



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO**

**CENTRO ACADÊMICO DO AGRESTE**

**NÚCLEO DE TECNOLOGIA**

**CURSO DE ENGENHARIA CIVIL**

**ANÁLISE DE ESTACAS CARREGADAS TRANSVERSALMENTE  
UTILIZANDO O MÉTODO DAS DIFERENÇAS FINITAS E PLAXIS 3D  
FOUNDATION**

**HUGO RAFAEL DE ARRUDA FERREIRA**

Caruaru, 2019.

---

HUGO RAFAEL DE ARRUDA FERREIRA

**ANÁLISE DE ESTACAS CARREGADAS TRANSVERSALMENTE  
UTILIZANDO O MÉTODO DAS DIFERENÇAS FINITAS E PLAXIS 3D  
FOUNDATION**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

**Área de concentração:** Geotecnia.

**Orientador:** Prof<sup>o</sup> Dr. José Moura Soares

Caruaru, 2019

---

Catálogo na fonte:  
Bibliotecária – Simone Xavier - CRB/4 - 1242

F383a     Ferreira, Hugo Rafael de Arruda.  
              Análise de estacas carregadas transversalmente utilizando o Método das  
              diferenças finitas e Plaxis 3D Foundation. / Hugo Rafael de Arruda Ferreira. – 2019.  
              83 f. il. : 30 cm.

              Orientador: José Moura Soares.  
              Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) – Universidade Federal de  
              Pernambuco, CAA, Engenharia Civil, 2019.  
              Inclui Referências.

              1. Fundações. 2. Estacas. 3. Levantamento e carregamento. 4. Diferenças finitas.  
I. Soares, José Moura (Orientador). II. Título.

CDD 620 (23. ed.)  
180)

UFPE (CAA 2019-

---

HUGO RAFAEL DE ARRUDA FERREIRA

**ANÁLISE DE ESTACAS CARREGADAS TRANSVERSALMENTE UTILIZANDO O  
MÉTODO DAS DIFERENÇAS FINITAS E PLAXIS 3D FOUNDATION**

Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado ao Curso de Graduação em  
Engenharia Civil da Universidade  
Federal de Pernambuco, como requisito  
parcial para a obtenção do título de  
Bacharel em Engenharia Civil.

Aprovado em: 15 /07 /2019.

**BANCA EXAMINADORA**

---

Prof<sup>o</sup>. Dr. José Moura Soares (Orientador)  
Universidade Federal de Pernambuco

---

Prof<sup>o</sup>. Dr. Artur Paiva Coutinho (Examinador Interno)  
Universidade Federal de Pernambuco

---

Prof<sup>o</sup>. Dr. Flávio Eduardo Gomes Diniz (Examinador Interno)  
Universidade Federal de Pernambuco

---

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente, agradeço a Deus por me manter forte e sempre presente em minha vida.

Agradeço à minha mãe, Ieda Cristina, que sempre me deu forças e os recursos necessários para concluir o curso. E a minha família por todo apoio que recebi em minha jornada acadêmica.

Agradeço à minha namorada, Gisele Melo, por estar presente nos momentos mais importantes da minha vida, me mantendo de cabeça erguida em todas as situações e me apoiando em todos os momentos.

Agradeço aos meus amigos Andrew Saulo, Arthur Almeida, Kalil Ruan, Fellipe Michel e todos os demais, que fizeram com que essa caminhada se tornasse um marco em nossas vidas.

Agradeço aos professores da UFPE, por seus conhecimentos repassados.

Por fim, ao meu orientador, José Moura Soares, que me acolheu como seu orientando e me assistiu com seus conhecimentos acerca do trabalho realizado.

---

## RESUMO

Com o crescimento das cidades e consequentemente, sua verticalização, se torna cada vez mais frequente a construção de edifícios de grande porte onde se faz necessário, grande parte das vezes, do uso de fundações profundas. O presente trabalho vem a contribuir na área de fundações apresentando um estudo de caso relatado na tese de doutorado de Soares (2004) pela Universidade de Brasília. Onde, busca-se realizar uma análise comparativa do comportamento de estacas submetidas a carregamentos transversais, utilizando como base o Método das Diferenças Finitas para o cálculo dos esforços transversais de rotação, momento fletor, cortante e reação do solo e o software *Plaxis 3D Foundation* para modelagem das estruturas e extração das deflexões (deslocamento). Devido a algumas limitações na época da realização do estudo, o autor fez modificações (simplificações) na geometria dos blocos de fundação e nas etapas de modelagem utilizando o software. Este trabalho consistiu em modelar quatro fundações do edifício Confort Flat Taguatinga, sendo três blocos com estacas e uma estaca sem bloco de coroamento. Com os valores dos esforços obtidos, os resultados foram comparados com modelos presentes na literatura. Com isso, observou-se que para a estaca sem bloco de coroamento e o bloco com duas estacas os resultados estavam próximos do previsto na literatura, enquanto os blocos de três e quatro estacas, no que se refere aos esforços de momento e reação do solo, não estiveram em conformidade com a literatura.

**Palavras-chave:** Fundações; Estacas; Carregamentos transversais; Plaxis 3D Foundation; Diferenças Finitas.

---

## ABSTRACT

With the growth of cities and, consequently, their verticalization, becoming increasingly frequent the construction of large buildings where it is necessary, most of the time, the use of deep foundations. The present work comes to the aid of a series of studies containing a case study about the doctoral thesis of Soares (2004) by the University of Brasília. In this work, we propose to perform a comparative analysis of the behavior of the cuttings applied to transversal loads, using as basis the Differences Method for the realization of the transversal calculations of rotation, moment, shear and to make the soil and the software Plaxis 3D Foundation for modeling of structures and extraction of deflections. For sometimes during the study phase, the author made modifications (simplifications) in the geometry of the building blocks and in the modeling phases using the software. This work consisted in modeling four foundations of the Confort Flat Taguatinga building, being three blocks with stakes and a stake without crown block. The values of the efforts obtained, compared to the techniques present in the literature. With this, it is observed that for a stake without a choir block and the block with two stakes, that are found throughout the time in the literature, whereas the block of three and four stakes, does not refer to the changes of moment and the soil reaction, is not in accordance with the literature.

**Keywords:** Foundations; Piles; Transversal loading; Plaxis 3D Foundation; Finite differences.

---

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Principais tipos de fundações profundas. (a) Estaca, (b) Tubulão e (c) Caixão. ....	17
Figura 2 – Fundações mistas: (a) sapata associada à estaca, (b) sapata associada à estaca com material compressível entre elas, (c) radier sobre estacas e (d) radier sobre tubulões .....	18
Figura 3 – (a) Deformações excessivas, (b) colapso do solo, (c) tombamento, (d) deslizamento e (e) colapso estrutural, resultantes de projetos deficientes.....	19
Figura 4 – Estaca submetida a carregamentos horizontais: a) cunha de ruptura, b) distribuição de tensões antes e depois do carregamento. ....	20
Figura 5 – Estaca sob carregamento horizontal – Método de Hansen.....	20
Figura 6 – Coeficientes $K_q$ e $K_c$ de Hansen.....	21
Figura 7 – Mecanismos de ruptura de uma estaca. a) e d) estacas longas, b),c) e e) estacas curtas .....	22
Figura 8 – Transformação de pressão em carga linear .....	24
Figura 9 – Conceito de módulo de reação .....	24
Figura 10 – Variações do módulo com a profundidade .....	25
Figura 11 – Esquema da estaca em função da profundidade.....	27
Figura 12 - Linhas de estado de estacas longas .....	28
Figura 13 – Tipo de elementos 2D/3D e pontos de tensão do PLAXIS.....	30
Figura 14 – Modelagem tridimensional no PLAXIS .....	30
Figura 15 – Localização e Vista do Edifício Confort Flat Taguatinga.....	31
Figura 16 – Esqueleto dos elementos estruturais do Edifício Confort Flat Taguatinga .....	32
Figura 17 – Vista Geral do contorno do edifício e garagem .....	32
Figura 18 – Planta de Fundação do Edifício Confort Flat Taguatinga.....	33
Figura 19 – Interface inicial do Plaxis 3D.....	34
Figura 20 – Dados Iniciais.....	34
Figura 21 – Input do Plaxis .....	35
Figura 22 – Parâmetros do solo e do concreto.....	35
Figura 23 – “Borehole” .....	37
Figura 24 – Workplanes .....	37
Figura 25 – Desenho do bloco com três estacas .....	38
Figura 26 – Discretização das malhas 2D e 3D.....	38
Figura 27 – Fases de Cálculo.....	39
Figura 28 – Material da estaca e bloco .....	40



---

Figura 29 – Força Horizontal .....	40
Figura 30 – Cálculo sendo executado pelo software .....	41
Figura 31 – Estaca sem bloco de coroamento .....	42
Figura 32 – Vista do modelo (sem o solo) .....	43
Figura 33 – Carregamento na estaca .....	43
Figura 34 – Deformação no topo da estaca .....	44
Figura 35 – Trecho da tabela de deslocamentos.....	44
Figura 36 – Conectividade dos nós da malha, destacando-se o nó no centro da estaca .....	45
Figura 37 – Gráfico de Deslocamento x Profundidade (Estaca sem bloco).....	47
Figura 38 – Gráfico da Rotação x Profundidade (Estaca sem bloco).....	48
Figura 39 – Gráfico de Momento x Profundidade (Estaca sem bloco) .....	49
Figura 40 – Gráfico de Cortante x Profundidade (Estaca sem bloco) .....	50
Figura 41 – Gráfico da Reação do Solo x Profundidade (Estaca sem bloco).....	51
Figura 42 – Duas estacas com Bloco de Coroamento .....	51
Figura 43 – Vista do modelo de duas estacas com bloco de coroamento (sem solo).....	52
Figura 44 – Carregamento no Sistema .....	52
Figura 45 – Deslocamento no topo do sistema.....	53
Figura 46 – Gráfico do Deslocamento x Profundidade (Bloco com duas estacas) .....	55
Figura 47 – Gráfico da Rotação x Profundidade (Bloco com duas estacas) .....	56
Figura 48 – Gráfico do Momento x Profundidade (Bloco com duas estacas).....	57
Figura 49 - Gráfico de Cortante x Profundidade (Bloco com duas estacas) .....	58
Figura 50 – Gráfico da Reação do Solo x Profundidade (Duas estacas com bloco) .....	59
Figura 51 – Dimensões em metro do bloco de três estacas e numeração das estacas .....	60
Figura 52 – Vista do modelo de três estacas com bloco de coroamento (sem solo) .....	60
Figura 53 – Carregamento do Sistema .....	60
Figura 54 – Deslocamentos no topo do sistema .....	61
Figura 55 – Gráfico do Deslocamento x Profundidade (Bloco com três estacas).....	64
Figura 56 – Gráfico da Rotação x Profundidade (Bloco com três estacas).....	65
Figura 57 – Gráfico de Momento x Profundidade (Bloco com três estacas) .....	66
Figura 58 – Gráfico do Cortante x Profundidade (Bloco com três estacas).....	67
Figura 59 - Gráfico da Reação do Solo x Profundidade (Bloco com três estacas).....	68
Figura 60 – Dimensões do bloco de quatro estacas e numeração das estacas.....	68
Figura 61 – Vista do modelo do bloco de quatro estacas (sem o solo) .....	69
Figura 62 – Carregamento do Sistema .....	69

---

Figura 63 – Deformações totais no topo da estrutura.....	70
Figura 64 – Deslocamento x Profundidade (Bloco com quatro estacas).....	73
Figura 65 – Rotação x Profundidade (Bloco com quatro estacas) .....	74
Figura 66 – Momento x Profundidade (Bloco com quatro estacas) .....	75
Figura 67 – Cortante x Profundidade (Bloco com quatro estacas).....	76
Figura 68 – Reação do solo x Profundidade (Bloco com quatro estacas) .....	77
Figura 69 – Gráfico do Deslocamento máximo x Número de estacas .....	78
Figura 70 - Gráfico da Rotação máxima x Número de estacas .....	79
Figura 71 - Gráfico do Momento máximo x Número de estacas .....	79
Figura 72 - Gráfico do Cortante máximo x Número de estacas .....	79
Figura 73 - Gráfico da Reação do Solo x Número de estacas .....	80

---

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Valores do módulo de reação K para argilas pré-adensadas .....	25
Tabela 2 – Valores da constante do coeficiente de reação horizontal .....	26
Tabela 3 – Parâmetros do Solo modelado .....	36
Tabela 4 – Tabela de carregamentos nas fundações selecionadas.....	41
Tabela 5 – Deslocamento em função da profundidade obtido via Plaxis 3D Foundation.....	45
Tabela 6 – Esforços calculados através do MDF (Estaca sem bloco) .....	46
Tabela 7 – Deslocamentos em função da profundidade (Estaca sem bloco).....	46
Tabela 8 – Rotação em função da profundidade (Estaca sem bloco) .....	47
Tabela 9 – Momento em função da profundidade (Estaca sem bloco) .....	48
Tabela 10 – Cortante em função da profundidade (Estaca sem bloco) .....	49
Tabela 11 – Reação do solo em função da profundidade (Estaca sem bloco).....	50
Tabela 12 – Deslocamento em função da profundidade para as duas estacas.....	53
Tabela 13 – Esforços calculados através do MDF (Estaca 1) .....	54
Tabela 14 - Esforços calculados através do MDF (Estaca 2) .....	54
Tabela 15 – Deslocamento em função da profundidade (Bloco com duas estacas).....	55
Tabela 16 –Rotação em função da profundidade (Bloco com duas estacas).....	56
Tabela 17 – Momento em função da profundidade (Bloco com duas estacas) .....	57
Tabela 18 – Cortante em função da profundidade (Bloco com duas estacas).....	58
Tabela 19 – Reação do Solo em função da profundidade para as duas estacas com bloco.....	59
Tabela 20 – Deslocamentos em função da profundidade para as três estacas com bloco .....	61
Tabela 21 – Esforços calculados pelo MDF (Estaca 1).....	62
Tabela 22 – Esforços calculados pelo MDF (Estaca 2).....	62
Tabela 23 – Esforços calculados pelo MDF (Estaca 3).....	63
Tabela 24 – Deslocamento em função da profundidade (Bloco com três estacas) .....	63
Tabela 25 – Rotação em Função da profundidade (Bloco com três estacas) .....	64
Tabela 26 – Momento em função da profundidade (Bloco com três estacas).....	65
Tabela 27 – Cortante em função da profundidade (Bloco com três estacas) .....	66
Tabela 28 – Reação do Solo em função da profundidade (Bloco com três estacas) .....	67
Tabela 29 – Deslocamento em função da profundidade via Plaxis 3D Foundation.....	70
Tabela 30 – Esforços calculados pelo MDF (Estaca 1).....	71
Tabela 31 – Esforços calculados pelo MDF (Estaca 2).....	71
Tabela 32 - Esforços calculados pelo MDF (Estaca 3) .....	72

---

Tabela 33 - Esforços calculados pelo MDF (Estaca 4) .....	72
Tabela 34 – Deslocamento em função da profundidade (Bloco com quatro estacas) .....	73
Tabela 35 – Rotação em função da profundidade (Bloco com quatro estacas).....	74
Tabela 36 – Momento em função da profundidade (Bloco com quatro estacas) .....	75
Tabela 37 – Cortante em função da profundidade (Bloco com quatro estacas).....	76
Tabela 38 – Reação do Solo em função da profundidade (Bloco com quatro estacas).....	77
Tabela 39 – Resumo de esforços que atenderam ao previsto na literatura.....	78
Tabela 40 – Resumo dos valores máximos em módulo .....	78

---

## SUMARIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>15</b>
<b>1.1</b>	<b>Justificativa.....</b>	<b>16</b>
<b>1.2</b>	<b>Motivação.....</b>	<b>16</b>
<b>1.3</b>	<b>Objetivos .....</b>	<b>16</b>
1.3.1	Objetivo Geral.....	16
1.3.2	Objetivos Específicos.....	16
<b>2</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO .....</b>	<b>17</b>
<b>2.1</b>	<b>Fundações .....</b>	<b>17</b>
2.1.1	Fundações superficiais .....	17
2.1.2	Fundações profundas .....	17
2.1.3	Requisitos de um Projeto de Fundações .....	18
<b>2.2</b>	<b>Determinação da carga de ruptura .....</b>	<b>19</b>
<b>2.3</b>	<b>Cálculo da carga de ruptura .....</b>	<b>20</b>
2.3.1	Método de Hansen .....	20
2.3.2	Método de Broms.....	22
2.3.2.1	<i>Mecanismos de Ruptura</i> .....	23
2.3.3	Coeficiente e Módulo de Reação Horizontais.....	23
<b>2.4</b>	<b>Método das Diferenças Finitas - MDF .....</b>	<b>26</b>
<b>2.5</b>	<b><i>Plaxis 3D Foundation</i> .....</b>	<b>29</b>
2.5.1	Elementos Finitos Tridimensionais.....	29
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA.....</b>	<b>31</b>
<b>3.1</b>	<b>Confort Flat Taguatinga.....</b>	<b>31</b>
<b>3.2</b>	<b>Procedimento de Modelagem e Cálculo no <i>Plaxis 3D Foundation</i> .....</b>	<b>33</b>
3.2.1	Dados Iniciais.....	34
3.2.2	Determinação dos materiais e <i>BoreHole</i> .....	35
3.2.3	Workplanes .....	37

---

3.2.4	Desenho das estruturas e criação das malhas 2D e 3D .....	37
3.2.5	Fases de cálculo .....	39
3.2.6	Modelagem da estrutura.....	39
<b>4</b>	<b>RESULTADOS .....</b>	<b>42</b>
<b>4.1</b>	<b>Estaca sem bloco de coroamento – P29.....</b>	<b>42</b>
4.1.1	Deslocamentos .....	46
4.1.2	Rotação .....	47
4.1.3	Momento .....	48
4.1.4	Cortante.....	49
4.1.5	Reação do Solo .....	50
<b>4.2</b>	<b>Duas estacas com bloco de coroamento – P25 .....</b>	<b>51</b>
4.2.1	Deslocamento.....	54
4.2.2	Rotação .....	55
4.2.3	Momento .....	56
4.2.4	Cortante.....	57
4.2.5	Reação do Solo .....	58
<b>4.3</b>	<b>Três estacas com bloco de coroamento – P24 .....</b>	<b>59</b>
4.3.1	Deslocamento.....	63
4.3.2	Rotação .....	64
4.3.3	Momento .....	65
4.3.4	Cortante.....	66
4.3.5	Reação do Solo .....	67
<b>4.4</b>	<b>Quatro estacas com bloco de coroamento – P27 .....</b>	<b>68</b>
4.4.1	Deslocamento.....	72
4.4.2	Rotação .....	73
4.4.3	Momento .....	74
4.4.4	Cortante.....	75

---

4.4.5	Reação do Solo .....	76
4.5	<b>Resumo dos resultados .....</b>	<b>77</b>
5	<b>CONCLUSÕES.....</b>	<b>81</b>
6	<b>SUJESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS .....</b>	<b>82</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>83</b>

---

## 1 INTRODUÇÃO

As fundações são elementos estruturais que tem como objetivo transmitir as cargas advindas da superestrutura ao solo ou rocha, sendo estas subdivididas em dois grupos: Fundações Superficiais (Rasas ou diretas) e Fundações Profundas. Onde, segundo a ABNT NBR6122:2010, Fundações superficiais são aquelas cuja profundidade de assentamento seja menor que duas vezes a menor das dimensões da fundação. Já as fundações profundas são aquelas que sua ponte ou base estão assentas a no mínimo 3m, sendo superior a duas vezes a sua menor dimensão.

A escolha da fundação que será executada depende, por exemplo, de fatores como topografia, dados geológicos, dados da estrutura, dados sobre construções vizinhas, custo, entre outros. As fundações diretas se dividem em bloco, sapata, sapata corrida, sapata associada, viga de fundação, grelha, e radier, porém não é o foco do presente trabalho. As fundações profundas se dividem em estacas, tubulões e caixões.

O tipo de fundação utilizada para este estudo é: estaca, mais precisamente, estacas com blocos de coroamento, que são elementos maciços de concreto armado que solidarizam as “cabeças” de um grupo de estacas. Segundo Rabello (1949), a transmissão dos carregamentos de um pilar para um grupo de duas ou mais estacas é realizado por blocos de fundação.

Segundo Alonso (1989), as fundações, como qualquer outro elemento estrutural, devem ter em seu projeto e execução, garantias de que, sob efeito de carregamentos de serviço, atenda as condições mínimas de: segurança, no que diz respeito às resistências tanto dos elementos estruturais quanto do solo: funcionalidade, fazendo com que o elemento projetado garanta deslocamentos compatíveis com o fim ao qual o mesmo foi destinado; e durabilidade, tendo uma vida útil no mínimo igual à da superestrutura.

Há diferentes modelos de representação do solo, e estes podem agir de forma diferente de acordo com cada geometria de fundação. Sendo assim, com o auxílio de ferramentas computacionais pode-se realizar análises de comportamentos de solo, capacidade de carga, interação solo-estrutura, entre outros. No presente estudo, será utilizado o software PLAXIS 3D FOUNDATION, que é utilizado especificamente para projetos de fundações. Com o auxílio deste software, será realizada a modelagem dos conjuntos de fundações, a análise dos resultados obtidos e consequente comparação entre os resultados obtidos e os pressupostos na literatura.



---

## 1.1 Justificativa

Quando se trata de um projeto de fundações, segurança, eficácia e economia são fatores primordiais. Fazendo-se necessário uma análise prévia, utilizando simulações, antes da implantação de um projeto. Assim, este trabalho é justificado pela necessidade de investigar estacas sob carregamentos transversais de um caso real, quanto a mudanças significativas em seu comportamento utilizando o software *Plaxis 3D Foundation* e o Método das Diferenças Finitas.

## 1.2 Motivação

O presente trabalho foi motivado por sugestões para pesquisas futuras do aluno, Ângelo Wanderley Lopes Mélo (2018), o qual realizou um estudo comparativo de fundações sobre apoios elásticos e sobre modelos constitutivos de solo, onde foram levados em conta dois pontos adicionais quanto a análise de estacas carregadas transversalmente. São os seguintes:

- Realizar um estudo considerando solos heterogêneos;
- Aprofundar o estudo para as estacas do estudo de caso referido.

## 1.3 Objetivos

### 1.3.1 Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho é realizar um estudo comparativo do comportamento de estacas carregadas transversalmente utilizando o Método das Diferenças Finitas e o software *Plaxis 3D Foundation*.

### 1.3.2 Objetivos Específicos

- Modelar o solo, as fundações e os carregamentos em três dimensões utilizando o *Plaxis 3D Foundation*;
- Fazer simulações da estrutura e do solo utilizando o *Plaxis 3D Foundation*;
- Obter o deslocamento horizontal da estaca em função da profundidade via *Plaxis 3D Foundation*;
- Calcular os esforços de Rotação, Momento, Cortante e Reação do Solo pelo Método das Diferenças Finitas.
- Comparar os resultados obtidos com as metodologias presentes na literatura.

---

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1 Fundações

As fundações são elementos estruturais que tem como objetivo transmitir as cargas advindas da superestrutura ao solo ou rocha. Sendo estas subdivididas em dois grupos: Fundações Superficiais (Rasas ou diretas) e Fundações Profundas.

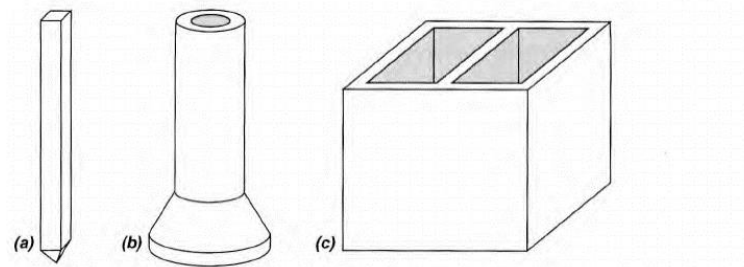
#### 2.1.1 Fundações superficiais

Segundo a ABNT NBR6122:2010, a fundação superficial é um elemento que transmite as cargas ao terreno pelas tensões sob a base da fundação, sendo sua profundidade de assentamento inferior a duas vezes a menor dimensão da fundação. São subdivididas em blocos, sapata, sapata corrida, sapata associada, vigas de fundação, grelha e radier. (VELLOSO E LOPES, 2004)

#### 2.1.2 Fundações profundas

Segundo a ABNT NBR6122/2010, a fundação profunda é um elemento que tem sua carga transmitida ao terreno pela base (resistência de ponta) ou por sua superfície lateral (resistência de fuste) ou por uma combinação de ambas, devendo, ainda, sua ponta ou base estar assentada em profundidade superior ao dobro de sua menor dimensão em planta, e no mínimo 3 m. São subdivididas em estaca, tubulão e caixão. Exemplificadas na Figura 1. (VELLOSO E LOPES, 2004)

*Figura 1 – Principais tipos de fundações profundas. (a) Estaca, (b) Tubulão e (c) Caixão.*



Fonte: Velloso e Lopes (2010)

Estaca – é um elemento de fundação profunda, que tem a função de receber os carregamentos advindos da superestrutura e transferi-los para o solo ou rocha o qual está apoiado. Sendo sua resistência dada pela soma da resistência de fuste (atrito) e a resistência de

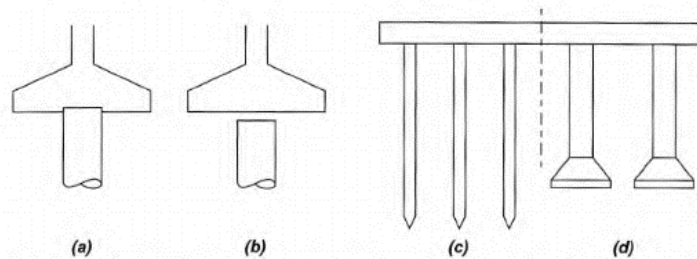
ponta. Segundo Velloso e Lopes (2004) para sua execução faz-se necessário ferramentas ou equipamento e esta pode ser feita por cravação, escavação, percussão ou prensagem, ou mista. Segundo a ABNT NBR6122:2010 as estacas podem ser executadas *in loco*, pré-moldadas ou mistas.

Tubulão – é um elemento de fundação profunda, escavada, cuja geometria é cilíndrica e diferente da estaca, sua resistência é dada preponderantemente pela ponta. Em sua etapa final, faz-se necessário a descida de pessoas para alargamento da base e/ou limpeza do fundo da escavação. (ABNT NBR6122:2010)

Caixão – é um elemento de fundação profunda, cuja geometria é prismática. É instalado por escavação interna e concretado na superfície. (VELLOSO E LOPES, 2004)

Segundo Velloso e Lopes (2010) existem, ainda, casos em que há a utilização de fundações mistas, ou seja, combinação de fundação superficial com profunda. Como mostrado na Figura 2.

Figura 2 – Fundações mistas: (a) sapata associada à estaca, (b) sapata associada à estaca com material compressível entre elas, (c) radier sobre estacas e (d) radier sobre tubulões



Fonte: Velloso e Lopes (2004)

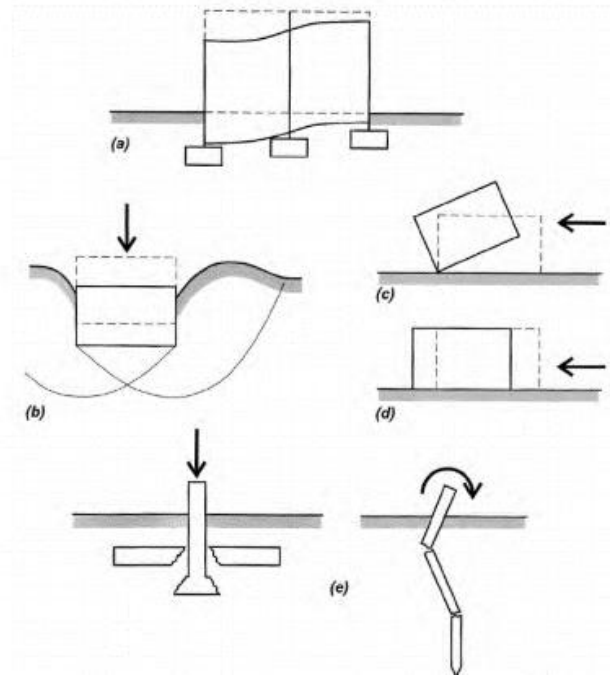
### 2.1.3 Requisitos de um Projeto de Fundações

Segundo Hachich et al. (1998), um projeto de fundações deve atender alguns requisitos básicos, são eles:

- a) Deformações aceitáveis sob condições de trabalho;
- b) Segurança adequada ao colapso do solo da fundação (*estabilidade “externa”*);
- c) Segurança adequada ao colapso dos elementos estruturais (*estabilidade “interna”*).

Caso tais requisitos não sejam atendidos, as consequências estão mostradas na Figura 3.

Figura 3 – (a) Deformações excessivas, (b) colapso do solo, (c) tombamento, (d) deslizamento e (e) colapso estrutural, resultantes de projetos deficientes



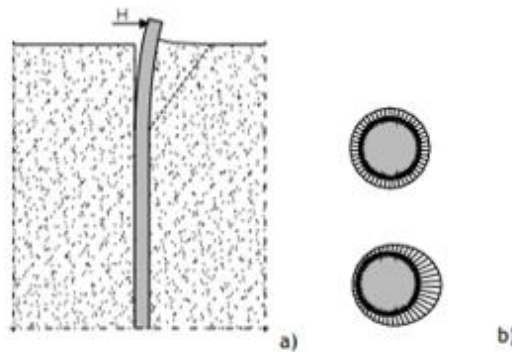
Fonte: Velloso e Lopes (2010)

## 2.2 Determinação da carga de ruptura

Segundo Sousa, C.T. (2006), quando na cabeça de uma estaca, sendo esta livre de se mover em qualquer direção, uma carga horizontal é aplicada é inicialmente equilibrada pelo solo próximo a superfície. Como consequência deste carregamento, o solo situado na face anterior da estaca, ou seja, no sentido do carregamento, sofre um acréscimo de tensão. De forma contrária se dá na face posterior à estaca.

Com o aumento dessa carga aplicada, o solo que se encontra na face posterior da estaca tende a separar-se da mesma, enquanto o solo que apresenta um maior confinamento começa a formar uma cunha de ruptura que se movimenta verticalmente como pode-se observar na Figura 4.

Figura 4 – Estaca submetida a carregamentos horizontais: a) cunha de ruptura, b) distribuição de tensões antes e depois do carregamento.



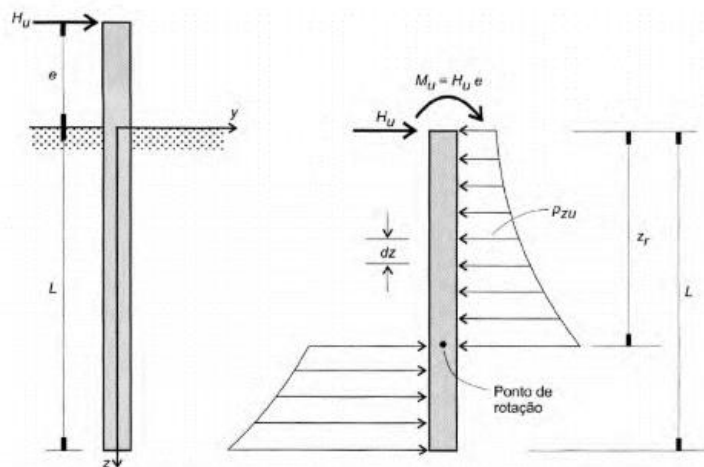
Fonte: Sousa (2006)

## 2.3 Cálculo da carga de ruptura

### 2.3.1 Método de Hansen

Segundo Velloso e Lopes (2010) o método de Hansen é um método de determinação de capacidade de carga de estacas que estão sob carregamentos transversais, cuja formulação é baseada na teoria do empuxo de terra. Tendo como vantagem o fato de ser aplicado a solos com resistência ao cisalhamento com parâmetros  $c$  e  $\phi$ , e como desvantagem, sua aplicação é restrita a estacas curtas. Pode-se observar a geometria do problema na Figura 5.

Figura 5 – Estaca sob carregamento horizontal – Método de Hansen



Fonte: Velloso e Lopes (2010)

Sendo  $H_u$  a carga horizontal máxima aplicada que faz com que a reação do terreno atinja seu valor máximo,  $e$  a excentricidade,  $L$  o comprimento enterrado,  $B$  o diâmetro da estaca,  $M_u$  o momento causado pelo carregamento excêntrico,  $P_{zu}$  a função que define o empuxo passivo no solo e  $z_r$  a profundidade de rotação da estaca. Com isso, tem-se o equilíbrio de forças e momentos:

$$\sum Fy = 0 \quad H_u - \int_0^{z_r} P_{zu} * B * dz + \int_{z_r}^L P_{zu} * B * dz = 0 \quad (1)$$

$$\sum M = 0 \quad H_u * e + \int_0^{z_r} P_{zu} * Bz * dz - \int_{z_r}^L P_{zu} * Bz * dz = 0 \quad (2)$$

Sendo então, conhecida a distribuição de  $P_{zu}$  e com o auxílio das equações (1) e (2), por tentativas, pode-se determinar os valores da carga horizontal máxima  $H_u$  e da profundidade de rotação  $z_r$ . Hansen (1961) fornece:

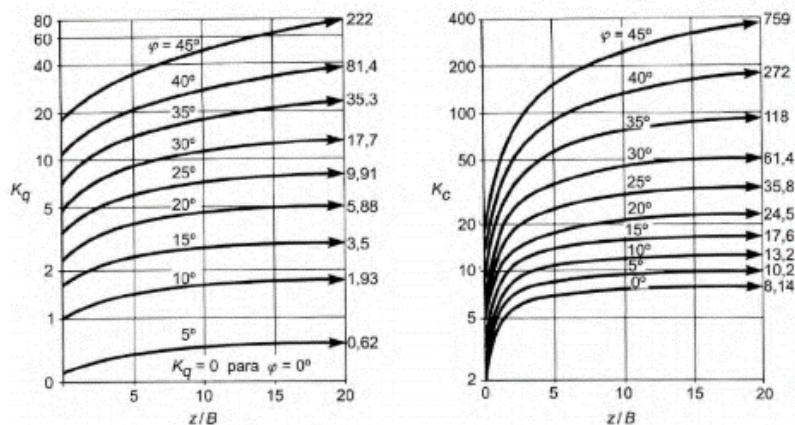
$$P_{zu} = \sigma'_{vz} * Kq + c * Kc \quad (3)$$

Sendo:

$\sigma'_{vz}$  = Tensão vertical efetiva no nível  $z$ ;

$Kq$  e  $Kc$  = Coeficientes de empuxo que dependem de  $\varphi$  e de  $z/B$  dados na Figura 6.

Figura 6 – Coeficientes  $Kq$  e  $Kc$  de Hansen



Fonte: Velloso e Lopes (2010)

Com isso, utilizando-se de tentativas, determina-se o valor da profundidade de rotação afim de se obter o valor da carga de ruptura  $H_u$ , sendo necessário minorá-la para obter a carga admissível  $H_{adm}$ .

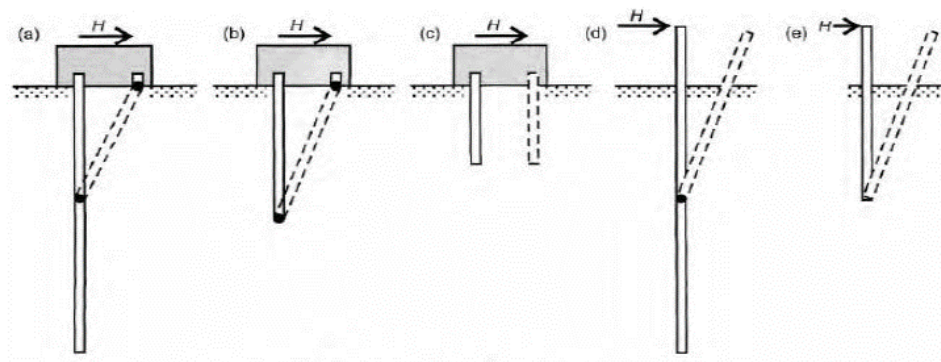
### 2.3.2 Método de Broms

Segundo Velloso e Lopes (2010), o método de Broms tem como base a filosofia dos métodos de ruptura. Partindo do pressuposto de que um projeto de grupo de estacas carregadas deve atender algumas exigências, são elas:

- i) Não pode ocorrer, em quaisquer circunstâncias, a ruptura completa do grupo de estacas ou da estrutura de suporte.
- ii) Não podendo ocorrer deslocamentos devido as cargas de trabalho que venham a prejudicar o funcionamento para o qual a fundação e/ou a superestrutura foi projetada.

Com isso, um projeto será definido pelos deslocamentos advindos das cargas de trabalho quando pequenos deslocamentos possam ser tolerados e caso contrário, será definido pela resistência à ruptura das estacas. Por conseguinte, caso haja algum dos mecanismos de ruptura mostrados na Figura 7, haverá, então, a ruptura de uma fundação em estacas.

Figura 7 – Mecanismos de ruptura de uma estaca. a) e d) estacas longas, b),c) e e) estacas curtas



Fonte: Velloso e Lopes (2010)

Como pode ser visto na Figura 7 (a) e (d) representam ruptura pela formação de uma rótula plástica em estacas longas, sendo as demais rupturas dadas pela resistência do solo vencida.

### 2.3.2.1 Mecanismos de Ruptura

Como visto na Figura 7, os mecanismos de ruptura variam de acordo com a geometria do sistema. Assim, segundo Décourt (1998) uma categorização bastante utilizada do estudo destes casos é a seguinte:

- a) Estacas curtas de topo livre;
- b) Estacas curtas de topo fixo;
- c) Estacas longas de topo livre;
- d) Estacas longas de topo fixo;

Sendo consideradas estacas de topo fixo aquelas que vinculado ao seu topo estão blocos de coroamento. Velloso e Lopes (2010) representam os mecanismos de ruptura, quanto ao tipo de categorização mencionada acima, da seguinte forma:

**Estacas curtas livres:** é o caso em que, como um corpo rígido, a estaca gira em torno de um ponto a uma certa profundidade. Como mostrado na Figura 7e.

**Estacas longas livres:** ocorre a ruptura a resistência à ruptura (ou plastificação) da estaca processa-se a uma certa profundidade. Como mostrado na Figura 7d.

**Estacas curtas impedidas:** tendo uma translação de corpo rígido, há a ruptura. Como mostrado na Figura 7c.

**Estacas longas impedidas:** a ruptura ocorre no momento em que se formam rótulas plásticas. Como na Figura 7a.

### 2.3.3 Coeficiente e Módulo de Reação Horizontais

Segundo Alonso (1989), estacas ativas são aquelas que estão sob ação de cargas externas horizontais, transmitindo ao solo esforços horizontais. Já as passivas, são aquelas que os esforços horizontais ao decorrer do seu fuste, são advindos da movimentação do solo.

Define-se o  $k_z$ , coeficiente de reação horizontal de um solo em uma certa profundidade  $z$  é dado pela relação entre a pressão unitária  $\sigma_z$  e o deslocamento sofrido pelo solo,  $y$ . Conforme a equação (4).

$$K_z = \frac{\sigma_z}{y} \quad (4)$$

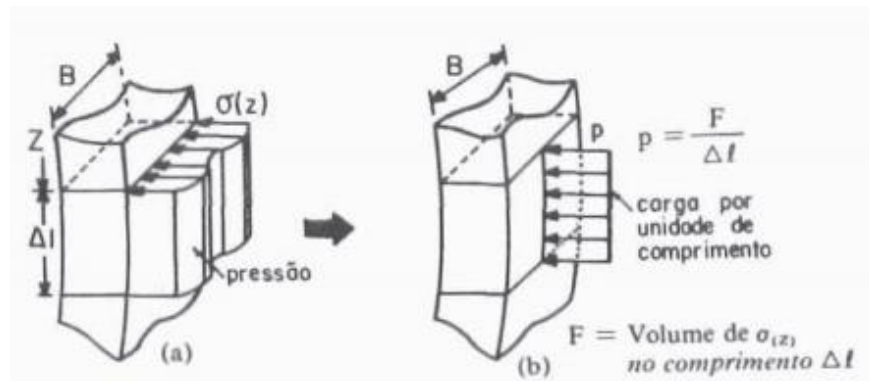
Devido ao fato de a estaca ser “rígida” no plano horizontal, em comparação com o solo, não se torna constante a distribuição de pressão ao longo da face do fuste encostada ao solo e,



portanto, o valor do coeficiente de reação horizontal, varia de ponto a ponto nesta seção. Levando em consideração o fato acima citado, segundo Alonso (1989) torna-se mais viável a utilização do Módulo de reação horizontal, denominado K e mostrado na equação (5). Diferindo do  $K_z$ , é definido como a razão entre a reação aplicada pelo solo à estaca (em unidades de força por comprimento) e o deslocamento sofrido pelo solo, y segundo. Como visto na Figura 8 e 9.

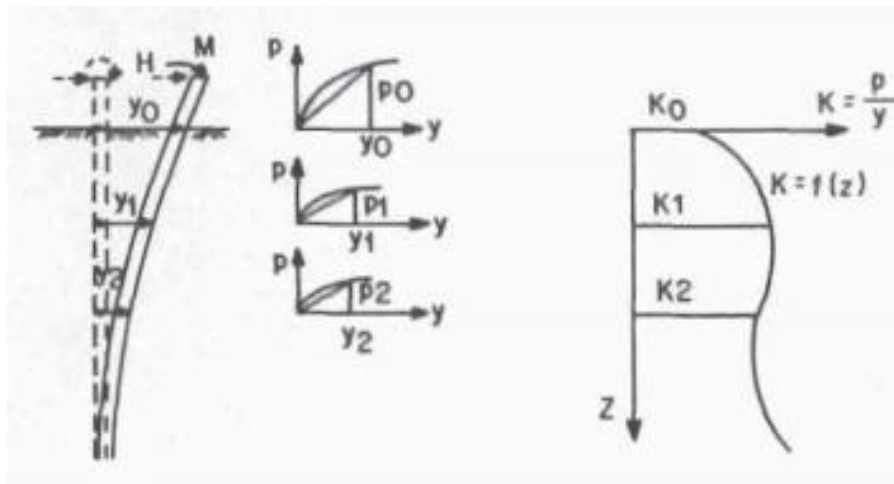
$$K = \frac{P}{y} \quad (5)$$

Figura 8 – Transformação de pressão em carga linear



Fonte: Alonso (1989)

Figura 9 – Conceito de módulo de reação



Fonte: Alonso (1989)

Um aspecto importante afirmado por Alonso (1989) é que para se realizar o estudo de uma estaca carregada transversalmente faz-se necessário prever a variação do K ao longo da profundidade.

Segundo Alonso (1989), no caso em que o solo apresenta características de deformação quase que independentes em relação a profundidade admite-se um  $K$  constante ou com crescimento linear. Este é o caso de argilas pré-adensadas (rijas a duras). A Figura 10 ilustra as duas situações. O segundo caso, o solo apresenta características de deformações proporcionais a profundidade, como solos de comportamento arenoso e as argilas normalmente adensadas (moles). Para estes solos, utiliza-se a equação (6).

$$K = n h * z \quad (6)$$

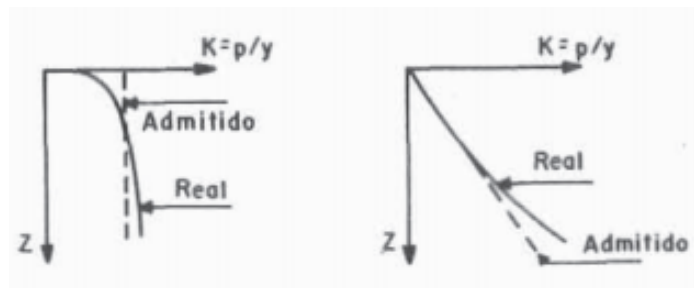
Sendo:

$\eta_h$  = constante do coeficiente de reação horizontal;

$z$  = profundidade;

$K$  = módulo de reação horizontal.

Figura 10 – Variações do módulo com a profundidade



Fonte: Alonso (1989)

Os valores do módulo de reação horizontal  $K$  e da constante do coeficiente de reação horizontal  $\eta_h$  podem ser obtidos nas Tabelas 1 e 2 segundo Davisson (1963, apud Alonso 1989).

Tabela 1 – Valores do módulo de reação  $K$  para argilas pré-adensadas

Argilas pré - adensadas		Valor de $K$ (MPa)	
Consistência	$q_u$ (kPa)	Ordem de grandeza	Valor provável
Média	20 a 40	0,7 a 4,0	0,8
Rija	100 a 200	3,0 a 6,5	5
Muito rija	200 a 400	6,5 a 13,0	10
Dura	> 400	> 13	19,5

Fonte: Adaptada de Alonso (1989)

Tabela 2 – Valores da constante do coeficiente de reação horizontal

Compacidade da areia ou consistência da argila	Valor de $\eta h$	
	Seca	Submersa
Areia fofa	2,6	1,5
Areia medianamente	8	5
Areia compacta	20	12,5
Silte muito fofo	-	0,1 a 0,3
Argila muito mole	-	0,55

Fonte: Adaptada de Alonso (1989)

Segundo Alonso (1989), a variação dos valores do módulo de reação e da constante do coeficiente de reação horizontal são de difícil previsão, pois os mesmos dependem de diversos fatores, inclusive da natureza do solo. Os erros na avaliação de tais valores têm pouca influência nos cálculos de momentos, devido ao fato da equação para determinação englobar uma raiz quarta no caso de  $K = \text{constante}$  ou uma raiz quinta no caso em que  $K = \eta h \cdot z$ . Não sendo necessário, então, refinar ou sofisticar a lei de variação de módulo de reação com a profundidade, pois, utilizando a lei de variação simples, pode-se obter resultados satisfatórios

Outro aspecto importante citado por Alonso (1989), é o fato de que o solo que ocorre nos primeiros metros exerce influência direta no comportamento da estaca. Por exemplo, no caso de areias, o comportamento da estaca sofre interferência até a profundidade  $z=T$ , onde o  $T$  é dado pela equação (7):

$$T = \sqrt[5]{\frac{EI}{\eta h}} \quad (7)$$

Sendo:

$EI$  = rigidez da estaca;

No caso de argilas pré-adensadas, o valor refinado de  $K$  deve ser restrito a profundidade  $z=0,4 \cdot R$ , onde o  $R$  é dado pela equação (8):

$$R = \sqrt[4]{\frac{EI}{K}} \quad (8)$$

## 2.4 Método das Diferenças Finitas - MDF

O Método das Diferenças Finitas aplicado a estacas, segundo Poulos e Davis (1980), consiste em dividir a mesma em  $n+1$  elementos iguais e de comprimento  $\delta$  e com isso, calcular os esforços em função da profundidade. No que se refere a estacas imersas em um solo o qual o seu coeficiente de reação horizontal ( $k_h$ ) não é constante em função da profundidade, utilizar

o Método das Diferenças Finitas nos traz soluções mais satisfatórias. Sendo a equação (9) uma equação diferencial para uma estaca imersa em um meio elástico.

$$EI * \frac{\partial^4 y}{dz^4} + Kh * y * D = 0 \quad (9)$$

Sendo:

**E** o módulo de elasticidade do material da estaca;

**I** o momento de inércia da seção da estaca;

**Kh** o Coeficiente de reação horizontal do Solo.

**D** o diâmetro da estaca.

A equação acima, é aplicada em uma estaca de comprimento L, dividida em “n+1” elementos iguais de altura  $\delta$ , com carregamento transversal H e Momento M, seguindo o esquema da Figura 11.

Figura 11 – Esquema da estaca em função da profundidade



Fonte: Poulos e Davis (1980)

A Figura 12 apresenta as correspondências entre as curvas de deslocamento, rotação, momento, cortante e reação do solo para uma estaca longa sob ação de carregamentos transversais segundo Coduto (1994).

Figura 12 - Linhas de estado de estacas longas



Fonte: Coduto (1994)

Com base nas informações destacadas na Figura 11, tem-se que os esforços de rotação, momento, cortante e a reação do solo são descritos pelas Equações (10), (11), (12) e (13), respectivamente:

$$\theta_i = \frac{y_{i+1} - y_{i-1}}{2 * \delta} \quad (10)$$

$$M_i = EI * \frac{(y_{i+1} - 2y_i + y_{i-1}))}{\delta^2} \quad (11)$$

$$Q_i = EI * \frac{(y_{i+2} - 2y_{i+1} + 2y_{i-1} - y_{i-2}))}{2 * \delta^3} \quad (12)$$

$$P_i = EI * \frac{(y_{i+2} - 4y_{i+1} + 6y_i - 4y_{i-1} + y_{i-2}))}{\delta^4} \quad (13)$$

Para os dois pontos fictícios adotados acima do topo da estaca e os dois pontos em sua base, utilizando artifícios numéricos e condições de contorno, temos as Equações (14), (15), (16) e (17).

$$y_{-1} = -\frac{2HL^3}{Ep*Ip*n^3} + 2y_{-1} - y_2 + y_3 \quad (14)$$

$$y_{-2} = \frac{ML^2}{Ep*Ip*n^2} + 2y_1 - y_2 \quad (15)$$

$$y_{n+2} = 2y_{n+1} - y_n \quad (16)$$

$$y_{n+3} = y_{n+1} - 2y_n + 2y_{n+2} \quad (17)$$

## 2.5 Plaxis 3D Foundation

O software PLAXIS foi desenvolvido na Holanda, na Universidade Técnica de Delft, pela empresa PLAXIS. Os softwares desenvolvidos por esta empresa são baseados na análise de elementos finitos, com o intuito de realizar análises de tensões e deformações bidimensionais (2D) e tridimensionais (3D), com uma aplicação vasta na área de geotecnia. A empresa conta com versões do PLAXIS que dependem da especificidade do problema a ser estudado. Uma utilizada na modelagem do solo e diversos problemas de geotecnia, como construção de túneis, análise de estabilidade de talude, construção de barragens, é a versão TUNNEL. Apesar desta ser uma ferramenta essencialmente usada em modelagem de túneis, Soares (2004) fez uso desta versão na modelagem 3D de blocos de estacas submetidos a carregamentos oriundos de duas edificações analisadas. Outra ferramenta com destaque para o estudo de fundações é a versão FOUNDATION, utilizada na modelagem do solo junto a estrutura da fundação.

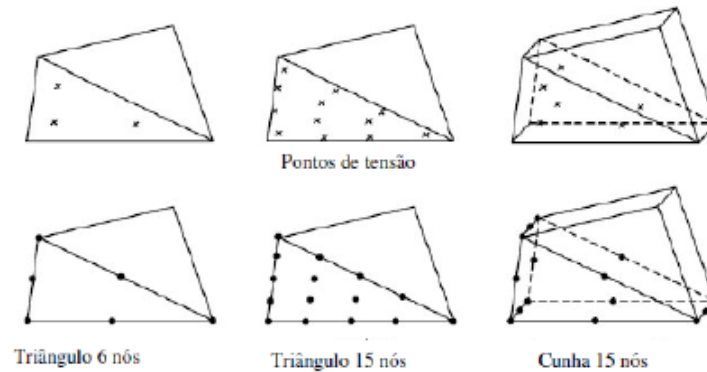
Os softwares da empresa PLAXIS são divididos em três partes: *Input*, onde é feita toda a modelagem do problema e os cálculos (pré-processamento); *Output*, onde são obtidas todas as partes de visualização de resultados (pós-processamento); e por fim, o *Curves*, onde obtém-se a construção dos gráficos oriundos dos resultados.

### 2.5.1 Elementos Finitos Tridimensionais

Segundo Soares (2004), o PLAXIS 2D e 3D são empregados, hoje em dia, em estruturas de contenção, interação solo-estrutura, estabilidade de taludes, barragens, dentre outros. Onde,

a versão bidimensional trabalha com elementos triangulares de 6 e 15 nós e a tridimensional, elementos do tipo cunha com 15 nós. Como exemplificado na Figura 11.

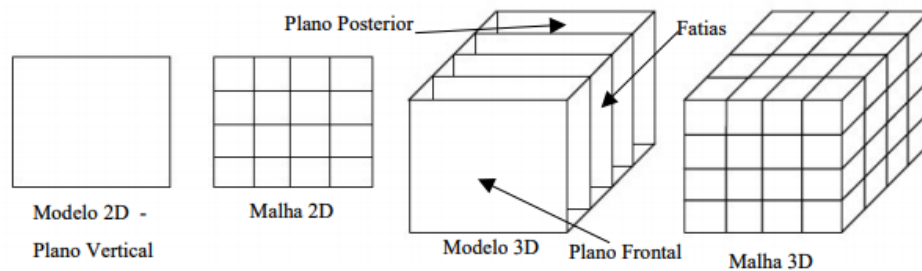
Figura 13 – Tipo de elementos 2D/3D e pontos de tensão do PLAXIS



Fonte: Soares (2004)

Soares (2004) afirma que, a versão 3D do PLAXIS trabalha com a modelagem de fatias 3D a partir de planos frontal, intermediários e posterior. Nestes planos são detalhadas as geometrias do problema que se pretende analisar e na fase posterior, a de cálculo, são selecionadas as geometrias que serão utilizadas na análise. Como mostra na Figura 12.

Figura 14 – Modelagem tridimensional no PLAXIS



Fonte: Soares (2004)

### 3 METODOLOGIA

Esse capítulo é referente a metodologia utilizada na modelagem e análise dos elementos provenientes de um edifício real fornecido pelo Prof. Dr. José Moura Soares presente no estudo da sua tese de doutorado, empregando a utilização do software *Plaxis 3D Foundation* e o Método das Diferenças Finitas.

A fim de analisar os esforços advindos dos carregamentos horizontais aplicados a estruturas com uma estaca, assim como em blocos com duas, três e quatro estacas. Sendo verificados, então, se os valores encontrados estão em concordância ou não com os valores previstos em literaturas.

#### 3.1 Confort Flat Taguatinga

Os elementos de fundação utilizados como paramentos para esse estudo são advindos do edifício comercial Confort Flat Taguatinga (Figura 15), que encontra-se no Distrito Federal. O mesmo é constituído por 2 subsolos, um pavimento térreo, um mezanino, primeiro pavimento, 7 pavimentos tipo, nono pavimento, uma cobertura e um ático, conforme visto na Figura 16.

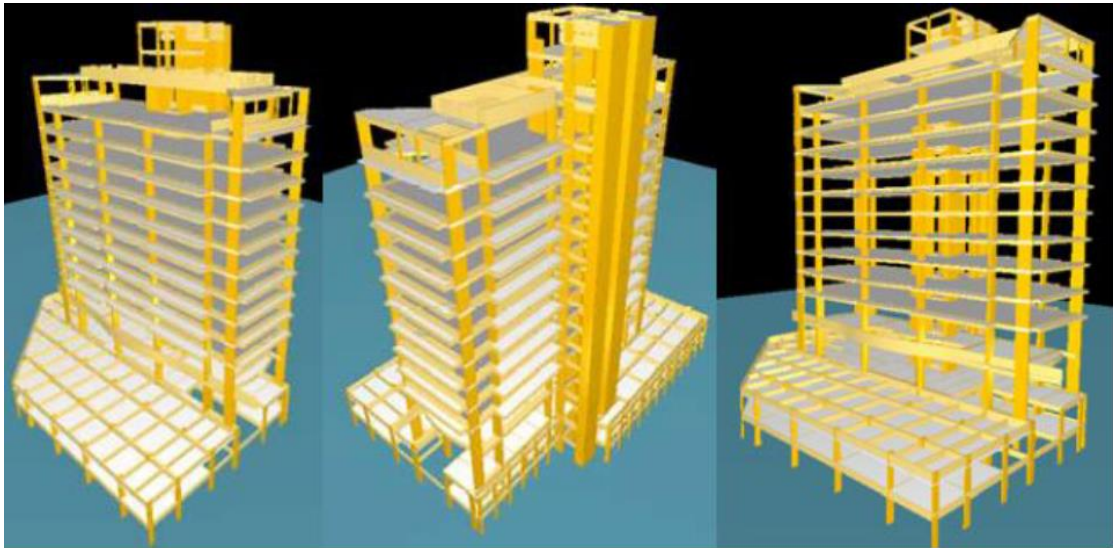
Figura 15 – Localização e Vista do Edifício Confort Flat Taguatinga



Fonte: Soares (2004)



*Figura 16 – Esqueleto dos elementos estruturais do Edifício Confort Flat Taguatinga*



Fonte: Soares (2004)

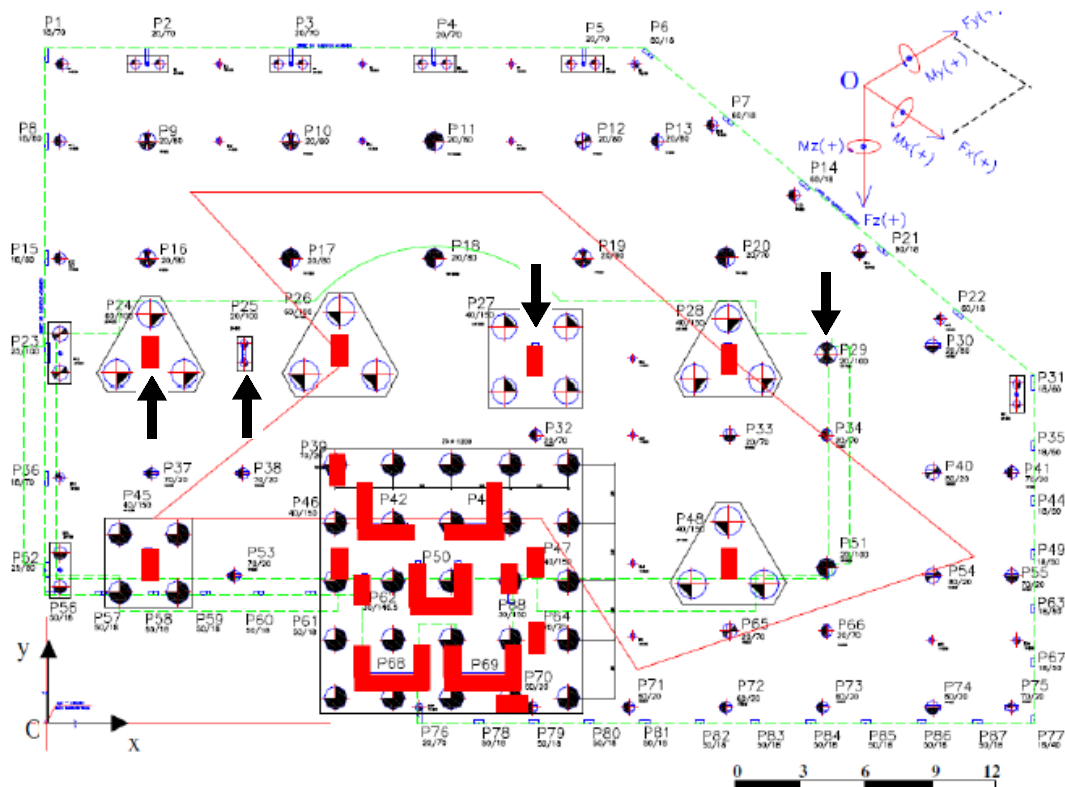
Segundo Soares (2004) o edifício conta com 88 pilares, dos quais 59 correspondem ao avanço do subsolo e 29 referentes a projeção do edifício. A Figura 16 mostra a projeção do edifício e o avanço do subsolo, enquanto a Figura 17 apresenta a planta de fundação e as quatro fundações escolhidas para análise.

*Figura 17 – Vista Geral do contorno do edifício e garagem*



Fonte: Soares (2004)

Figura 18 – Planta de Fundação do Edifício Confort Flat Taguatinga



Fonte: Soares (2004)

### 3.2 Procedimento de Modelagem e Cálculo no *Plaxis 3D Foundation*

Com as fundações selecionadas e suas dimensões obtidas a modelagem pode ser iniciada. Porém, algumas considerações foram definidas: As estacas foram modeladas com 20 metros de comprimento e os blocos com 2,5 metros de altura. Para realizar a modelagem e extração dos dados para análise utilizou-se o seguinte roteiro:

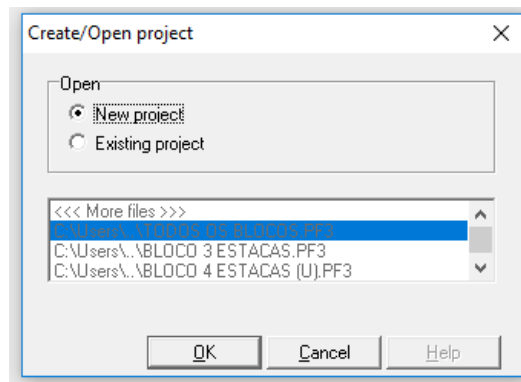
- Abrir o *Input* do *Plaxis 3D Foundation*, inserindo as informações iniciais e os dados sobre as dimensões do terreno;
- Criar os materiais, solo das camadas e concreto armado para as fundações;
- Desenhar através de pontos e retas as geometrias a serem modeladas (blocos e estacas);
- Criação do furo de sondagem (Borehole), para definir as camadas do solo e nível d'água;
- Criação das camadas de trabalho "WorkPlanes", com as profundidades desejadas para obtenção dos dados;
- Definição das malhas 2D e 3D;

- Criação das fases de cálculo;
- Execução do cálculo computacional;
- Extração das tabelas de deslocamentos obtidas.

### 3.2.1 Dados Iniciais

O primeiro passo na realização da modelagem no *Plaxis 3D Foundation* é executar o *Input* do software, informando em seguida os dados iniciais do projeto, como mostrado na Figura 19.

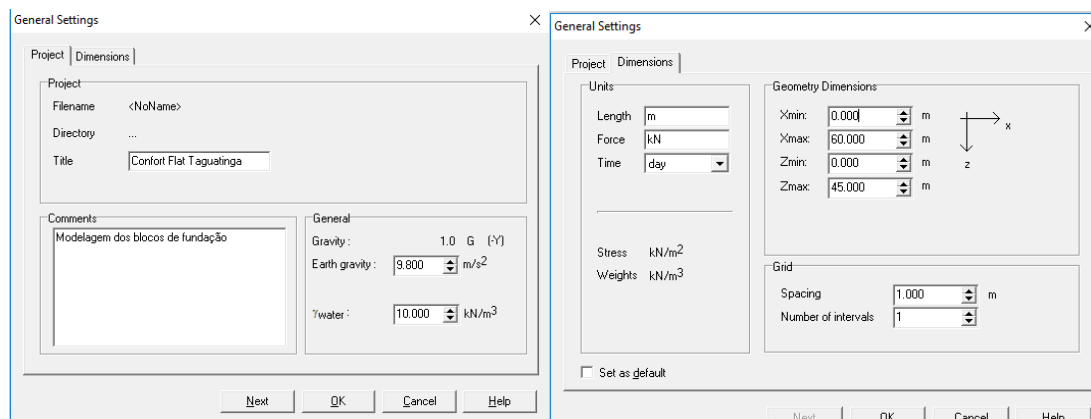
Figura 19 – Interface inicial do Plaxis 3D



Fonte: Autor (2019)

Em seguida, informa-se os dados referentes a unidades que serão utilizadas e as dimensões fixas da geometria do solo onde será realizada a modelagem, deixando uma folga, como mostrado na Figura 20.

Figura 20 – Dados Iniciais

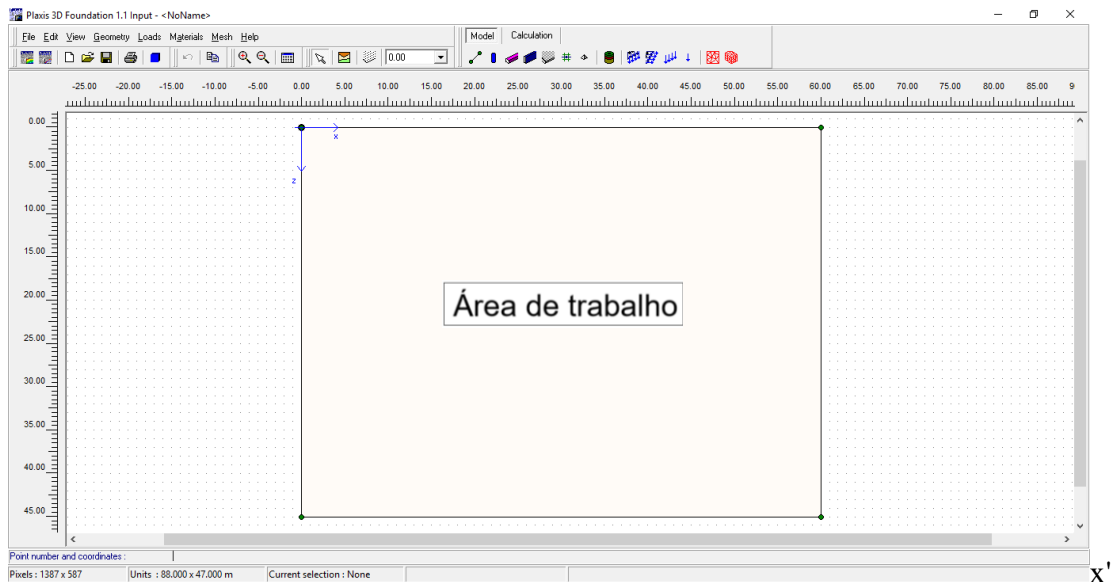


Fonte: Autor (2019)

### 3.2.2 Determinação dos materiais e *BoreHole*

Com os dados informados, é aberta a interface do *Input*, onde é possível observar a área da geometria do solo, de acordo com as dimensões definidas. Dentro desta área será realizada a modelagem da estrutura. Como visto na Figura 21.

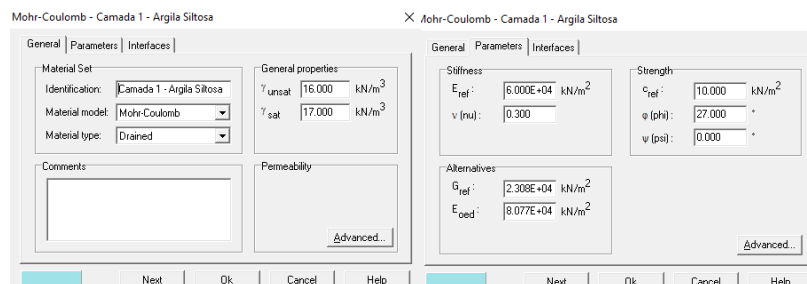
Figura 21 – Input do Plaxis



Fonte: Autor (2019)

Na aba “materials” podem ser criados os materiais que serão utilizados de acordo com os parâmetros correspondentes ao solo (Figura 22). Segundo Soares (2004), o solo modelado conta com três camadas: Argila Siltosa, Areia Argilosa e Silte Arenoso, como visto na Tabela 3. O concreto usado nas fundações tem resistência característica ( $f_{ck}$ ) de 30 MPa e módulo de elasticidade de 3,13 GPa.

Figura 22 – Parâmetros do solo e do concreto



The image displays four screenshots of software dialog boxes for defining soil material properties. The first two are for 'Mohr-Coulomb - Camada 2 - Areia Argilosa' and the last two are for 'Linear elastic - Estacas e Blocos'. Each dialog has tabs for General, Parameters, and Interfaces. The General tab shows identification, material model, and type. The Parameters tab shows general properties like unit weight and permeability. The Interfaces tab shows stiffness and strength parameters.

Fonte: Autor (2019)

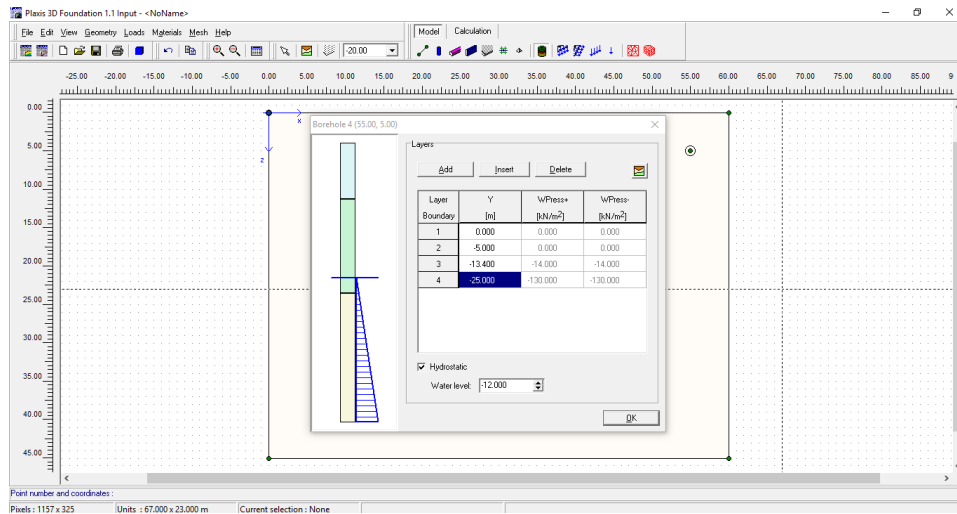
Tabela 3 – Parâmetros do Solo modelado

	Prof. (m)	E (MPa)	$\nu$	$c$ (kPa)	$\phi$ (°)	$\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\gamma_n$ (kN/m <sup>3</sup> )	N <sub>SPT</sub>
Camada	0 – 5,0	20	0,3	10	27	13,8	18,0	0-3
Camada	5 – 13,4	60	0,3	12	27	13,8	18,0	5-20
Camada	13,4 – 25,0	120	0,3	5	27	17,0	18,0	20-5

Fonte: Soares (2004)

Com os materiais criados, o próximo passo é adicionar o furo de sondagem na aba “borehole” e atribuir o material de cada camada, assim como indicar o nível d’água que segundo Soares (2004), é na profundidade -12m (Figura 23).

Figura 23 – “Borehole”

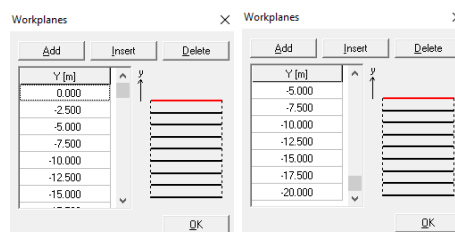


Fonte: Autor (2019)

### 3.2.3 Workplanes

Workplanes são os planos de trabalho para cada profundidade no eixo “y” do software. Para criar as “workplanes” fez-se necessário analisar as profundidades em que os dados seriam extraídos. Para todos os casos foram consideradas estacas de 20 metros de profundidade e blocos com 2,5 metros. Assim, os 20 metros foram divididos em espaços de 2,5 metros, devido ao fato do Método das Diferenças Finitas exigir distâncias iguais entre os pontos, para fim de análise. Como pode ser visto na Figura 24.

Figura 24 – Workplanes



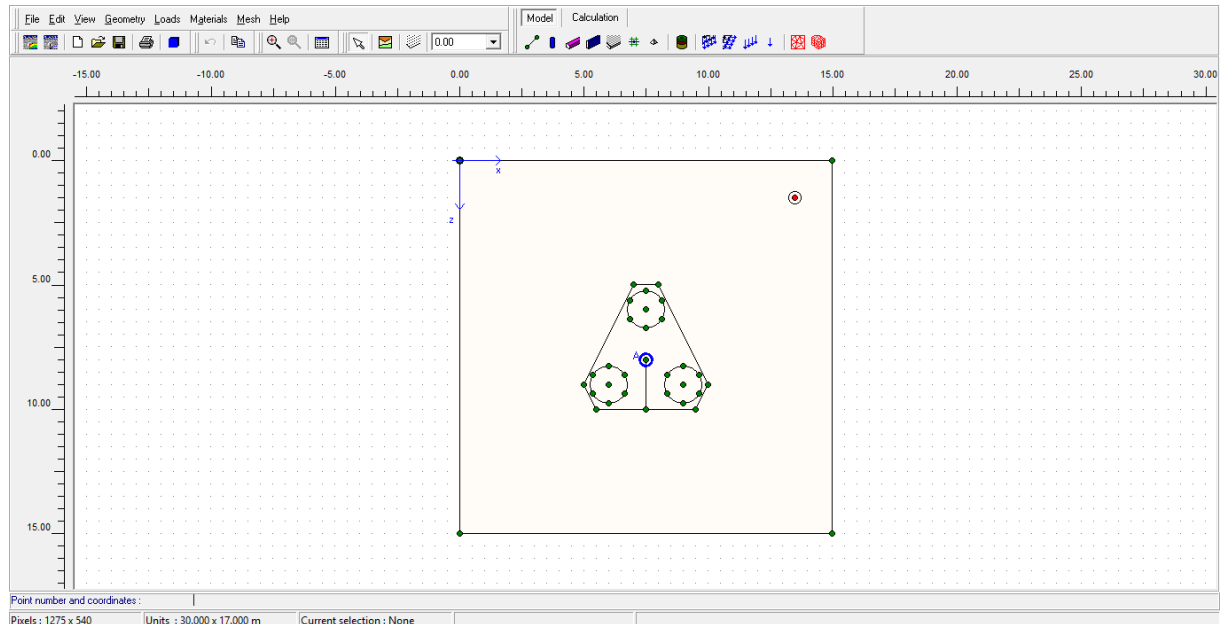
Fonte: Autor (2019)

### 3.2.4 Desenho das estruturas e criação das malhas 2D e 3D

Antes de chegar à etapa de cálculo o software exige que sejam criadas malhas 2D e 3D da estrutura a ser modelada, para isso, faz-se necessário que a estrutura seja desenhada em uma das workplanes, como visto na Figura 25. Para esta etapa foram utilizadas as ferramentas de

“*Geometry line*”, para as linhas que delimitam o bloco, “*pile*” para adicionar as estacas e “*point load*” para adicionar a carga.

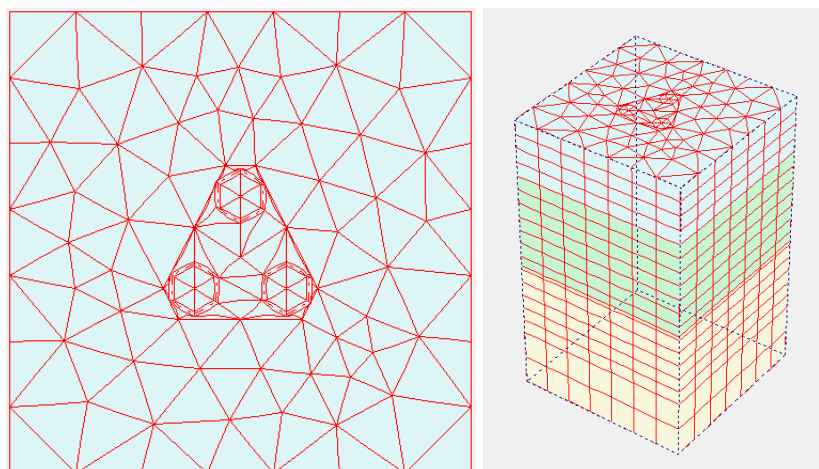
Figura 25 – Desenho do bloco com três estacas



Fonte: Autor (2019)

Após desenhar a estrutura e alocar o ponto em que a força está sendo aplicada em cada caso, são geradas as malhas 2D e 3D (Figura 26) nas ferramentas “*Generate 2D mesh*” e “*Generate 3D Mesh*”, respectivamente.

Figura 26 – Discretização das malhas 2D e 3D



Fonte: Autor (2019)

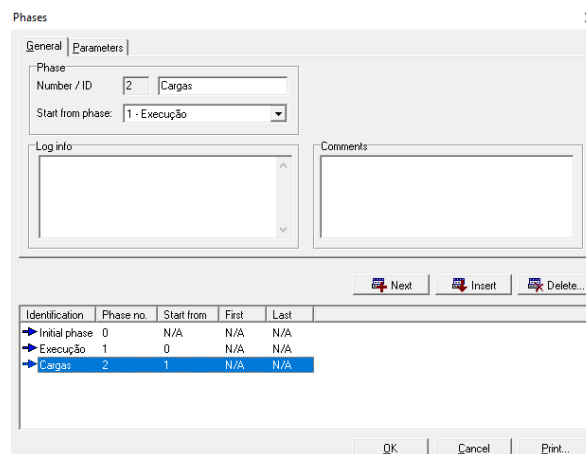
### 3.2.5 Fases de cálculo

Após as malhas terem sido geradas, abre-se a aba de cálculo, onde vão ser criadas as fases. Sendo estas, uma forma de simular a etapa de construção de uma estrutura real, tornando a modelagem mais próxima da realidade.

A modelagem realizada por Soares (2004) leva em consideração todos os blocos de 3, 4 e 25 estacas e sendo estes apoiados na cota -7m devido a presença do subsolo do edifício. Com isso, faz-se necessário adicionar estruturas de contenção na área escavada para que o solo não venha a colapso durante a etapa de cálculo do software.

Neste trabalho foram criadas apenas as fases de construção das estacas e blocos, assim como a fase que os carregamentos são adicionados (Figura 27). A fim de evitar os erros gerados na etapa de cálculo provenientes da escavação.

Figura 27 – Fases de Cálculo



Fonte: Autor (2019)

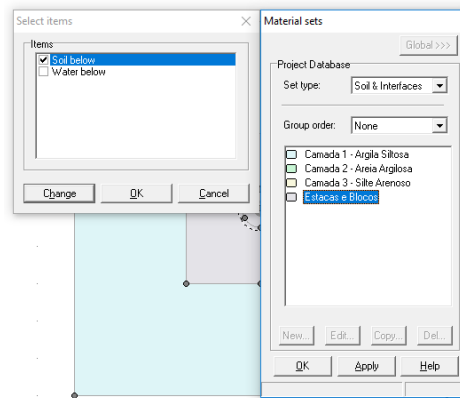
Com as etapas definidas, realiza-se a modelagem para cada fase. Sendo a fase de execução onde os blocos e estacas serão moldados e a fase de cargas, onde as forças atuantes serão inseridas.

### 3.2.6 Modelagem da estrutura

Para modelar a estrutura, deve-se abrir a fase de Execução e em seguida, ir para a *workplane* que se deseja trabalhar. Em seguida, deve-se retirar a água e modificar o material das estacas e blocos para concreto, como visto na Figura 28.



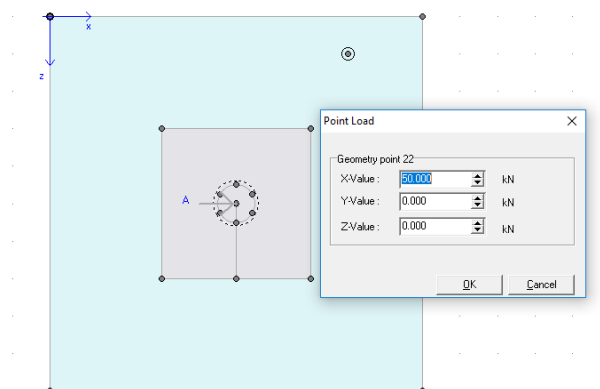
Figura 28 – Material da estaca e bloco



Fonte: Autor (2019)

Realiza-se este procedimento para cada workplane, a fim de criar o elemento estrutural. Em seguida, na fase de Cargas, é adicionado o carregamento horizontal no ponto determinado (Figura 29).

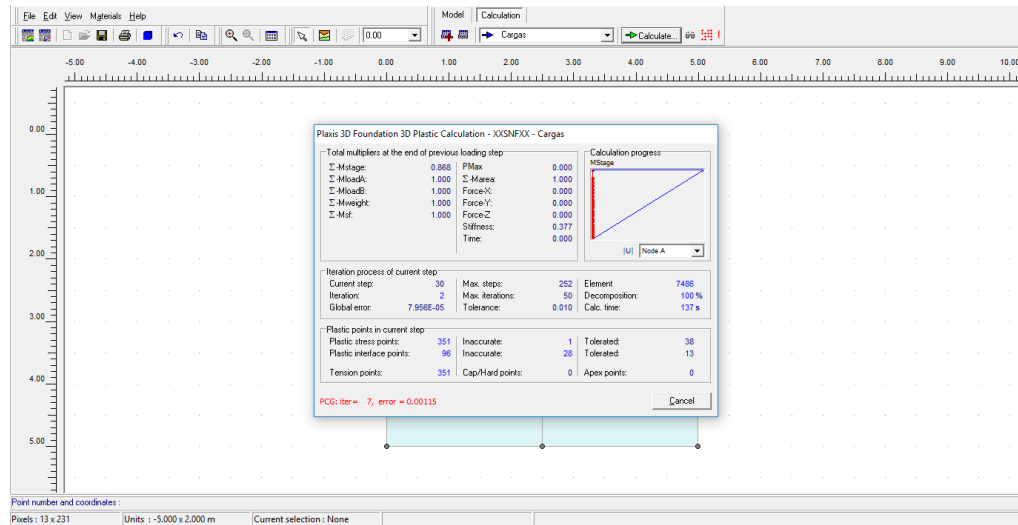
Figura 29 – Força Horizontal



Fonte: Autor (2019)

Por fim, com a estrutura modelada em todas as workplanes e as cargas adicionadas (Tabela 4), a etapa de cálculo pode ser executada clicando na opção “*calculate*”. Com isso o programa inicia os cálculos referentes a estrutura montada, como visto na Figura 30.

Figura 30 – Cálculo sendo executado pelo software



Fonte: Autor (2019)

Tabela 4 – Tabela de carregamentos nas fundações selecionadas

Pilar	Fy (kN)	Fx (kN)	Fz (kN)
P24	10516	5	50
P25	774	-	32
P27	11661	1	53
P29	2295	-	40

Fonte: Adaptada de Soares (2004)

## 4 RESULTADOS

Neste capítulo estão apresentados os resultados da modelagem de quatro estruturas provenientes do edifício Confort Flat Taguatinga, imersas em um solo heterogêneo estudado por Soares (2004). São elas:

- Uma estaca sem bloco de coroamento (P29);
- Duas estacas com bloco de coroamento (P25);
- Três estacas com bloco de Coroamento (P24);
- Quatro estacas com bloco de Coroamento (P27).

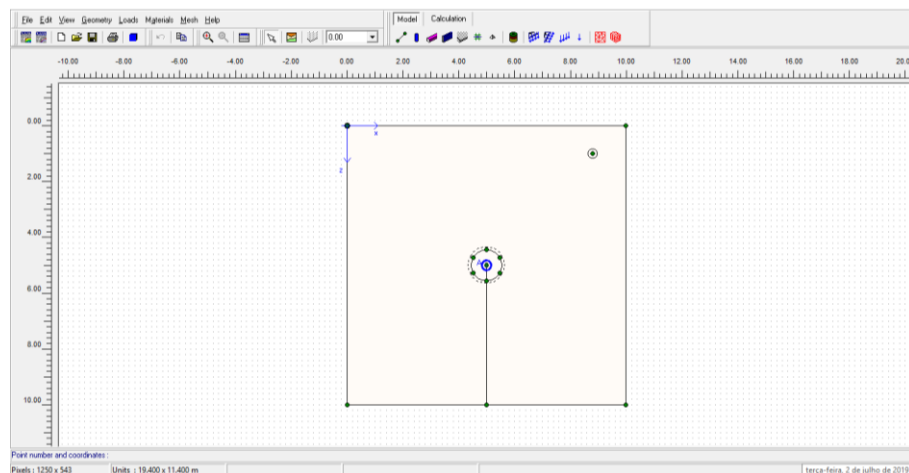
Assim como, o cálculo e a análise comparativa dos esforços de momento, rotação, esforço cortante e pressão do solo em cada estaca, com o auxílio do Método das Diferenças Finitas, tendo como dado de entrada os deslocamentos obtidos no *Plaxis 3D foundation*.

Vale ressaltar que, de forma simplificada, as estruturas foram modeladas separadamente, iniciando na cota 0 e considerando o maior carregamento horizontal para cada pilar. Além disso, todas as estacas foram simuladas com 20 m de comprimento e os blocos com altura de 2,5 metros.

### 4.1 Estaca sem bloco de coroamento – P29

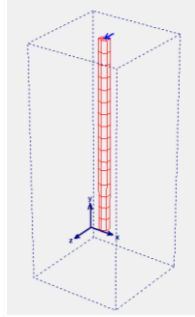
Essa estrutura foi modelada em um plano de 10 m x 10 m, imersa no solo presente na tese de Soares (2004), com uma estaca com 1,1 m de diâmetro e profundidade de 20m (Figura 31 e 32) e com uma carga de 40kN na direção “z”, como visto na Figura 33.

Figura 31 – Estaca sem bloco de coroamento



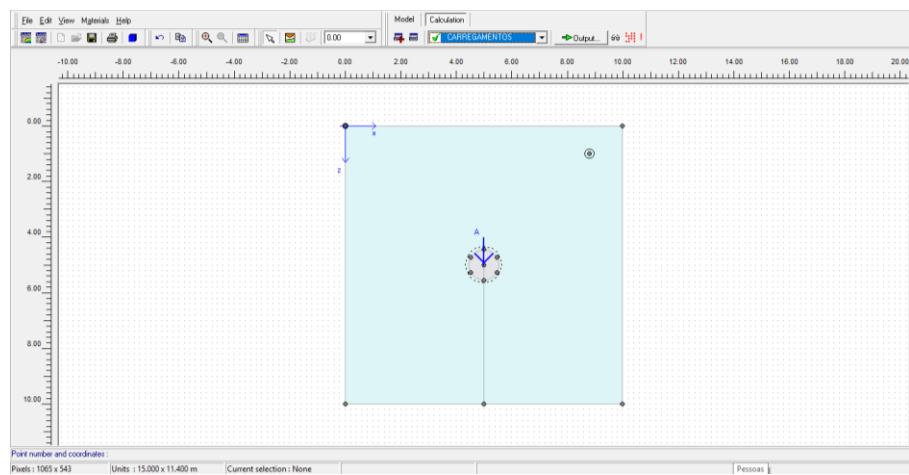
Fonte: Autor (2019)

Figura 32 – Vista do modelo (sem o solo)



Fonte: Autor (2019)

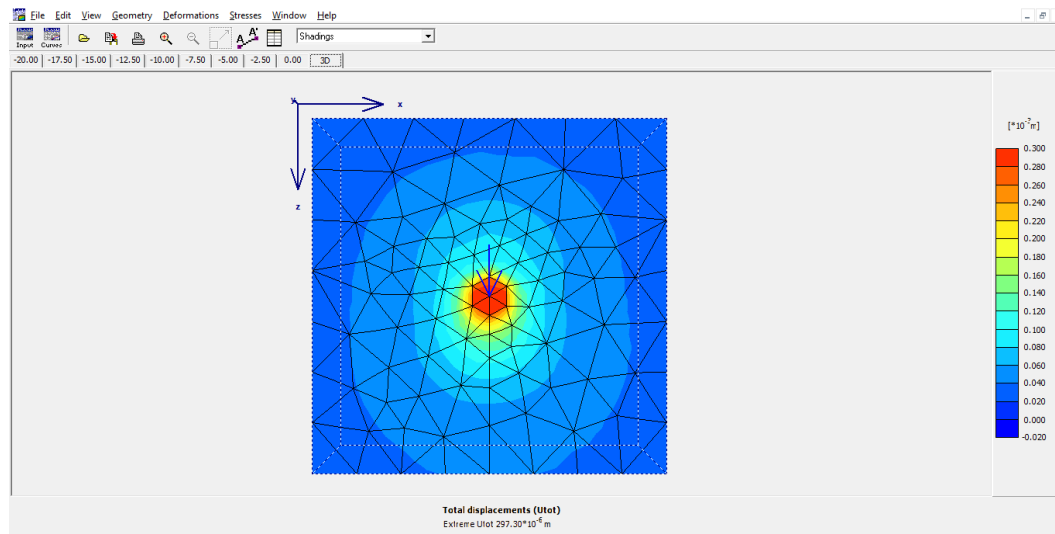
Figura 33 – Carregamento na estaca



Fonte: Autor (2019)

Com a modelagem completa e a fase de cálculo executada, tem-se os resultados dispostos no “*output*” do software, e nele pode-se perceber a influência da carga na estaca e consequentemente no solo o qual ela está imersa. A Figura 34 traz as deformações no topo da estaca modelada.

Figura 34 – Deformação no topo da estaca



Fonte: Autor (2019)

Na aba “output” do *Plaxis 3D Foundation*, pode-se obter os deslocamentos em cada nó em função da profundidade definida pelas *workplanes*. Clicando na tabela presente no software obtém-se, então, os deslocamentos em cada um dos eixos (Figura 35).

Figura 35 – Trecho da tabela de deslocamentos

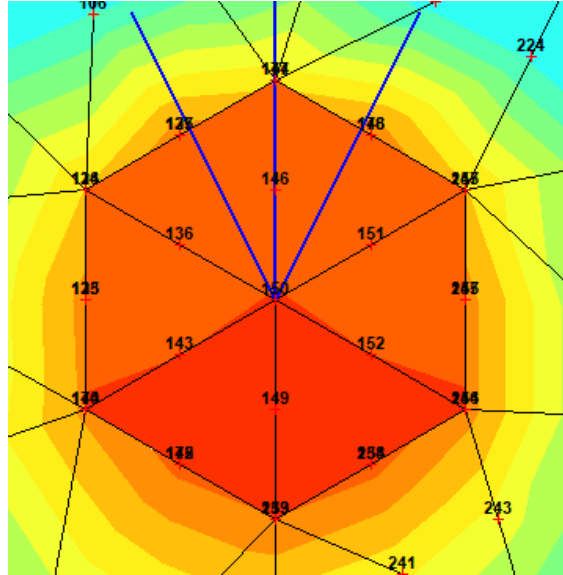
Node	X [m]	Y [m]	Z [m]	Ux [10 <sup>-6</sup> m]	Uy [10 <sup>-6</sup> m]	Uz [10 <sup>-6</sup> m]	ΔUx [10 <sup>-6</sup> m]	ΔUy [10 <sup>-6</sup> m]	ΔUz [10 <sup>-6</sup> m]	FUx [10 <sup>-6</sup> m]	FUy [10 <sup>-6</sup> m]	FUz [10 <sup>-6</sup> m]
1	0.000	0.000	0.000	0.000	-31.821	0.000	0.000	0.042	0.000	0.000	1.764	0.000
2	0.714	0.000	0.000	2.883	-31.900	0.000	0.165	0.040	0.000	2.475	1.778	0.000
3	0.000	0.000	0.714	0.000	-31.968	3.212	0.000	0.038	0.206	0.000	1.712	2.806
4	0.714	0.000	0.714	3.013	-32.055	3.586	0.172	0.036	0.229	2.580	1.728	3.146
5	2.143	0.000	0.000	7.001	-32.716	0.000	0.395	0.014	0.000	6.038	1.663	0.000
6	1.843	0.000	0.748	6.810	-32.738	5.751	0.384	0.014	0.360	5.839	1.616	5.142
7	1.429	0.000	0.000	5.484	-32.186	0.000	0.311	0.032	0.000	4.725	1.763	0.000
8	1.129	0.000	1.462	5.121	-32.839	7.915	0.289	0.012	0.509	4.333	1.465	7.013
9	0.000	0.000	2.143	0.000	-33.155	8.215	0.000	0.003	0.536	0.000	1.214	7.246
10	0.612	0.000	2.175	3.113	-33.338	9.005	0.172	-0.002	0.590	2.556	1.184	7.988
11	0.000	0.000	1.429	0.000	-32.428	6.085	0.000	0.025	0.391	0.000	1.528	5.330
12	1.741	0.000	2.208	8.256	-34.440	14.554	0.446	-0.036	0.936	6.858	0.984	13.181
13	1.886	0.000	2.841	9.560	-35.908	18.725	0.495	-0.077	1.227	7.716	0.464	17.175
14	2.418	0.000	3.182	11.869	-38.035	26.882	0.570	-0.138	1.747	9.435	-0.125	25.024
15	2.558	0.000	0.748	7.790	-33.362	7.680	0.433	-0.008	0.472	6.699	1.518	6.943
16	2.857	0.000	0.000	7.201	-33.263	0.000	0.403	-0.004	0.000	6.221	1.602	0.000
17	3.439	0.000	0.480	6.592	-33.890	6.699	0.361	-0.026	0.403	5.703	1.466	6.088
18	3.571	0.000	0.000	5.986	-33.763	0.000	0.328	-0.021	0.000	5.185	1.546	0.000
19	0.000	0.000	2.857	0.000	-34.071	9.576	0.000	-0.025	0.640	0.000	0.789	8.577
20	0.612	0.000	2.889	3.183	-34.305	10.549	0.169	-0.031	0.705	2.514	0.745	9.501
21	0.000	0.000	3.571	0.000	-35.068	10.206	0.000	-0.059	0.702	0.000	0.258	9.385
22	3.139	0.000	1.227	8.198	-34.570	15.645	0.438	-0.048	0.949	7.037	1.196	14.261
23	2.258	0.000	1.495	8.540	-33.980	13.290	0.468	-0.026	0.830	7.256	1.243	12.021

Fonte: Autor (2019)

A Figura 36 mostra a conectividade dos nós da malha. Para cada profundidade adotou-se o ponto central da estaca para análise e obtenção dos deslocamentos. Com cada ponto anotado

e utilizando o auxílio do software Excel, obteve-se o deslocamento da estaca ao longo da profundidade, como pode ser visto na Tabela 5.

Figura 36 – Conectividade dos nós da malha, destacando-se o nó no centro da estaca



Fonte: Autor (2019)

Tabela 5 – Deslocamento em função da profundidade obtido via Plaxis 3D Foundation

Nó	Profundidade (m)	Deslocamento (m)
150	0.00	2.82E-04
1119	-2.50	8.04E-05
2055	-5.00	2.77E-06
2991	-7.50	-8.32E-06
3927	-10.00	-4.77E-06
4863	-12.50	-1.71E-06
5799	-15.00	-5.24E-07
6735	-17.50	-2.47E-07
7671	-20.00	-1.38E-07

Fonte: Autor (2019)

Com os dados de deslocamentos em função da profundidade, pode-se obter os valores dos demais esforços utilizando as equações do Método das Diferenças Finitas. A Tabela 6 traz os valores dos esforços calculados, sendo os pontos -2, -1, n+2 e n+3 os pontos fictícios definidos pelo MDF, os quais não tem esforços calculados.

Tabela 6 – Esforços calculados através do MDF (Estaca sem bloco)

Pontos	Profundidade (m)	Deslocamento (m)	Rotação (rad)	Momento (kN.m)	Cortante (kN)	Reação do Solo (kN/m <sup>2</sup> )
-2	-	2.50E-04	-	-	-	-
-1	-	4.83E-04	-	-	-	-
1	0.00	2.82E-04	-8.04E-05	0.00	40.00	0.00
2	-2.50	8.04E-05	-5.57E-05	44.30	4.77	-10.36
3	-5.00	2.77E-06	-1.77E-05	23.87	-7.81	0.29
4	-7.50	-8.32E-06	-1.51E-06	5.25	-4.81	2.11
5	-10.00	-4.77E-06	1.32E-06	-0.18	-1.19	0.79
6	-12.50	-1.71E-06	8.48E-07	-0.67	-0.03	0.14
7	-15.00	-5.24E-07	2.92E-07	-0.32	0.12	-0.01
n	-17.50	-2.47E-07	7.71E-08	-0.06	0.06	-0.03
n+1	-20.00	-1.38E-07	4.35E-08	0.00	0.00	0.00
n+2	-	-2.92E-08	-	-	-	-
n+3	-	2.97E-07	-	-	-	-

Fonte: Autor (2019)

#### 4.1.1 Deslocamentos

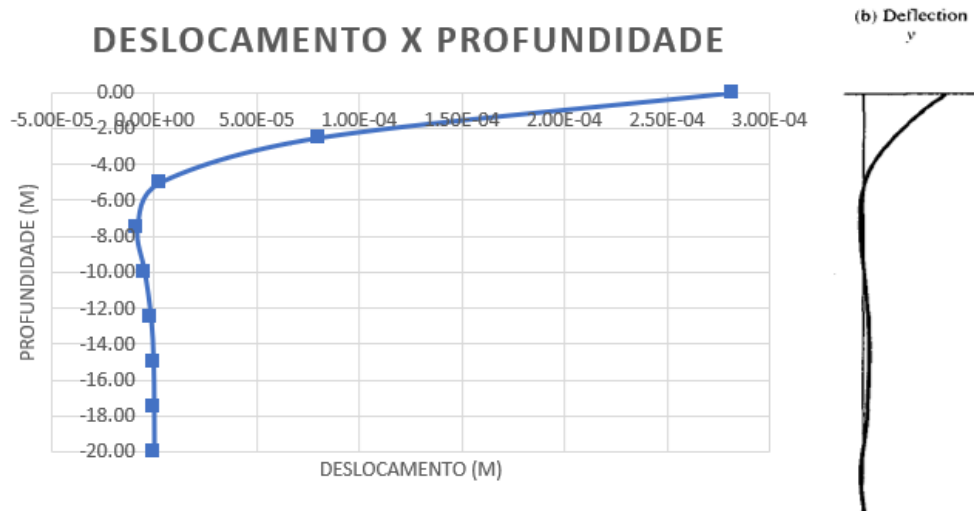
Para este modelo, o deslocamento principal se dá na direção do carregamento, ou seja, na direção z. A Tabela 7 apresenta os deslocamentos em função da profundidade. Na Figura 37, observa-se o gráfico do deslocamento em relação a profundidade, o qual apresentou um comportamento similar ao previsto por Coduto (1994).

Tabela 7 – Deslocamentos em função da profundidade (Estaca sem bloco)

Deslocamento(m)	Prof. (m)
2.82E-04	0.00
8.04E-05	-2.50
2.77E-06	-5.00
-8.32E-06	-7.50
-4.77E-06	-10.00
-1.71E-06	-12.50
-5.24E-07	-15.00
-2.47E-07	-17.50
-1.38E-07	-20.00

Fonte: Autor (2019)

Figura 37 – Gráfico de Deslocamento x Profundidade (Estaca sem bloco)



#### 4.1.2 Rotação

A Tabela 8 apresenta os valores de rotação em função da profundidade calculados pelo MDF. Com isso, torna-se possível observar na Figura 38 o gráfico da rotação em função da profundidade, o qual segue um comportamento similar ao previsto por Coduto (1994).

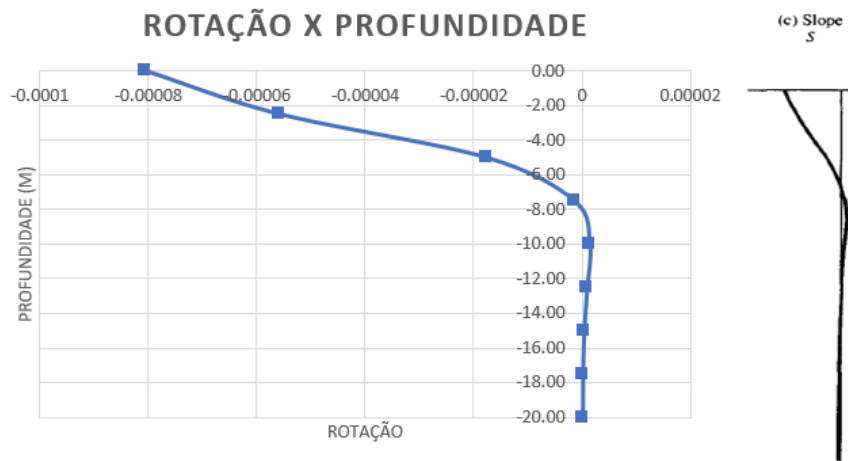
Tabela 8 – Rotação em função da profundidade (Estaca sem bloco)

Rotação	Profundidade (m)
-8.04E-05	0.00
-5.57E-05	-2.50
-1.77E-05	-5.00
-1.51E-06	-7.50
1.32E-06	-10.00
8.48E-07	-12.50
2.92E-07	-15.00
7.71E-08	-17.50
4.35E-08	-20.00

Fonte: Autor (2019)



Figura 38 – Gráfico da Rotação x Profundidade (Estaca sem bloco)



Fonte: Autor (2019)

#### 4.1.3 Momento

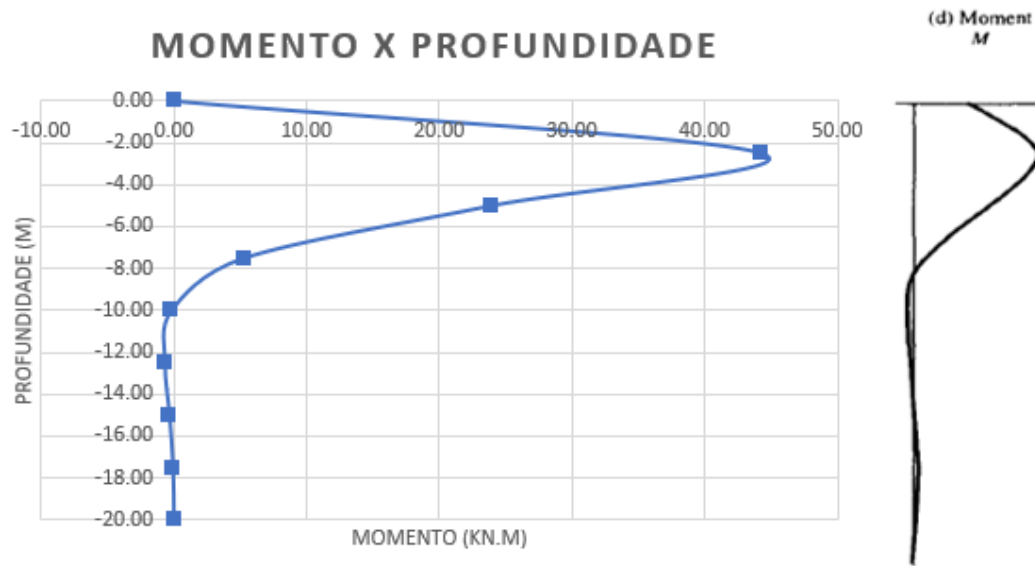
Assim como para a rotação, o procedimento é repetido, a Tabela 8 traz os valores calculados de momento pelo MDF e a Figura 39 apresenta o gráfico do momento em função da profundidade, o qual segue um comportamento similar ao previsto por Coduto (1994).

Tabela 9 – Momento em função da profundidade (Estaca sem bloco)

Momento (kN.m)	Profundidade (m)
0.00	0.00
44.30	-2.50
23.87	-5.00
5.25	-7.50
-0.18	-10.00
-0.67	-12.50
-0.32	-15.00
-0.06	-17.50
0.00	-20.00

Fonte: Autor (2019)

Figura 39 – Gráfico de Momento x Profundidade (Estaca sem bloco)



Fonte: Autor (2019)

#### 4.1.4 Cortante

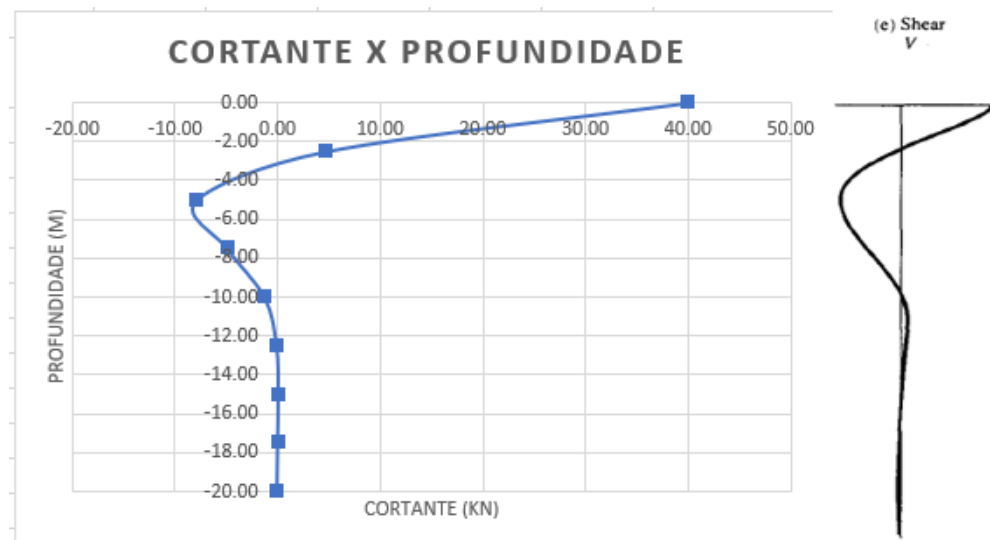
A Tabela 10 apresenta os valores do esforço cortante para a estaca isolada em função da profundidade. A Figura 40 traz o gráfico referente a tabela, o qual segue um comportamento similar ao apresentado por Coduto (1994).

Tabela 10 – Cortante em função da profundidade (Estaca sem bloco)

Cortante (kN)	Profundidade (m)
40.00	0.00
4.77	-2.50
-7.81	-5.00
-4.81	-7.50
-1.19	-10.00
-0.03	-12.50
0.12	-15.00
0.06	-17.50
0.00	-20.00

Fonte: Autor (2019)

Figura 40 – Gráfico de Cortante x Profundidade (Estaca sem bloco)



Fonte: Autor (2019)

#### 4.1.5 Reação do Solo

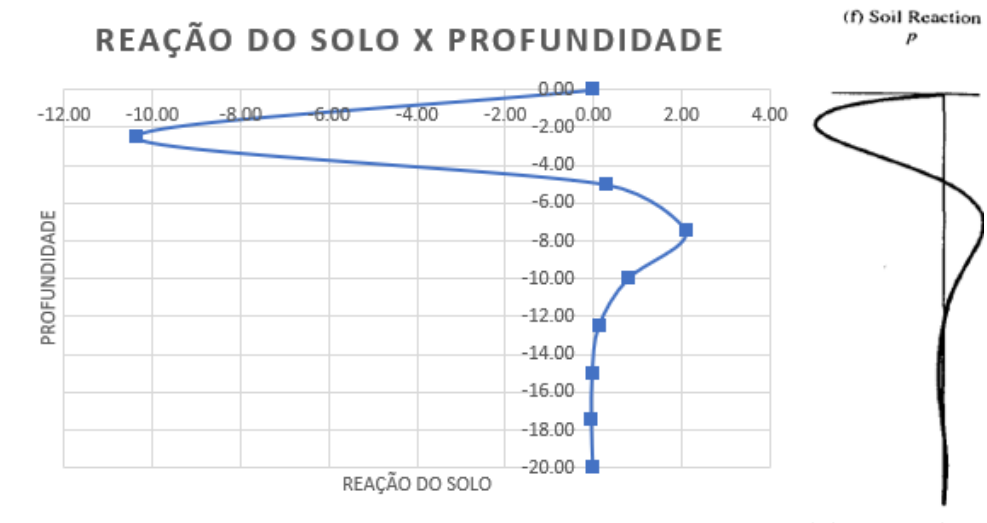
Assim como os demais esforços, os valores de reação do solo em função da profundidade vêm dispostos na Tabela 11, e o gráfico em sequência (Figura 41). É possível observar, que o comportamento da curva assemelha-se ao previsto por Coduto (1994).

Tabela 11 – Reação do solo em função da profundidade (Estaca sem bloco)

Reação do Solo (kN/m <sup>2</sup> )	Profundidade (m)
0.00	0.00
-10.36	-2.50
0.29	-5.00
2.11	-7.50
0.79	-10.00
0.14	-12.50
-0.01	-15.00
-0.03	-17.50
0.00	-20.00

Fonte: Autor (2019)

Figura 41 – Gráfico da Reação do Solo x Profundidade (Estaca sem bloco)

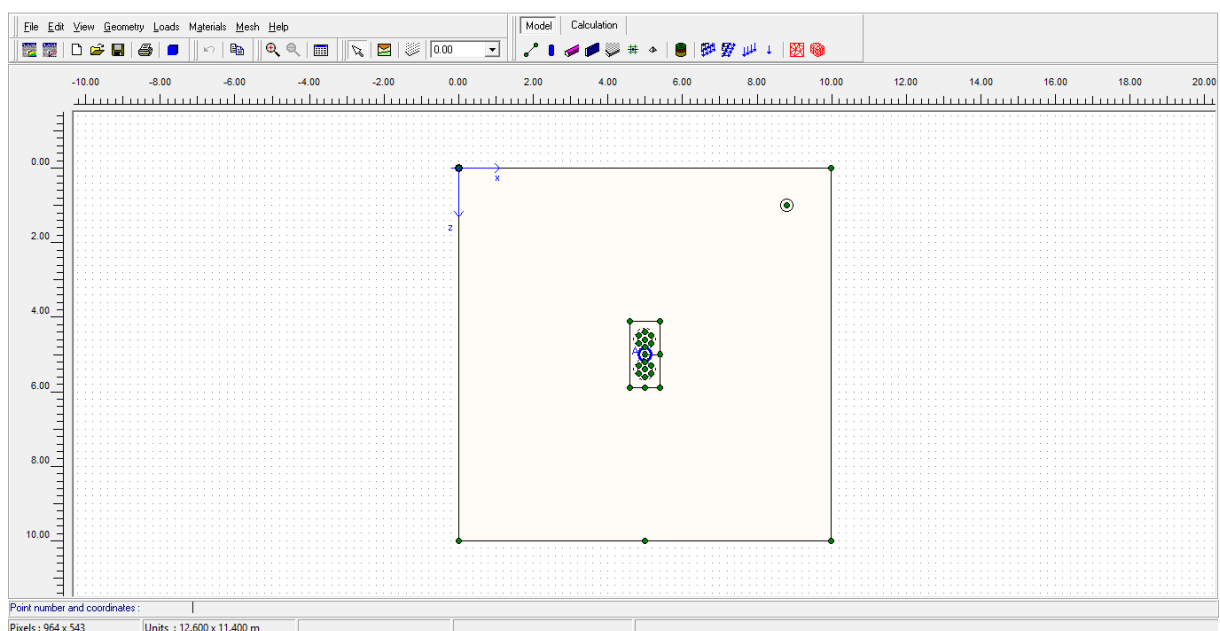


Fonte: Autor (2019)

## 4.2 Duas estacas com bloco de coroamento – P25

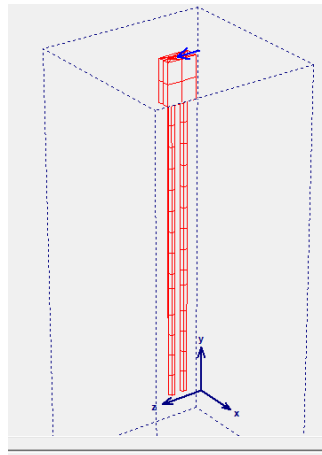
Essa estrutura foi modelada em um plano de 10 m x 10 m, imersa no solo presente na tese de Soares (2004), com duas estacas de 0,4 m de diâmetro, tendo essas um bloco de coroamento com dimensões de 0,8 m x 1,8 m x 2,5 m (Figura 42 e 43) e com uma carga de 32kN na direção “z”, como visto na Figura 44.

Figura 42 – Duas estacas com Bloco de Coroamento



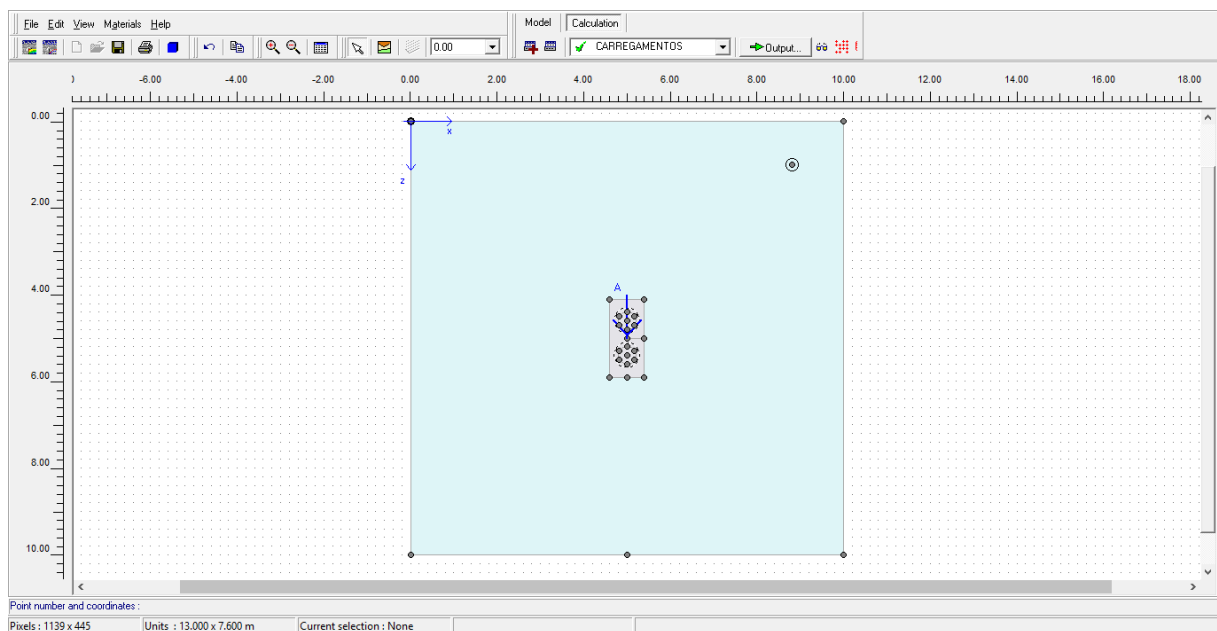
Fonte: Autor (2019)

Figura 43 – Vista do modelo de duas estacas com bloco de coroamento (sem solo)



Fonte: Autor (2019)

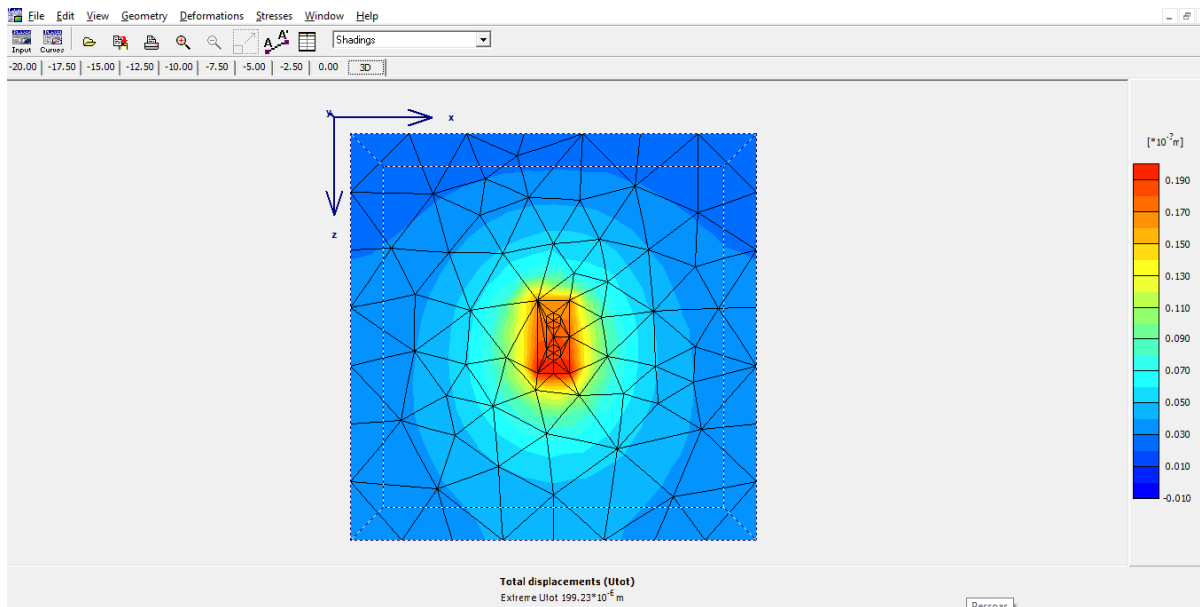
Figura 44 – Carregamento no Sistema



Fonte: Autor (2019)

Com a modelagem completa e a fase de cálculo executada, tem-se os resultados dispostos no “output” do software, e nele pode-se perceber a influência da carga nas estacas e consequentemente no solo o qual estão imersas (Figura 45).

*Figura 45 – Deslocamento no topo do sistema*



Fonte: Autor (2019)

Repetindo o processo de selecionar o ponto central de cada estaca e obter o deslocamento referente a este nó, foi criada a Tabela 12 com os dados de deslocamento em função da profundidade para ambas as estacas. Adotando como estaca 1 a superior e estaca 2 a inferior.

*Tabela 12 – Deslocamento em função da profundidade para as duas estacas*

Profundidade (m)	Estaca 1		Estaca 2	
	Nó	Deslocamento (m)	Nó	Deslocamento (m)
0.00	106	1.64E-04	138	1.64E-04
-2.50	1054	3.37E-05	1086	3.38E-05
-5.00	2002	-9.97E-07	2034	-1.23E-06
-7.50	2950	-2.40E-06	2982	-2.06E-06
-10.00	3898	-2.33E-06	3930	-2.09E-06
-12.50	4846	-1.18E-06	4878	-1.24E-06
-15.00	5794	-6.92E-07	5826	-4.78E-07
-17.50	6742	-4.65E-07	6774	-3.08E-07
-20.00	7685	-2.03E-07	7710	-2.34E-07

Fonte: Autor (2019)

Tendo os deslocamentos em função da profundidade para cada uma das estacas, e considerando de forma simplificada que cada estaca irá receber metade da carga recebida no bloco, pode-se calcular os demais esforços utilizando o Método das Diferenças Finitas, como visto na Tabela 13 e 14.

Tabela 13 – Esforços calculados através do MDF (Estaca 1)

Pontos	Prof. (m)	Deslocamento (m)	Rotação (rad)	Momento (kN.m)	Cortante (kN)	Reação do Solo (kN/m <sup>2</sup> )
-2	-	-1.22E-02	-	-	-	-
-1	-	2.95E-04	-	-	-	-
1	0.00	1.64E-04	-5.23E-05	0.0000	16.0000	0.0000
2	-2.50	3.37E-05	-3.31E-05	0.6027	0.0418	-0.1594
3	-5.00	-9.97E-07	-7.22E-06	0.2089	-0.1187	0.0310
4	-7.50	-2.40E-06	-2.68E-07	0.0092	-0.0404	0.0316
5	-10.00	-2.33E-06	2.44E-07	0.0068	-0.0027	-0.0014
6	-12.50	-1.18E-06	3.28E-07	-0.0042	-0.0017	0.0022
7	-15.00	-6.92E-07	1.43E-07	-0.0016	0.0009	-0.0001
n	-17.50	-4.65E-07	9.79E-08	0.0002	0.0003	-0.0003
n+1	-20.00	-2.03E-07	1.05E-07	0.0000	0.0000	0.0006
n+2	-	5.91E-08	-	-	-	-
n+3	-	8.45E-07	-	-	-	-

Fonte: Autor (2019)

Tabela 14 - Esforços calculados através do MDF (Estaca 2)

Pontos	Prof. (m)	Deslocamento (m)	Rotação (rad)	Momento (kN.m)	Cortante (kN)	Reação do Solo (kN/m <sup>2</sup> )
-2	-	-1.22E-02	-	-	-	-
-1	-	2.95E-04	-	-	-	-
1	0.00	1.64E-04	-5.22E-05	0.0000	16.0000	0.0000
2	-2.50	3.38E-05	-3.31E-05	0.5986	0.0429	-0.1572
3	-5.00	-1.23E-06	-7.17E-06	0.2146	-0.1187	0.0279
4	-7.50	-2.06E-06	-1.74E-07	0.0050	-0.0418	0.0336
5	-10.00	-2.09E-06	1.64E-07	0.0056	-0.0011	-0.0011
6	-12.50	-1.24E-06	3.23E-07	-0.0006	-0.0019	0.0005
7	-15.00	-4.78E-07	1.86E-07	-0.0037	0.0000	0.0010
n	-17.50	-3.08E-07	4.88E-08	-0.0006	0.0007	-0.0004
n+1	-20.00	-2.34E-07	2.94E-08	0.0000	0.0000	0.0001
n+2	-	-1.61E-07	-	-	-	-
n+3	-	6.01E-08	-	-	-	-

Fonte: Autor (2019)

#### 4.2.1 Deslocamento

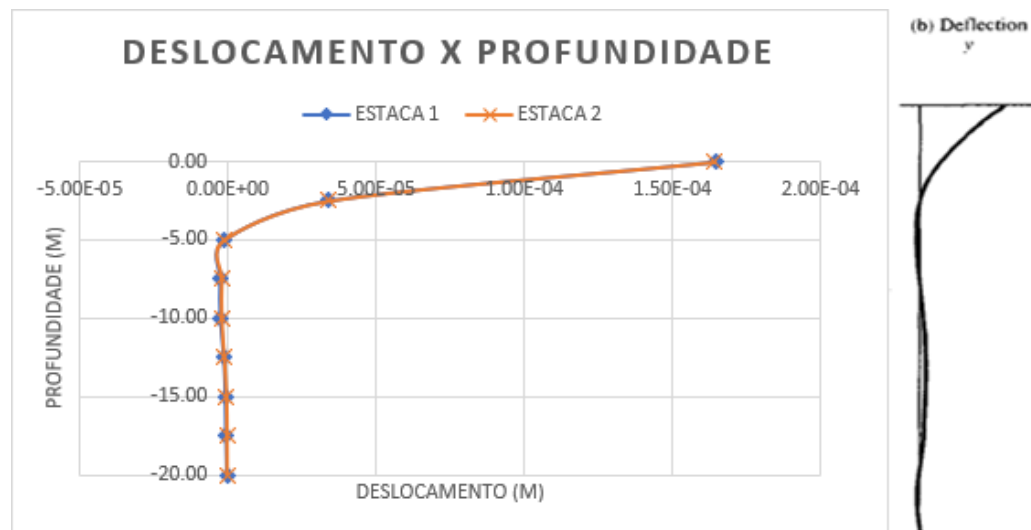
Para este modelo, o deslocamento principal se dá na direção do carregamento, ou seja, na direção “z”. A Tabela 15 apresenta os deslocamentos em função da profundidade para as duas estacas. Na Figura 46, observa-se o gráfico do deslocamento em relação a profundidade, o qual apresentou, para ambas as estacas, um comportamento similar ao previsto por Coduto (1994).

Tabela 15 – Deslocamento em função da profundidade (Bloco com duas estacas)

Profundidade (m)	Estaca 1	Estaca 2
	Deslocamento (m)	Deslocamento (m)
0.00	1.64E-04	1.64E-04
-2.50	3.37E-05	3.38E-05
-5.00	-9.97E-07	-1.23E-06
-7.50	-2.40E-06	-2.06E-06
-10.00	-2.33E-06	-2.09E-06
-12.50	-1.18E-06	-1.24E-06
-15.00	-6.92E-07	-4.78E-07
-17.50	-4.65E-07	-3.08E-07
-20.00	-2.03E-07	-2.34E-07

Fonte: Autor (2019)

Figura 46 – Gráfico do Deslocamento x Profundidade (Bloco com duas estacas)



Fonte: Autor (2019)

#### 4.2.2 Rotação

É possível observar na Tabela 16 os valores de rotação em função da profundidade para as duas estacas. Com isso, o gráfico apresentado na Figura 47 mostra a rotação em função da profundidade, o qual segue, em ambos os casos, um comportamento próximo ao previsto por Coduto (1994).

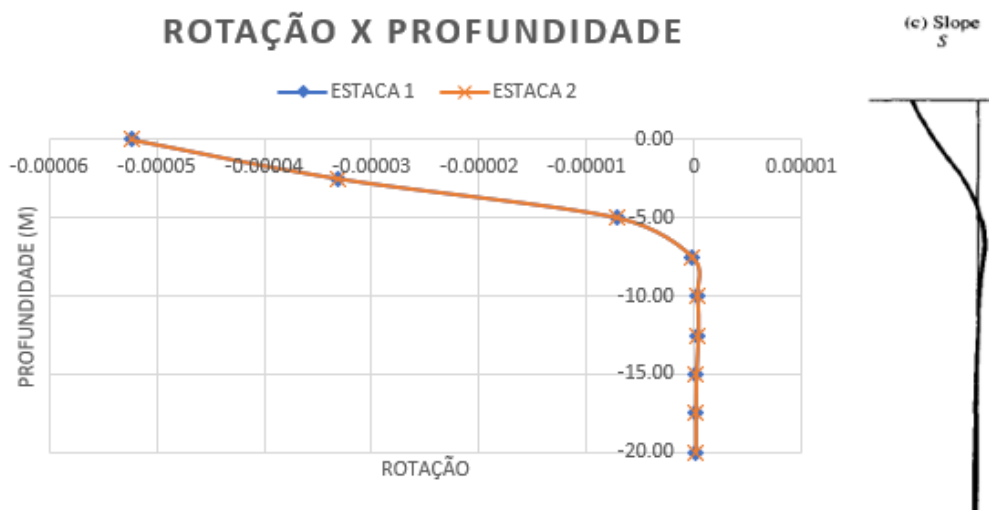


Tabela 16 – Rotação em função da profundidade (Bloco com duas estacas)

Profundidade (m)	Estaca 1	Estaca 2
	Rotação (rad)	Rotação (rad)
0.00	-5.23E-05	-5.23E-05
-2.50	-3.31E-05	-3.31E-05
-5.00	-7.22E-06	-7.22E-06
-7.50	-2.68E-07	-2.68E-07
-10.00	2.44E-07	2.44E-07
-12.50	3.28E-07	3.28E-07
-15.00	1.43E-07	1.43E-07
-17.50	9.79E-08	9.79E-08
-20.00	1.05E-07	1.05E-07

Fonte: Autor (2019)

Figura 47 – Gráfico da Rotação x Profundidade (Bloco com duas estacas)



Fonte: Autor (2019)

#### 4.2.3 Momento

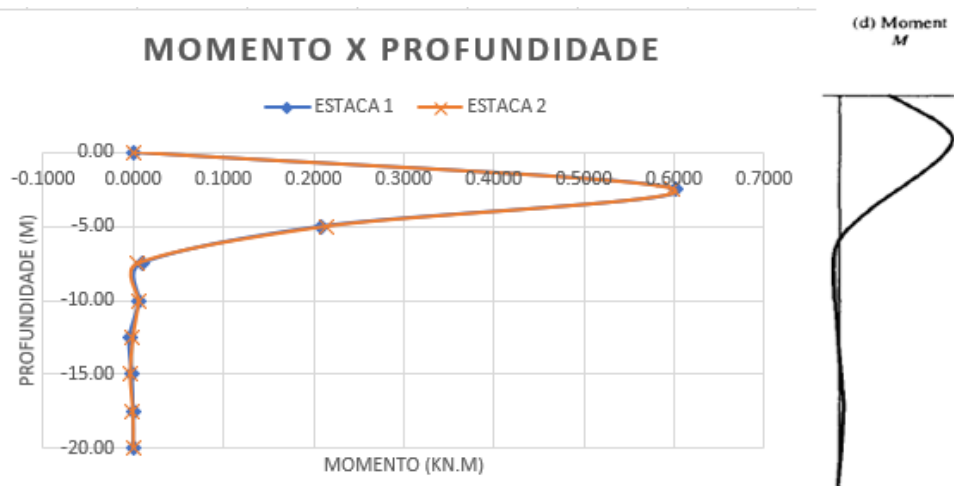
A Tabela 17 apresenta os valores calculados de momento pelo MDF para as duas estacas. Com esses valores, o gráfico do momento ao longo da estaca pode ser montado (Figura 48), o qual apresentou, para as duas estacas, um comportamento próximo ao previsto por Coduto (1994).

Tabela 17 – Momento em função da profundidade (Bloco com duas estacas)

Profundidade (m)	Estaca 1	Estaca 2
	Momento (kN.m)	Momento (kN.m)
0.00	0.0000	0.0000
-2.50	0.6027	0.5986
-5.00	0.2089	0.2146
-7.50	0.0092	0.0050
-10.00	0.0068	0.0056
-12.50	-0.0042	-0.0006
-15.00	-0.0016	-0.0037
-17.50	0.0002	-0.0006
-20.00	0.0000	0.0000

Fonte: Autor (2019)

Figura 48 – Gráfico do Momento x Profundidade (Bloco com duas estacas)



Fonte: Autor (2019)

#### 4.2.4 Cortante

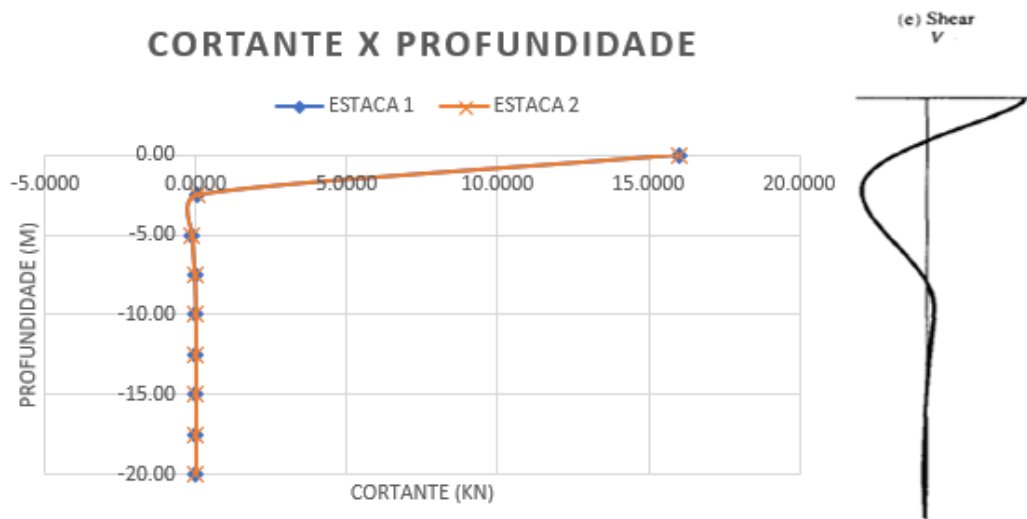
Os valores calculados do esforço cortante ao longo da estaca, estão dispostos na Tabela 18. A Figura 50 apresenta o gráfico do Cortante em função da profundidade, para as duas estacas, o qual apresentou um comportamento semelhante ao apresentado por Coduto (1994).

Tabela 18 – Cortante em função da profundidade (Bloco com duas estacas)

Profundidade (m)	Estaca 1	Estaca 2
	Cortante (kN)	Cortante (kN)
0.00	16.0000	16.0000
-2.50	0.0418	0.0429
-5.00	-0.1187	-0.1187
-7.50	-0.0404	-0.0418
-10.00	-0.0027	-0.0011
-12.50	-0.0017	-0.0019
-15.00	0.0009	0.0000
-17.50	0.0003	0.0007
-20.00	0.0000	0.0000

Fonte: Autor (2019)

Figura 49 - Gráfico de Cortante x Profundidade (Bloco com duas estacas)



Fonte: Autor (2019)

#### 4.2.5 Reação do Solo

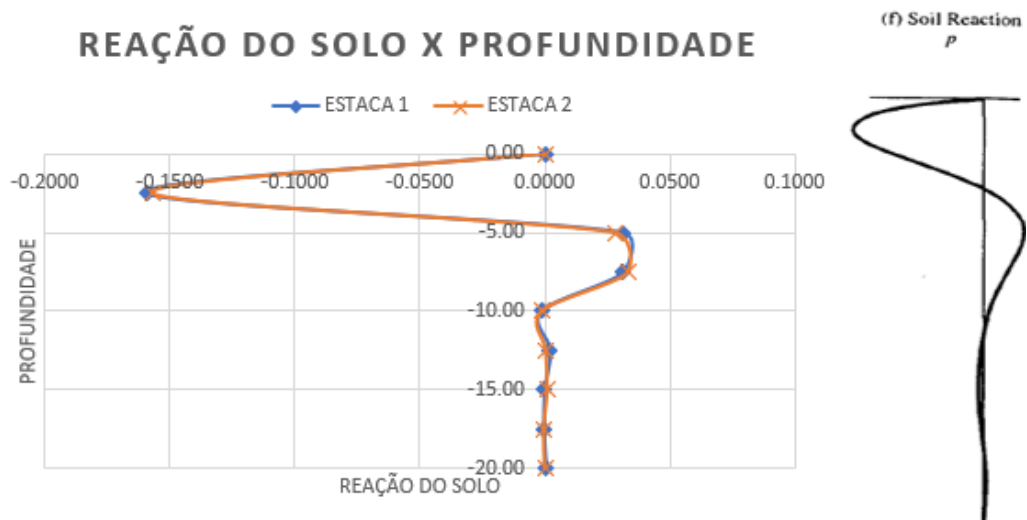
Para as duas estacas modeladas, a Tabela 19 apresenta os valores da reação do solo em função da profundidade. Na Figura 50 está disposto o gráfico da reação do solo em função da profundidade, tendo este, um comportamento similar ao que é mostrado por Coduto (1994).

Tabela 19 – Reação do Solo em função da profundidade para as duas estacas com bloco

Profundidade (m)	Estaca 1	Estaca 2
	Reação do Solo (kN/m <sup>2</sup> )	Reação do Solo (kN/m <sup>2</sup> )
0.00	0.0000	0.0000
-2.50	-0.1594	-0.1572
-5.00	0.0310	0.0279
-7.50	0.0316	0.0336
-10.00	-0.0014	-0.0011
-12.50	0.0022	0.0005
-15.00	-0.0001	0.0010
-17.50	-0.0003	-0.0004
-20.00	0.0006	0.0001

Fonte: Autor (2019)

Figura 50 – Gráfico da Reação do Solo x Profundidade (Duas estacas com bloco)

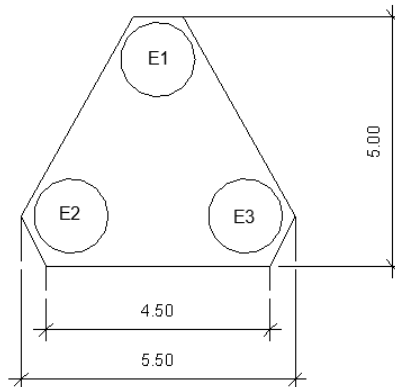


Fonte: Autor (2019)

### 4.3 Três estacas com bloco de coroamento – P24

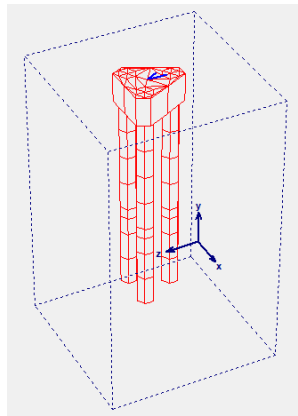
A terceira estrutura modelada é de um bloco de coroamento com três estacas, estando imerso no solo proposto por Soares (2004) e com dimensões de trabalho de 15 m x 15 m. As dimensões do bloco triangular e a numeração das estacas são indicadas na Figura 51, tendo estacas com 1,5 m de diâmetro e profundidade de 20 metros (Figura 52). Assim como um carregamento de 50kN na direção “z”, como visto na Figura 53.

*Figura 51 – Dimensões em metro do bloco de três estacas e numeração das estacas*



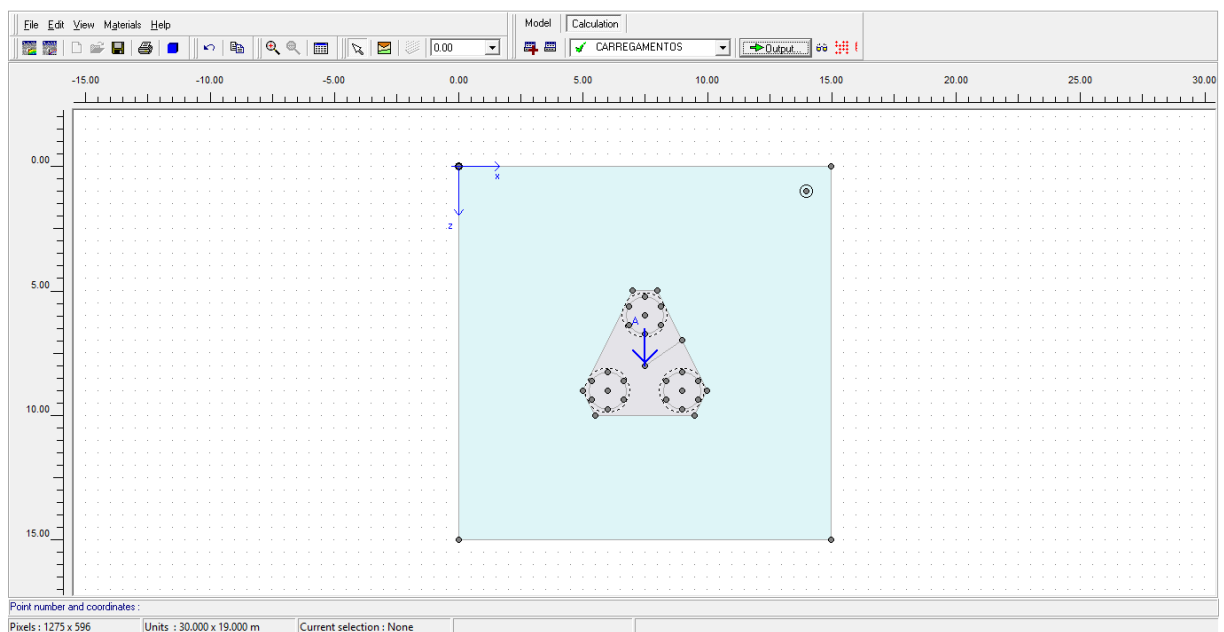
Fonte: Autor (2019)

*Figura 52 – Vista do modelo de três estacas com bloco de coroamento (sem solo)*



Fonte: Autor (2019)

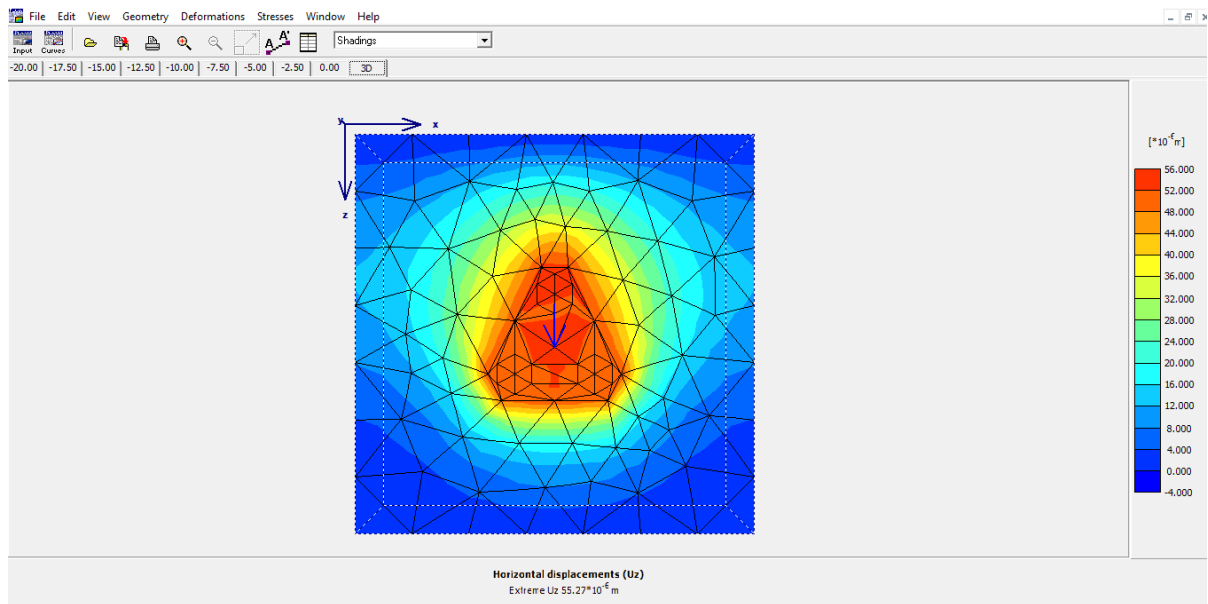
*Figura 53 – Carregamento do Sistema*



Fonte: Autor (2019)

Com a etapa de modelagem e cálculo completas, os resultados são gerados no “output” do software, e é nela onde pode-se perceber a influência da carga na estrutura bloco/estaca e consequentemente no solo o qual ela está imersa (Figura 54).

Figura 54 – Deslocamentos no topo do sistema



Fonte: Autor (2019)

Com isso, os deslocamentos em função da profundidade para cada uma das três estacas podem ser extraídos da Tabela do output do *Plaxis 3D Foundation*. A Tabela 20 traz os deslocamentos obtidos no software.

Tabela 20 – Deslocamentos em função da profundidade para as três estacas com bloco

Profundidade (m)	Estaca 1		Estaca 2		Estaca 3	
	Nó	Deslocamento (m)	Nó	Deslocamento (m)	Nó	Deslocamento (m)
0.00	93	5.23E-05	175	5.16E-05	254	5.16E-05
-2.50	621	3.62E-05	694	3.70E-05	761	3.70E-05
-5.00	1100	1.89E-05	1173	1.96E-05	1240	1.96E-05
-7.50	1579	6.57E-06	1652	6.71E-06	1719	6.73E-06
-10.00	2058	5.15E-07	2131	4.58E-07	2198	4.67E-07
-12.50	2537	-1.28E-06	2610	-1.61E-06	2677	-1.60E-06
-15.00	3495	-2.22E-06	3568	-1.61E-06	3635	-1.61E-06
-17.50	3974	-2.96E-06	4047	-1.13E-06	4114	-1.14E-06
-20.00	4453	-2.76E-06	4526	-6.43E-07	4593	-6.54E-07

Fonte: Autor (2019)

Tendo os deslocamentos em função da profundidade para cada uma das estacas, e considerando de forma simplificada que cada estaca irá receber um terço da carga recebida no bloco, pode-se calcular os demais esforços utilizando o Método das Diferenças Finitas, como visto nas Tabelas 21, 22 e 23.

*Tabela 21 – Esforços calculados pelo MDF (Estaca 1)*

Pontos	Prof. (m)	Desloc. (m)	Rotação (rad)	Momento (kN.m)	Cortante (kN)	Reação do Solo (kN/m <sup>2</sup> )
-2	-	1.62E-05	-	-	-	-
-1	-	6.84E-05	-	-	-	-
1	0.00	5.23E-05	-6.44E-06	0.00	16.67	0.00
2	-2.50	3.62E-05	-6.68E-06	-1.48	1.23	1.46
3	-5.00	1.89E-05	-5.93E-06	6.14	1.86	-0.95
4	-7.50	6.57E-06	-3.68E-06	7.80	-0.17	-0.67
5	-10.00	5.15E-07	-1.57E-06	5.29	-1.35	-0.27
6	-12.50	-1.28E-06	-5.47E-07	1.07	-1.01	0.54
7	-15.00	-2.22E-06	-3.34E-07	0.25	0.02	0.28
n	-17.50	-2.96E-06	-1.07E-07	1.16	-0.05	-0.33
n+1	-20.00	-2.76E-06	7.98E-08	0.00	0.00	0.26
n+2	-	-2.56E-06	-	-	-	-
n+3	-	-1.96E-06	-	-	-	-

Fonte: Autor (2019)

*Tabela 22 – Esforços calculados pelo MDF (Estaca 2)*

Pontos	Prof. (m)	Desloc. (m)	Rotação (rad)	Momento (kN.m)	Cortante (kN)	Reação do Solo (kN/m <sup>2</sup> )
-2	-	1.09E-05	-	-	-	-
-1	-	6.62E-05	-	-	-	-
1	0.00	5.16E-05	-5.85E-06	0.00	16.67	0.00
2	-2.50	3.70E-05	-6.39E-06	-3.38	1.10	1.96
3	-5.00	1.96E-05	-6.05E-06	5.51	2.33	-0.98
4	-7.50	6.71E-06	-3.83E-06	8.25	-0.06	-0.93
5	-10.00	4.58E-07	-1.66E-06	5.20	-1.14	0.07
6	-12.50	-1.61E-06	-4.13E-07	2.56	-0.92	0.11
7	-15.00	-1.61E-06	9.61E-08	0.60	-0.51	0.22
n	-17.50	-1.13E-06	1.93E-07	0.00	-0.12	0.10
n+1	-20.00	-6.43E-07	1.93E-07	0.00	0.00	0.19
n+2	-	-1.59E-07	-	-	-	-
n+3	-	1.29E-06	-	-	-	-

Fonte: Autor (2019)

Tabela 23 – Esforços calculados pelo MDF (Estaca 3)

Pontos	Prof. (m)	Desloc. (m)	Rotação (rad)	Momento (kN.m)	Cortante (kN)	Reação do Solo (kN/m <sup>2</sup> )
-2	-	1.09E-05	-	-	-	-
-1	-	6.62E-05	-	-	-	-
1	0.00	5.16E-05	-5.84E-06	0.00	16.67	0.00
2	-2.50	3.70E-05	-6.40E-06	-3.42	1.10	1.98
3	-5.00	1.96E-05	-6.06E-06	5.52	2.34	-0.99
4	-7.50	6.73E-06	-3.84E-06	8.26	-0.06	-0.93
5	-10.00	4.67E-07	-1.67E-06	5.20	-1.14	0.07
6	-12.50	-1.60E-06	-4.16E-07	2.55	-0.92	0.11
7	-15.00	-1.61E-06	9.30E-08	0.61	-0.51	0.21
n	-17.50	-1.14E-06	1.92E-07	0.00	-0.12	0.10
n+1	-20.00	-6.54E-07	1.92E-07	0.00	0.00	0.19
n+2	-	-1.73E-07	-	-	-	-
n+3	-	1.27E-06	-	-	-	-

Fonte: Autor (2019)

#### 4.3.1 Deslocamento

Esta modelagem tem seu deslocamento principal seguindo a direção da carga, ou seja, no eixo “z”. A Tabela 24 traz o deslocamento em função da profundidade para cada uma das estacas.

A Figura 55 apresenta o gráfico do deslocamento das três estacas em função da profundidade. É de se esperar que as estacas dois e três tenham um comportamento um pouco diferente ao da estaca um, devido ao fato de estarem em posições diferentes em relação a carga. Apesar disso, ambas seguem um comportamento próximo do que é encontrado em Coduto (1994).

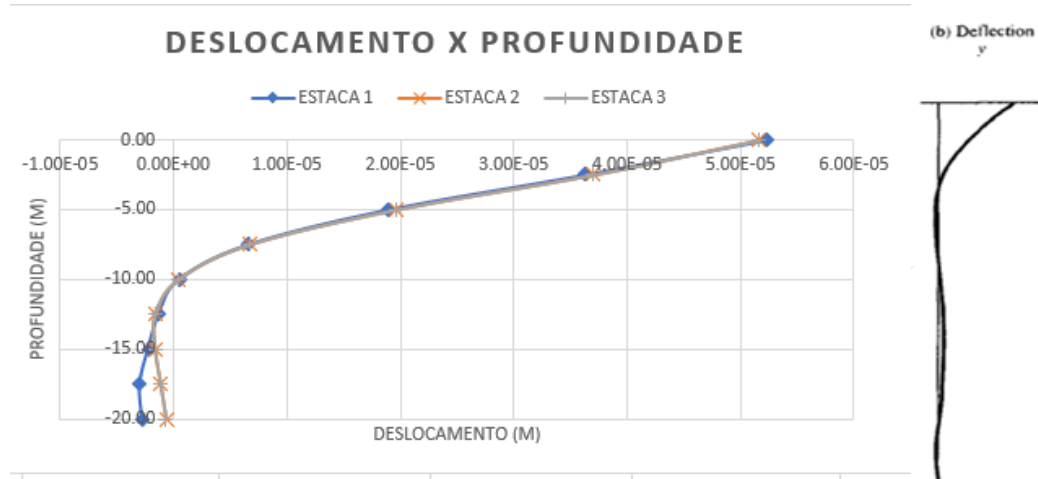
Tabela 24 – Deslocamento em função da profundidade (Bloco com três estacas)

Profundidade (m)	Estaca 1	Estaca 2	Estaca 3
	Deslocamento (m)	Deslocamento (m)	Deslocamento (m)
0.00	5.23E-05	5.16E-05	5.16E-05
-2.50	3.62E-05	3.70E-05	3.70E-05
-5.00	1.89E-05	1.96E-05	1.96E-05
-7.50	6.57E-06	6.71E-06	6.73E-06
-10.00	5.15E-07	4.58E-07	4.67E-07
-12.50	-1.28E-06	-1.61E-06	-1.60E-06
-15.00	-2.22E-06	-1.61E-06	-1.61E-06
-17.50	-2.96E-06	-1.13E-06	-1.14E-06
-20.00	-2.76E-06	-6.43E-07	-6.54E-07

Fonte: Autor (2019)



Figura 55 – Gráfico do Deslocamento x Profundidade (Bloco com três estacas)



Fonte: Autor (2019)

#### 4.3.2 Rotação

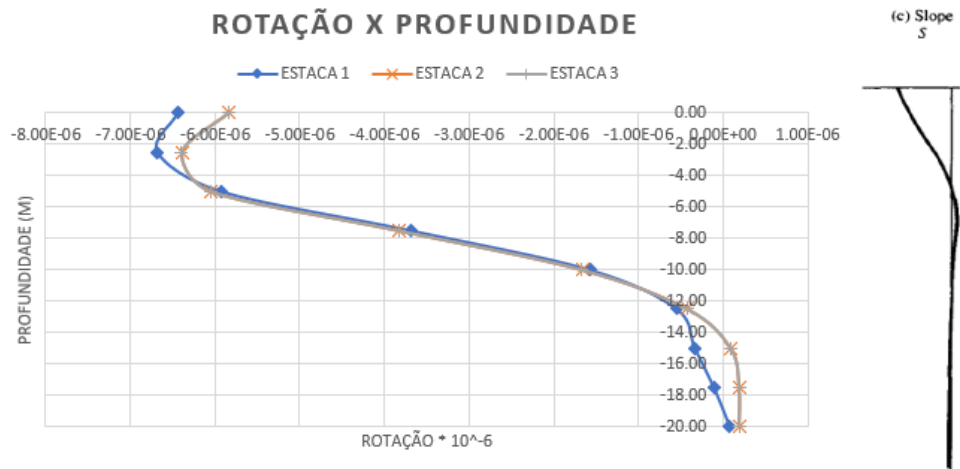
A Tabela 25 traz os valores de rotação em função da profundidade para as três estacas. Na Figura 56 está disposto o gráfico da rotação em função da profundidade, o qual segue, em ambos os casos, um comportamento próximo ao previsto por Coduto (1994).

Tabela 25 – Rotação em Função da profundidade (Bloco com três estacas)

Profundidade	Estaca 1	Estaca 2	Estaca 3
	Rotação (rad)	Rotação (rad)	Rotação (rad)
0.00	-6.4424E-06	-5.85E-06	-5.84E-06
-2.50	-6.6813E-06	-6.39E-06	-6.40E-06
-5.00	-5.93004E-06	-6.05E-06	-6.06E-06
-7.50	-3.68198E-06	-3.83E-06	-3.84E-06
-10.00	-1.57178E-06	-1.66E-06	-1.67E-06
-12.50	-5.4713E-07	-4.13E-07	-4.16E-07
-15.00	-3.34461E-07	9.61E-08	9.30E-08
-17.50	-1.07183E-07	1.93E-07	1.92E-07
-20.00	7.97932E-08	1.93E-07	1.92E-07

Fonte: Autor (2019)

Figura 56 – Gráfico da Rotação x Profundidade (Bloco com três estacas)



Fonte: Autor (2019)

#### 4.3.3 Momento

A Tabela 26 apresenta os valores de momento em função da profundidade para cada uma das três estacas. Neste caso já é possível perceber uma inversão dos valores de momento diferindo do previsto por Coduto (1994), como visto na Figura 57.

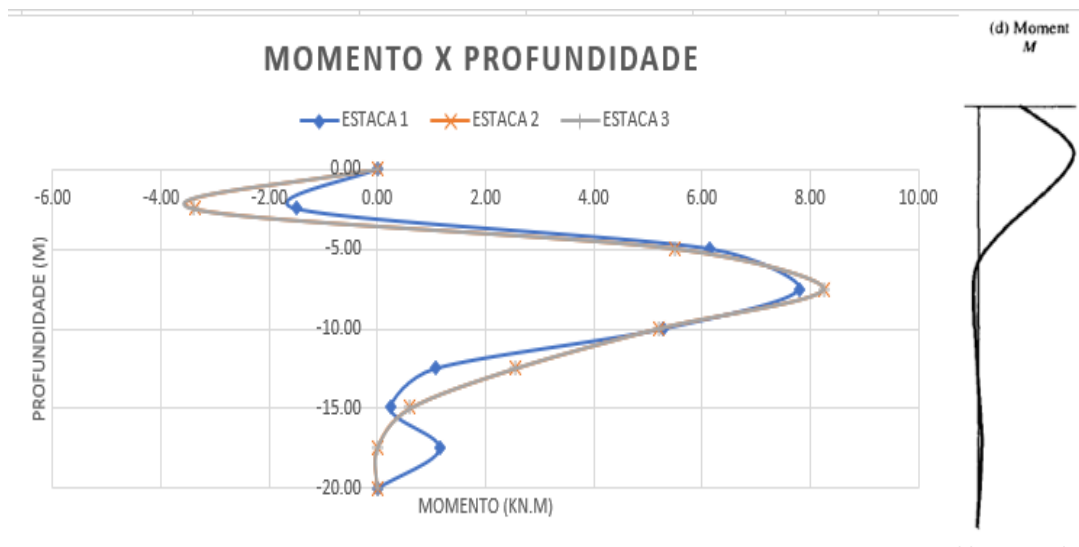
Este fato, possivelmente, pode se dar, devido a rigidez que o bloco triangular oferece a estrutura, já que o MDF foi idealizado para estacas sem bloco de coroamento e neste presente trabalho foi feito uma adaptação para estacas com blocos.

Tabela 26 – Momento em função da profundidade (Bloco com três estacas)

Profundidade (m)	Estaca 1	Estaca 2	Estaca 3
	Momento (kN.m)	Momento (kN.m)	Momento (kN.m)
0.00	0.00	0.00	0.00
-2.50	-1.48	-3.38	-3.42
-5.00	6.14	5.51	5.52
-7.50	7.80	8.25	8.26
-10.00	5.29	5.20	5.20
-12.50	1.07	2.56	2.55
-15.00	0.25	0.60	0.61
-17.50	1.16	0.00	0.00
-20.00	0.00	0.00	0.00

Fonte: Autor (2019)

Figura 57 – Gráfico de Momento x Profundidade (Bloco com três estacas)



Fonte: Autor (2019)

#### 4.3.4 Cortante

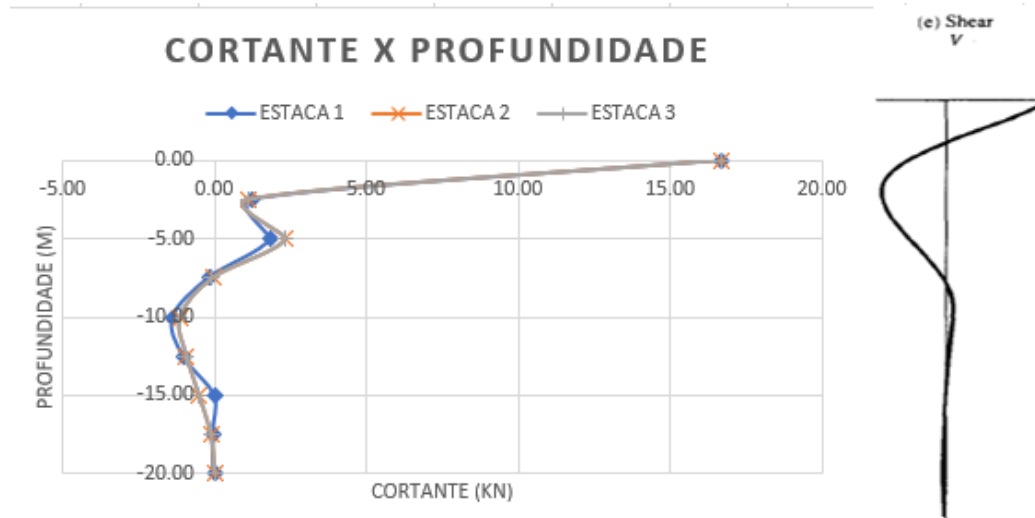
De forma simplificada, adotou-se um terço da carga do topo do bloco, ou seja, 16,67 kN para cada estaca. A Tabela 27 traz os valores de cortante em função da profundidade. Na Figura 58 está disposto o gráfico do cortante em função da profundidade para as três estacas modeladas. Ambas as curvas se assemelham ao comportamento previsto por Coduto (1994).

Tabela 27 – Cortante em função da profundidade (Bloco com três estacas)

Profundidade (m)	Estaca 1	Estaca 2	Estaca 3
	Cortante (kN)	Cortante (kN)	Cortante (kN)
0.00	16.67	16.67	16.67
-2.50	1.23	1.10	1.10
-5.00	1.86	2.33	2.34
-7.50	-0.17	-0.06	-0.06
-10.00	-1.35	-1.14	-1.14
-12.50	-1.01	-0.92	-0.92
-15.00	0.02	-0.51	-0.51
-17.50	-0.05	-0.12	-0.12
-20.00	0.00	0.00	0.00

Fonte: Autor (2019)

Figura 58 – Gráfico do Cortante x Profundidade (Bloco com três estacas)



Fonte: Autor (2019)

#### 4.3.5 Reação do Solo

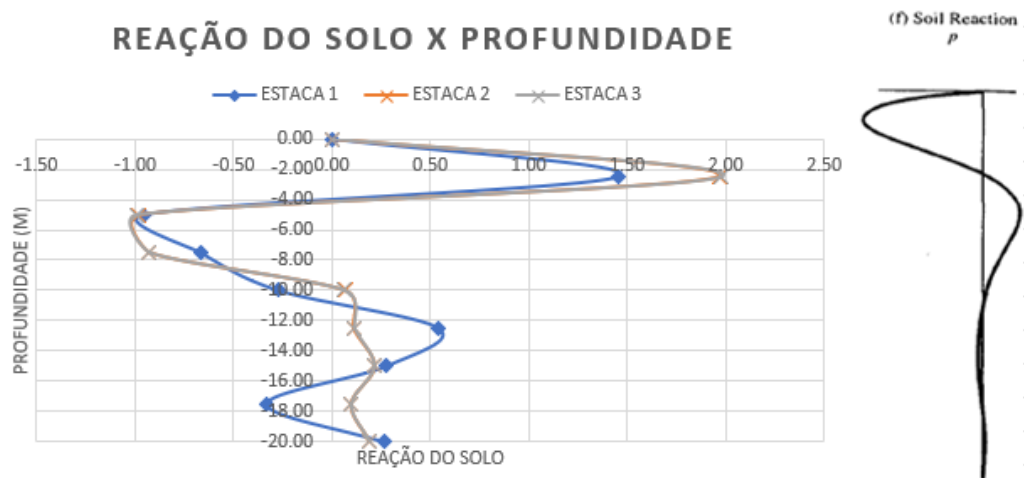
A Tabela 28 traz os valores de reação do solo em função da profundidade, e a Figura 59 o gráfico referente a tabela. Nele é possível perceber, assim como no momento, uma inversão dos valores no início da curva. Com isso, este fato possivelmente ocorre devido a rigidez que o bloco oferece a estrutura.

Tabela 28 – Reação do Solo em função da profundidade (Bloco com três estacas)

Profundidade	Estaca 1	Estaca 2	Estaca 3
	Reação do Solo (kN/m <sup>2</sup> )	Reação do Solo (kN/m <sup>2</sup> )	Reação do Solo (kN/m <sup>2</sup> )
0.00	0.00	0.00	0.00
-2.50	1.46	1.96	1.98
-5.00	-0.95	-0.98	-0.99
-7.50	-0.67	-0.93	-0.93
-10.00	-0.27	0.07	0.07
-12.50	0.54	0.11	0.11
-15.00	0.28	0.22	0.21
-17.50	-0.33	0.10	0.10
-20.00	0.26	0.19	0.19

Fonte: Autor (2019)

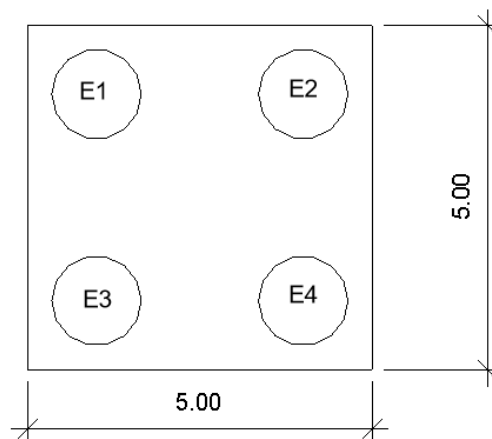
Figura 59 - Gráfico da Reação do Solo x Profundidade (Bloco com três estacas)



#### 4.4 Quatro estacas com bloco de coroamento – P27

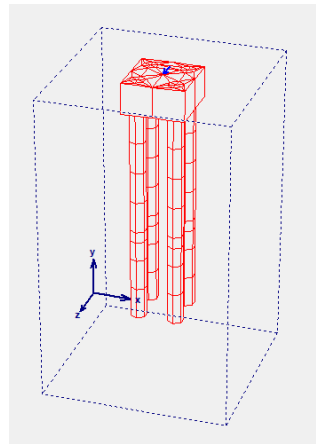
A última estrutura modelada consiste em quatro estacas com um bloco de coroamento, sendo estas, imersas no solo proposto por Soares (2004). O sistema conta com uma superfície de trabalho de 15 m x 15 m. As dimensões do bloco quadrado e a numeração das estacas são indicadas na Figura 60, tendo estacas com 1,3 m de diâmetro e profundidade de 20 metros (Figura 61). Assim como um carregamento adotado de 50kN na direção “z”, como visto na Figura 62.

Figura 60 – Dimensões do bloco de quatro estacas e numeração das estacas



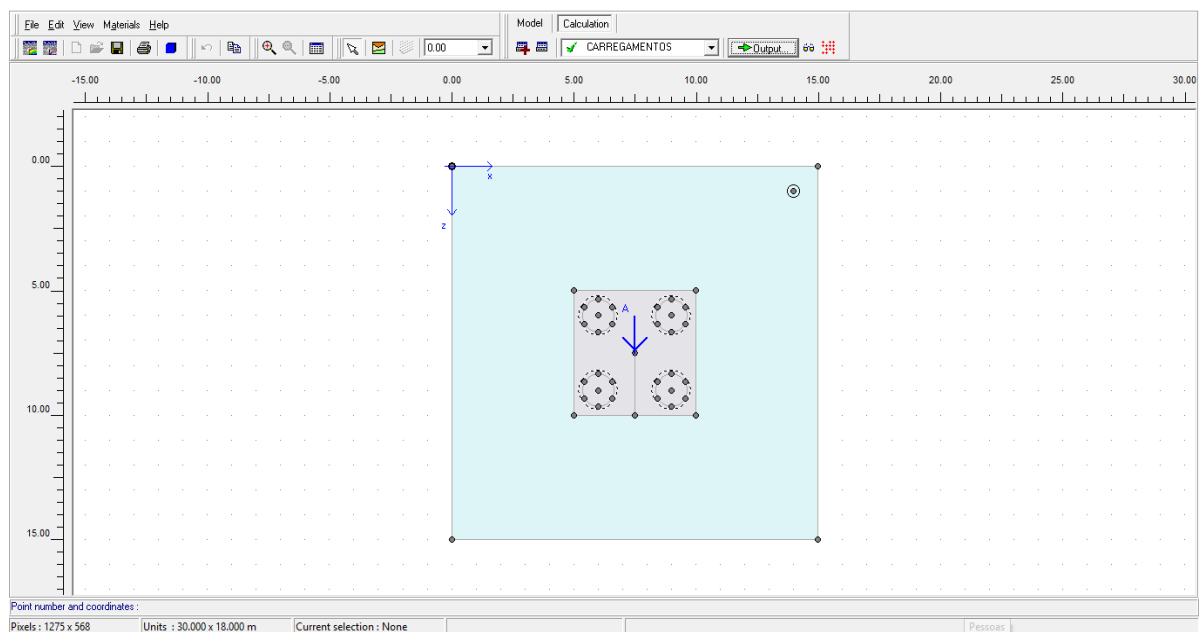
Fonte: Autor (2019)

Figura 61 – Vista do modelo do bloco de quatro estacas (sem o solo)



Fonte: Autor (2019)

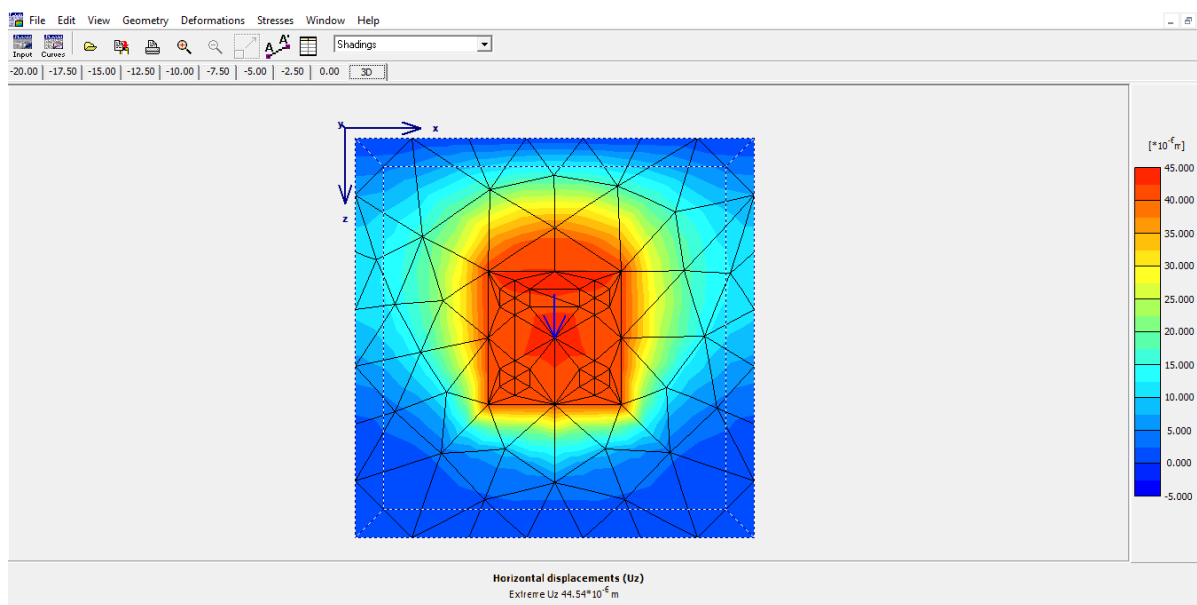
Figura 62 – Carregamento do Sistema



Fonte: Autor (2019)

Com a etapa de modelagem e cálculo completas, os resultados são gerados no “*output*” do software, e é nela onde pode-se perceber a influência da carga na estrutura bloco/estaca e consequentemente no solo o qual ela está imersa (Figura 63). Tendo na Tabela 29 os resultados de deslocamento em função da profundidade retirados do *Plaxis 3D Foundation*.

Figura 63 – Deformações totais no topo da estrutura



Fonte: Autor (2019)

Tabela 29 – Deslocamento em função da profundidade via Plaxis 3D Foundation

Profundidade (m)	E1		E2		E3		E4	
	Nó	Deslocamento (m)	Nó	Deslocamento (m)	Nó	Deslocamento (m)	Nó	Deslocamento (m)
0.00	84	4.23E-05	109	4.23E-05	179	4.15E-05	260	4.15E-05
-2.50	565	2.99E-05	585	2.99E-05	648	3.09E-05	712	3.09E-05
-5.00	979	1.54E-05	999	1.53E-05	1062	1.63E-05	1126	1.63E-05
-7.50	1393	4.66E-06	1413	4.65E-06	1476	5.51E-06	1540	5.50E-06
-10.00	1807	-1.07E-07	1827	-1.07E-07	1890	5.37E-07	1954	5.33E-07
-12.50	2221	-1.07E-06	2241	-1.06E-06	2304	-1.17E-06	2368	-1.17E-06
-15.00	3049	-1.63E-06	3069	-1.64E-06	3132	-7.86E-07	3196	-7.86E-07
-17.50	3463	-2.23E-06	3483	-2.24E-06	3546	2.12E-08	3610	2.45E-08
-20.00	3877	-2.12E-06	3897	-2.12E-06	3960	4.42E-07	4024	4.47E-07

Fonte: Autor (2019)

Com os deslocamentos obtidos e utilizando as equações descritas no Método das Diferenças Finitas, calcula-se os demais esforços. Levando em conta que, neste caso específico, será considerado de forma simplificada que cada estaca receberá um carregamento de um quarto do carregamento horizontal do topo do bloco. Como visto nas Tabelas 30, 31, 32 e 33.

Tabela 30 – Esforços calculados pelo MDF (Estaca 1)

Pontos	Prof. (m)	Desloc. (m)	Rotação (rad)	Momento (kN.m)	Cortante (kN)	Reação do Solo (kN/m <sup>2</sup> )
-2	-	-2.75E-05	-	-	-	-
-1	-	5.31E-05	-	-	-	-
1	0.00	4.15E-05	-4.64E-06	0.00	12.50	0.00
2	-2.50	2.99E-05	-5.22E-06	-2.04	0.53	1.08
3	-5.00	1.54E-05	-5.05E-06	2.66	1.24	-0.51
4	-7.50	4.66E-06	-3.10E-06	4.16	0.00	-0.48
5	-10.00	-1.07E-07	-1.15E-06	2.67	-0.78	-0.14
6	-12.50	-1.07E-06	-3.06E-07	0.28	-0.54	0.33
7	-15.00	-1.63E-06	-2.33E-07	-0.02	0.04	0.13
n	-17.50	-2.23E-06	-9.68E-08	0.50	0.00	-0.16
n+1	-20.00	-2.12E-06	4.58E-08	0.00	0.00	0.11
n+2	-	-2.00E-06	-	-	-	-
n+3	-	-1.66E-06	-	-	-	-

Fonte: Autor (2019)

Tabela 31 – Esforços calculados pelo MDF (Estaca 2)

Pontos	Prof. (m)	Desloc. (m)	Rotação (rad)	Momento (kN.m)	Cortante (kN)	Reação do Solo (kN/m <sup>2</sup> )
-2	-	-2.42E-05	-	-	-	-
-1	-	5.47E-05	-	-	-	-
1	0.00	4.23E-05	-4.97E-06	0.00	12.50	0.00
2	-2.50	2.99E-05	-5.39E-06	-1.47	0.54	0.90
3	-5.00	1.53E-05	-5.05E-06	2.69	1.13	-0.43
4	-7.50	4.65E-06	-3.09E-06	4.16	-0.01	-0.47
5	-10.00	-1.07E-07	-1.14E-06	2.66	-0.78	-0.14
6	-12.50	-1.06E-06	-3.06E-07	0.27	-0.54	0.34
7	-15.00	-1.64E-06	-2.34E-07	-0.02	0.05	0.13
n	-17.50	-2.24E-06	-9.72E-08	0.50	0.00	-0.16
n+1	-20.00	-2.12E-06	4.55E-08	0.00	0.00	0.11
n+2	-	-2.01E-06	-	-	-	-
n+3	-	-1.67E-06	-	-	-	-

Fonte: Autor (2019)



Tabela 32 - Esforços calculados pelo MDF (Estaca 3)

Pontos	Prof. (m)	Desloc. (m)	Rotação (rad)	Momento (kN.m)	Cortante (kN)	Reação do Solo (kN/m <sup>2</sup> )
-2	-	-3.05E-05	-	-	-	-
-1	-	5.21E-05	-	-	-	-
1	0.00	4.15E-05	-4.25E-06	0.00	12.50	0.00
2	-2.50	3.09E-05	-5.04E-06	-2.76	0.53	1.30
3	-5.00	1.63E-05	-5.07E-06	2.63	1.37	-0.63
4	-7.50	5.51E-06	-3.16E-06	4.08	-0.07	-0.52
5	-10.00	5.37E-07	-1.34E-06	2.29	-0.52	0.16
6	-12.50	-1.17E-06	-2.65E-07	1.46	-0.40	-0.05
7	-15.00	-7.86E-07	2.38E-07	0.30	-0.35	0.10
n	-17.50	2.12E-08	2.46E-07	-0.27	-0.06	0.13
n+1	-20.00	4.42E-07	1.68E-07	0.00	0.00	0.05
n+2	-	8.63E-07	-	-	-	-
n+3	-	2.13E-06	-	-	-	-

Fonte: Autor (2019)

Tabela 33 - Esforços calculados pelo MDF (Estaca 4)

Pontos	Prof. (m)	Desloc. (m)	Rotação (rad)	Momento (kN.m)	Cortante (kN)	Reação do Solo (kN/m <sup>2</sup> )
-2	-	-3.05E-05	-	-	-	-
-1	-	5.21E-05	-	-	-	-
1	0.00	4.15E-05	-4.25E-06	0.00	12.50	0.00
2	-2.50	3.09E-05	-5.04E-06	-2.75	0.53	1.30
3	-5.00	1.63E-05	-5.07E-06	2.63	1.37	-0.63
4	-7.50	5.50E-06	-3.15E-06	4.08	-0.07	-0.52
5	-10.00	5.33E-07	-1.33E-06	2.28	-0.52	0.16
6	-12.50	-1.17E-06	-2.64E-07	1.46	-0.40	-0.06
7	-15.00	-7.86E-07	2.39E-07	0.30	-0.35	0.10
n	-17.50	2.45E-08	2.47E-07	-0.27	-0.06	0.13
n+1	-20.00	4.47E-07	1.69E-07	0.00	0.00	0.05
n+2	-	8.69E-07	-	-	-	-
n+3	-	2.14E-06	-	-	-	-

Fonte: Autor (2019)

#### 4.4.1 Deslocamento

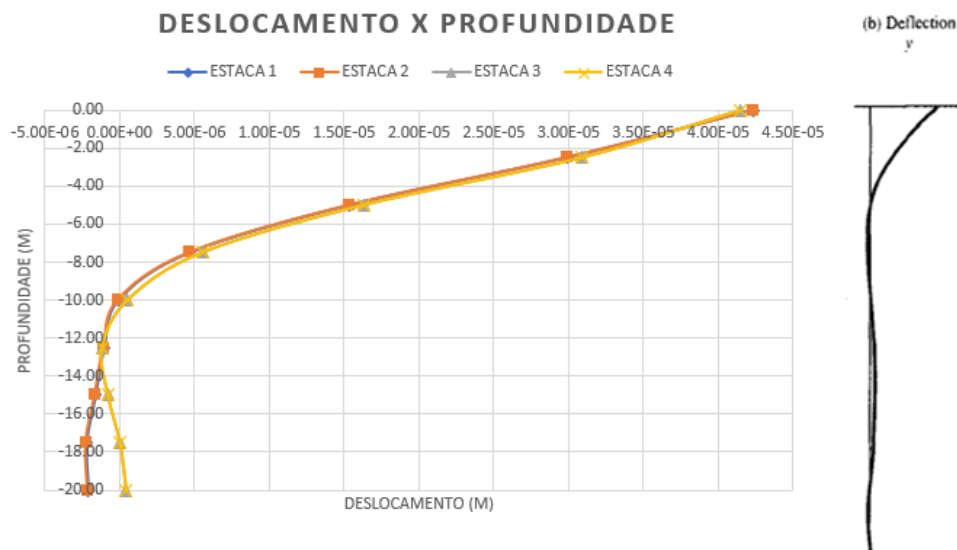
Esta modelagem tem seu deslocamento principal seguindo a direção da carga, ou seja, no eixo “z”. A Tabela 34 traz o deslocamento em função da profundidade para cada uma das estacas. A Figura 64 apresenta o gráfico do deslocamento das quatro estacas em função da profundidade.

Tabela 34 – Deslocamento em função da profundidade (Bloco com quatro estacas)

Profundidade (m)	Estaca 1	Estaca 2	Estaca 3	Estaca 4
	Deslocamento (m)	Deslocamento (m)	Deslocamento (m)	Deslocamento (m)
0.00	4.23E-05	4.23E-05	-4.25E-06	4.15E-05
-2.50	2.99E-05	2.99E-05	-5.04E-06	3.09E-05
-5.00	1.54E-05	1.53E-05	-5.07E-06	1.63E-05
-7.50	4.66E-06	4.65E-06	-3.16E-06	5.50E-06
-10.00	-1.07E-07	-1.07E-07	-1.34E-06	5.33E-07
-12.50	-1.07E-06	-1.06E-06	-2.65E-07	-1.17E-06
-15.00	-1.63E-06	-1.64E-06	2.38E-07	-7.86E-07
-17.50	-2.23E-06	-2.24E-06	2.46E-07	2.45E-08
-20.00	-2.12E-06	-2.12E-06	1.68E-07	4.47E-07

Fonte: Autor (2019)

Figura 64 – Deslocamento x Profundidade (Bloco com quatro estacas)



Fonte: Autor (2019)

É de se esperar que as estacas um e dois tenham comportamento idênticos como pode ser observado no gráfico acima, e isso se dá devido ao fato de estarem em uma posição semelhante em relação a carga. Assim como a estaca três e quatro. Apesar desta diferença entre as duplas, ambas as estacas seguem um comportamento próximo ao previsto por Coduto (1994).

#### 4.4.2 Rotação

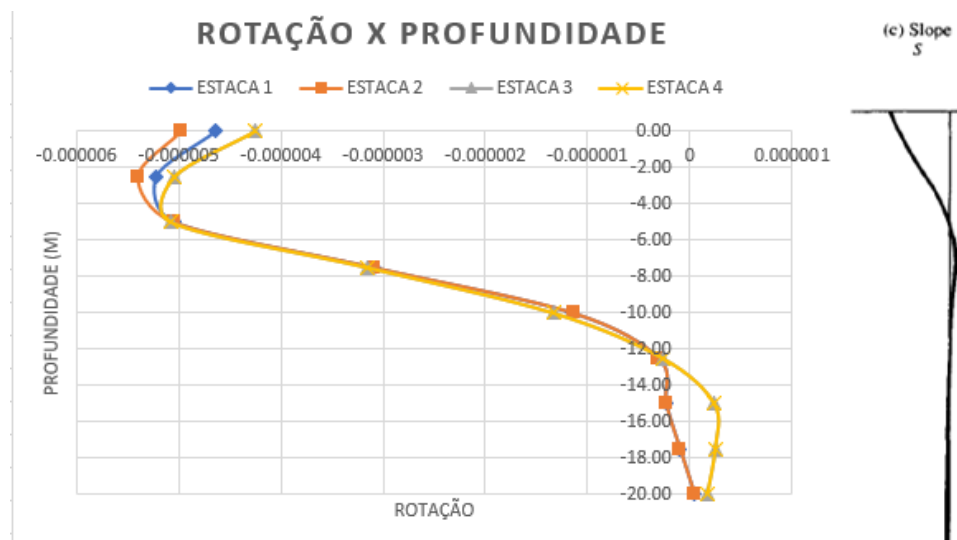
A Tabela 35 traz os valores de rotação em função da profundidade para as quatro estacas. A Figura 65 apresenta o gráfico da rotação em função da profundidade, o qual segue em ambos os casos, um comportamento próximo ao previsto por Coduto (1994).

Tabela 35 – Rotação em função da profundidade (Bloco com quatro estacas)

Profundidade (m)	Estaca 1 Rotação (rad)	Estaca 2 Rotação (rad)	Estaca 3 Rotação (rad)	Estaca 4 Rotação (rad)
0.00	-4.64224E-06	-4.97E-06	-4.25E-06	-4.25E-06
-2.50	-5.22415E-06	-5.39E-06	-5.04E-06	-5.04E-06
-5.00	-5.04557E-06	-5.05E-06	-5.07E-06	-5.07E-06
-7.50	-3.0968E-06	-3.09E-06	-3.16E-06	-3.15E-06
-10.00	-1.14669E-06	-1.14E-06	-1.34E-06	-1.33E-06
-12.50	-3.05555E-07	-3.06E-07	-2.65E-07	-2.64E-07
-15.00	-2.32837E-07	-2.34E-07	2.38E-07	2.39E-07
-17.50	-9.68178E-08	-9.72E-08	2.46E-07	2.47E-07
-20.00	4.57852E-08	4.55E-08	1.68E-07	1.69E-07

Fonte: Autor (2019)

Figura 65 – Rotação x Profundidade (Bloco com quatro estacas)



Fonte: Autor (2019)

#### 4.4.3 Momento

A Tabela 36 traz os valores de momento em função da profundidade para cada uma das quatro estacas. Neste caso já é possível perceber uma inversão dos valores de momento diferindo do previsto por Coduto (1994), como visto na Figura 66.

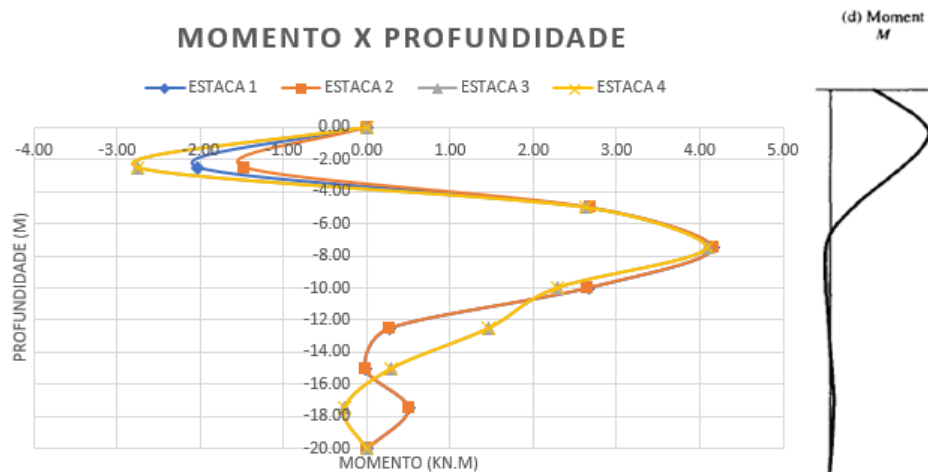
Este fato, possivelmente, pode se dar, devido a rigidez que o bloco oferece a estrutura, já que o MDF foi idealizado para estacas sem bloco de coroamento e neste presente trabalho foi feito uma adaptação para estacas com blocos.

Tabela 36 – Momento em função da profundidade (Bloco com quatro estacas)

Profundidade	Estaca 1	Estaca 2	Estaca 3	Estaca 4
	Momento (kN.m)	Momento (kN.m)	Momento (kN.m)	Momento (kN.m)
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
-2.50	-2.04	-1.47	-2.76	-2.75
-5.00	2.66	2.69	2.63	2.63
-7.50	4.16	4.16	4.08	4.08
-10.00	2.67	2.66	2.29	2.28
-12.50	0.28	0.27	1.46	1.46
-15.00	-0.02	-0.02	0.30	0.30
-17.50	0.50	0.50	-0.27	-0.27
-20.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Fonte: Autor (2019)

Figura 66 – Momento x Profundidade (Bloco com quatro estacas)



Fonte: Autor (2019)

#### 4.4.4 Cortante

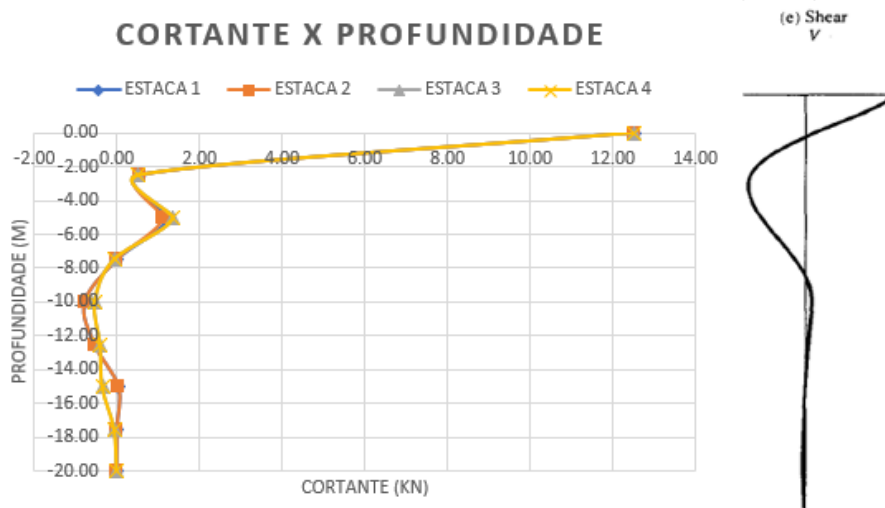
Como nos casos de duas e três estacas, adotou-se de forma simplificada a carga dividida de forma igual para ambas as estacas, o que gera um valor de 12,50 kN por estaca. A Tabela 37 traz os valores de cortante em função da profundidade. A Figura 67 mostra o gráfico do cortante em função da profundidade para as quatro estacas modeladas. Ambas as curvas se assemelham ao comportamento previsto por Coduto (1994).

Tabela 37 – Cortante em função da profundidade (Bloco com quatro estacas)

Profundidade	Estaca 1	Estaca 2	Estaca 3	Estaca 4
	Cortante (kN)	Cortante (kN)	Cortante (kN)	Cortante (kN)
0.00	12.50	12.50	12.50	12.50
-2.50	0.53	0.54	0.53	0.53
-5.00	1.24	1.13	1.37	1.37
-7.50	0.00	-0.01	-0.07	-0.07
-10.00	-0.78	-0.78	-0.52	-0.52
-12.50	-0.54	-0.54	-0.40	-0.40
-15.00	0.04	0.05	-0.35	-0.35
-17.50	0.00	0.00	-0.06	-0.06
-20.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Fonte: Autor (2019)

Figura 67 – Cortante x Profundidade (Bloco com quatro estacas)



Fonte: Autor (2019)

#### 4.4.5 Reação do Solo

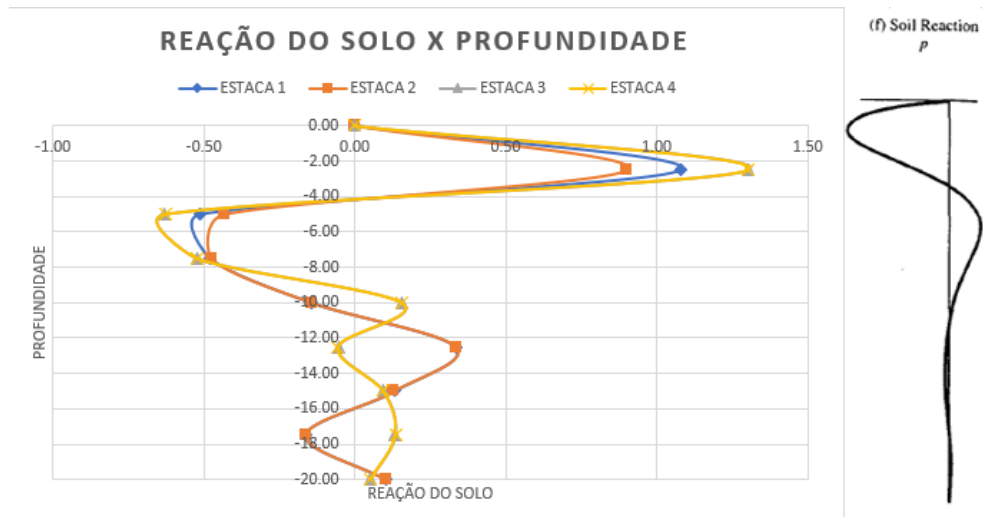
A Tabela 38 traz os valores de reação do solo em função da profundidade, e a Figura 68 o gráfico referente a tabela. Nele é possível perceber, assim como no momento, uma inversão dos valores no início da curva. Com isso, possivelmente, ocorre devido a rigidez que o bloco oferece a estrutura.

Tabela 38 – Reação do Solo em função da profundidade (Bloco com quatro estacas)

Profundidade	Estaca 1	Estaca 2	Estaca 3	Estaca 4
Reação do Solo (kN/m <sup>2</sup> )	Reação do Solo (kN/m <sup>2</sup> )	Reação do Solo (kN/m <sup>2</sup> )	Reação do Solo (kN/m <sup>2</sup> )	Reação do Solo (kN/m <sup>2</sup> )
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
-2.50	1.08	0.90	1.30	1.30
-5.00	-0.51	-0.43	-0.63	-0.63
-7.50	-0.48	-0.47	-0.52	-0.52
-10.00	-0.14	-0.14	0.16	0.16
-12.50	0.33	0.34	-0.05	-0.06
-15.00	0.13	0.13	0.10	0.10
-17.50	-0.16	-0.16	0.13	0.13
-20.00	0.11	0.11	0.05	0.05

Fonte: Autor, 2019.

Figura 68 – Reação do solo x Profundidade (Bloco com quatro estacas)



Fonte: Autor (2019)

#### 4.5 Resumo dos resultados

Com todas as simulações realizadas e consequentemente, obtenção dos seus resultados, torna-se possível avaliar de uma forma geral o comportamento das curvas dos esforços em relação ao estudo realizado por Coduto (1994). A Tabela 39 apresenta de forma resumida a relação entre as fundações modeladas e os esforços calculados, sendo a representação verde do equivalente as simulações que atenderam ao que se esperava de acordo com a literatura, e em vermelho, quando não foi atendido.

Tabela 39 – Resumo de esforços que atenderam ao previsto na literatura

Nº DE ESTACAS	DESLOCAMENTO	ROTAÇÃO	MOMENTO	CORTANTE	REAÇÃO DO SOLO
UMA ESTACA	Atende	Atende	Atende	Atende	Atende
DUAS ESTACAS	Atende	Atende	Atende	Atende	Atende
TRÊS ESTACAS	Atende	Atende	Não Atende	Atende	Não Atende
QUATRO ESTACAS	Atende	Atende	Não Atende	Atende	Não Atende

Fonte: Autor (2019)

Vale salientar que a literatura que traz os resultados mais semelhantes é referente a Coduto (1994), por esse motivo foi escolhida para realizar esta comparação. Porém, o Método das Diferenças Finitas também é tratado por Alonso (1989), Velloso (2004), entre outras literaturas. Em Alonso a rotação e a reação do solo são invertidas comparado com os resultados de Coduto. Já Velloso, inverte apenas o valor da curva de momento.

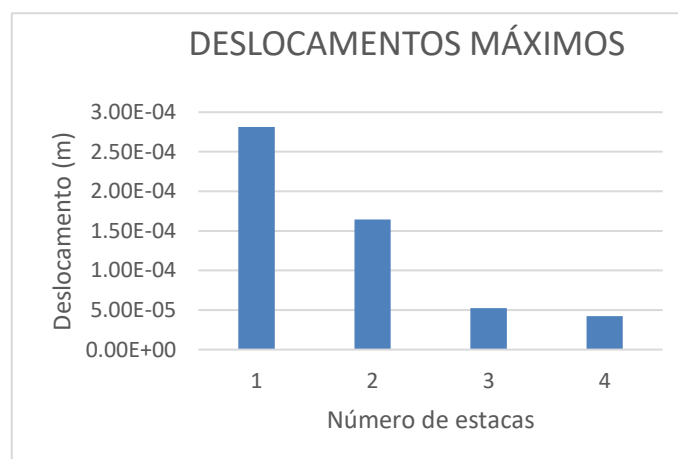
A fim de fazer uma breve comparação entre os 4 modelos, a Tabela 40 resume os valores máximos em módulo do deslocamento, rotação, momento, cortante e reação do solo. Com isso, os gráficos dispostos nas Figuras 69, 70, 71, 72 e 73, apresentam essas comparações.

Tabela 40 – Resumo dos valores máximos em módulo

VALORES MÁXIMOS EM MÓDULO					
Número de Estacas	Deslocamento	Rotação	Momento	Cortante	Reação do Solo
1	2.82E-04	8.04E-05	44.30	7.81	10.36
2	1.64E-04	5.23E-05	0.60	0.12	0.16
3	5.23E-05	6.68E-06	8.26	2.34	1.98
4	4.23E-05	5.39E-06	4.16	1.37	1.30

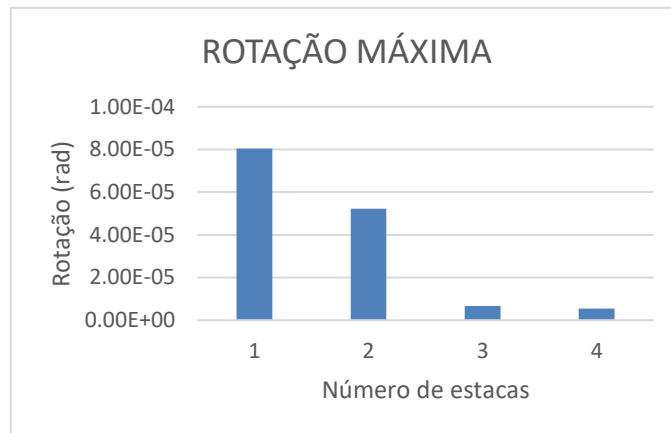
Fonte: Autor (2019)

Figura 69 – Gráfico do Deslocamento máximo x Número de estacas



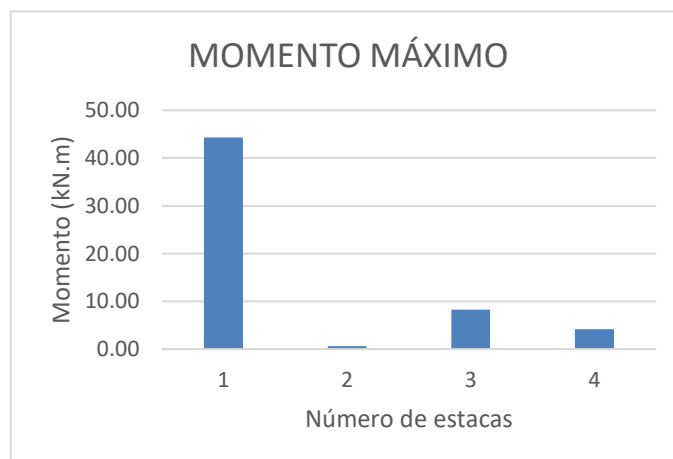
Fonte: Autor (2019)

Figura 70 - Gráfico da Rotação máxima x Número de estacas



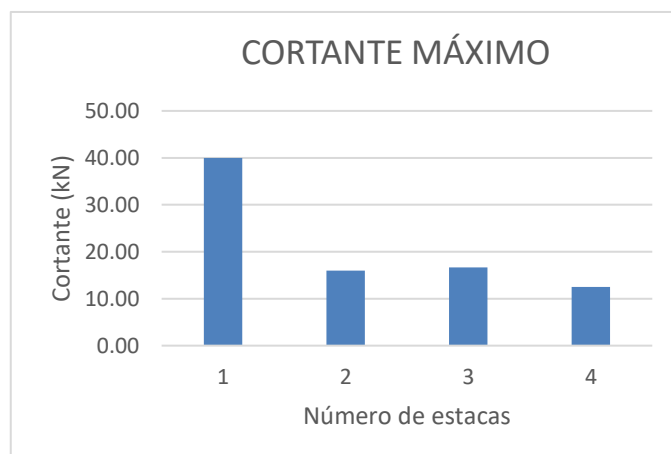
Fonte: Autor (2019)

Figura 71 - Gráfico do Momento máximo x Número de estacas



Fonte: Autor (2019)

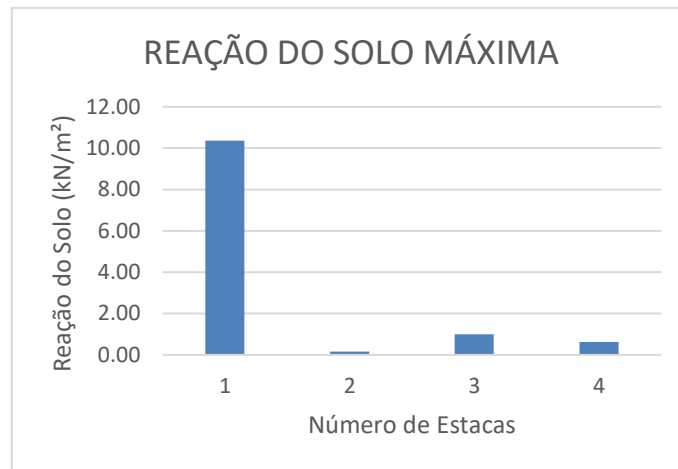
Figura 72 - Gráfico do Cortante máximo x Número de estacas



Fonte: Autor (2019)



Figura 73 - Gráfico da Reação do Solo x Número de estacas



Fonte: Autor (2019)

Pode-se perceber, em relação ao deslocamento, valores decrescentes seguindo o crescimento do número de estacas, o que era de se imaginar devido ao fato de que a carga segue diminuindo e consequentemente foi adicionado um bloco mais rígido ao sistema. Quanto a rotação, se deu da mesma forma que o deslocamento. O momento, por sua vez, teve uma queda acentuada no bloco de duas estacas, devido ao fato de que o diâmetro da mesma é relativamente menor do que as demais e isso faz com que a estaca absorva um momento menor do que uma estaca mais rígida. Já para o cortante, os valores máximos ocorreram no topo da estaca, consequentemente, são os valores de carregamento segundo Soares (2004). Por fim, a reação do solo que segue de forma análoga, o que foi dito para o momento.

---

## 5 CONCLUSÕES

Este presente trabalho teve como objetivo inicial a modelagem das fundações presentes no edifício Confort Flat Taguatinga submetidas a carregamentos transversais, utilizando o software *Plaxis 3D Foundation* e conseguinte a isto, calcular os esforços de rotação, momento, cortante, e reação do solo utilizando o Método das Diferenças Finitas. Pela limitação causada devido aos erros que a etapa de escavação apresentava durante a modelagem, partiu-se para modelos com simplificações.

Para estes modelos reduzidos, foram extraídos os valores de deslocamento em função da profundidade via *Plaxis 3D Foundation*, que se baseia no Método dos Elementos Finitos, e que serviram como dado de entrada para o cálculo dos demais esforços utilizando o Método das Diferenças Finitas. Com isso, os resultados foram comparados com os comportamentos descritos por Coduto (1994).

A comparação entre os esforços calculados obtidos via MDF e dos deslocamentos via MEF, apresentou comportamentos muito próximos para a estaca isolada. Porém, ao aumentar a rigidez do bloco de coroamento, os resultados divergiram um pouco do previsto na literatura. O que já era esperado, pois o MDF foi idealizado para estacas isoladas e neste estudo foi feito uma adaptação para estacas com blocos de coroamento.

Por fim, com os resultados apresentados e as análises feitas, recomenda-se que esta metodologia seja utilizada para estacas sem bloco de coroamento ou que seja feito uma adaptação mais refinada com blocos de coroamento, a fim de ter resultados mais próximos a realidade.

---

## 6 SUJESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

A fim de dar continuidade ao estudo de estacas carregadas horizontalmente, entender melhor o seu comportamento e ultrapassar as dificuldades encontradas neste presente trabalho, recomenda-se que sejam realizadas:

- Modelagens completas das fundações do edifício Confort Flat Taguatinga utilizando o *Plaxis 3D Foundation*;
- Estudar o comportamento das estacas utilizando os demais métodos para estacas carregadas transversalmente;
- Realizar o cálculo dos esforços e dimensionamento de fundações utilizando o software Geo5.

---

## REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6122: projeto e execução de fundações. Rio de Janeiro, 2010.

ALONSO, U. R. **Dimensionamento de fundações profundas**. 1 ed. São Paulo. Edgard Blücher LTDA, 1989.

CODUTO, DONALD P. **Foundation Design: principles and practices**. New Jersey, Prentice-Hall, inc. A Simon & Schuster Company Englewood Cliffs. 1994.

DÉCOURT, L., ALBIERO, J. H. e CINTRA, J. C. A., (1998) **Análise de Projeto de Fundações Profundas. Fundações: teoria e prática**. Hachich, W., Falconi, F. F., Saes, J. L., Frota, R. G. Q., Carvalho, C. S., Niyama, S., 2. ed., Editora PINI Ltda, São Paulo, SP

HACHICH, W.; FALCONI, F. F.; SALES, J. L.; FROTA, R. G. Q.; CARVALHO, C. S.; NIYAMA, S. (Ed.). **Fundações: teoria e prática**. 2. ed. São Paulo: Pini, 1998. p. 265-327.

HANSEN, J.B. **THE ULTIMATE RESISTANCE OF RIGID PILES AGAINST TRANSVERSAL FORCES**. Bulletin n. 12, Danish Geotechnical institute , 1961.

MÉLO, A.W.L. **ESTUDO COMPARATIVO DE FUNDAÇÕES SOBRE APOIOS ELÁSTICOS E SOBRE MODELOS CONSTITUTIVOS**. Caruaru - PE: Universidade Federal de Pernambuco - UFPE, 2018.

POULOS, H.G., DAVIS, E. **Piles Foundations Analysis and Design forces**. 1980. John Wiley & Sons Ins., New York.

RABELLO, Yopanan Conrado Pereira, 1949 – **Fundações: Guia prático de projeto, execução e dimensionamento** / Yopanan C.P. Rabello. – São Paulo: Zigurate Editora, 2008.

SOARES, J.M. **Estudo Numérico-Experimental da Interação Solo-Estrutura em Dois Edifícios do Distrito Federal**. Tese de Doutorado, Publicação G.TD-023A/04, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 265p.2004

SOUSA, C. T. **Ensaio e análise de resposta de estacas em solo residual do granito sob ações horizontais**. 2006. 228 f. Tese (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia do Porto, Portugal.

VELLOSO, Dirceu A.; LOPES, Francisco R. **Fundações** Vol. 1. Nova Edição, Editora Oficina de Textos, São Paulo, SP, 2004

Informação sobre o PLAXIS. Disponível em: <http://www.plaxis.com/>. Acesso 10 julho de 2018.