os recalques admissíveis obtidas pela simulação 1 com as obtidas por Falcão (2014).

Tabela 12 - Diferença percentual entre as tensões e recalques admissíveis obtidos pela simulação 1 com as obtidas por Falcão (2014)

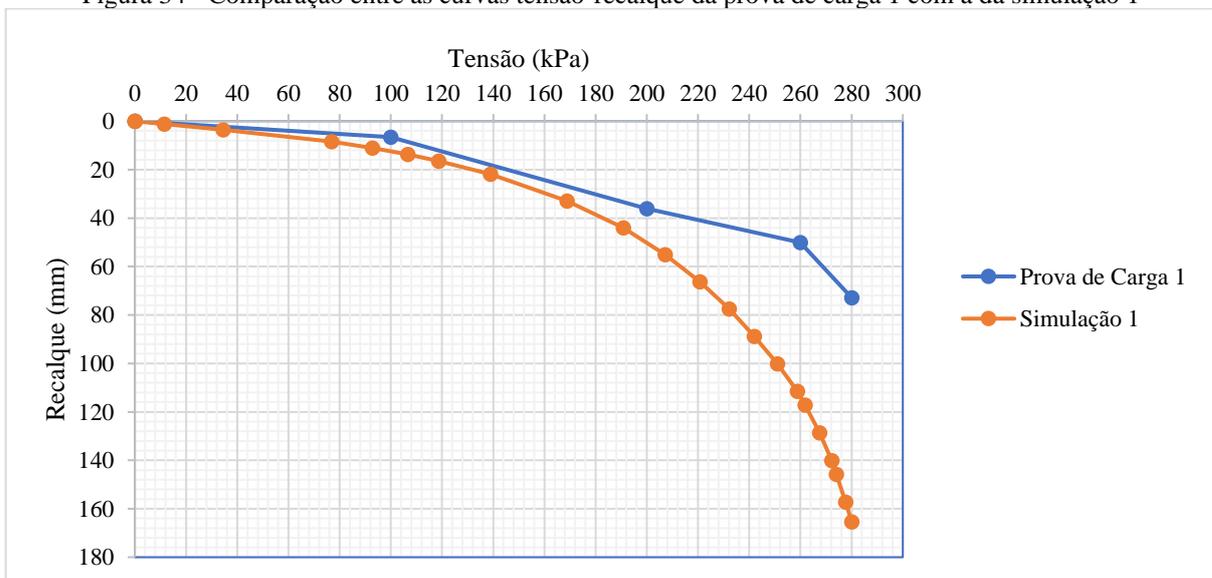
Critério	Simulação	Falcão	Diferença percentual (%)	Simulação	Falcão	Diferença percentual (%)
	1	(2014)		1	(2014)	
	P_{adm} (kPa)	P_{adm} (kPa)		ρ_a (mm)	ρ_a (mm)	
Van der Veen	145	153	-5,52	25,0	21,0	19,05
Recalque máximo	187	187	0,00	40,0	30,0	33,33
Boston	73	80	-9,58	7,0	5,0	40,00
Terzaghi	137	50	63,50	20,0	3,0	566,67

Fonte: Arquivos pessoais

Pelos valores apresentados, percebe-se que os métodos de Van der Veen e o de recalque máximo apresentaram melhores valores quanto à semelhança percentual da tensão e do recalque admissível, enquanto o critério de Terzaghi apresentou os valores mais discrepantes.

Como mencionado no Capítulo 3 do presente trabalho, o critério de Terzaghi se utiliza de uma mudança no comportamento da curva tensão-recalque para a determinação da tensão admissível; sendo assim, é de se esperar que esses valores apresentem tamanha discrepância, visto que as curvas experimentais apresentam forma pouco definida enquanto as curvas da simulação apresentam um formato bem definido, como observado na Figura 34.

Figura 34 - Comparação entre as curvas tensão-recalque da prova de carga 1 com a da simulação 1



Observa-se na comparação entre a curva experimental e a curva simulada um comportamento tensão-recalque bastante semelhante até valores próximos da tensão de 200 kPa, acentuando-se os valores de recalque por parte da curva simulada.

5.2 SIMULAÇÃO 2

Definiu-se a utilização do furo de sondagem SPT-2 (Figura 12) para a previsão dos parâmetros de entrada e a prova de carga PC-2 para o estudo comparativo do comportamento tensão-recalque.

O modelo geométrico da simulação 2 é composto por três camadas, resultando em um perfil de 11m. Na Tabela 13 apresenta-se um resumo de todos os parâmetros utilizados.

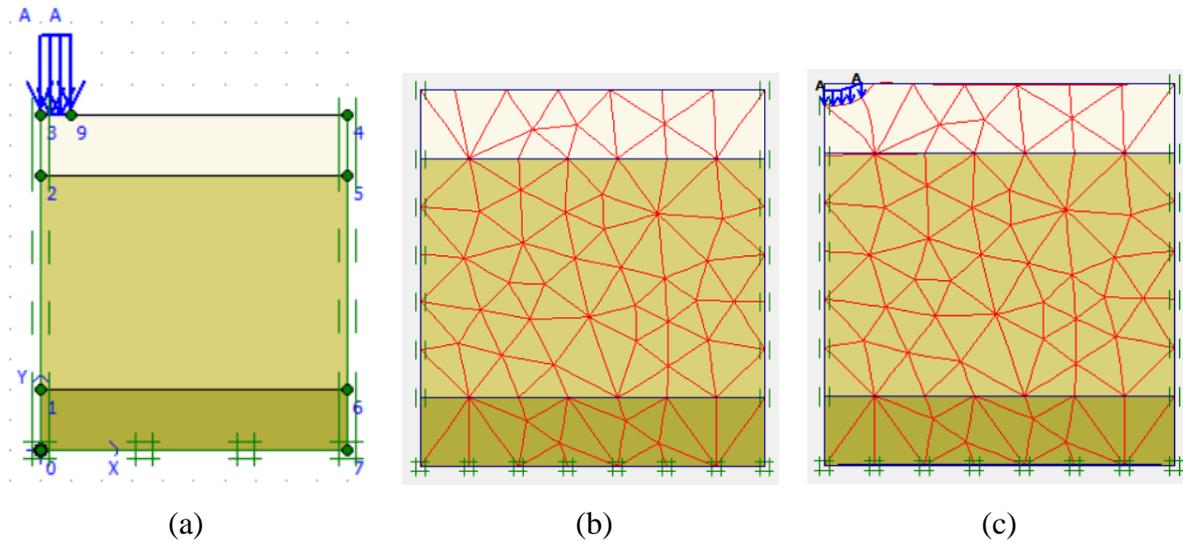
Tabela 13 - Apresentação dos parâmetros de entrada estimados para a simulação 2 onde N_{spt} é o índice SPT, γ o peso específico natural, c a coesão, φ o ângulo de atrito, E_s o módulo de elasticidade do solo e ν o coeficiente de Poisson

Camada	Espessura – h (m)	N_{spt}	γ (kN/m ³)	c (kN/m ²)	φ (°)	E_s (kN/m ²)	ν
1	2	9,33	16	13,3	21,33	19593	0,1
2	7	16,12	16	75	22,67	33852	0,1
3	2	23	16	100	24	48300	0,1

Fonte: Arquivos pessoais

Assim como na Simulação 1, realizou-se a análise de tensão-recalque seguindo o método de análise plástica com o comando *prescribed load*, sendo a carga máxima definida pela carga atingida pelo último estágio da prova de carga 2, no caso 900 kPa. Na Figura 35, apresentam-se o modelo geométrico modelado, a malha de elementos finitos gerada e o estado de deformação final após o carregamento.

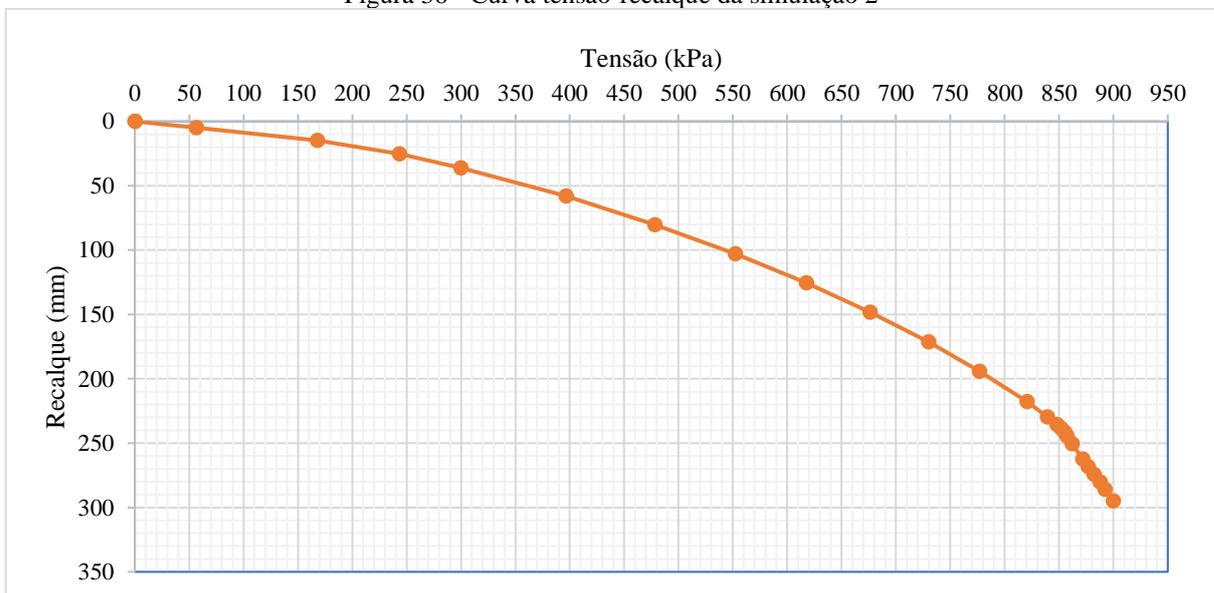
Figura 35 - (a) Modelo geométrico final, (b) Malha gerada do modelo geométrico e (c) Estado de deformação final do modelo geométrico



Fonte: Arquivos pessoais

Observa-se pela Figura 36 que a simulação atingiu tensões próximas a 900 kPa, caracterizado como o ponto de recalque máximo, apresentando valores na ordem de 300 mm.

Figura 36 - Curva tensão-recalque da simulação 2

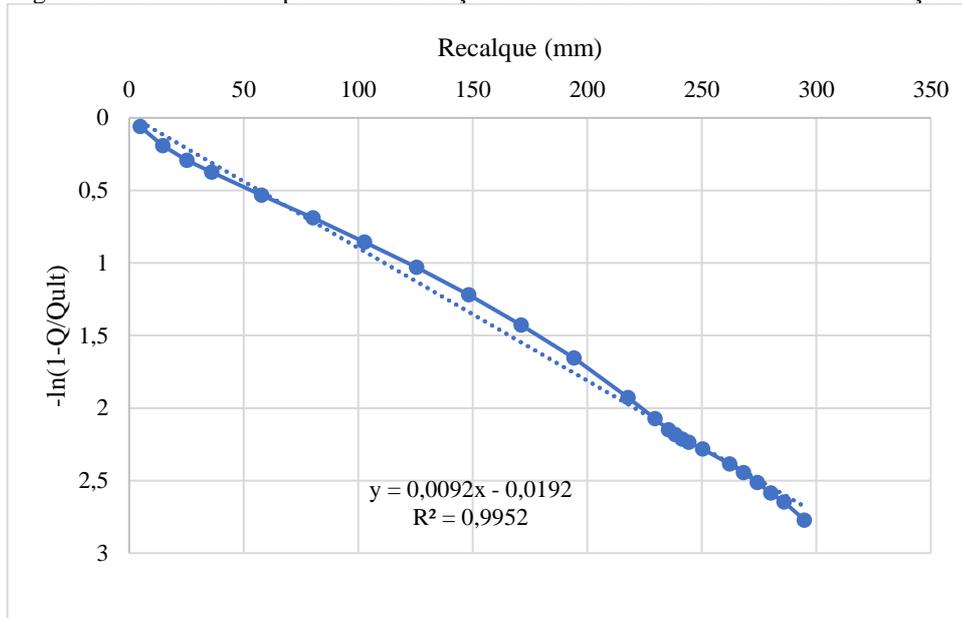


Fonte: Arquivos pessoais

5.2.1 Extrapolação pelo método de Van der Veen modificado por Aoki

Assim como na primeira simulação, constata-se a necessidade em se utilizar um método de extrapolação da curva tensão-recalque. Apresenta-se na Figura 37 o resultado da última iteração.

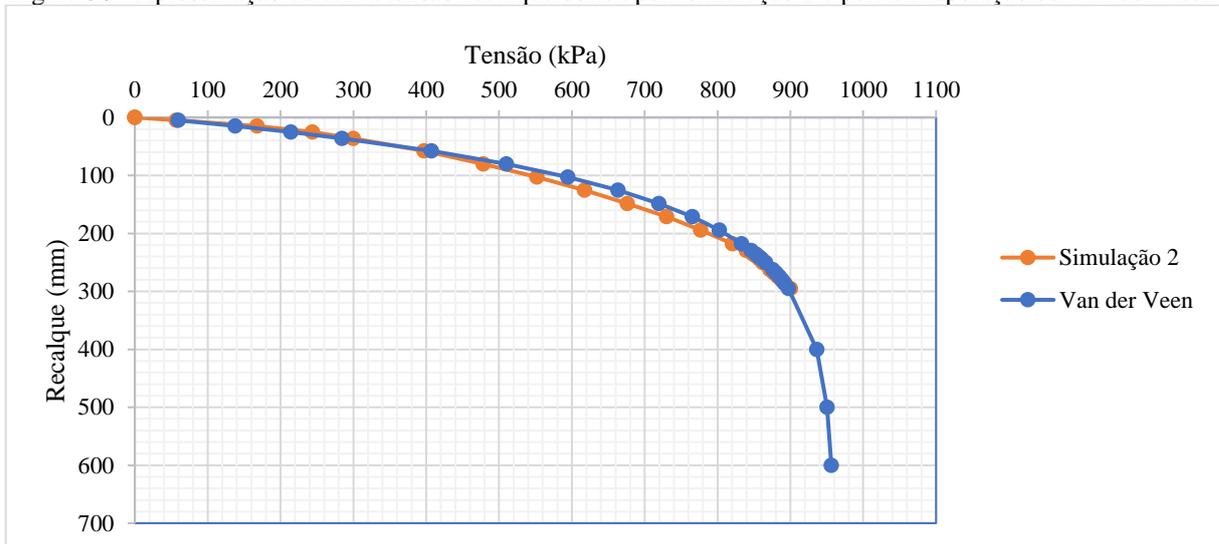
Figura 37 - Curva obtida pela última iteração do método de Van der Veen da simulação 2



Fonte: Arquivos pessoais

Obteve-se a melhor regressão linear ao se utilizar uma tensão de ruptura de 960 kPa, resultando em um coeficiente R^2 de 0,9952, $\alpha = 0,0092$ e $\beta = 0,0192$. Aplicando-se esses valores na Equação 10, obteve-se a curva exponencial de equação $Q = 960 \cdot (1 - e^{-0,0092\rho + 0,0192})$. Na Figura 38, apresentam-se a curva da Simulação 2 e a curva extrapolada.

Figura 38 - Apresentação da curva tensão-recalque obtida pela simulação 2 e pela extrapolação de Van der Veen



Fonte: Arquivos pessoais

5.2.2 Tensões e recalques admissíveis

Realizaram-se os mesmos procedimentos utilizados na simulação 1 para a determinação das tensões e recalques admissíveis, sendo os valores obtidos apresentados na Tabela 14.

Tabela 14 - Tensões e recalques admissíveis obtidos pela Simulação 2 e pelos métodos teóricos e semiempíricos

Critério	Q_u (kPa)	P_{adm} (kPa)	ρ_a (mm)
Van der Veen	960	480	80,0
Recalque máximo	1200	600	120,0
Boston	220	110	10,0
Terzaghi	1712	856	240,0
Teórico de Terzaghi	1452	484	30,0
Semiempírico de Meyerhof	825	275	14,0

Fonte: Arquivos pessoais

Ressaltam-se algumas semelhanças com a primeira simulação, o método teórico de Terzaghi apresentou-se novamente como a melhor aproximação, e o critério de Boston como o método mais conservador em relação a tensão obtida por Van der Veen. Apesar disso, todos os outros métodos resultaram em valores bastante discrepantes com o valor de referência.

5.2.3 Análise comparativa

Apresenta-se na Tabela 15 a diferença percentual entre as tensões e os recalques admissíveis obtidas pela simulação 2 com as obtidas por Falcão (2014).

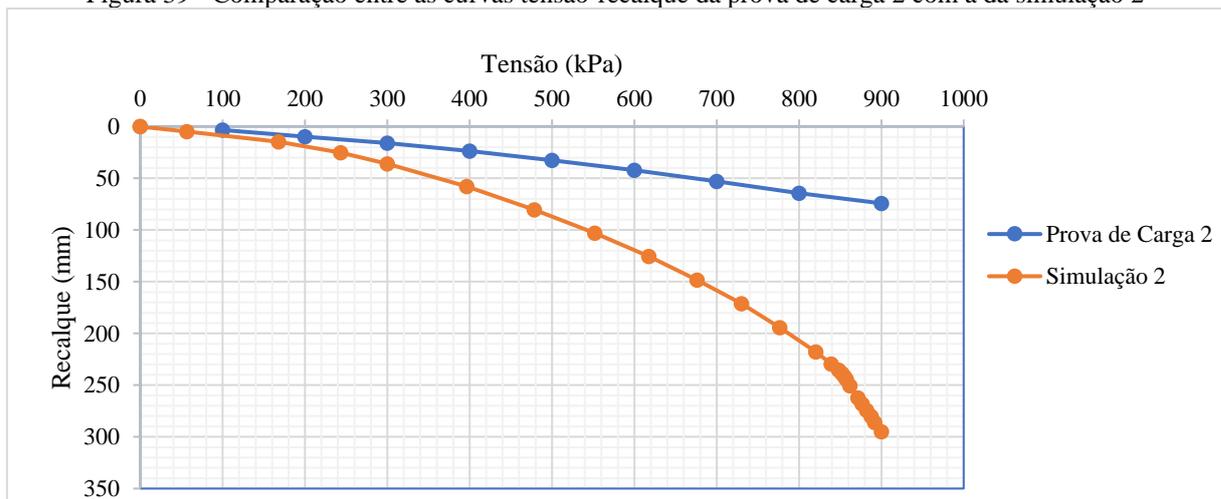
Tabela 15 - Diferença percentual entre as tensões e recalques admissíveis obtidos pela simulação 2 com as obtidas por Falcão (2014)

Critério	Simulação	Falcão	Diferença percentual (%)	Simulação	Falcão	Diferença percentual (%)
	2	(2014)		2	(2014)	
	P_{adm} (kPa)	P_{adm} (kPa)		ρ_a (mm)	ρ_a (mm)	
Van der Veen	480	745	-55,21	80,0	57,0	40,35
Recalque máximo	600	600	0,00	120,0	43,0	178,94
Boston	110	210	-90,90	10,0	10,0	0,00
Terzaghi	856	130	84,81	240,0	6,0	3900,00

Fonte: Arquivos pessoais

Observa-se que praticamente todos os valores de tensão e recalque admissíveis resultaram em diferenças percentuais exacerbadas, sendo a única exceção o critério de Boston que toma como referência a maior tensão atingida, igual tanto para a simulação como para a prova de carga. Em relação a comparação entre a curva experimental e a curva simulada, na Figura 39 observa-se que os valores de recalque estiveram sempre abaixo da curva experimental, apresentando também valores de recalque excessivo para tensões maiores que 300 kPa.

Figura 39 - Comparação entre as curvas tensão-recalque da prova de carga 2 com a da simulação 2



Fonte: Arquivos pessoais

Percebe-se pela avaliação das tensões admissíveis da primeira simulação como pelo estudo comparativo que os resultados não se apresentaram de forma representativa com o solo da região. Como exposto por Falcão (2014), a curva tensão-recalque obtida pela prova de carga 2

se apresentou distinta da prova de carga 1 e das provas de carga 3 e 4 obtidas por Barreto (2015), caracterizando-se por uma resistência elevada.

Apresentam-se como possíveis causas da diferença entre as curvas a ocorrência de problemas durante a execução do ensaio de prova de carga, erros nos dados de entrada previstos e a má qualidade da malha gerada.

Como forma de avaliar a precisão dos dados de entrada, realizou-se uma simulação extra com os parâmetros do solo obtidos experimentalmente pelos trabalhos de Morais (2011) e Falcão (2014), mas, apesar disso, não houveram mudanças significativas nos resultados, indicando que os problemas foram decorrentes ou da execução do ensaio ou da qualidade da malha gerada.

5.3 SIMULAÇÃO 3

Definiu-se a utilização do furo de sondagem SPT-3 (Figura 12) para a previsão dos parâmetros de entrada e a prova de carga PC-3 para o estudo comparativo do comportamento tensão-recalque.

O modelo geométrico da simulação 3 é composto por quatro camadas, resultando em um perfil de 11m. Apresenta-se na Tabela 16 um resumo de todos os parâmetros utilizados.

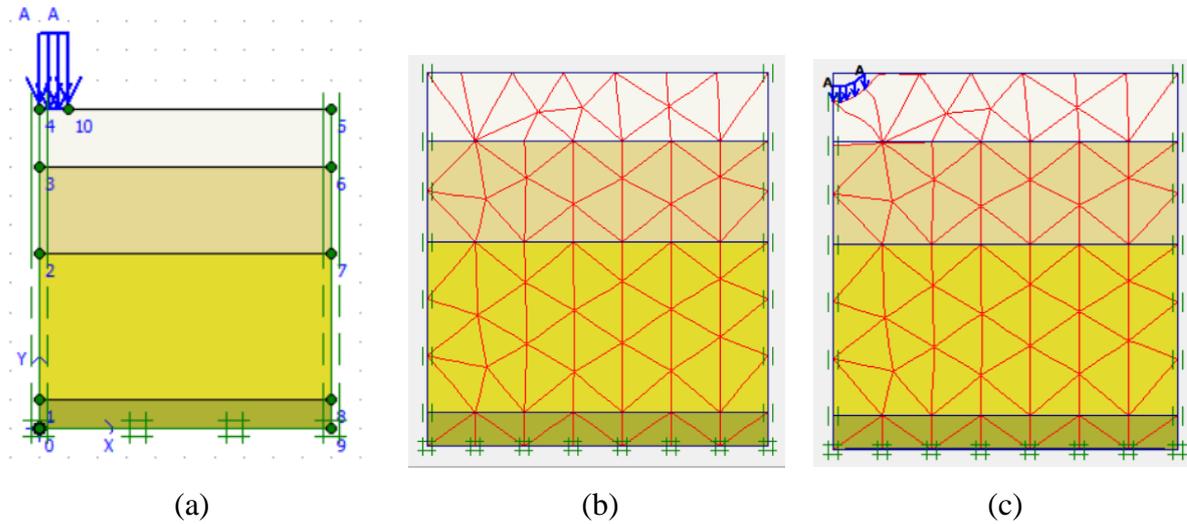
Tabela 16 - Apresentação dos parâmetros de entrada estimados para a simulação 3 onde N_{spt} é o índice SPT, γ o peso específico natural, c a coesão, ϕ o ângulo de atrito, E_s o módulo de elasticidade do solo e ν o coeficiente de Poisson

Camada	Espessura – h (m)	N_{spt}	γ (kN/m ³)	c (kN/m ²)	ϕ (°)	E_s (kN/m ²)	ν
1	2	6,33	16	16,7	18,67	8862	0,1
2	3	8,5	16	25	21,33	11900	0,1
3	5	15,83	16	75	22,67	25480	0,1
4	1	24	17	100	24	46200	0,1

Fonte: Arquivos pessoais

Realizou-se a análise de tensão-recalque seguindo o método de análise plástica com o comando *prescribed load*, sendo a carga máxima definida pela carga atingida pelo último estágio da prova de carga 3, no caso 300 kPa. Observa-se na Figura 40 o modelo geométrico modelado, a malha de elementos finitos gerada e o estado de deformação final após o carregamento.

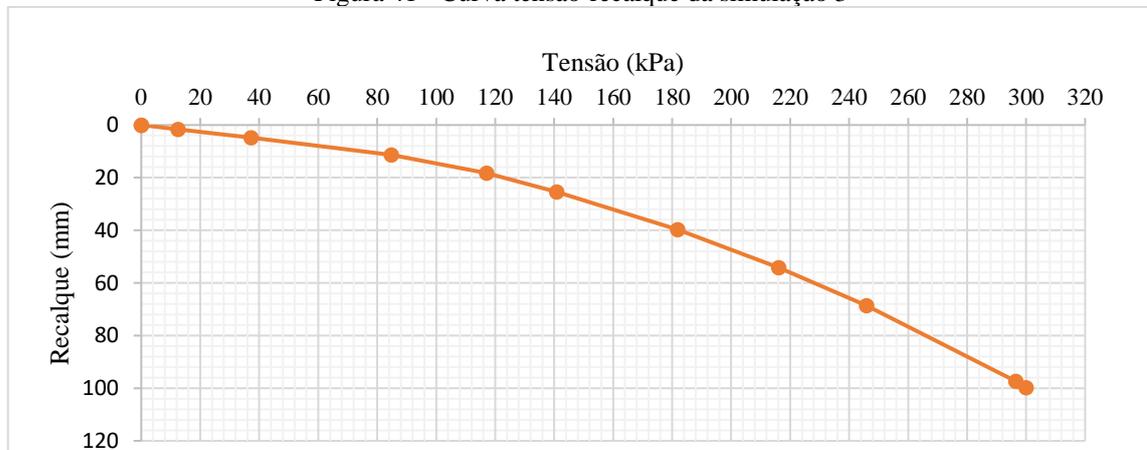
Figura 40 - (a) Modelo geométrico final, (b) Malha gerada do modelo geométrico e (c) Estado de deformação final do modelo geométrico



Fonte: Arquivos pessoais

Observa-se pela Figura 41 que a simulação atingiu tensões próximas a 300 kPa, caracterizada como ponto de recalque máximo, apresentado valores na ordem de 100 mm.

Figura 41 - Curva tensão-recalque da simulação 3

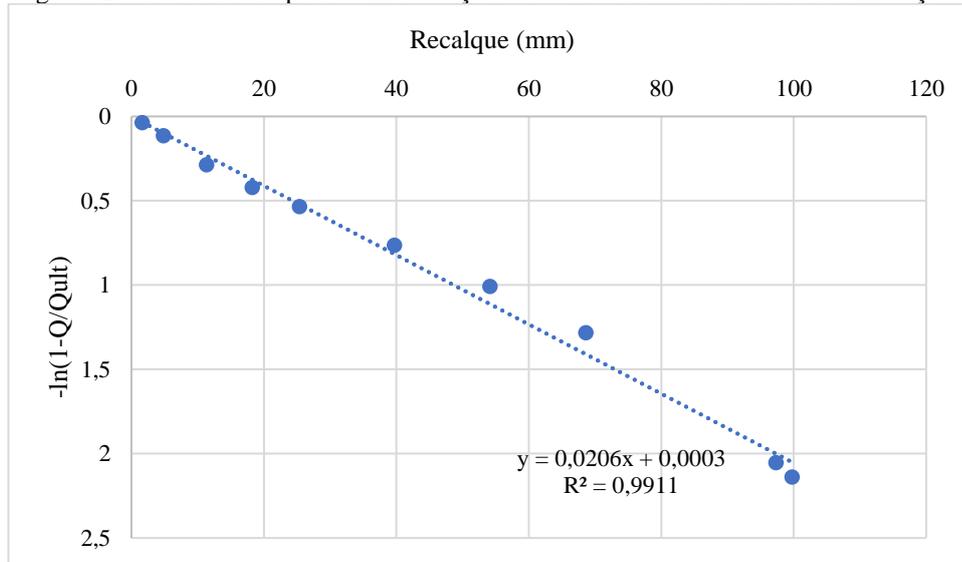


Fonte: Arquivos pessoais

5.3.1 Extrapolação pelo método de Van der Veen modificado por Aoki

Apresenta-se na Figura 42 a reta decorrente da última iteração do método de Van der Veen modificado por Aoki.

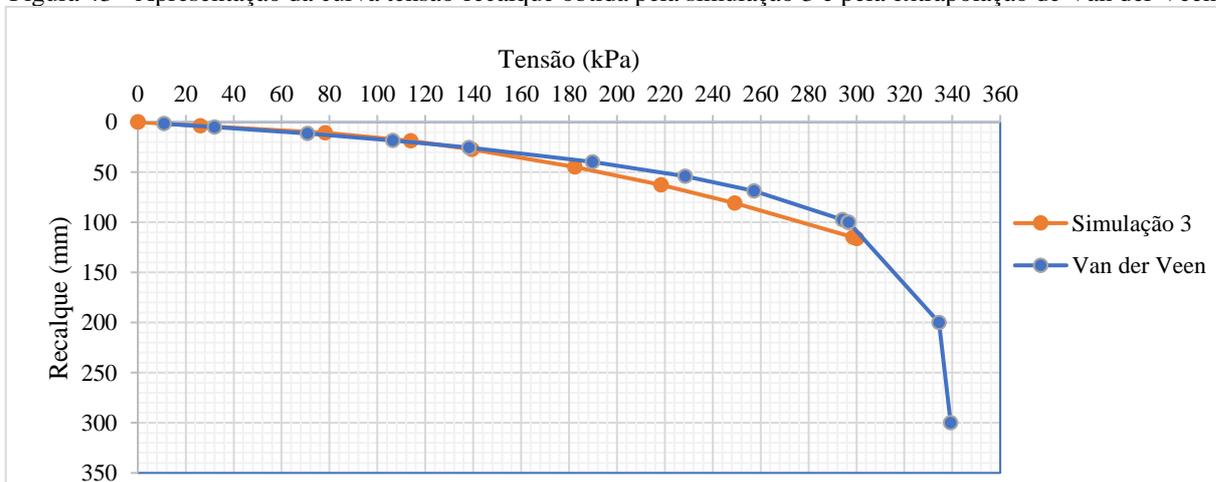
Figura 42 - Curva obtida pela última iteração do método de Van der Veen da simulação 3



Fonte: Arquivos pessoais

Observa-se que a última iteração resultou em um coeficiente R^2 de 0,9911, caracterizado por uma tensão de ruptura de 340 kPa, $\alpha = 0,0206$ e $\beta = 0,0008$. Aplicando-se esses valores na Equação 10, obteve-se a curva exponencial de equação $Q = 340 \cdot (1 - e^{-0,0206\rho + 0,0008})$. Apresentam-se na Figura 43 a curva da Simulação 3 e a curva extrapolada.

Figura 43 - Apresentação da curva tensão-recalque obtida pela simulação 3 e pela extrapolção de Van der Veen



Fonte: Arquivos pessoais

5.3.2 Tensões e recalques admissíveis

Determinou-se os valores de tensão e recalques admissíveis pelos mesmos critérios utilizados por Barreto (2015); ou seja, pelo método de Van der Veen modificado por Aoki, critério de recalque máximo, critério de Boston e critério de Terzaghi.

Constata-se que Barreto (2015) apresentou além do método semiempírico de Meyerhof, os métodos propostos por Teixeira, Mello e Teixeira e Godoy. Apesar disso, como forma de padronização dos resultados, expuseram-se somente as tensões e recalques decorrentes do método de Meyerhof.

Apresentam-se na Tabela 17 os valores da tensão e recalque admissíveis e das capacidades de carga obtidos pela simulação e pelos métodos teóricos e semiempíricos, considerando um coeficiente de segurança de 2 para os valores obtidos pela simulação e 3 para os métodos teóricos e semiempíricos.

Tabela 17 - Tensões e recalques admissíveis obtidos pela Simulação 3 e pelos métodos teóricos e semiempíricos

Critério	Q_u (kPa)	P_{adm} (kPa)	ρ_a (mm)
Van der Veen	340	170	35,0
Recalque máximo	400	200	47,0
Boston	140	70	9,0
Terzaghi	364	182	34,0
Teórico de Terzaghi	604	201	40,0
Semiempírico de Meyerhof	405	135	14,0

Fonte: Arquivos pessoais

Pelo exposto, o critério Terzaghi apresentou os valores mais próximo com o de Van der Veen, enquanto o critério de Boston e o método semiempírico de Meyerhof apresentaram os valores mais divergentes.

Constata-se também que diferentemente das duas primeiras simulações, o método teórico de Terzaghi não apresentou o valor mais próximo com o de referência; entretanto, o critério de Boston continuou sendo o mais conservador entre todos.

Em relação aos recalques admissíveis, observou-se valores de recalques semelhantes aos da simulação 2, ultrapassando os limites exposto por Skempton-MacDonald quando comparados com areias, mas apresentando valores abaixo do limite quando comparados com argilas. Visto que os resultados das sondagens no local apontaram a existência de solo majoritariamente argilosos, os valores de recalque admissível podem ser considerados aceitáveis.

5.3.3 Análise comparativa

A Tabela 18 apresenta a diferença percentual entre as tensões e os recalques admissíveis das simulações com as obtidas por Barreto (2015).

Tabela 18 - Diferença percentual entre as tensões e recalques admissíveis obtidos pela simulação 3 com as obtidas por Barreto (2015)

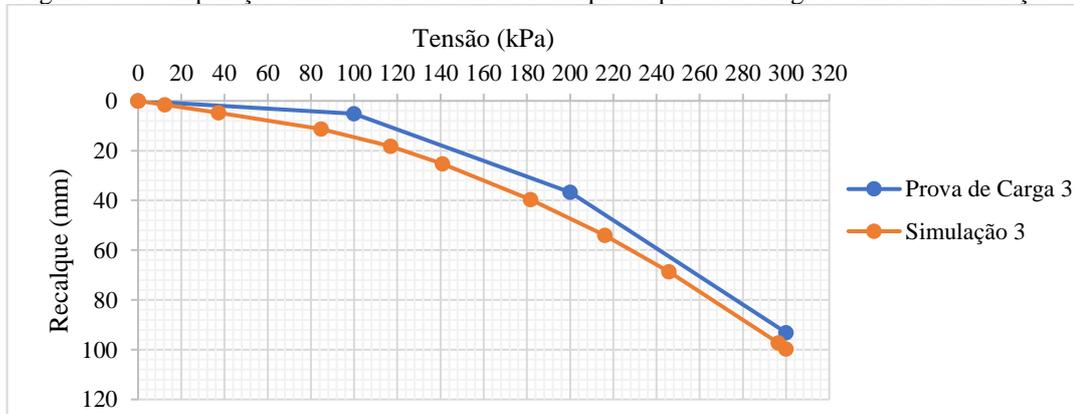
Critério	Simulação	Barreto	Diferença	Simulação	Barreto	Diferença
	3	(2015)	percentual	3	(2015)	percentual
	$P_{adm} (kPa)$	$P_{adm} (kPa)$	(%)	$\rho_a (mm)$	$\rho_a (mm)$	(%)
Van der Veen	170	159	6,47	35,0	28,0	25,00
Recalque máximo	200	199	0,50	47,0	49,1	-4,28
Boston	70	84	-20,00	9,0	4,0	125,00
Terzaghi	182	105	42,30	34,0	12,0	183,33

Fonte: Arquivos pessoais

Percebe-se que os métodos de Van der Veen e o critério de Recalque máximo apresentaram diferenças percentuais bastante satisfatórias em relação as tensões e recalques admissíveis. Ressalta-se também a discrepância entre os valores obtidos pelo método de Terzaghi, que semelhante as outras simulações, depende bastante do formato da curva.

Apresenta-se na Figura 44 a comparação entre as curvas tensão-recalque obtidas pela prova de carga 3 e pela simulação 3.

Figura 44 - Comparação entre as curvas tensão-recalque da prova de carga 3 com a da simulação 3



Fonte: Arquivos pessoais

Observa-se uma grande semelhança na forma de ambas as curvas, obtendo-se pela curva simulada valores mais elevados de recalque do que os obtidos experimentalmente. Ressalta-se também que diferentemente das outras duas simulações, esta não apresentou diferenças significativas nos valores de recalque, sendo a maior diferença na ordem de 10 mm.

5.4 SIMULAÇÃO 4

Definiu-se a utilização do furo de sondagem SPT-4 (Figura 12) para a previsão dos parâmetros de entrada e a prova de carga PC-4 para o estudo comparativo do comportamento tensão-recalque.

O modelo geométrico da simulação 4 é composto por seis camadas, resultando em um perfil de 11m. Apresenta-se. Na Tabela 19 tem-se um resumo de todos os parâmetros utilizados.

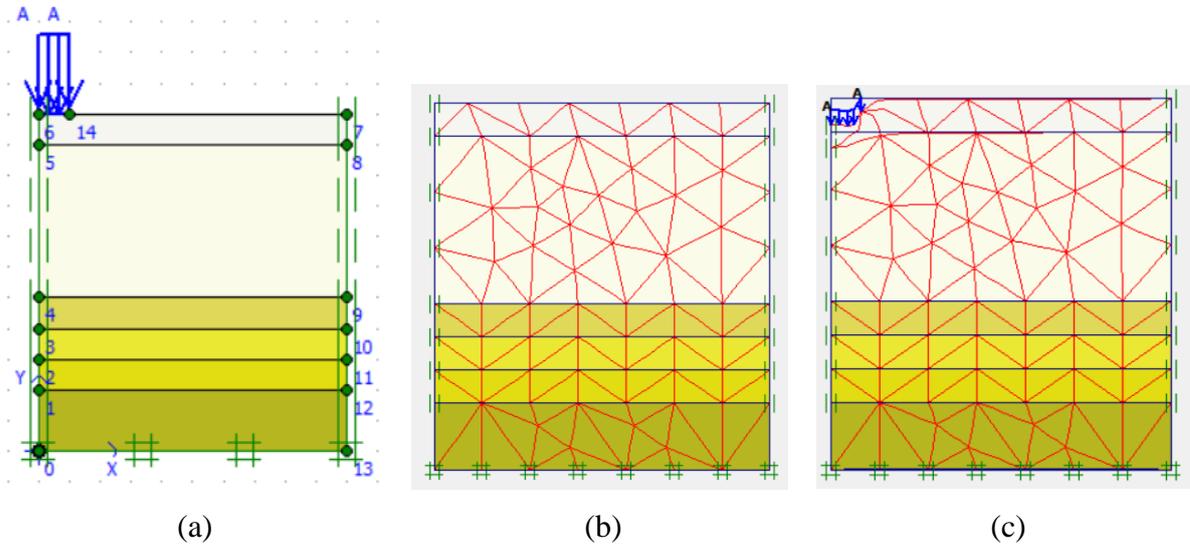
Tabela 19 - Apresentação dos parâmetros de entrada estimados para a simulação 4 onde N_{spt} é o índice SPT, γ o peso específico natural, c a coesão, ϕ o ângulo de atrito, E_s o módulo de elasticidade do solo e ν o coeficiente de Poisson

Camada	Espessura – h (m)	N_{spt}	γ (kN/m ³)	c (kN/m ²)	ϕ (°)	E_s (kN/m ²)	ν
1	1	5	15	16,7	18,67	10500	0,1
2	5	7,33	16	16,7	21,33	15393	0,1
3	1	19,5	17	100	24	40950	0,1
4	1	29	17	100	24	60900	0,1
5	1	28	17	100	24	58800	0,1
6	2	19	16	100	24	39900	0,1

Fonte: Arquivos pessoais

Realizou-se a análise de tensão-recalque seguindo o método de análise plástica com o comando *prescribed load*, sendo a carga máxima definida pela carga atingida pelo último estágio da prova de carga 3, no caso 300 kPa. Apresenta-se na Figura 45 o modelo geométrico modelado, a malha de elementos finitos gerada e o estado de deformação final após o carregamento.

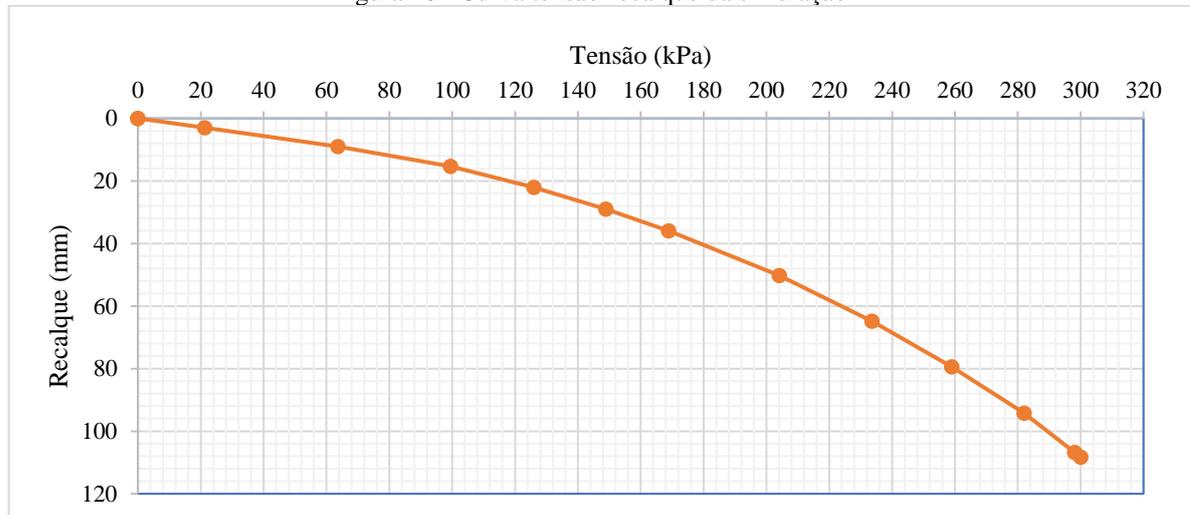
Figura 45 - (a) Modelo geométrico final, (b) Malha gerada do modelo geométrico e (c) Estado de deformação final do modelo geométrico



Fonte: Arquivos pessoais

Observa-se pela Figura 46 que o ensaio atingiu valores de tensão próximas a 300 kPa, caracterizada como o ponto de recalque máximo, apresentando valores na ordem de 110 mm.

Figura 46 - Curva tensão-recalque da simulação 4

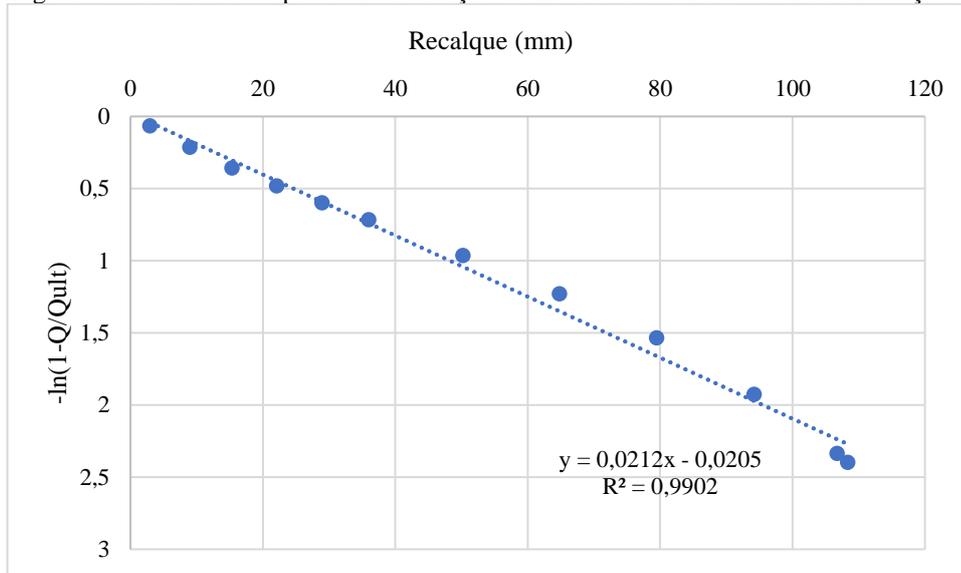


Fonte: Arquivos pessoais

5.4.1 Extrapolação pelo método de Van der Veen

Apresenta-se na Figura 47 o resultado da última iteração da extrapolação da curva.

Figura 47 - Curva obtida pela última iteração do método de Van der Veen da simulação 3

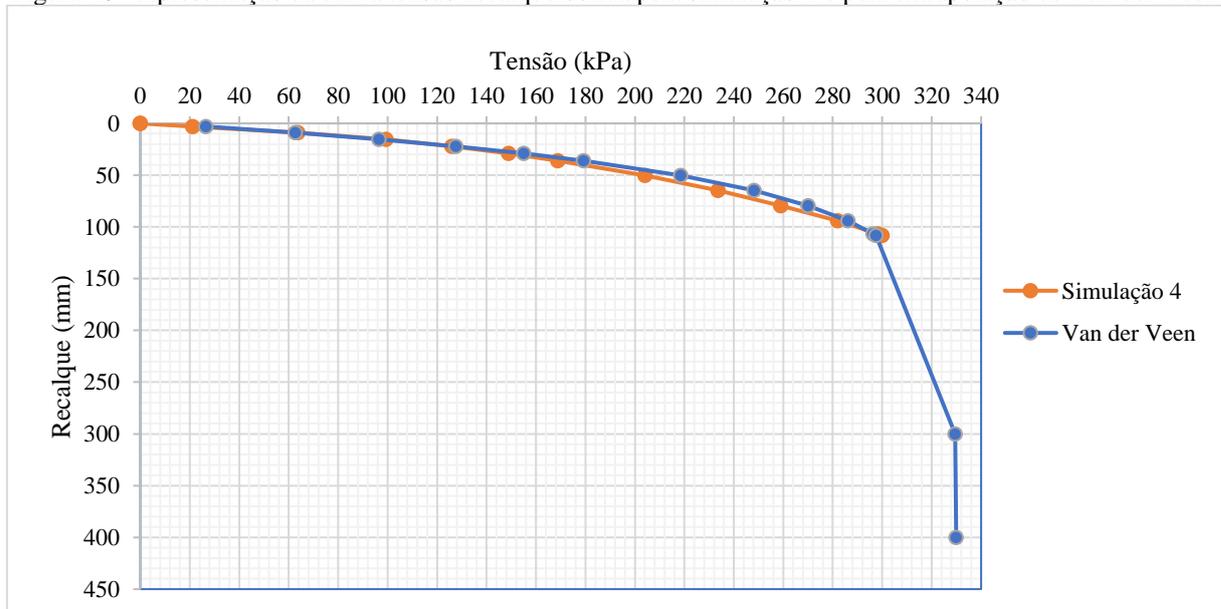


Fonte: Arquivos pessoais

Observa-se que a última iteração resultou em um coeficiente R^2 de 0,9902, representado por uma tensão de ruptura de 335 kPa, $\alpha = 0,0212$ e $\beta = -0,0205$. Aplicando-se esses valores na Equação 10 proposta por Van der Veen modificado por Aoki, obteve-se a curva exponencial de equação $Q = 330 \cdot (1 - e^{-0,0212\rho - 0,0205})$.

Apresentam-se na Figura 48 a curva da Simulação 4 e a curva extrapolada.

Figura 48 - Apresentação da curva tensão-recalque obtida pela simulação 4 e pela extrapolção de Van der Veen



Fonte: Arquivos pessoais

5.4.2 Tensões e recalques admissíveis

Definiu-se a utilização dos mesmos procedimentos da simulação 3 para a definição das tensões e recalques admissíveis. Apresenta-se na Tabela 20 os valores obtidos de tensão e recalques admissíveis e da carga de ruptura.

Tabela 20 - Tensões e recalques admissíveis obtidos pela Simulação 4 e pelos métodos teóricos e semiempíricos

Critério	Q_u (kPa)	P_{adm} (kPa)	ρ_a (mm)
Van der Veen	330	165	35,0
Recalque máximo	400	200	49,0
Boston	135	68	9,0
Terzaghi	520	260	45,0
Teórico de Terzaghi	338	169	36,0
Semiempírico de Meyerhof	232	77	51,0

Fonte: Arquivos pessoais

Constata-se a semelhança entre os resultados obtidos pela simulação 1 e 2, apresentando a tensão admissível pelo método teórico de Terzaghi como o mais próximo da tensão de referência, e as obtidas pelo critério de Boston e pelo método semiempírico de Meyerhof como as mais discrepantes.

Em relação aos recalques admissíveis, observa-se que o critério de recalque máximo ultrapassou o limite das areais expostos por Skempton-MacDonald; apesar disso, todos os critérios apresentaram valores menores que os das argilas.

5.4.3 Análise comparativa

A Tabela 21 apresenta a diferença percentual entre as tensões e os recalques admissíveis obtidas pela simulação com as obtidas por Barreto (2015).

Tabela 21 - Diferença percentual entre as tensões e recalques admissíveis obtidos pela simulação 4 com as obtidas por Barreto (2015)

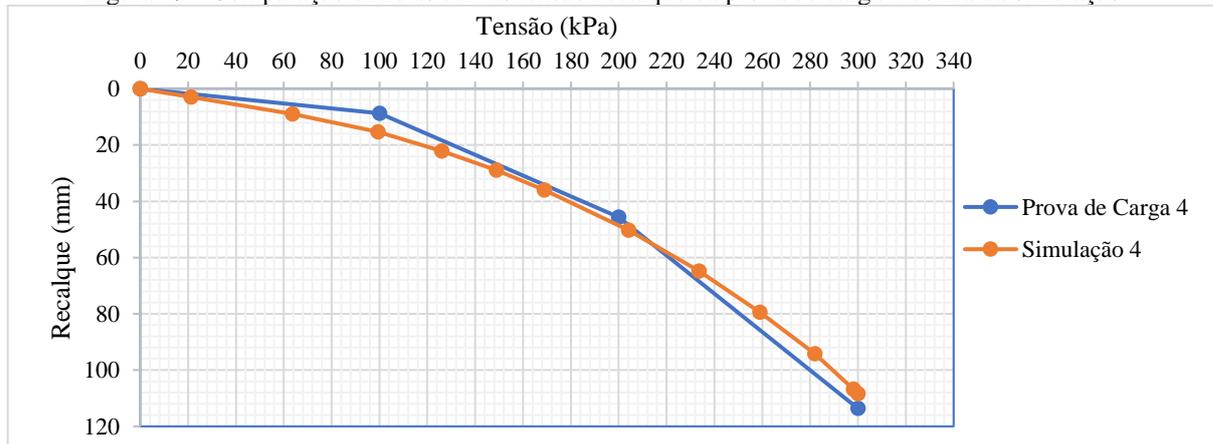
Critério	Simulação	Barreto	Diferença	Simulação	Barreto	Diferença
	4	(2015)	percentual	4	(2015)	percentual
	P_{adm} (kPa)	P_{adm} (kPa)	(%)	ρ_a (mm)	ρ_a (mm)	(%)
Van der Veen	165	159	3,64	35,0	28,0	25,00
Recalque máximo	200	199	0,50	49,0	49,1	-0,20
Boston	68	74	-8,82	9,0	4,0	125,00
Terzaghi	260	108	58,46	45,0	12,0	275,00

Fonte: Arquivos pessoais

Observa-se novamente o mesmo padrão das outras simulações, o método de Van der Veen e o critério de recalque máximo apresentaram as menores diferenças percentuais para a tensão e recalque admissível, enquanto o critério de Boston e Terzaghi as maiores.

Em relação à comparação entre a curva experimental e a curva simulada (Figura 49), ambas apresentaram comportamento bastante semelhante durante todo o carregamento.

Figura 49 - Comparação entre as curvas tensão-recalque da prova de carga 4 com a da simulação 4



Fonte: Arquivos pessoais

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Considera-se a utilização do *software* Plaxis 2D para determinação do comportamento tensão-recalque de um solo da Formação Barreiras como uma boa alternativa, apresentando resultados bastante próximos aos de provas de carga sobre placas utilizando como dados de entrada valores de fácil previsão por equacionamentos que se utilizam do índice N_{spt} .

Apesar disso, o *software* é regido pela sua simplicidade, que apesar de possibilitar a obtenção dos resultados de forma bastante rápida e prática, restringe o usuário as opções disponíveis. Sendo assim, constata-se que a limitação quanto a forma dos elementos em triangulares de 6 ou 15 nós pode ocasionar no aumento do custo computacional de forma excessiva em problemas mais complexos. Além disso, ressalta-se que a inexistência de uma função para edição das malhas impossibilita o processo de estruturação das malhas, dificultando na avaliação da qualidade das simulações.

Em relação ao comportamento geral entre as curvas tensão-recalque, as obtidas pelas simulações 1, 3 e 4 apresentaram comportamento bastante similares aos das experimentais, ocorrendo pequenas variações nos valores de recalque que não impactariam no dimensionamento geotécnico. Já a obtida pela simulação 2 apresentou-se bastante discrepante da realidade, indiciando a existência de problemas quanto a execução do ensaio, aos dados de entrada e/ou na qualidade da malha gerada.

Sendo assim, devido à incoerência com os demais resultados, optou-se por desconsiderar a análise comparativa referente ao estudo de tensão-recalque da simulação 2, recomendando-se a realização de estudos mais aprofundados quanto ao aumento da resistência do solo nesse local. Avalia-se positivamente os valores de tensão admissível obtidos por métodos teóricos. As quatro simulações apresentaram valores de tensão pela extrapolação de Van der Veen praticamente iguais as obtidas pelo método teórico de Terzaghi. Em contrapartida, os valores de tensão obtidos pelos métodos semiempíricos apresentaram-se bastante divergentes.

Partindo-se para a comparação entre as tensões admissíveis obtidas pelas curvas tensão-recalque, constata-se a semelhança entre as tensões obtidas pelo método de Van der Veen, sendo a maior diferença percentual entre as curvas experimentais e simuladas de apenas 6%. Além disso, o critério de Terzaghi se apresentou bastante inconsistente e o critério de Boston expressou valores exageradamente conservadores em todas as simulações, recomendando-se então a utilização de diferentes critérios ao se utilizar o *software*.

Em relação ao estudo dos recalques admissíveis, também se avalia positivamente a utilização do *software* visto que praticamente todos os valores se apresentaram dentro dos limites expostos

por Skempton-MacDonald, apresentando sempre valores maiores, e, conseqüentemente, mais seguros quanto ao dimensionamento.

Por fim, apresentam-se algumas sugestões para trabalhos futuros com o intuito de abordar as limitações presentes no trabalho em questão:

- Realização de um teste de convergência para avaliação da qualidade da malha de elementos finitos;
- Realizar um estudo comparativo entre as curvas tensão-recalque obtidas por diferentes *softwares* de elementos finitos;
- Realização de análises numéricas referentes a outras provas de carga da região.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6122**: Projeto e execução de fundações. 3 ed. Rio de Janeiro, 2019. 108 p.

_____. **NBR 6489**: Solo - Prova de carga estática em fundação. 2 ed. Rio de Janeiro, 2019. 11 p.

ALMEIDA NETO, J. A. **Análise do desempenho de estacas hélice contínua e ômega – Aspectos executivos**. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 2002.

ALMEIDA, M. P. B. **Prova de carga rápida com recalque estabilizado**. 2009. 79p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2009.

ALONSO, U. R. **Exercícios de fundações**. 3 ed. São Paulo: Edgard Blucher, 2019.

ALONSO, Urbano Rodriguez. **Previsão e controle das fundações**. 1. ed. São Paulo: Edgard Elücher Ltda, 1983. 156 p.

AOKI, N. **Considerações sobre a capacidade de carga de estacas isoladas**, Notas de Aula, Universidade Gama Filho, 1976.

BARRETO, V. J. M. **Estudo do Comportamento do Solo através de Provas de Carga sobre Placa no Campo Experimental de Geotecnia da Universidade Federal de Alagoas**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2015.

CAPUTO, H. P. **Mecânica dos solos e suas aplicações**. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 1988.

CINTRA, J. C. A.; AOKI, N.; ALBIERO, J. H. **Fundações Diretas: Projeto Geotécnico**. São Paulo: Oficina de Textos, 2011.

COSTA, Y. D. J. **Estudo do comportamento de solo não saturado através de provas de carga em placa**. 1999. 138p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1999.

DUARTE, L. N. **Análise de prova de carga instrumentada em uma sapata rígida**. 2006. 118p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2006.

FALCÃO, V. B. **Execução e análise de prova de carga sobre placa no campo experimental da Universidade Federal de Alagoas**. 2014. 82p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2014.

FISH, J.; BELYTSCHKO, T. **A first course in finite elements**. Chichester: John Wiley & Sons, Ltd, 2007.

FREITAS, A. C. **Contribuição ao estudo do efeito tridimensional de instalação e de grupo em estacas em areias**. 2010. 231p. Dissertação (mestrado) – Curso de Engenharia Civil, Universidade Estadual do Rio de Janeiro, 2010.

GUNNVARD, Per. **Evaluation of the Efficiency of the Standardized Norrland Method**. 2016. 126 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Luleå University Of Technology, Boden, 2016.

MARQUES, A. G. *et. al.* **Métodos de investigação do subsolo**. 3. ed. Maceió: EDUFAL, 2015.

MELLO, V. F. B., 1975, **The philosophy of statistics and probability applied in soil mechanics**. In: CONF. ON APPLICATION OF STATISTICS AND PROBABILITY IN SOIL AND STRUCTURAL ENGINEERING, 2., 1975, Aachen. Proceedings... Aachen: Conf. on Application of Statistics and Probability in Soil and Structural Engineering, 1975.

MENEGOTTO, M. L. **Previsão da curva tensão-recalque de ensaios de placa em solo não saturado**. 2004. 224p. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2004.

MORAES, L. S. **Prova de carga dinâmica em placa**. 2005. 144p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005.

MORAIS, T. S. O. **Implantação do Campo Experimental de Geotecnia da Universidade Federal de Alagoas**. Projeto de Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil). Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2011.

RUSSI, D. **Estudo do comportamento de solos através de ensaios de placa de diferentes diâmetros**. 2007. 147p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2007.

SKEMPTON, A. W. **The bearing capacity of clays**. Building Research Congress, v. 1, p. 180-189, 1951. Técnicos e Científicos Editora S.A., 1988.

TEIXEIRA, A. H. **Projeto e execução de fundações**. 3º Seminário de Engenharia de Fundações Especiais e Geotecnia, São Paulo, n.1, p.33-50, 1996.

TEIXEIRA, A. H.; GODOY, N. S. **Análise, projeto e execução de fundações rasas**, in: HACHICH, W. *et. al.* (ed.) **Fundações: Teoria e prática**. São Paulo: Pini, Cap. 7, p. 227-264, 1996.

VELOSSO, D. A.; LOPES, F. R. **Fundações: critérios de projeto, investigação do subsolo, fundações superficiais, fundações profundas**. São Paulo: Oficina de Textos, 2010.

ANEXO A – LOCALIZAÇÃO GEOGRÁFICA DOS ENSAIOS REALIZADOS NO CEG/UFAL

Ponto	Norte	Este	Altitude	Descrição	Trabalho
1	8943008.3160	195344.8630	78.0000	MARCO ZERO CTEC	TOPOGRAFIA
2	8943002.2250	195193.1860	79.0040	MARCO CTEC 2	TOPOGRAFIA
3	8943008.6828	195250.5223	77.6080	PROVA DE CARGA 1	FALCÃO (2014)
4	8943012.3576	195280.9434	77.0950	PROVA DE CARGA 2	FALCÃO (2014)
5	8943031.7713	195271.0085	77.3207	BARRA MINA	ARCANJO (2014)
6	8943031.1341	195270.8308	77.2957	BARRA MINA	ARCANJO (2014)
7	8943031.6435	195270.3188	77.3260	BARRA MINA	ARCANJO (2014)
8	8943031.1045	195269.6138	77.3134	BARRA MINA	ARCANJO (2014)
9	8943014.0565	195279.9029	77.1669	ESTACA DE REAÇÃO	FALCÃO (2014)
10	8943010.6587	195281.9839	77.0223	ESTACA DE REAÇÃO	FALCÃO (2014)
11	8943011.2123	195286.1744	77.1754	POÇO DE INSPEÇÃO	MENEZES (2014)
12	8943009.1016	195283.4214	76.9866	SPT	MENEZES (2014)
13	8943008.7079	195282.9995	76.9963	SPT EQUIVALENTE	FERREIRA (2014)
14	8943008.4262	195282.2477	77.0136	BARRA MINA	ARCANJO (2014)
15	8943007.7560	195282.0212	77.0102	BARRA MINA	ARCANJO (2014)
16	8943007.6837	195280.2615	76.9942	BARRA MINA	ARCANJO (2014)
17	8943006.9992	195279.8709	76.9932	BARRA MINA	ARCANJO (2014)
18	8942994.4469	195256.2220	77.6033	BARRA MINA	ARCANJO (2014)
19	8942994.1541	195255.3987	77.6083	BARRA MINA	ARCANJO (2014)
20	8942993.7135	195254.5221	77.6112	BARRA MINA	ARCANJO (2014)
21	8943006.6902	195250.5052	77.6189	ESTACA DE REAÇÃO	FALCÃO (2014)
22	8943010.6753	195250.5393	77.5973	ESTACA DE REAÇÃO	FALCÃO (2014)
23	8943008.9083	195248.5381	77.6909	BARRA MINA	MORAIS (2011)
24	8943010.2380	195247.8945	77.6217	SPT	MORAIS (2011)
25	8943012.9031	195246.4276	77.6189	POÇO DE INSPEÇÃO	MORAIS (2011)
26	8943013.7806	195250.0052	77.5940	BARRA MINA	ARCANJO (2014)
27	8943014.3689	195250.0261	77.6117	BARRA MINA	ARCANJO (2014)
28	8943014.0706	195250.7110	77.5678	BARRA MINA	ARCANJO (2014)
29	8943040.7389	195276.9889	77.6446	VÉRTICE DO CEG	MORAIS (2011)
30	8943009.5007	195293.5768	77.2609	VÉRTICE DO CEG	MORAIS (2011)
31	8942975.5018	195230.1795	78.4467	VÉRTICE DO CEG	MORAIS (2011)
32	8943007.5101	195212.7589	78.5529	VÉRTICE DO CEG	MORAIS (2011)
33	8943002.0347	195260.4667	77.4937	SPT	BARRETO (2015)
34	8943001.4704	195259.6028	77.5068	(PLACA) PROVA DE CARGA 4	BARRETO (2015)
35	8942999.7810	195260.6834	77.5203	ESTACA DE REAÇÃO	BARRETO (2015)
36	8943003.2239	195258.6589	77.4953	ESTACA DE REAÇÃO	BARRETO (2015)
37	8943011.1375	195265.6975	77.2674	SPT	BARRETO (2015)
38	8943010.3597	195266.3015	77.2379	(PLACA) PROVA DE CARGA 3	BARRETO (2015)
39	8943008.7504	195267.5866	77.2100	ESTACA DE REAÇÃO	BARRETO (2015)
40	8943012.2041	195265.3670	77.2856	ESTACA DE REAÇÃO	BARRETO (2015)
41	8943021.2611	195268.1230	77.2115	SPT	BARRETO (2015)
42	8943034.4274	195302.9585	78.4933	VÉRTICE DO CTEC NOVO	BARRETO (2015)
43	8943019.5112	195310.9526	78.4892	VÉRTICE DO CTEC NOVO	BARRETO (2015)