



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO ACADÊMICO DO AGRESTE
NÚCLEO DE TECNOLOGIA
ENGENHARIA CIVIL

YHAGO CARVALHO SERAFIM

ESTUDO COMPARATIVO DE ESTRUTURAS DE CONTENÇÃO: USO
DE ESTACAS JUSTAPOSTAS E MUROS DE CONCRETO

CARUARU

2018

YHAGO CARVALHO SERAFIM

ESTUDO COMPARATIVO DE ESTRUTURAS DE CONTENÇÃO: USO
DE ESTACAS JUSTAPOSTAS E MUROS DE CONCRETO

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à coordenação do Curso
de Engenharia Civil do Centro
Acadêmico do Agreste - CAA, da
Universidade Federal de Pernambuco
- UFPE, em cumprimento às
exigências para obtenção do grau de
Bacharel em Engenharia Civil.

Área de concentração: **Geotecnia.**

CARUARU

2018

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

S481e Serafim, Yhago Carvalho.

Estudo comparativo de estruturas de contenção: uso de estacas
justapostas e muros de concreto. / Yhago Carvalho Serafim. – 2018.
87 f. il. : 30 cm.

Orientador: José Moura Soares.

Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) – Universidade Federal de
Pernambuco, CAA, Engenharia Civil, 2018.

Inclui Referências.

1. Estacas (Engenharia Civil). 2. Geotecnia. 3. Estruturas. I. Soares, José Moura
(Orientador). II. Título.

CDD 620 (23. ed.)

UFPE (CAA 2018-306)

YHAGO CARVALHO SERAFIM

**ESTUDO COMPARATIVO DE ESTRUTURAS DE CONTENÇÃO: USO
DE ESTACAS JUSTAPOSTAS E MUROS DE CONCRETO**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à coordenação do Curso
de Engenharia Civil do Centro
Acadêmico do Agreste - CAA, da
Universidade Federal de Pernambuco
- UFPE, em cumprimento às
exigências para obtenção do grau de
Bacharel em Engenharia Civil.

Aprovado em 22 de Dezembro de 2018.

BANCA EXAMINADORA

Profº. Dr. José Moura Soares: _____

Universidade Federal de Pernambuco (Orientador)

Profº. Dr. Renato Mahon Macedo: _____

Universidade Federal de Pernambuco (Examinador Interno)

Profª. Drª. Maria Isabela Marques da Cunha Vieira Bello:

Universidade Federal de Pernambuco (Examinadora Interna)

Profº. Dr. Elder Alpes de Vasconcelos: _____

Universidade Federal de Pernambuco (Coordenador da disciplina de TCC)

AGRADECIMENTOS

Agradeço principalmente à minha mãe, Dalka Carvalho, e a minha avó, Luciene Carvalho, por todo apoio que recebi durante toda essa jornada. Nunca mediram esforços para que fosse possível o término deste curso.

Aos demais familiares que sempre me ajudaram e me apoiaram, sempre me dando exemplo de união.

Agradeço à minha namorada, Raquel Ferreira, por sempre estar comigo, me dando apoio nas horas que mais precisei.

Agradeço aos meus amigos Matheus de Melo, Emanuel Marques e Sérgio Manoel por todo apoio e ajuda que me deram, por todas as saídas e conversas que me proporcionaram ótimos momentos de distração.

Aos demais amigos, cada um teve influência sobre esta etapa da minha vida, sempre me apoiando.

Aos professores e a UFPE que me ajudaram nessa caminhada.

Por fim, ao meu orientador José Moura Soares, que me deu todo apoio e ajuda para que este trabalho fosse realizado.

RESUMO

Com o aumento da ocupação nos centros das grandes cidades, os subsolos estão sendo cada vez mais frequentes na construção de edifícios. Visando uma melhor solução para conter o solo lateralmente em escavações feitas para construção de subsolos em edifícios, foi analisada a comparação de deslocamentos, esforços e momentos entre duas soluções para contenção: cortina de estacas “justapostas” e contenção com muro de concreto armado. As estruturas também foram dimensionadas e detalhadas. Para isto, criou-se um modelo fictício para escavação (4m x 4m x 3m), devido a algumas limitações apresentadas pelo *Plaxis 3D Foundation* o modelo não pôde ser de maiores dimensões. Foram utilizadas características de solo com base na Tese de Soares (2004). Para esta análise comparativa, utilizou-se dois programas, o *Plaxis 3D Foundation* e o *Cype*, onde apenas o *Cype* possui a função de dimensionamento. Comparou-se os resultados obtidos entre as duas estruturas (estaca e parede) entre os dois programas (*Plaxis 3D Foundation* e o *Cype*) e para cada uma separadamente, também se comparou os resultados calculados para cada estrutura entre os dois programas. Tanto as estacas justapostas como o muro de contenção são duas estruturas que servem muito bem para estrutura de contenção, porém, devido aos tipos de modelagens serem diferentes para os programas, pela análise feita para esses softwares as paredes não obtiveram resultados tão satisfatórios, diferente das estacas, que apresentaram resultados próximos. Portanto, de acordo com a análise feita no presente trabalho, as estacas se mostraram ser a solução adotada para execução, além de ser o método de montagem mais simples.

Palavras-chave: *Plaxis 3D Foundation*. *Cype*. Estacas Justapostas. Muros de Contenção. Comparação. Deslocamentos. Esforços Axiais. Esforços Transversais. Momentos Fletores.

ABSTRACT

With the increase of the occupation in the centers of the big cities, the underground ones are being more and more frequent in the construction of buildings. Aiming for a better solution to contain the soil laterally in excavations made to construct subsoils in buildings, the comparison of displacements, stresses and moments between two solutions for containment: curtain of "juxtaposed" piles and containment with reinforced concrete wall was analyzed. The structures were also dimensioned and detailed. For this, a fictitious model for excavation (4m x 4m x 3m) was created, due to some limitations presented by the Plaxis 3D Foundation the model could not be of bigger dimensions. Soil characteristics were used based on the Soares Thesis (2004). For this comparative analysis, we used two programs, the Plaxis 3D Foundation and Cype, where only Cype has the dimensioning function. Results were compared between the two structures (stake and wall) between the two programs (Plaxis 3D Foundation and Cype) and for each one separately, the calculated results for each structure between the two programs were also compared. Because the types of modeling were different for the programs, the walls did not achieve as satisfactory results, different from the stakes, which presented nearer and safer results. Therefore, according to the analysis done in the present work, the stakes proved to be the safest solution for execution, besides being the simplest assembly method.

Keywords: Plaxis 3D Foundation. Cype. Curtain of Stakes. Containment walls.

Comparison. Displacements. Axial Efforts. Transversal Efforts. Fleeting Moments.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Estrutura de contenção do tipo gabião	18
Figura 2 - Estrutura de contenção do tipo parede-diafragma	19
Figura 3 - Estrutura de encosta em estrada do tipo parede atirantada.	20
Figura 4 - Estrutura de contenção do tipo solo armado.	20
Figura 5 - Estrutura de contenção com geossintético	21
Figura 6 - Execução de estaca pelo método trado contínuo.	23
Figura 7 - Execução de estaca pelo método tubo moldador.	24
Figura 8 - Execução de uma estaca pelo método de Lama Betonítica.	25
Figura 9 - Cortina de estacas com vigas de coroamento e intermédias.	26
Figura 10 - Ancoragem de uma estaca.	27
Figura 11 - Estacas espaçadas, tangentes e secantes.	28
Figura 12 - Comportamento típico do coeficiente de empuxo no repouso K_0 no ensaio edométrico.	32
Figura 13 - Princípio dos elementos do tipo “embedded beam”.	35
Figura 14 - Rigidez dos elementos de interface no corpo da estaca.	36
Figura 15 - Rigidez do elemento de interface na ponta da estaca.	37
Figura 16 - Projeção do subsolo do Edifício Park In.....	38
Figura 17 - Modelo de escavação idealizado.....	39
Figura 18 - Interface inicial do programa Plaxis Foundation	39
Figura 19 - Dados iniciais pedidos pelo Plaxis Foundation	40
Figura 20 - Interface do Input no Plaxis 3D Foundation	40
Figura 21 - Criação de Workplanes no Plaxis 3D Foundation	41
Figura 22 - Criação de uma estaca no Plaxis 3D Foundation.....	42
Figura 23 - Posicionando as estacas	43
Figura 24 - Criação de um borehole no Plaxis 3D Foundation.	43
Figura 25 - Criação de um tipo de solo no Plaxis Foundation.	44
Figura 26 - Adição da carga distribuída	45
Figura 27 - Desenho da parede de contenção	46
Figura 28 - Criação do material a ser inserido na parede	47
Figura 29 - Parede com material inserido.....	48
Figura 30 - Refinamento global e local da malha 2D nas estacas	49
Figura 31 - Malha 2D gerada nas estacas justapostas	49

Figura 32 - Malha 2D gerada na cortina de parede	49
Figura 33 - Malha 3D gerada na cortina de estacas.....	50
Figura 34 - Malha 3D gerada na parede de contenção	51
Figura 35 - Configurações da fase inicial de cálculos	52
Figura 36 - Seleção de itens desejados na estaca.....	53
Figura 37 - Ativação da parede de contenção.....	54
Figura 38 - Processo de escavação do solo.....	54
Figura 39 - Ativação da carga distribuída do modelo	55
Figura 40 - Modelo em 3D antes do cálculo	56
Figura 41 - Janela de cálculo do programa Plaxis 3D Foundation.....	56
Figura 42 - Interface do Output no programa Plaxis 3D Foundation.....	57
Figura 43 - Informações a serem analisadas.....	57
Figura 44 - Exemplo de como os elementos e nós se agrupam.....	58
Figura 45 - Elementos e nós da seção superior da estaca mais solicitada	58
Figura 46 - Direcionamento das tensões exercidas em cada nó	59
Figura 47 - Estrutura da parede de contenção	59
Figura 48 - Comportamento dos esforços na placa	60
Figura 49 - Dados gerais do modelo de estacas justapostas	61
Figura 50 - Dados gerais do modelo de contenção de parede	62
Figura 51 - Opções para início do projeto	63
Figura 52 - Dados iniciais da edificação	64
Figura 53 - Dados iniciais do terreno	64
Figura 54 - Adição de uma nova camada de solo.....	65
Figura 55 - Edição da carga no Cype	65
Figura 56 - Definição da tipologia da cortina.....	66
Figura 57 - Definição dos dados da estaca e do muro, respectivamente	66
Figura 58 - Resultados calculados pelo programa Cype	67
Figura 59 - Estaca escolhida para comparação de resultados.....	68
Figura 60 - Deslocamento das estacas na direção 'x' das estacas	69
Figura 61 - Deslocamento das estacas na direção 'x' das paredes	69
Figura 62 - Deslocamento das estacas na direção 'z' das estacas	70
Figura 63 - Deslocamento das estacas na direção 'z' das paredes.....	71
Figura 64 - Tensão s'_{xx} calculadas nas estacas.....	72
Figura 65 - Tensões s'_{yy} calculadas nas estacas	73

Figura 66 - Tensões s'_{zz} calculadas nas estacas.....	74
Figura 67 - Tensões s'_{zx} calculadas nas estacas	75
Figura 68 - Gráfico comparativo de deslocamento entre parede e estaca calculados no Cype.....	78
Figura 69 - Gráfico comparativo de esforço axial entre parede e estaca calculados no Cype.....	79
Figura 70 - Gráfico comparativo de esforço transversal entre parede e estaca calculados no Cype.....	80
Figura 71 - Gráfico comparativo de momento fletor entre parede e estaca calculados no Cype.....	81
Figura 72 - Detalhamento da armadura da estaca.....	83
Figura 73 - Detalhamento da armadura do muro.....	84

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 -	Dados utilizados para modelagem da estrutura	44
Tabela 2 -	Dados do material da parede	47
Tabela 3 -	Tensões calculadas no nó 1206 das estacas justapostas	61
Tabela 4 -	Deformações calculadas em uma estaca	61
Tabela 5 -	Esforços calculados em uma Parede	62
Tabela 6 -	Deformações calculadas em uma parede.....	62
Tabela 7 -	Tabela comparativa entre os deslocamentos na direção 'x' entre estaca e parede.....	70
Tabela 8 -	Tabela comparativa entre os deslocamentos na direção 'z' entre estaca e parede.....	71
Tabela 9 -	Tabela de tensões s'_{xx}	72
Tabela 10 -	Tabela de tensões s'_{yy}	73
Tabela 11 -	Tabela de tensões s'_{zz}	74
Tabela 12 -	Tabela de tensões s'_{zx}	75
Tabela 13 -	Tabela comparativa dos esforços axiais	76
Tabela 14 -	Tabela comparativa dos esforços transversais.....	76
Tabela 15 -	Tabela comparativa dos momentos fletores	77
Tabela 16 -	Tabela comparativa de deslocamentos calculados no Cype.....	78
Tabela 17 -	Tabela comparativa de esforços axiais calculados no Cype.....	79
Tabela 18 -	Tabela comparativa de esforços transversais calculados no Cype	80
Tabela 19 -	Tabela comparativa de momentos fletores calculados no Cype.....	81
Tabela 20 -	Tabela comparativa entre deslocamentos calculados no Plaxis 3D Foundation e no Cype (estacas justapostas)	82
Tabela 21 -	Tabela comparativa entre deslocamentos calculados no Plaxis 3D Foundation e no Cype (parede de contenção)	83

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	13
1.1	Justificativa.....	14
1.2	Motivação.....	14
1.3	Objetivos.....	15
1.3.1	Objetivo Geral.....	15
1.3.2	Objetivos Específicos.....	15
1.4	Estrutura do trabalho.....	15
2.	REFERENCIAL TEÓRICO.....	17
2.1	Tipos de contenção.....	17
2.1.1	Gabião.....	17
2.1.2	Parede-diafragma.....	18
2.1.3	Parede atirantada.....	19
2.1.4	Solo armado.....	20
2.1.5	Geossintéticos.....	21
2.2	Estacas justapostas.....	22
2.2.1	Elementos integrantes de uma Cortina de Estacas.....	22
2.2.2	Espaçamento entre estacas.....	27
2.3	Programa PLAXIS 3D Foundation.....	29
3.	METODOLOGIA.....	31
3.1	Análise de tensões.....	31
3.1.1	Tensões iniciais.....	31
3.2	Análise de drenagem.....	33
3.3	Modelagem do solo.....	33
3.4	Modelagem de estacas.....	34
3.5	Metodologia utilizada para o trabalho no Plaxis 3D Foundation.....	38
3.5.1	Modelagem da geometria e do carregamento.....	41
3.5.2	Discretização do modelo.....	48
3.5.3	Fases de cálculo.....	51
3.5.4	Análise dos resultados.....	56
3.5.5	Organização dos dados.....	60
3.6	Metodologia utilizada para o trabalho no Cype.....	63

4.	RESULTADOS.....	68
4.1	Comparação entre estacas e muros modelados no Plaxis 3D	
	Foundation.....	68
4.1.1	Deslocamentos na direção ‘x’ - horizontal.....	69
4.1.2	Deslocamentos na direção ‘z’.....	70
4.2	Tensões obtidas nas estacas.....	71
4.2.1	Tensões na direção ‘x’.....	71
4.2.2	Tensões na direção ‘y’.....	72
4.2.3	Tensões na direção ‘z’.....	73
4.2.4	Tensão cisalhante na direção ‘zx’.....	74
4.3	Comparações dos esforços calculados nas paredes via Plaxis 3D	
	Foundation e Cype.....	75
4.3.1	Esforços axiais.....	76
4.3.2	Esforços Transversais.....	76
4.3.3	Momentos fletores.....	76
4.4	Comparação dos resultados calculados no Cype para as estacas e	
	muros.....	77
4.4.1	Comparação dos deslocamentos calculados no Cype.....	77
4.4.2	Comparação dos esforços axiais calculados no Cype.....	78
4.4.3	Comparação dos esforços transversais calculados no Cype.....	79
4.4.4	Comparação dos momentos fletores calculados no Cype.....	80
4.5	Comparação entre os resultados de deslocamento obtidos no Plaxis 3D	
	Foundation e no Cype.....	81
4.5.1	Comparação entre os deslocamentos obtidos nas estacas.....	82
4.5.2	Comparação entre os deslocamentos obtidos nas paredes.....	82
4.6	Detalhes das armaduras obtidas no dimensionamento.....	83
5.	CONCLUSÕES.....	85
5.1	Conclusões do trabalho.....	85
5.2	Sugestões para trabalhos futuros.....	86
	REFERÊNCIAS.....	87

1. INTRODUÇÃO

Com a crescente ocupação das áreas urbanas e consequentemente a falta de espaço para construção no interior de grandes cidades, surge a necessidade de obras que permitam a escavação do solo sem que ele ceda. As estacas justapostas e a parede de contenção são duas soluções adotadas para conter o solo lateralmente, fazendo com que se consiga construir em áreas com grande número de construções.

Estas soluções consistem fundamentalmente na execução de uma parede descontínua de estacas pouco distanciadas entre si (podendo mesmo intersectar-se), sendo o terreno entre elas estabilizado por um efeito de arco e a sua estabilidade garantida, e uma parede contínua de concreto armado deformando em forma de “barriga” para estabilização, na fase provisória, pode-se adicionar ancoragens ou a própria rigidez da estrutura garante estabilidade. A sua estabilidade permite que as cortinas de estacas/paredes sejam incorporadas como um elemento resistente na estrutura final.

As cortinas de estacas são um tipo de estrutura de contenção periférica, cuja utilização tem vindo a aumentar bastante, sobretudo devido à facilidade e rapidez em relação às soluções alternativas. Este tipo de estrutura, que pode ou não ser provisória, tem um leque de utilizações bastante grande no plano da contenção de terras. Podem ser utilizadas por exemplo nas escavações provisórias (em grandes obras) necessárias para a execução de fundações ou em obras em linha (MATOS, 2010).

É fundamental que não haja erros de análise e dimensionamento, como em qualquer outra estrutura, pois pode acarretar em patologias tanto na edificação que está atrelada à contenção como em edificações vizinhas, levando à custos inesperados pelos danos causados nas edificações.

Este trabalho teve como objetivo inicial o cálculo dos esforços em estacas justapostas de um edifício existente em Brasília-DF, através do programa *Plaxis 3D Foundation*. Pela limitação encontrada do número de estacas modeladas, partiu-se para um modelo reduzido, onde mostra que o programa é capaz de calcular este tipo de estrutura.

O presente trabalho consiste no estudo de uma comparação entre duas estruturas de contenção do tipo “estaca justaposta” e muro de contenção para um modelo fictício de escavação criado pelo autor. Neste trabalho será utilizado características de resistência e

deformabilidade de um solo idealizado com base em sondagens obtidas por Soares (2004) de um solo típico do Distrito Federal.

1.1 Justificativa

O desenvolvimento de projetos que levem em consideração estacas justapostas em termos de estrutura de contenção. É inegável a importância do entendimento desse tipo de estrutura, uma vez que esta envolve forças exercidas pelos empuxos de terras e análise e dimensionamento estrutural de elementos submetidos ao esforço de flexão.

Muitos fatores devem ser considerados para a escolha do tipo de contenção a ser utilizado em uma obra, o de maior importância, é de que a escavação do solo não interfira nas construções vizinhas existentes, garantindo a deformação não seja suficiente para causar danos. Outro fator importante é o tipo de estaca/equipamento que pode ser utilizada, para minimizar vibrações nas obras próximas. O tipo de solo do local também deve ser levado em conta.

A utilização do método cortina de estacas para conter o solo em uma construção proporciona uma maior contenção sem ocupar grandes áreas do terreno. Uma vez que as estacas ocuparão em sua maior parte espaço periférico subterrâneo. Essa técnica é uma das mais recomendadas por atender aos principais fatores citados.

1.2 Motivação

Atualmente, com o desenvolvimento dos transportes e o aumento de construções, é necessário buscar soluções para utilização do solo em grandes profundidades mesmo com pouco espaço. A motivação vem da oportunidade estudar uma comparação entre duas soluções muito usadas para este tipo de problema. Além disso, a motivação por não estudar na graduação esses tipos de estruturas e obter um novo aprendizado, é um tema extremamente interessante e que traz um grande desafio, pois é um assunto em que não tenho conhecimento específico e será bastante gratificante o retorno que me proporcionará este esforço.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo Geral

Estudar o comportamento de estacas justapostas e muros de contenção para o caso um modelo de escavação (4mx4mx3m), onde será verificado os principais esforços atuantes nessa estrutura decorrente do empuxo de terra.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Modelagem do solo/carregamentos atuantes nas fundações;
- Efeito da escavação na estrutura (tensões, esforços e deslocamentos);
- Analisar os esforços e dimensionar as estacas e muros;
- Comparar os resultados obtidos nos programas *Plaxis 3D Foundation* e *Cype* “Contenção Periférica”.

1.4 Estrutura do trabalho

Este trabalho está subdividido em 5 capítulos e 3 apêndices, distribuídos da seguinte maneira:

CAPÍTULO 1. INTRODUÇÃO

Apresenta a introdução, na qual se tem uma visualização geral do trabalho desenvolvido, incluindo as considerações iniciais, os objetivos gerais e específicos e a estrutura do trabalho.

CAPÍTULO 2. REFERENCIAL TEÓRICO

Realiza uma revisão da literatura sobre o tema: obras de contenção e programas computacionais utilizados neste trabalho.

CAPÍTULO 3. METODOLOGIA

Descrito o tipo de análise e modelagem dos elementos estudados neste trabalho. Inicialmente será mostrado um tópico referente à análise de tensões e modelagem das

estacas/muros de contenção, condições de drenagem (carregamento) e modelagem do solo.

CAPÍTULO 4. RESULTADOS

Este capítulo apresenta a comparação entre os resultados dos modelos de estacas e paredes utilizados para fins de estruturas de contenção do problema em estudo, calculados no *Plaxis 3D Foundation* e no *Cype*. São apresentados também os esforços atuantes nas estacas e nas paredes.

CAPÍTULO 5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS

Apresenta as principais sugestões para pesquisas futuras.

ANEXO

Apresenta verificações dos resultados calculados no programa *Cype*, dados do dimensionamento e seção mais solicitada para estacas e muros.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

As estruturas de contenção são obras civis construídas com o objetivo de proporcionar estabilidade para um local e evitar o desmoronamento, que pode ser causado pelo peso próprio ou de construções vizinhas.

São feitas a fim de evitar a ruptura de maciços e suportar grandes pressões laterais causadas pelo empuxo de terra. São indispensáveis em muitos dos projetos de engenharia, como rodovias, pontes, subsolo de edifícios, barragens, entre outros.

As contenções são de grande importância para engenharia, pois possibilitam a execução de obras em locais onde o deslizamento de terra seria uma dificuldade.

2.1 Tipos de contenção

Existem inúmeras alternativas para se fazer a contenção de uma encosta, sendo importante antes de se fazer a escolha do qual tipo utilizar, analisar qual será mais adequada à situação.

2.1.1 Gabião

Segundo ESCOLAENGENHARIA (2018), gabião é uma estrutura armada, drenante, tem flexibilidade, grande durabilidade e de alta resistência (Figura 1). São compostos por malhas de fios de aço, formando um tipo de gaiola, dentro dessa gaiola são colocadas pedras de 2 a 5kg. Pelo fato do baixo custo, fácil execução e não ser agressivo ao meio ambiente, o gabião é uma das técnicas de contenção mais utilizadas. Pela sua elevada permeabilidade e boa capacidade de acomodação com deslocamentos, são utilizados em várias situações, além de muro de contenção, também como proteção de margens e canalização de córregos.

Figura 1. Estrutura de contenção do tipo gabião



Fonte: ECIVIL (2003)

2.1.2 Parede-diafragma

Segundo téchni (2011), paredes-diafragma, mostrada na Figura 2, são painéis de concreto armado que podem ser pré-fabricados ou moldados in loco. Sua aplicação é feita, geralmente, em solos enterrados, essa técnica é mais comum em centros urbanos, por existir uma dificuldade de se utilizar outros métodos devido à falta de área livre. As lamelas chegam até 7 m de comprimento e espessura entre 45 cm e 150 cm, tem a capacidade de vencer profundidades de até 100 m, os painéis são preenchidos de lama bentonítica, tem o objetivo de estabilizar as paredes de escavação e o empuxo causado pelo lençol freático no terreno.

Figura 2. Estrutura de contenção do tipo parede-diafragma



Fonte: slidex.tips (2016)

2.1.3 Parede atirantada

Segundo infraestruturaurbana (2011), são estruturas de concreto armado que trabalham com auxílio de tirantes compostos por cordoalhas ou por monobarra. É mais utilizada para contenção de encostas e construção de subsolos. É bastante recomendada em cortes feitos em terrenos e em solos com baixa resistência. É utilizada também em áreas com riscos de deslizamento.

Apesar de ser uma técnica cara e demorada, devido a necessidade de se utilizar o terreno vizinho para cravar os tirantes, tem a vantagem aplicação sem necessidade de cortar o solo além do necessário. Tem a possibilidade de vencer qualquer altura, é um método seguro e tem uma grande vida útil.

Figura 3. Estrutura de encosta em estrada do tipo parede atirantada.



Fonte: AECweb (2007)

2.1.4 Solo armado

Segundo infraestruturaurbana (2012), o solo armado é uma estrutura que aproveita o próprio solo como material como material estrutural, além de placas de concreto e armaduras (Figura 4). A pressão do sistema é distribuída nas armaduras, que vai sendo posicionada conforme o solo vai sendo compactado. Com isso, ao término do espalhamento e da compactação, tem-se o solo armado finalizado.

Essa técnica é comum no encontro de pontes e ferrovias, também em perímetros urbanos com espaços restritos e prazos de execução curtos. A NBR 9.286 - Terra Armada - Especificação, de 1986, pauta condições para elaboração do projeto e a execução de estruturas com esse tipo de contenção.

Figura 4. Estrutura de contenção do tipo solo armado.



Fonte: Planservi (2010)

2.1.5 Geossintéticos

A utilização de geossintéticos em obras de engenharia civil constitui prática crescente graças às diversas vantagens que estes materiais oferecem. Eles têm ampla aplicação em técnicas de solo reforçado, para a estabilização de cortes em terrenos naturais ou de taludes de aterros, aumentando a resistência à tração ao solo evitando deslizamentos. Também são utilizados na função de filtração, drenagem, proteção, separação, impermeabilização e controle de erosão. A Figura 5 mostra uma contenção com geossintéticos, eles podem ser aproveitados de várias formas em obras de contenção, aumenta a resistência à tração ao solo evitando deslizamentos.

Além das vantagens técnicas, os geossintéticos também destacam pela facilidade de aplicação do material, pela rapidez da construção e ainda pela redução significativa de custos na comparação com soluções convencionais.

Alguns cuidados são necessários devido ao tipo de material do geossintético utilizado na contenção. É importante propiciar proteção ao material contra intempéries. Também deve-se observar a agressividade do meio ambiente, podendo alterar algumas propriedades dos polímeros, que deve ser considerado em projeto.

Figura 5. Estrutura de contenção com geossintético



Fonte: Téchne (2010)

2.2 Estacas justapostas

A cortina de estaca é uma estrutura de contenção do solo que consiste na execução de estacas no interior do solo antes da escavação. Esse tipo de aplicação vem ganhando força atualmente, devido à facilidade e rapidez de execução, quando comparadas às soluções com mesma função.

As estacas poderão ser posicionadas de diferentes formas, espaçadas entre si, juntas ou até intersectar-se, provocando estabilização do terreno através de um efeito de arco. Este tipo de estrutura pode ser denominada como flexível, uma vez que sofre deformações por flexão causadas pela força exercida pelo maciço à estrutura, provocando o efeito de arco.

Quando uma parte da estrutura que suporta uma dada massa de solo se afasta desta, mantendo-se a restante na posição inicial, o solo adjacente à primeira tende a acompanhá-la. Ao movimento relativo no interior do solo opõe-se a resistência ao corte na zona de contato da massa, que tende a deslocar-se da remanescente, tentando manter a primeira na posição inicial. Por esse motivo, as pressões de terras diminuem na parte da estrutura de suporte que se afastou e aumentam nas que se mantiverem imóveis (ou que se deslocam menos, ou, até que se deslocam contra ao solo). É esta transferência de tensões que se designa por “efeito de arco” (MEIRELES & MARTINS, 2006).

Um dos métodos matemáticos utilizados para um cálculo aproximado das deformações exercidas na cortina é o método de elementos finitos, que acaba sendo de grande utilidade para o dimensionamento das cortinas.

Geralmente, no dimensionamento da estaca é levado em conta apenas momentos fletores e esforços cortantes, no entanto há também carga axial devido ao peso próprio da estaca, um esforço de compressão, que reduz as tensões de tração causada pela flexão, o que possibilita a diminuição da armadura tracionada, tornando a estrutura mais econômica.

2.2.1 Elementos integrantes de uma Cortina de Estacas

Neste item será descrito métodos de execução, tipos de cortinas de estaca e alguns elementos constituintes das estacas justapostas.

2.2.1.1 Estacas

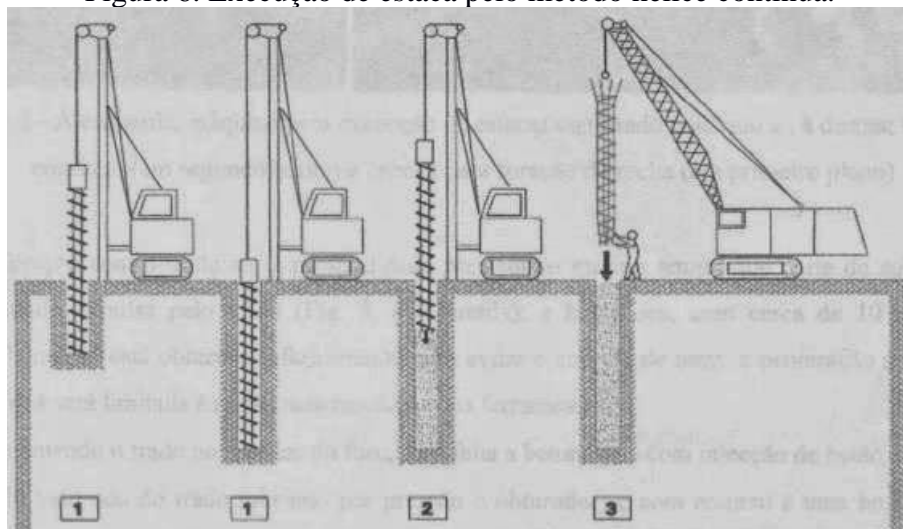
As estacas são os principais componentes da estrutura. Existem dois tipos de estacas, a moldada *in loco* e a pré-moldada. As estacas pré-moldadas, normalmente, são cravadas no solo gerando grandes vibrações, por esse fator são menos utilizadas devido as edificações vizinhas, não podendo causar perturbações. Nas estacas moldadas *in loco*, geralmente o próprio terreno é utilizado como forma para contenção periférica do solo. São feitas perfurações no solo que serão preenchidas de concreto e armadura. A escavação do terreno será feita após as estacas serem finalizadas.

Com o desenvolvimento da tecnologia, surgiram novas soluções de execução de estacas, trazendo facilidades para utilização desse tipo de estrutura. As estacas moldadas *in loco* detêm de muitos métodos de aplicação, no entanto existem três métodos que são mais aplicados pelas empresas: hélice contínua, tubo moldador Franki e lamias betoníticas.

Na hélice contínua a perfuração do solo é feita através de rotações feitas com o equipamento, que é composto com uma hélice através de toda haste, pela haste é realizada a betonagem, após o furo estar preenchido com o concreto a armadura é introduzida, mostrado na Figura 6.

É um método mais econômico se comparado com outras técnicas, tem rapidez na execução e praticamente não provoca vibrações. Em contrapartida, há limitação da profundidade em 22 m, há uma falta de precisão no diâmetro da estaca e não garante o posicionamento correto da armadura.

Figura 6. Execução de estaca pelo método hélice contínua.

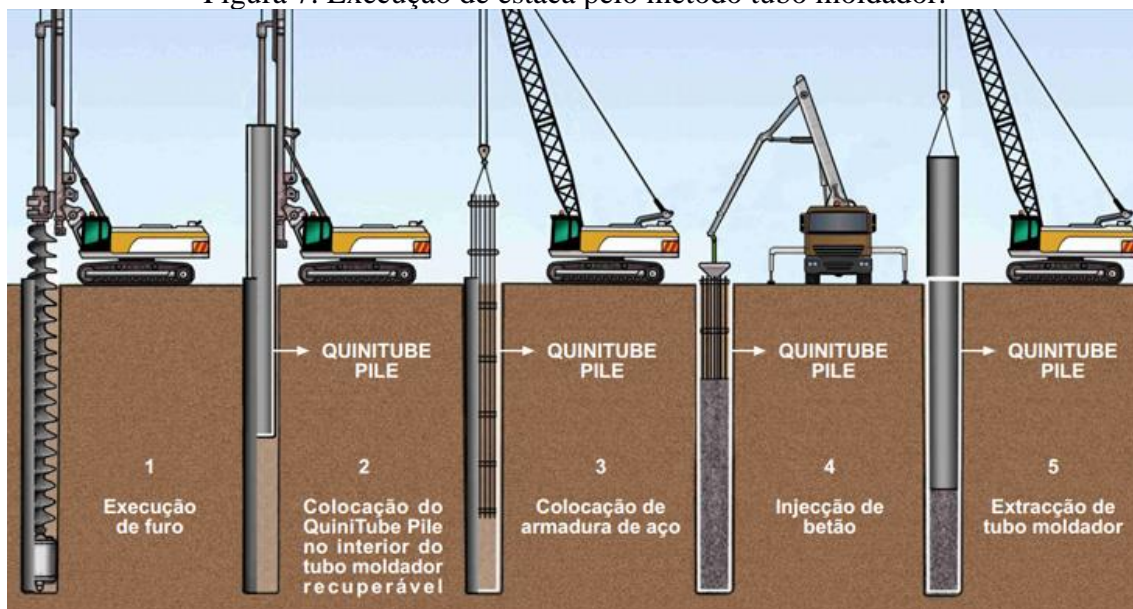


Fonte: LAN – Fundações e Obras Geotécnicas. (2017)

O tubo moldador é indicado em solos moles, onde as paredes do furo cederiam se não houvesse a proteção do tubo antes da concretagem. A concretagem é feita após a colocação da armadura, e só ao fim, é retirado o tubo moldador, podendo ser reaproveitado, Figura 7.

O equipamento funciona em pouco espaço e com difícil acesso, dependendo do tipo de solo chega aos 50 m de comprimento e permite estacas com grandes diâmetros. Tem a desvantagem de ser um método caro e demorado, podem ser um problema devido aos ruídos e vibrações geradas na sua execução.

Figura 7. Execução de estaca pelo método tubo moldador.

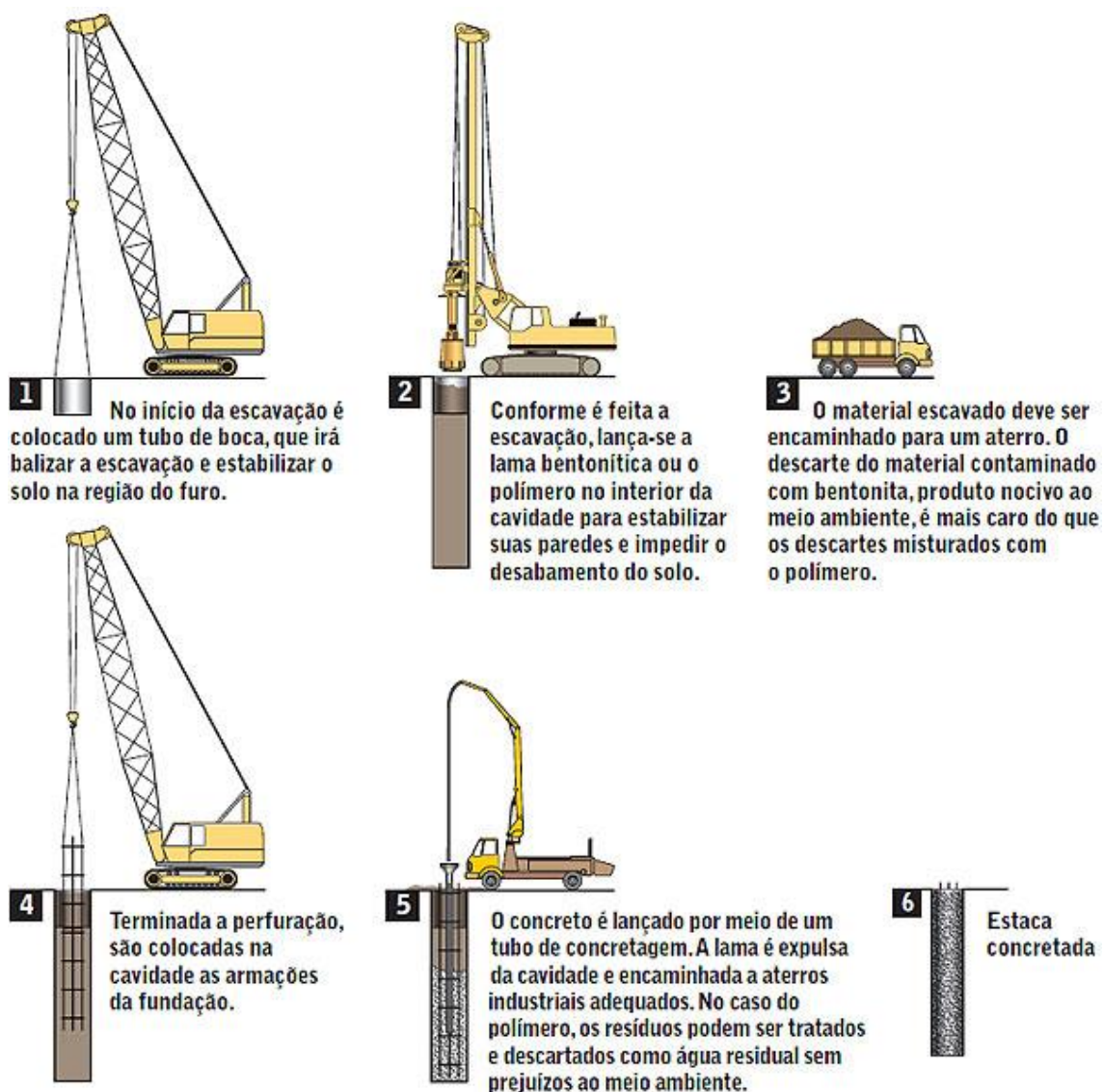


Fonte: QUINIROAD (2010)

Na Figura 8, pode-se ver o método de execução da lama betonítica, é um método utilizado em solos sem capacidade de sustentação, o solo é sustentado pela lama betonítica, que tem uma propriedade de se comportar como um líquido quando é posta em movimento e como um solo quando está em repouso.

É uma solução econômica quando se trata de solos moles, tem pouco ruído, não ocorre vibração relevante e possibilita estacas com grandes profundidades. Porém, são limitadas à estaca vertical, se utilizam de muito espaço para execução e podem causar problemas ambientais pela perda de lama.

Figura 8. Execução de uma estaca pelo método de Lama Betonítica.



Fonte: Equipe de Obra (2011)

2.2.1.2 Vigas de coroamento e viga intermediária

A viga de coroamento, mostrada na Figura 9, tem como objetivo distribuir os esforços exercidos pelo maciço em todas as estacas, para que funcionem em conjunto, formando a cortina. Normalmente é aplicada no topo das estacas. Devido à direção da flexão, na horizontal, as armaduras são mais distribuídas nas faces laterais da viga.

As vigas intermédias aparecem quando as estacas atingem grandes alturas, têm a mesma função da viga de coroamento, porém numa posição intermédia.

Figura 9. Cortina de estacas com vigas de coroamento e intermédias.



Fonte: Meireles & Martins (2006)

2.2.1.3 Ancoragem

As estacas podem ser projetadas de diferentes maneiras, pode ser em balanço, com a estaca simplesmente encravada no terreno, ou podem ter o auxílio de elementos para dar uma melhor estabilidade ao terreno, como a ancoragem. A ancoragem é feita com tirantes injetáveis.

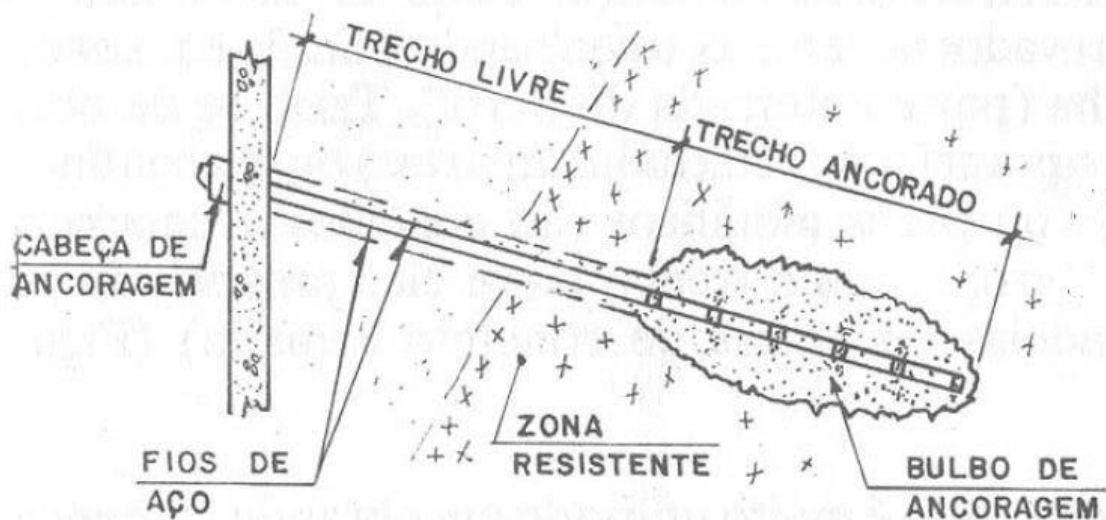
Os tirantes injetados são peças especialmente montadas, tendo como componente principal um ou mais elementos resistentes à tração. São introduzidas no terreno em perfuração própria, nas quais, por meio de injeção de calda de cimento ou outro aglutinante nas suas extremidades, são formados bulbos de ancoragem ligados à estrutura através dos elementos resistentes à tração e das cabeças dos tirantes. A força a ser absolvida pelo tirando deve ser transmitida ao terreno somente pelo bulbo de ancoragem (NBR 5629, 1996)

Para escolha do tipo utilizado será necessário verificar a altura livre que será submetida à estaca, o limite de deslocamento permitido no topo da estaca, qual tipo de terreno e a rigidez da estaca.

A Figura 10 representa as ancoragens que são atreladas as estacas e os esforços são distribuídos com o auxílio das vigas de coroamento e intermédias. Uma medida

provisória que pode ser adotada é o escoramento, que sustentam as cortinas até a finalização da superestrutura.

Figura 10. Ancoragem de uma estaca.

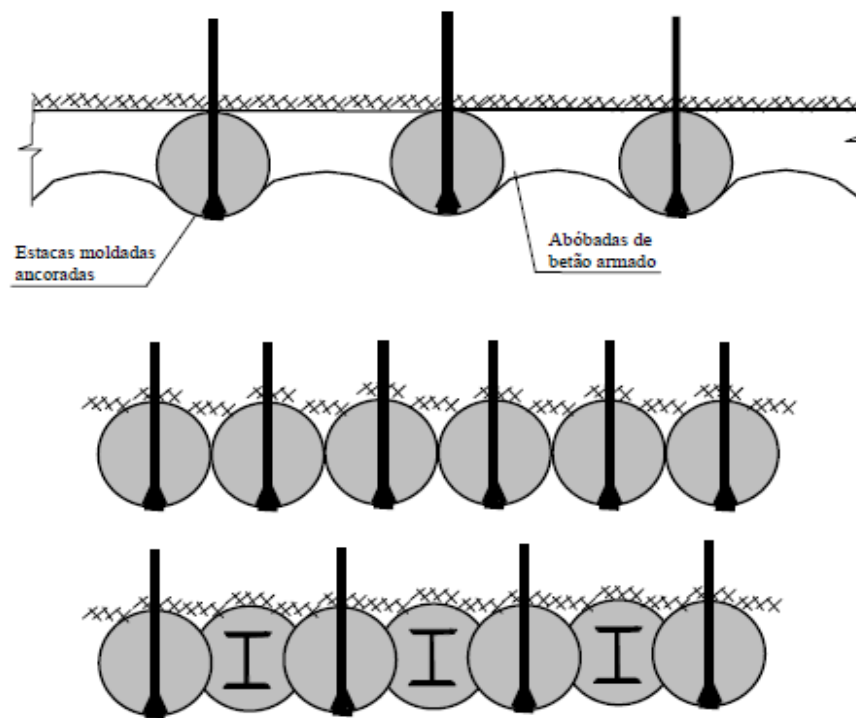


Fonte: Meireles & Martins (2006)

2.2.2 Espaçamento entre estacas

As cortinas de estacas podem ser espaçadas entre si, tangentes e secantes, como pode-se observar na Figura 11. O tipo de espaçamento utilizado será decidido em fase de projeto, dependendo de alguns fatores que serão mostrados no item 5.2.2.4.

Figura 11. Estacas espaçadas, tangentes e secantes.



Fonte: Brito (2002)

As cortinas de estacas espaçadas podem ter uma distância entre as estacas de até 1,5 metros, o espaço entre elas pode ser preenchido com concreto projetado ou malha de reforço. É necessário fazer a drenagem, normalmente com tubos de plástico, para evitar as infiltrações. Devido ao espaçamento, a impermeabilidade não é garantida e também é menos resistente que as demais soluções.

As cortinas de estacas tangentes também têm um espaçamento entre as estacas, podendo ser entre 7,5 e 10 cm. É necessário ter total controle no posicionamento das estacas e da verticalidade da furação para que não permita o contato entre as estacas, devido a esse fator, há uma grande dificuldade na sua execução.

As cortinas de estacas secantes são executadas com uma característica diferentes das outras, elas intersectam entre si. Para execução são feitas estacas com menos de um diâmetro de distância, são chamadas de estacas fêmeas. As estacas intermédias, também chamadas de estaca macho, não necessariamente precisam ser construídas com a mesma profundidade das estacas fêmeas, depende de como foram projetadas. Esse método só pode ser utilizado com estacas moldadas sem tubo moldador ou com trado contínuo.

A decisão do tipo de cortina de estacas que será utilizada depende de alguns fatores. A presença de nível freático é de grande importância, não podendo haver infiltrações entre as estacas, sendo mais indicada as estacas secantes.

A coesão do solo interfere na escolha, pois não pode haver deterioração do próprio entre as estacas, o tipo de estacas espaçadas é o que melhor se encaixa, quanto maior a coesão do solo, mais exequível se torna o método.

Caso haja a necessidade de estanqueidade, seria impossibilitado o uso de estacas com espaços, mesmo que pequenos, não sendo possível executar as estacas tangente e espaçadas.

Na hipótese de existir pouco capital e na necessidade de prazos curtos, as estacas espaçadas têm a melhor solução, pois utilizam menos estacas e conseqüentemente menos concreto.

2.3 Programa PLAXIS 3D Foundation

O programa utilizado para realização deste estudo foi o *PLAXIS 3D Foundation*. É um programa de elementos finitos para análises tridimensionais de tensão-deformação.

Antes do desenvolvimento do *PLAXIS 3D*, vieram uma série de programas relacionados que foram se sofisticando até a chegada do próprio.

Em 1987 o programa *PLAXIS* começou a ser desenvolvido na *Delft University of Technology*, Holanda. O propósito inicial seria o desenvolvimento de um código de elementos finitos 2D que facilitasse a análise de diques sobre solos moles. Seis anos mais tarde a empresa *Plaxis bv* foi criada.

Em 1998 ocorreu o primeiro lançamento do *PLAXIS 2D* para Windows. Em 2001 foi lançado o programa *3DTunnel* para análise de túneis e em 2004 foi lançado o programa *3DFoundation* para análise de fundações.

Em 2010 foi lançado o programa *PLAXIS 3D*, um programa de elementos finitos totalmente tridimensional e que superou algumas limitações existentes no *3DTunnel* e do *3DFoundation*. O *PLAXIS 3D Foundation* foi o último lançamento do programa, que vem se atualizando ao longo dos anos.

O *PLAXIS 3D* é composto por dois subprogramas, o *Input* e o *Output*.

O *Input* é um pré-processador que define a geometria, propriedades dos materiais utilizados e condições de contorno do problema, para permitir a criação da malha de elementos finitos e definir fases de cálculo.

O *Output* atua como um pós-processador que verifica os resultados dos cálculos, permite a vista tridimensional ou em cortes transversais, também gera gráficos de diversos tipos relacionados à estrutura.

3. METODOLOGIA

Este capítulo descreve a metodologia em relação ao tipo de análise e modelagem dos elementos estudados neste trabalho. Através do programa *Plaxis 3D Foundation*. Inicialmente será mostrado um tópico referente à análise de tensões e modelagem das estacas/muros de contenção, condições de drenagem (carregamento) e modelagem do solo.

3.1 Análise de tensões

3.1.1 Tensões iniciais

As tensões iniciais em um corpo de solo são influenciadas pelo peso do solo, condições da pressão causada pela água e pela história de formação do solo. Esse estado de estresse pode ser gerado usando o *K₀ Procedure* ou usando *Gravity loading*. Se o *K₀ Procedure* for utilizado, valores adequados de *K₀* precisam ser especificados para todas as camadas.

3.1.1.1 K₀ Procedure

Este método é baseado no conceito de “tensões geostáticas” ou de “condição de repouso”, onde a compressão imposta ao maciço por seu peso próprio é unidimensional (vertical), não havendo deformações horizontais (OLIVEIRA, 2015).

Com o solo em repouso a tensão vertical efetiva σ'_{v0} em um determinado ponto é calculada em função do peso do próprio solo, através da equação 1 obtém a tensão horizontal efetiva σ'_{h0} :

$$\sigma'_{h0} = K_0 \cdot \sigma'_{v0} \quad (1)$$

Na qual, *K₀* é o coeficiente de empuxo no repouso.

O coeficiente *K₀* depende das propriedades do material utilizado. Quando tem-se um solo normalmente adensado, onde *OCR* = 1, tem-se o coeficiente de empuxo no repouso *K_{0,nc}* correlacionado com o ângulo de atrito ϕ' , mostrado na equação 2:

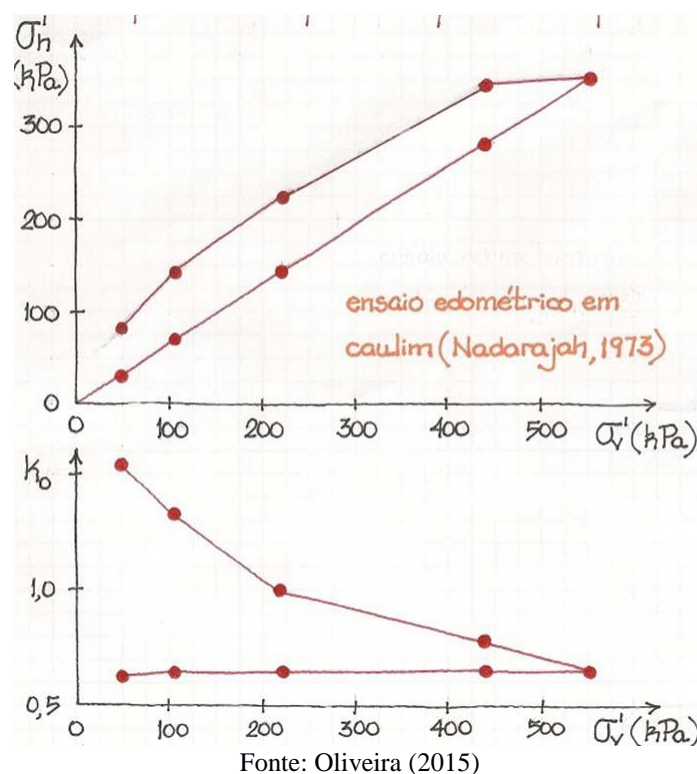
$$K_{0,nc} = 1 - \sin \phi' \quad (2)$$

Ainda que o usuário possa mudar o valor, o *PLAXIS 3D* utiliza esta expressão como padrão para cálculo.

Para o solo sobreadensado ($OCR > 1$) o valor de K_0 é maior que o $K_{0,nc}$. Na Figura 12 está ilustrado o comportamento típico do K_0 em um ensaio edométrico, onde o solo inicialmente sofre uma compressão virgem ($OCR = 1$) e posteriormente é descarregado, gerando um sobreadensamento ($OCR > 1$) (OLIVEIRA, 2015).

O ensaio edométrico, também chamado de ensaio de adensamento lateral confinado, é um ensaio que mede propriedades mecânicas do solo referente às deformações verticais. O ensaio edométrico é realizado através do edômetro, é feito com uma amostra em forma de cilindro, com 7 cm de diâmetro e 1,9 cm de altura, é realizada de acordo com as hipóteses base da Teoria de Consolidação Unidimensional de Terzaghi, onde fala que abaixo da fundação forma uma cunha que devido ao atrito com da base da fundação se desloca verticalmente.

Figura 12. Comportamento típico do coeficiente de empuxo no repouso K_0 no ensaio edométrico.



O histórico de tensões no solo não é levado em consideração no modelo Mohr-Coulomb, se o usuário desejar utilizar esse histórico na geração de tensões iniciais, deve ser especificado um valor de K_0 mais apropriado.

3.1.1.2 Gravity Loading

É um tipo de cálculo *Plastic* no qual as tensões iniciais são geradas com base no peso volumétrico do solo. As tensões iniciais são estabelecidas aplicando o peso próprio do solo na primeira fase de cálculo (OLIVEIRA, 2015).

No modelo *Mohr-Coulomb* resultante da análise *Gravity Loading*, K_0 vai depender de uma relação com o coeficiente de Poisson ν , mostrada na equação 3:

$$K_0 = \frac{\nu}{1 - \nu} \quad (3)$$

Se for necessário especificar um valor de ν que fuja da realidade para atender ao valor de K_0 , muda-se o tipo de solo para um que o coeficiente ν seja mais adequado à situação.

3.2 Análise de drenagem

As condições de drenagem são controladas através do tipo de comportamento especificado para cada material, e não através da atribuição de um tipo de comportamento a uma fase de análise ao qual todos os materiais do modelo deveriam obedecer. Por exemplo, numa determinada fase de análise pode-se especificar que alguns materiais se comportem de forma não drenada enquanto outros se comportem de forma drenada (OLIVEIRA, 2015).

3.3 Modelagem do solo

No *Plaxis 3D Foundation* o solo é modelado através de elementos finitos tetraédricos de 10 nós. Isso possibilita interpolações quadráticas de deslocamentos no interior do elemento e variação linear das deformações. Cada nó terá uma função específica e 3 graus de liberdade. Utiliza-se o método de Gauss para fazer a integração do volume, baseando-se em 4 pontos de integração.

O programa possui um algoritmo para cálculo da malha de elementos finitos, onde o usuário não poderá modifica-lo, apenas mudar características, como grau de refinamento dos elementos geométricos e características de angulações dos elementos.

O programa disponibiliza até 11 modelos para analisar o comportamento de tensão/deformação ao longo do tempo em solos e rochas, além de que permite que o próprio usuário crie um modelo. No entanto, neste trabalho só serão utilizados os modelos “Linear *Elastic*” para modelagem das estacas, visto que pode-se fazer uma aproximação do comportamento do concreto para elástico linear, simplificando o problema, e o modelo “Mohr-Coulomb” para modelagem do solo, visto que é o modelo mais comum para análise do solo.

O modelo Linear *Elastic* permite uma análise grosseira com o concreto e a rocha, só é aplicado em túneis e faz uma análise grosseira das tensões de compressão virgem e de carregamento/descarregamento.

O modelo Mohr-Coulomb permite análise com todos os tipos de materiais, sendo o melhor modelo para análise de concreto no *PLAXIS*, faz uma análise grosseira de todos os tipos de obra, como: fundação, escavação, túnel, aterro, talude, barragem, entre outras; e em relação ao caminho das tensões, não realiza análises apenas em carregamentos cíclicos.

O modelo Mohr-Coulomb envolve cinco parâmetros de entrada, que são: E e ν para elasticidade do solo; j e c para plasticidade do solo e ϕ como um ângulo de dilatação. Este modelo representa uma aproximação de "primeira ordem" do comportamento do solo ou das rochas. Este modelo é recomendado para uma primeira análise do problema considerado. Para cada camada estima-se uma rigidez média constante. Devido a essa rigidez constante, os cálculos tendem a ser relativamente rápidos e obtém-se uma primeira estimativa de deformações.

O modelo Linear *Elastic* é o mais simples, a modelagem de deformações é feita sem ocorrências de deformações plásticas e desconsidera a possibilidade de ruptura do material.

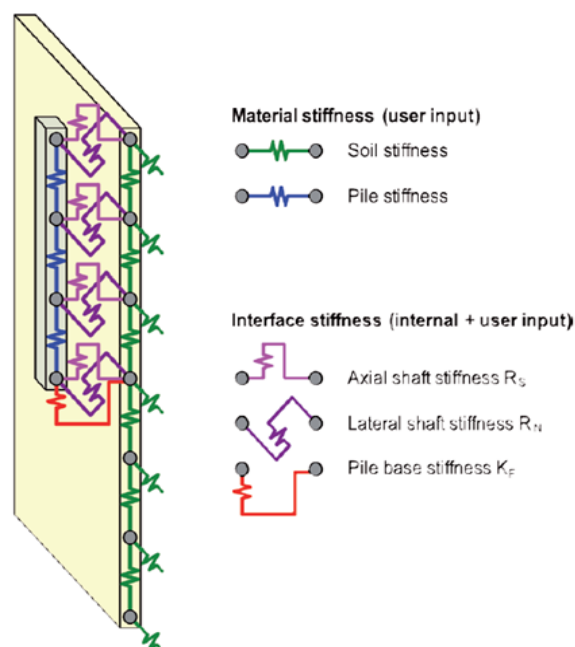
O modelo Mohr-Coulomb é linear elástico perfeitamente plástico, utiliza o critério de Mohr-Coulomb para ruptura. Permite a modelagem de deformações reversíveis e irreversíveis no material.

3.4 Modelagem de estacas

O *PLAXIS 3D Foundation* apresenta basicamente duas opções para modelar estacas: *Embedded Beam* e *Volume Pile*.

Os Elementos do tipo “*Embedded Beam*” interagem com o solo por meio de elementos de interface especiais. O elemento “*embedded pile row*” pode ser usado para simular uma linha de estacas com um certo espaçamento perpendicular à área do modelo. As propriedades de rigidez são inseridas por estaca, o programa calcula as propriedades manchadas por metro de largura. Uma característica especial deste elemento estrutural é que não está diretamente acoplado à malha. É indiretamente acoplado através de uma interface linha a linha (consistindo em elementos de mola e controles deslizantes). O princípio é mostrado na Figura 13. Note que, como resultado desta implementação, a malha é contínua para que o solo possa “fluir” através da linha de estacas incorporada. (SLUIS, 2012).

Figura 13. Princípio dos elementos do tipo “*embedded beam*”.



Fonte: SLUIS (2012)

Na posição dos nós, são criados nós virtuais no elemento de volume de solo. A interface especial faz a ligação entre os nós da viga e estes nós virtuais e, consequentemente, com todos os nós do elemento de volume de solo (OLIVEIRA, 2015).

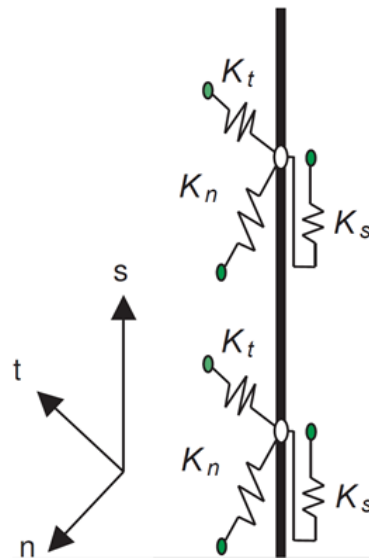
É uma interação que abrange resistência por atrito lateral e de ponta, onde a estabilidade é determinada pelo deslocamento relativo entre estaca e solo.

3.4.1 Interação do corpo da estaca

A interação do fuste da estaca com o solo é descrita por uma relação linear elástica perfeitamente plástica para as tensões cisalhantes, e linear elástica para as tensões normais (OLIVEIRA, 2015).

Na figura 14 está representado um esquema de como o programa considera a rigidez no corpo de uma estaca.

Figura 14. Rigidez dos elementos de interface no corpo da estaca.



Fonte: Oliveira (2015).

O programa utiliza as equações 4, 5 e 6 para cálculo da relação tensão-deformação no regime elástico:

$$t_s = K_s \cdot (u_s^p - u_s^s) \quad (4)$$

$$t_n = K_n \cdot (u_n^p - u_n^s) \quad (5)$$

$$t_t = K_t \cdot (u_t^p - u_t^s) \quad (6)$$

Na qual:

t_s é a tensão cisalhante na direção axial da estaca,

t_n e t_t são tensões normais nas direções transversais à estaca,

u^p e u^s são deslocamentos da estaca e do solo,

K_s é a rigidez ao cisalhamento na direção axial da estaca,

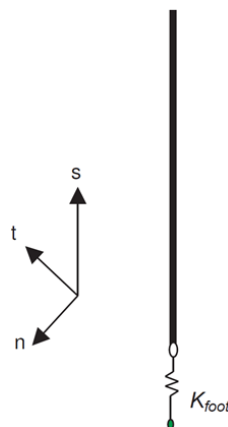
K_n e K_t rigidez normal nas direções transversais à estaca.

Os valores de rigidez são definidos pelo programa de maneira que não influencie elástica da estrutura. Para resistência ao cisalhamento da interface, utiliza-se uma relação com a resistência ao cisalhamento das camadas de solo que estão em contato com a estaca.

3.4.2 Interação na ponta da estaca com o solo

A interação da ponta da estaca com o solo é descrita por uma relação linear elástica perfeitamente plástica do elemento de interface. Na Figura 15 está representada esquematicamente a maneira como o programa considera a rigidez do elemento de interface da ponta de uma estaca (OLIVEIRA, 2015).

Figura 15. Rigidez do elemento de interface na ponta da estaca.



Fonte: Oliveira (2015).

A relação tensão-deformação é dada pela equação 11:

$$F_{foot} = K_{foot} \cdot (u_{foot}^p - u_{foot}^s) < F_{m\acute{a}x} \quad (11)$$

Na qual:

F_{foot} = força normal mobilizada pela ponta da estaca,

u_p e u_s = deslocamentos da estaca e do solo, respectivamente,

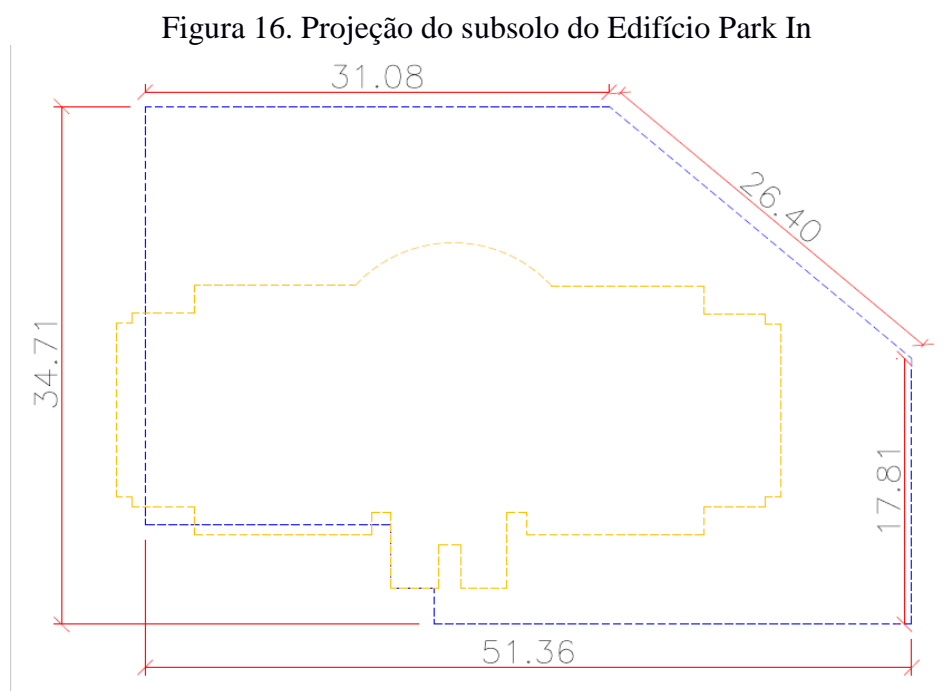
K_{foot} = rigidez normal da interface da ponta da estaca.

Não são permitidos esforços de tração na ponta da estaca. A resistência de ponta máxima $F_{m\acute{a}x}$ é definida pelo usuário, desde que permaneça no regime elástico.

O programa define o valor de K_{foot} muito maior que G_{foot} para a rigidez da interface não influenciar na rigidez do conjunto solo-estaca.

3.5 Metodologia utilizada para o trabalho no *Plaxis 3D Foundation*

Inicialmente, pensou-se em se fazer o dimensionamento de estacas justapostas para construção do estacionamento subterrâneo do Edifício Confort Flat Taguatinga (Park In). Visto que a geometria da escavação do referido estacionamento tem perímetro de grande comprimento (Figura 16), estacas com diâmetro de 40cm obtendo-se grande quantidade de estacas justapostas, sendo assim verificou-se número excessivo de elementos e nós para análise com programa utilizado. Pois o programa possui limite da quantidade de elementos e nós em seus modelos.

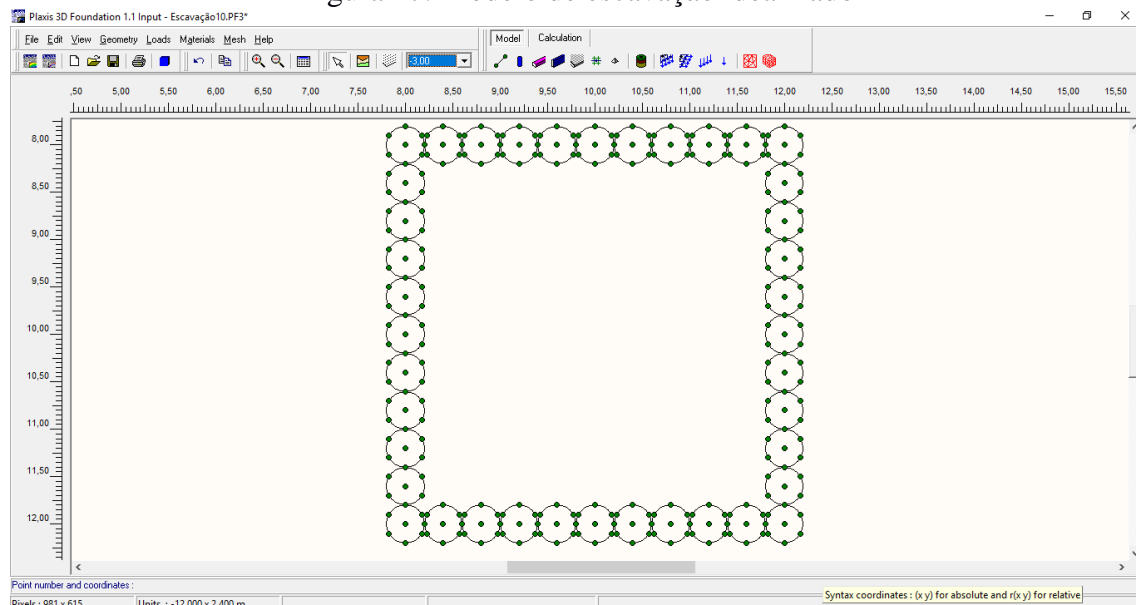


Fonte: Autor (2018)

O perímetro da escavação seria de 161,36m, totalizando 403 estacas. Assim, partiu-se para o estudo de um modelo de contenção idealizado e reduzido constituído por estacas e muros, para mostrar que apesar de ter uma limitação o programa dá a possibilidade de se calcular este tipo de estrutura (Figura 17). O modelo tem uma área

quadrada de 16 m², totalizando 40 estacas ou um muro de 16 m de comprimento, sendo modelado para uma escavação até a profundidade de 3 m.

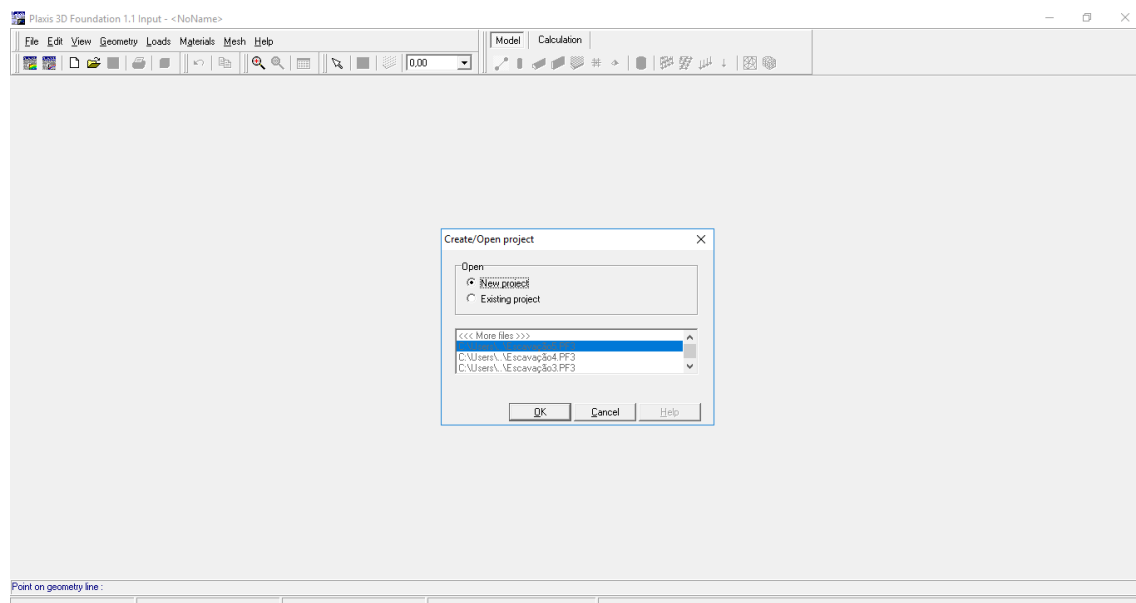
Figura 17. Modelo de escavação idealizado



Fonte: Autor (2018)

O primeiro passo do presente trabalho no programa *Plaxis 3D Foundation* é informar, quando o programa é aberto, se é um novo projeto ou um projeto já existente, como mostrado na Figura 18.

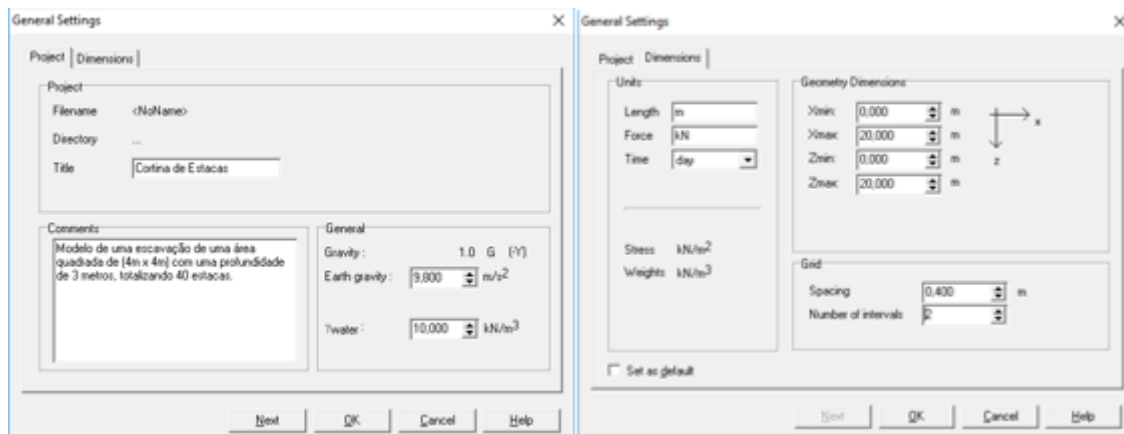
Figura 18. Interface inicial do programa Plaxis Foundation



Fonte: Autor (2018)

Ao selecionar novo projeto, o programa pede a entrada dos dados iniciais necessários para começar a modelagem da estrutura, como título para do projeto, descrição do projeto, valor da gravidade do local, peso específico da água, unidades a serem utilizadas, dimensão da geometria e espaçamento da grade para desenho, como pode-se observar na Figura 19.

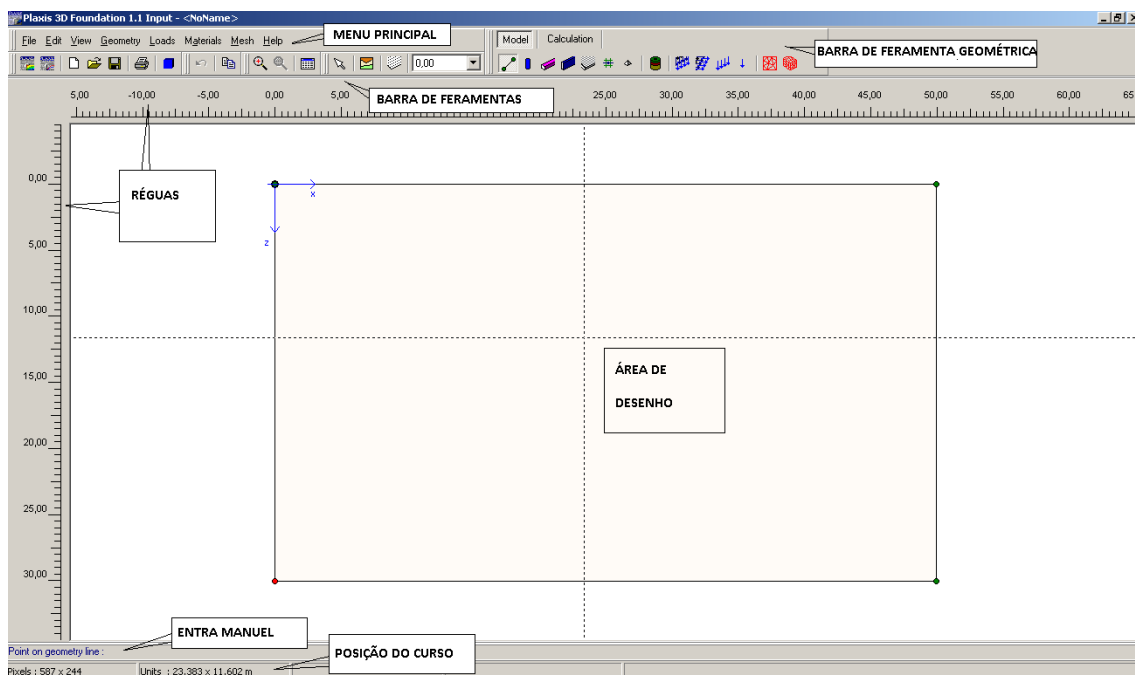
Figura 19. Dados iniciais pedidos pelo Plaxis Foundation



Fonte: Autor (2018)

Na Figura 20 é mostrada a interface do *Input*, onde será feita a modelagem e cálculo de toda estrutura.

Figura 20. Interface do Input no Plaxis 3D Foundation



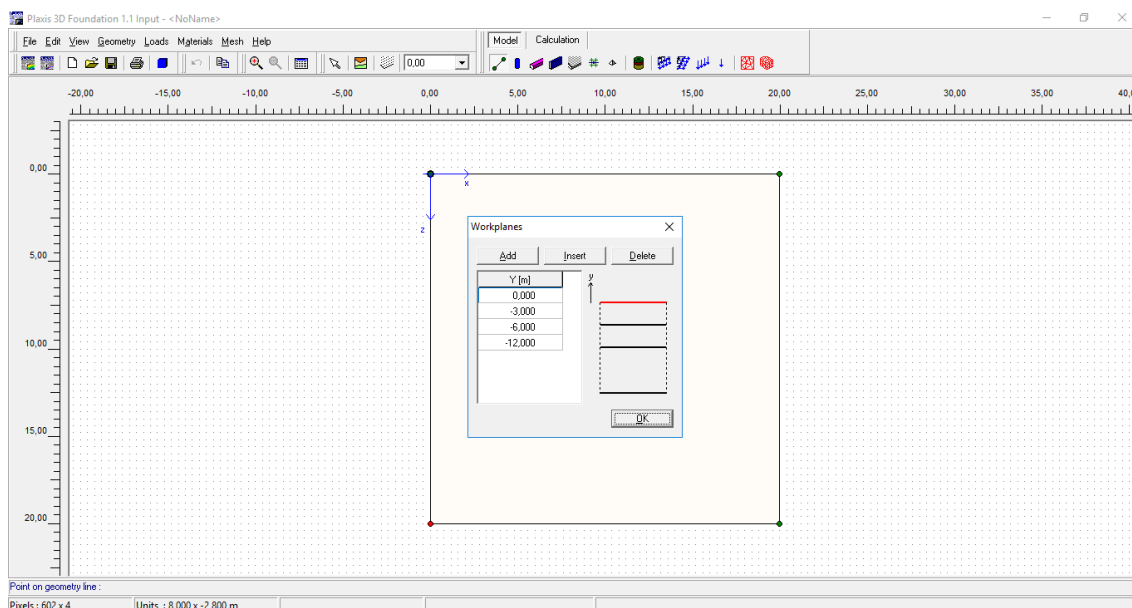
Fonte: Oliveira (2016)

3.5.1 Modelagem da geometria e do carregamento

Neste tópico será abordado a modelagem da geometria e como colocar o carregamento para as estacas e muros, que é feita no modo “*Model*” do *Input*. A geração da geometria em 3D começa em um modelo 2D com os eixos ‘x’ na horizontal e ‘z’ na vertical. Através dos *Workplanes* criados, mostrado na Figura 21, que são planos paralelos ao superficial, é que o modelo 3D é criado, tendo o eixo ‘y’ como referência.

No início de um novo projeto, um único plano de trabalho inicial é criado automaticamente no nível $y=0$. O nível deste plano de trabalho pode ser alterado pelo usuário e o usuário pode também criar planos de trabalho adicionais. É recomendado criar primeiro os planos de trabalho e após os objetos estruturais a serem trabalhados.

Figura 21. Criação de Workplanes no Plaxis 3D Foundation



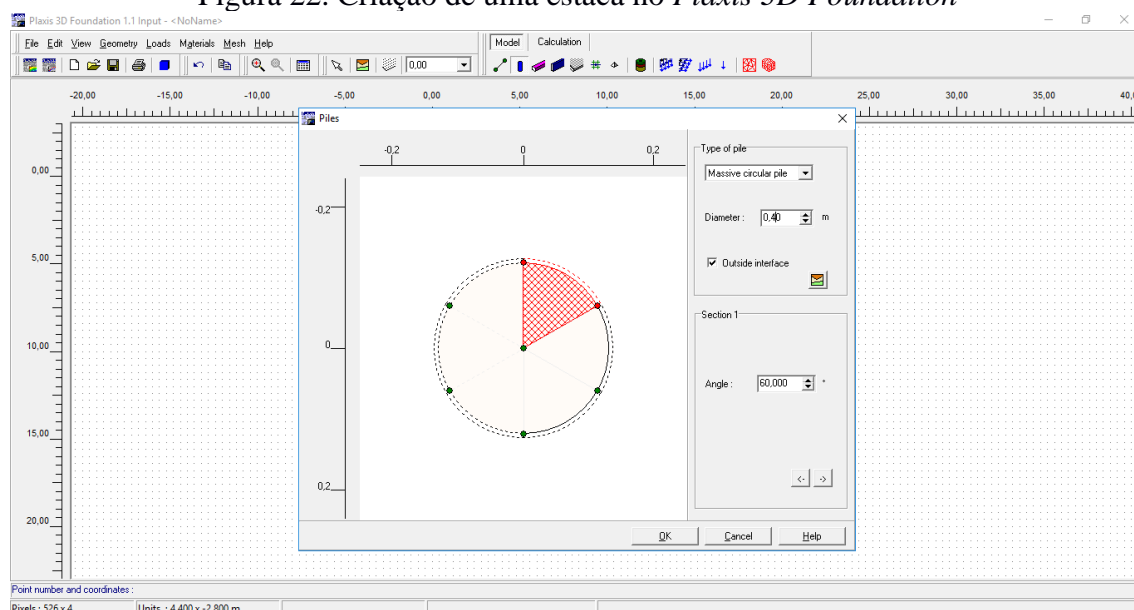
Fonte: Autor (2018)

É necessário sempre selecionar o *Workplane* correto para criar ou modificar os elementos, pois caso o usuário não mude, poderá ser criada estrutura em uma profundidade indesejada.

3.5.1.1 Estacas

A modelagem das estacas é feita como um tipo de solo com propriedades do concreto, apesar de haver o ícone para inserção de uma estaca, o *Plaxis 3D Foundation* não entende as estacas como uma estrutura única, define-se o tipo de estaca e seu diâmetro para delimitação com o solo. A opção ‘*Pile*’, mostrada na Figura 22, pode ser usada para criar estacas volumétricas com seções quadráticas, circulares ou uma seção transversal definida pelo usuário.

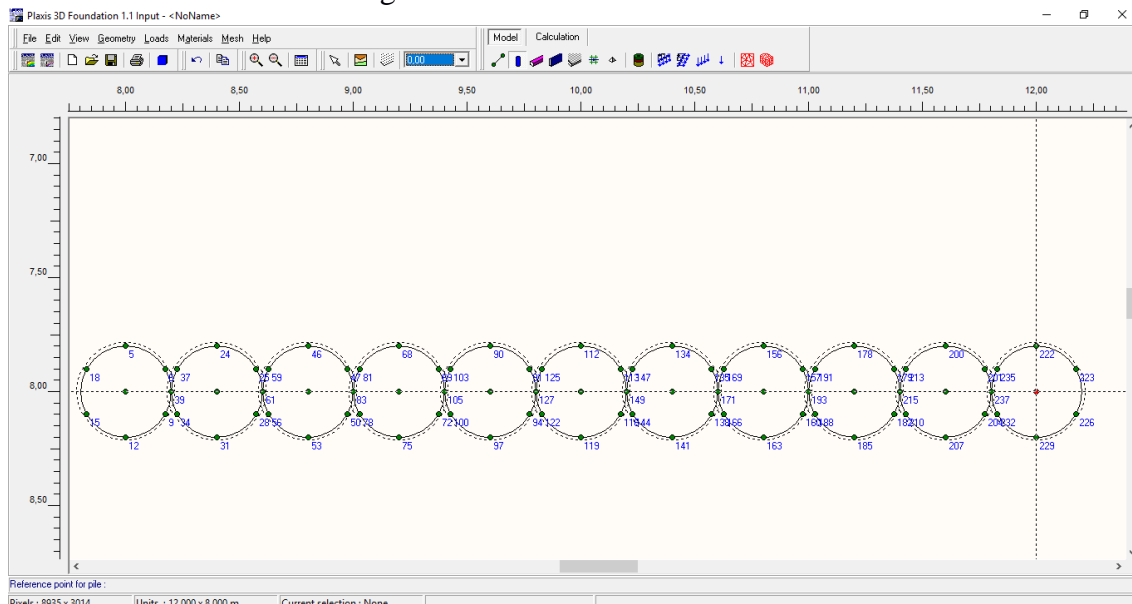
Figura 22. Criação de uma estaca no *Plaxis 3D Foundation*



Fonte: Autor (2018)

Para este trabalho foi utilizada a estaca circular maciça com diâmetro de 40 cm. Após definir as características da estaca, posiciona o cursor na coordenada desejada e a insere, na Figura 23 é mostrado a inserção das estacas, que no caso, é só a delimitação com o solo. Posteriormente, na fase de cálculo, será modelada com o devido material. Para as estacas não será necessário adicioná-la em todos os planos, quando inserida em algum plano, a delimitação já é inserida automaticamente em todos, porém ela terá um comprimento de 6 metros, que será definido posteriormente.

Figura 23. Posicionando as estacas

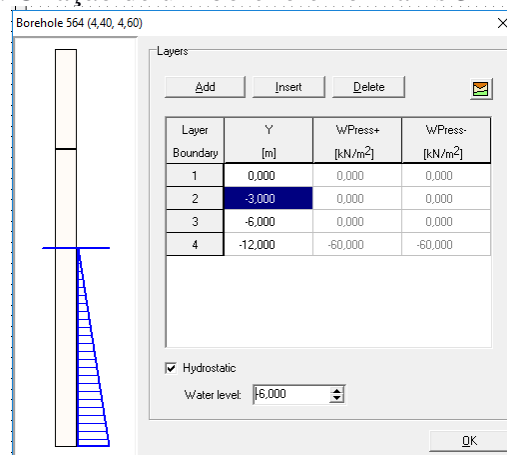


Fonte: Autor (2018)

Após a definição de toda geometria inicia-se o processo de modelagem do solo. Através do ícone 'Borehole' o usuário define quantas camadas de solo terá e as características de cada camada. O usuário pode criar quantos *boreholes* achar necessário, o *Plaxis 3D Foundation* irá fazer a interpolação dos pontos onde não houver *boreholes* criados, obtendo a nivelção do solo tal qual desejado.

Nesse caso, foi criado apenas um *borehole*, fazendo com que as camadas de solo se estendam niveladas por toda geometria. Foram utilizadas 3 camadas de solo com profundidades de 0 a 3 metros, 3 a 6 metros e 6 a 12 metros, mostrado na Figura 24.

Figura 24. Criação de um borehole no Plaxis 3D Foundation.



Fonte: Autor (2018)

Nesta área também é determinado o nível da água no terreno, que foi de -6, o programa determina automaticamente a pressão gerada pela água em cada camada de solo.

Entrando no ícone de conjunto de materiais, será definido cada tipo de solo e também do concreto a ser utilizado na estrutura. A estrutura contém os solos com as características informadas na Tabela 1.

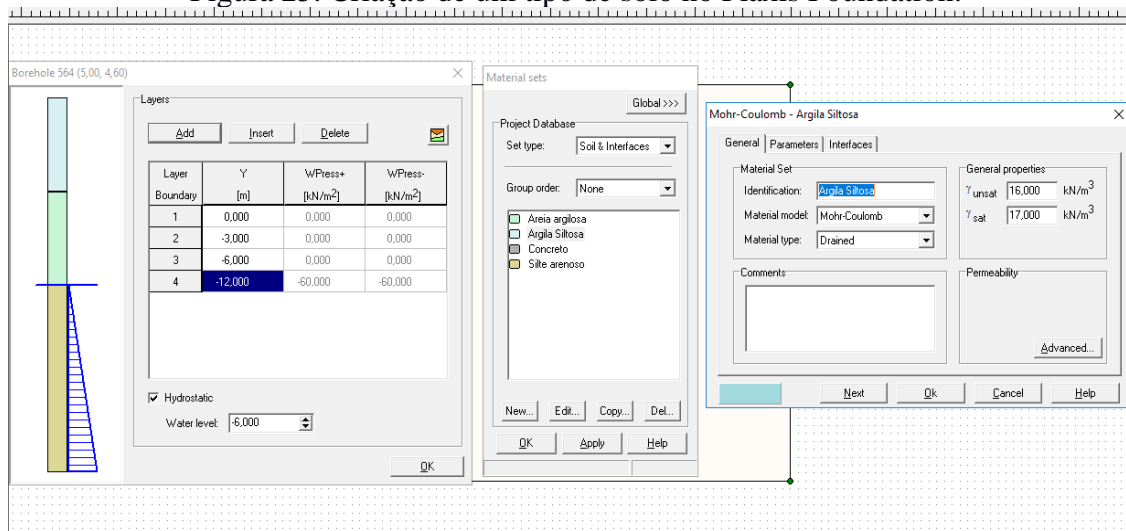
Tabela 1. Dados utilizados para modelagem da estrutura

		Material				
	Nome	Argila Siltosa	Areia Argilosa	Silte Arenoso	Concreto	Unidade
Profundidade	y	0 à 3	3 à 6	6 à 12	0 à 6	m
Modelo de material	Modelo	Mohr-Coulomb	Mohr-Coulomb	Mohr-Coulomb	Linear Elastic	-
Tipo de comportamento do material	Tipo	Drained	Drained	Drained	Non-porous	-
Unidade de peso do solo acima do nível freático	γ_{unsat}	16	16	16,5	24	kN/m ³
Unidade de peso do solo abaixo do nível freático	γ_{sat}	17	16,5	18	-	kN/m ³
Módulo de Young (constante)	E_{ref}	60000	120000	240000	29200000	kN/m ²
Coefficiente de Poisson	ν	0,3	0,3	0,3	0,3	-
Coesão (constante)	c_{ref}	10	15	5	-	kN/m ²
Ângulo de atrito	ϕ	27	25	27	-	°
Ângulo dilatância	ψ	0	0	0	-	°

Fonte: Autor (2018)

Para inserir o tipo de solo, seleciona-se antes a aba 'Soil & Interfaces', clica em 'novo' e define-se as características gerais e os parâmetros para cada tipo de solo. Como já foi abordado antes o concreto é modelado como um tipo de solo, então suas características são atribuídas na aba de *Soil & Interfaces*, o passo a passo pode ser observado na Figura 25.

Figura 25. Criação de um tipo de solo no Plaxis Foundation.

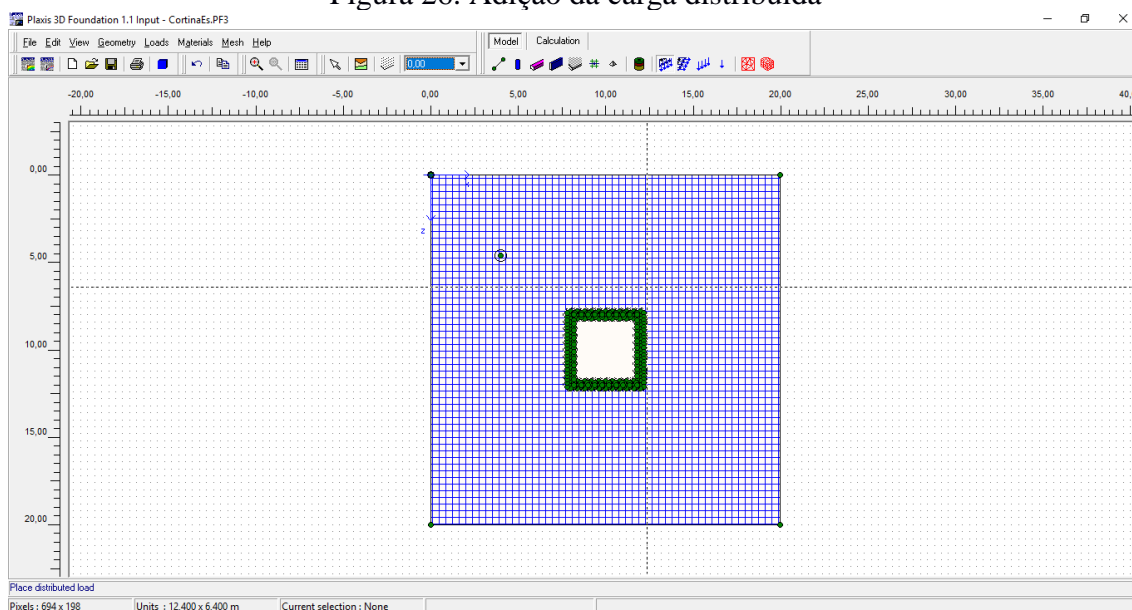


Fonte: Autor (2018)

Após criadas todas as camadas, clica no tipo de solo desejado e arrasta até a camada definida no borehole, assim o programa já entende que toda a camada delimitada tem as propriedades do solo determinada pelo usuário. Como o material das estacas só é definido na fase de cálculo, até lá as estacas estão com o material do solo especificado em cada camada.

Após a definição do material do solo, é selecionado o *workplane* em $y = 0$, onde será adicionada a carga distribuída, Figura 26, que simula as construções vizinhas ao local de escavação. Para adição da carga, clica no ícone de carga distribuída (planos horizontais) e seleciona no desenho a área de atuação da carga, é adicionada no plano horizontal 'xz' no sentido do eixo 'y'. Para este modelo reduzido foi adotada a carga de 50 kN/m^2 .

Figura 26. Adição da carga distribuída



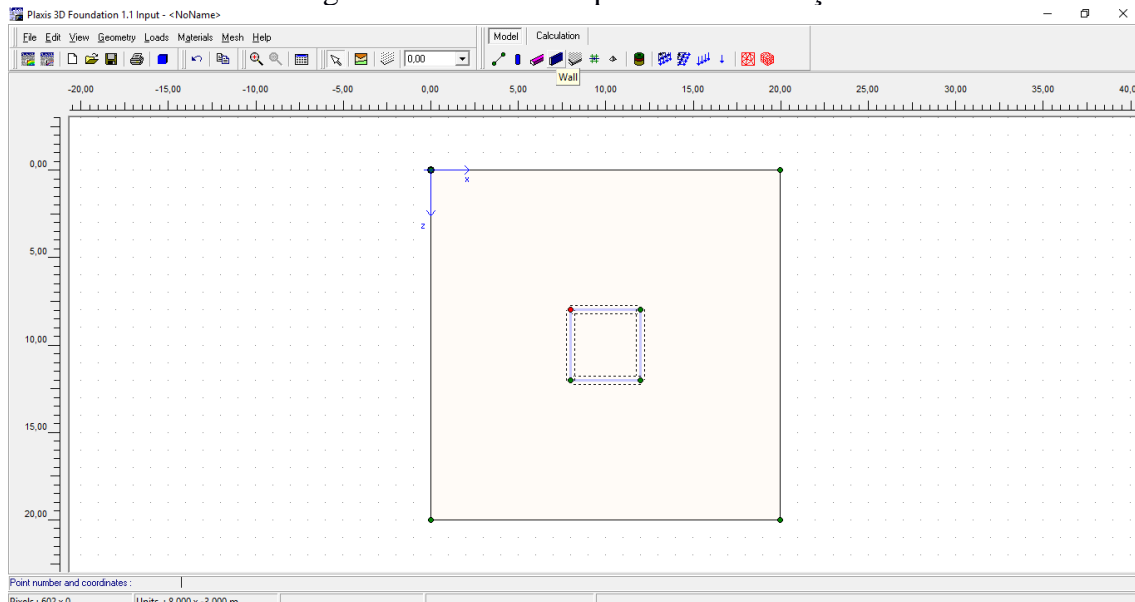
Fonte: Autor (2018)

3.5.1.2 Modelagem do muro de contenção

Diferente da estaca, o *Plaxis 3D Foundation* entende o muro como uma estrutura única e ele será modelado nessa primeira parte, já entrando no modo de cálculo como uma estrutura diferenciada do solo. Para adicionar o muro clica no ícone “*Wall*”, e será inserido com uma linha, posiciona-se o cursor na coordenada desejada e clica, repete o

passo em todas as coordenadas que define a parede até que o muro seja fechado, a Figura 27 mostra como fica o desenho após a criação das paredes.

Figura 27. Desenho da parede de contenção



Fonte: Autor (2018)

Para a parede é necessário adicioná-la nos *workplanes* com $y = 0$ e $y = -3$, pois quando adicionada em um plano fica delimitado até o plano abaixo, diferente da estaca a parede já é adicionada como uma estrutura e não como delimitação de áreas, o muro contém 6 metros de altura, por isso a necessidade de adicioná-la nos dois planos.

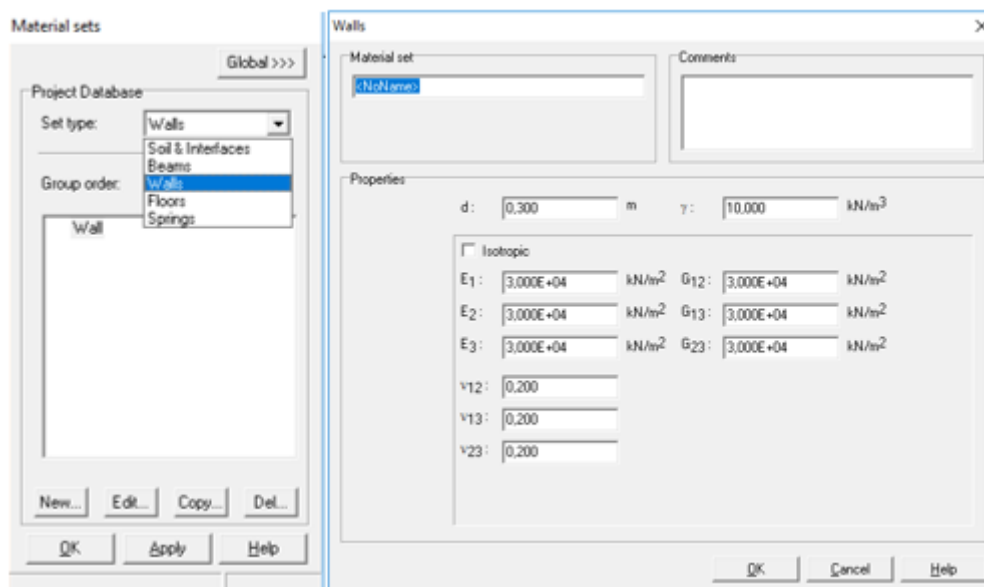
Para adição de solo e do carregamento é utilizado o mesmo procedimento explicado no item 7.5.1.1, entretanto o material utilizado para a parede é adicionado de uma forma diferente, Figura 28. Clica no ícone de conjunto de materiais, seleciona o tipo de material para parede, clica em novo e adiciona os dados do material da parede mostrado na Tabela 2.

Tabela 2. Dados do material da parede

Parâmetro	Nome	Parede de estaca-prancha	Unidade
modelo de material	Modelo	Linear	-
Espessura	d	0,3	m
Peso volumétrico	γ	7,85	kN/m ³
Módulo de Young	E1	10.000.000	kN/m ²
	E2	10.000.000	kN/m ²
	E3	10.000.000	kN/m ²
módulo de cisalhamento	G1	4.167.000	kN/m ²
	G2	4.167.000	kN/m ²
	G3	4.167.000	kN/m ²
Razão de Poisson	ν ii	0,2	-

Fonte: Autor (2018)

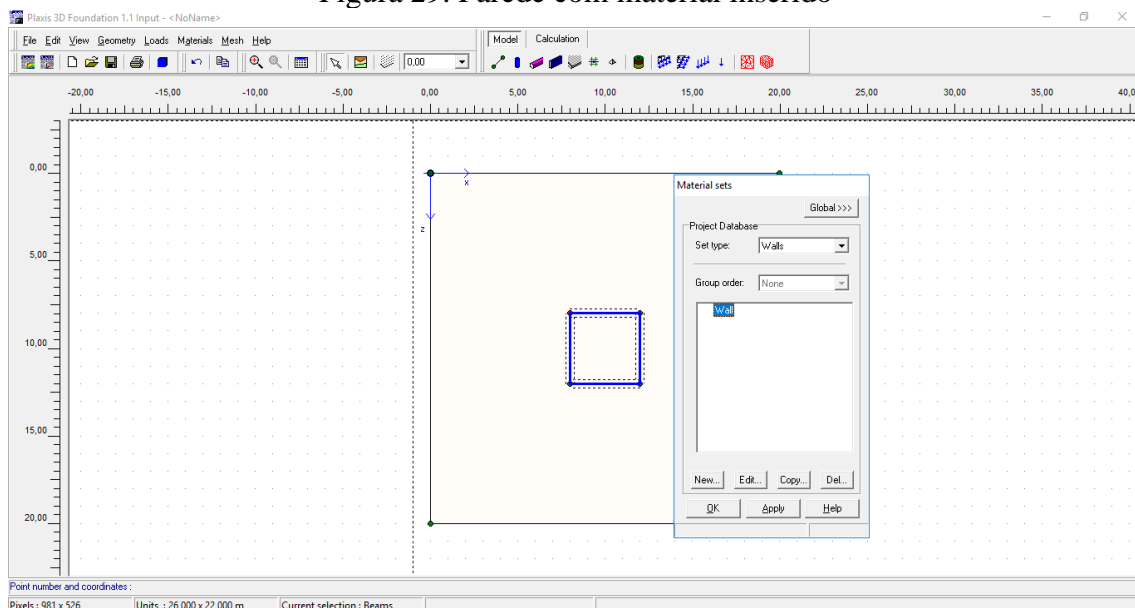
Figura 28. Criação do material a ser inserido na parede



Fonte: Autor (2018)

Para inserir o material na parede desenhada clica no material e arrasta até a parede, quando ela mudar para a cor azul é porque o material foi inserido, como pode-se observar na Figura 29. É necessário repetir o procedimento para todos os planos onde foram adicionadas as estruturas.

Figura 29. Parede com material inserido



Fonte: Autor (2018)

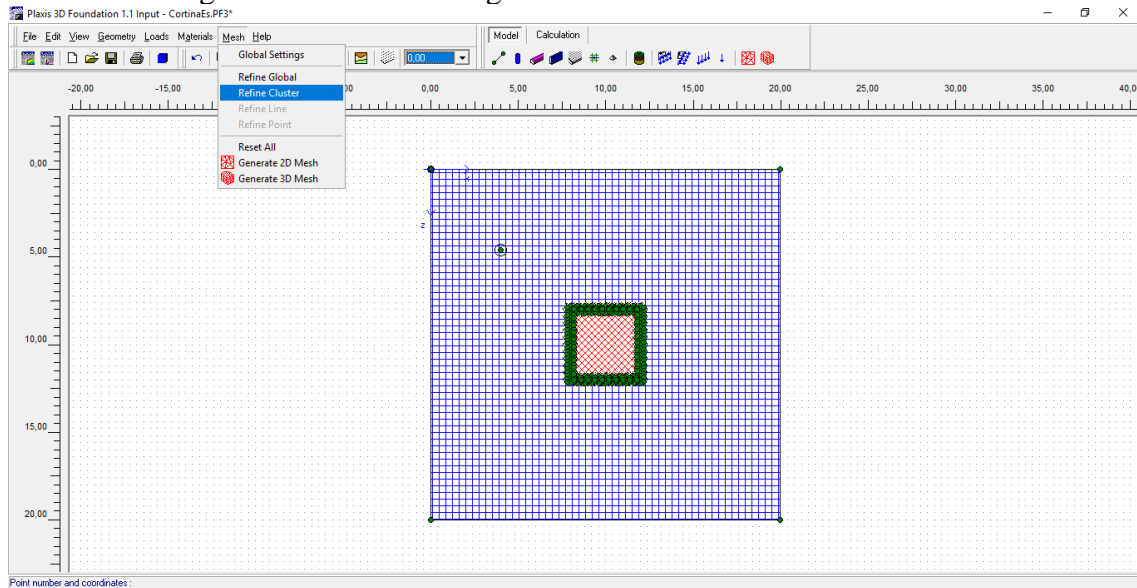
3.5.2 Discretização do modelo

Antes de entrar no módulo de cálculo é necessário a geração de uma malha na estrutura, pois para o cálculo pelo método dos elementos finitos temos que dividir a estrutura em vários elementos.

Quando a geometria modelo está totalmente definida e as propriedades do material foram atribuídas a todas as camadas e objetos estruturais, recomenda-se primeiro gerar uma malha 2D de planos de trabalho, caso haja algo errado ou faltando o programa dará erro na geração da malha.

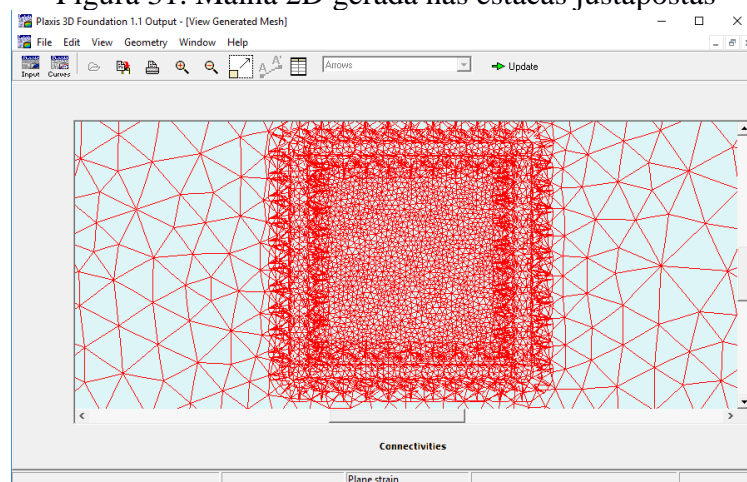
A malha 2D pode ser refinada globalmente ou obter o refinamento de uma área específica, no presente trabalho foi utilizada a malha grosseira para a cortina de parede e a malha fina para as estacas justapostas para mostrar a diferença entre os refinamentos. Os refinamentos das malhas das estacas e muros, podem ser observados nas Figuras 30, 31 e 32.

Figura 30. Refinamento global e local da malha 2D nas estacas



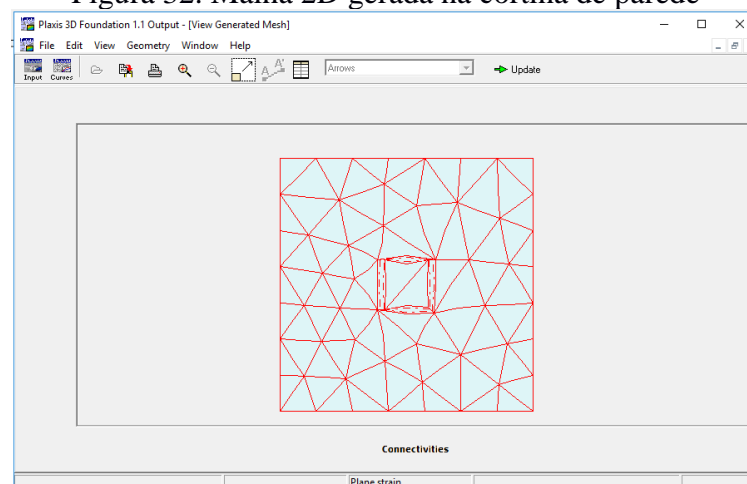
Fonte: Autor (2018)

Figura 31. Malha 2D gerada nas estacas justapostas



Fonte: Autor (2018)

Figura 32. Malha 2D gerada na cortina de parede

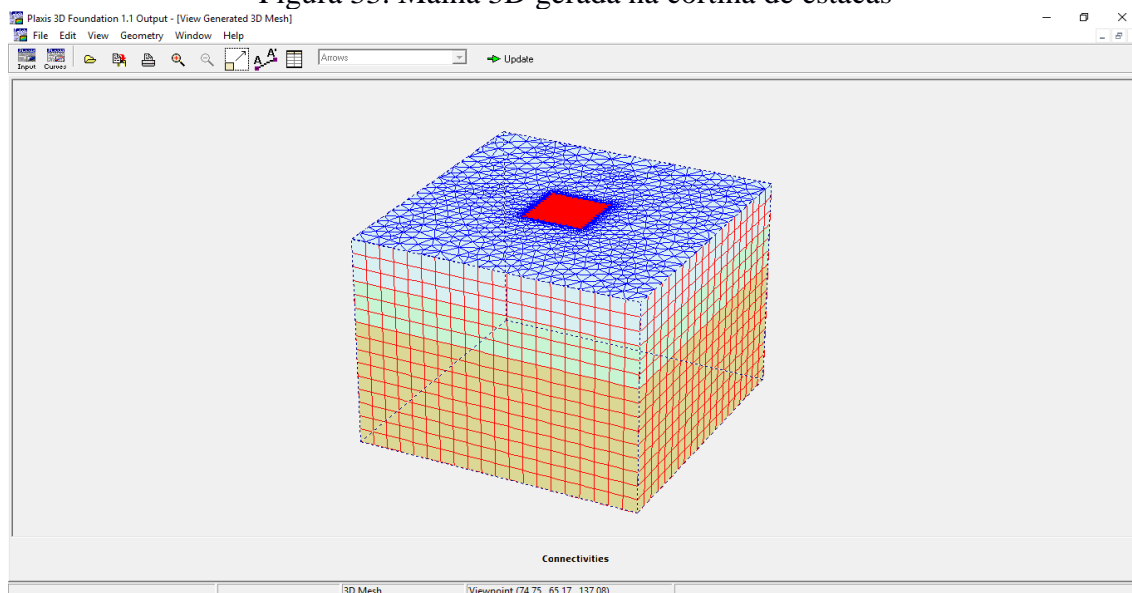


Fonte: Autor (2018)

Como pode-se ver nas Figuras 33 e 34, as malhas geradas são diferenciadas pela quantidade de elementos gerados. Para as estacas justapostas foi necessário aproximar a imagem para uma melhor visualização da divisão dos elementos devido ao refinamento da malha. Para a parede de contenção a malha é grosseira e não há necessidade de aproximar a imagem.

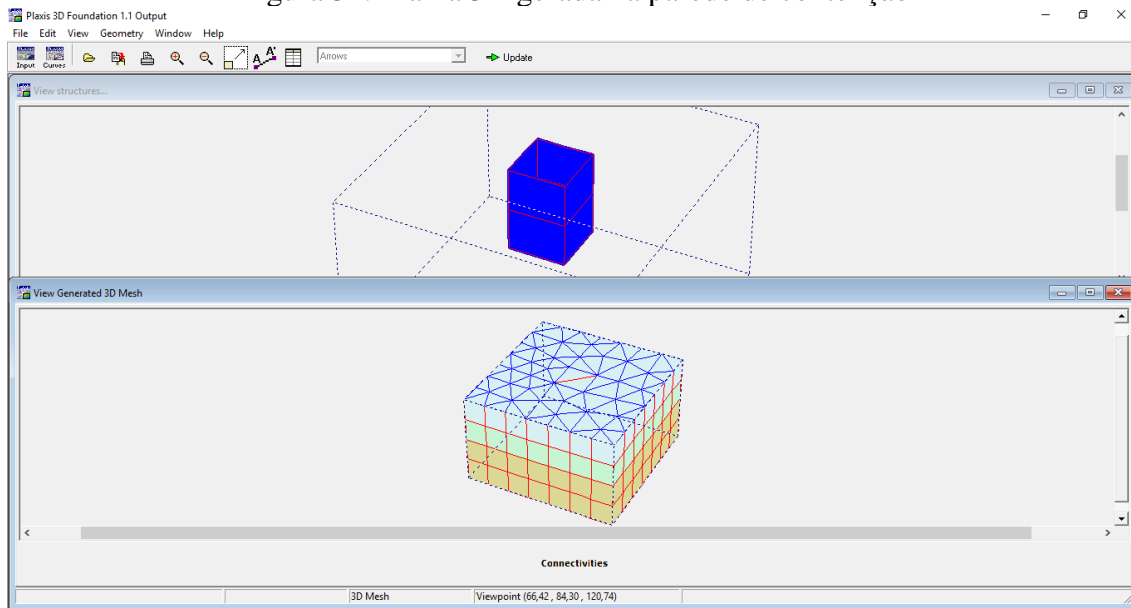
A malha em 3D só será gerada após a malha 2D ter sido aceita, após a geração da malha 2D, seleciona a malha 3D. Para a contenção de estaca-prancha a malha 3D gera separada a malha do solo e da estrutura, o que não ocorre na geração da cortina de estacas devido ao fato da estaca “não ser uma estrutura” e ser modelada como solo.

Figura 33. Malha 3D gerada na cortina de estacas



Fonte: Autor (2018)

Figura 34. Malha 3D gerada na parede de contenção



Fonte: Autor (2018)

3.5.3 Fases de cálculo

Após a geração das malhas será iniciada a etapa da separação de fases para cálculo da estrutura. Nesse modo serão definidas cada fase de construção das estacas, é seguida a linha de raciocínio lógico da construção. Primeiro são modeladas as estacas e depois é feita a escavação.

Ao entrar no modo Cálculo, a área de desenho mostra uma vista superior semelhante ao modo Modelo, esta etapa é dividida em 4 fases: fase inicial, modelagem das estacas e paredes, escavação e carregamento.

A fase inicial é determinada automaticamente pelo programa, com 250 steps, que são a quantidade de vezes que chegará no máximo de iterações, a cada 50 iterações, máximo padrão definido pelo programa que poderá ser alterado pelo usuário, na Figura 35 pode-se observar as configurações que o usuário poderá modificar ou aceitar as configurações automáticas.

Figura 35. Configurações da fase inicial de cálculos

Phases

General Parameters

Additional steps : 250

☒ Reset displacements to zero
☒ Ignore undrained behaviour
☒ Delete intermediate steps

Iterative procedure
☒ Default
Tolerated error : 0.0100
Over relaxation : 1.2000
Maximum iterations : 50
Desired minimum : 4
Desired maximum : 10
☐ Arc-length control

Next Insert Delete...

Identification	Phase no.	Start from	First	Last
✓ Initial phase	0	N/A	1	1
✓ Modelagem do muro	1	0	2	2
✓ Escavação	2	1	3	4
✓ Carregamento	3	2	5	25

OK Cancel Print...

Fonte: Autor (2018)

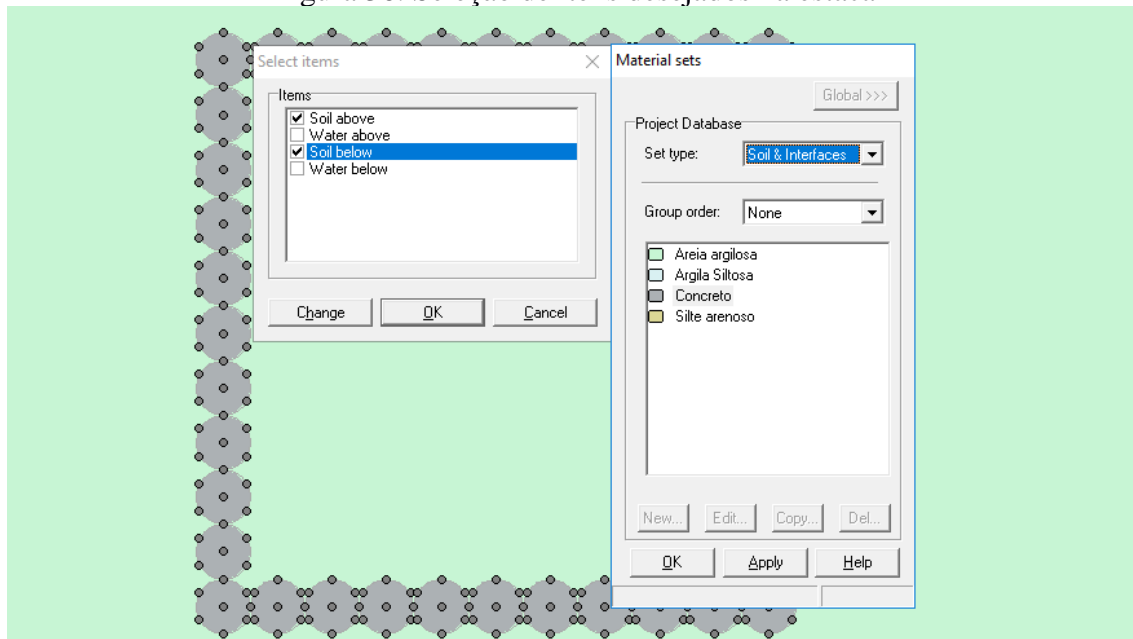
A opção de redefinir os deslocamentos para zero está marcada para que quando os cálculos nessa fase terminarem o programa desconsidere os deslocamentos causados nela, essa fase ignora o comportamento não drenado pois ainda não está no cálculo da estrutura em si e marca para apagar os steps intermediários pois quando achar uma solução não será necessário calcular os 250 steps, já poderá passar para próxima fase.

A segunda fase é a modelagem das estacas e a ativação da parede que já foi modelada no modo Modelo. Nesta fase é desmarcada a opção de ignorar o comportamento não drenado na janela de parâmetros, pois já começou a montagem da estrutura e a água interfere no processo.

Para modelagem das estacas, mostrada na Figura 36, seleciona primeiro o *workplane* desejado, clica na estaca e o usuário tem a opção de definir o material do solo acima e do solo abaixo, até o momento existe uma linha delimitando a estaca do solo, entretanto estão com o mesmo material, sendo necessário mudar só na estaca.

Para agilizar o processo o *workplane* selecionado foi o de $y = -3$ e definiu-se o material da estaca para o solo acima (-3m à 0) e para o solo abaixo (-3m à -6m).

Figura 36. Seleção de itens desejados na estaca

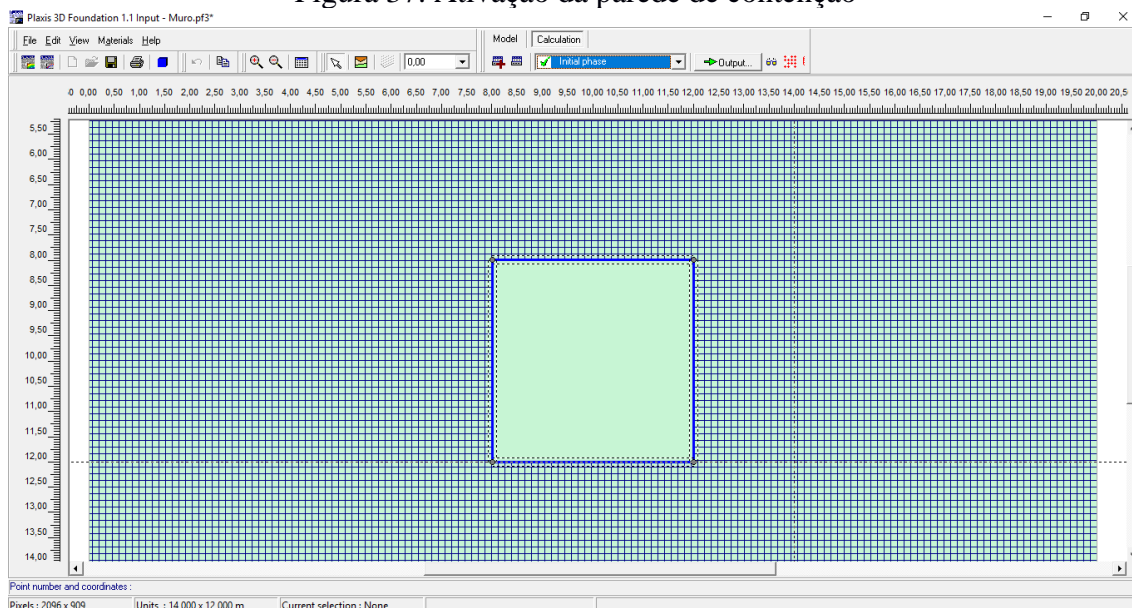


Fonte: Autor (2018)

Na seleção de itens vem com a opção de ativar água por ser modelada como um solo, esta seleção é desativada para a estrutura acima e abaixo. Na opção solo acima e abaixo são selecionadas e clica em “change”, aparecendo a janela de materiais, seleciona o concreto e clica em “OK”, assim o material da estaca é definido, o processo deve ser repetido para todas as estacas selecionadas, ao término da modelagem pode-se passar para a próxima fase.

Para ativação da parede, apenas clica em cima do muro em todos os planos que estão com o muro inserido e estará ativado se alterar a cor para azul escuro, mostrado na Figura 37.

Figura 37. Ativação da parede de contenção

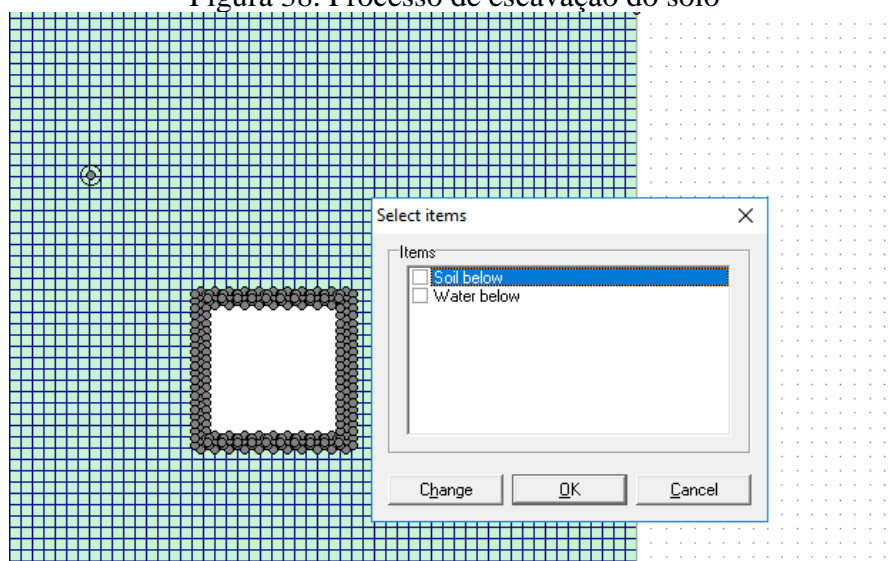


Fonte: Autor (2018)

A terceira fase é a escavação, na área de parâmetros é desmarcada a opção que redefine o deslocamento para zero ao final dos cálculos, pois na escavação estão os deslocamentos e tensões necessárias para análise.

Seleciona o *workplane* em $y = 0$, clica no solo a ser escavado e na janela de seleção de itens desmarca todas as opções, se a área ficar na cor branca significa que o programa entende que não existe solo na área selecionada, Figura 38. Tanto para o muro como para as estacas o procedimento é o mesmo.

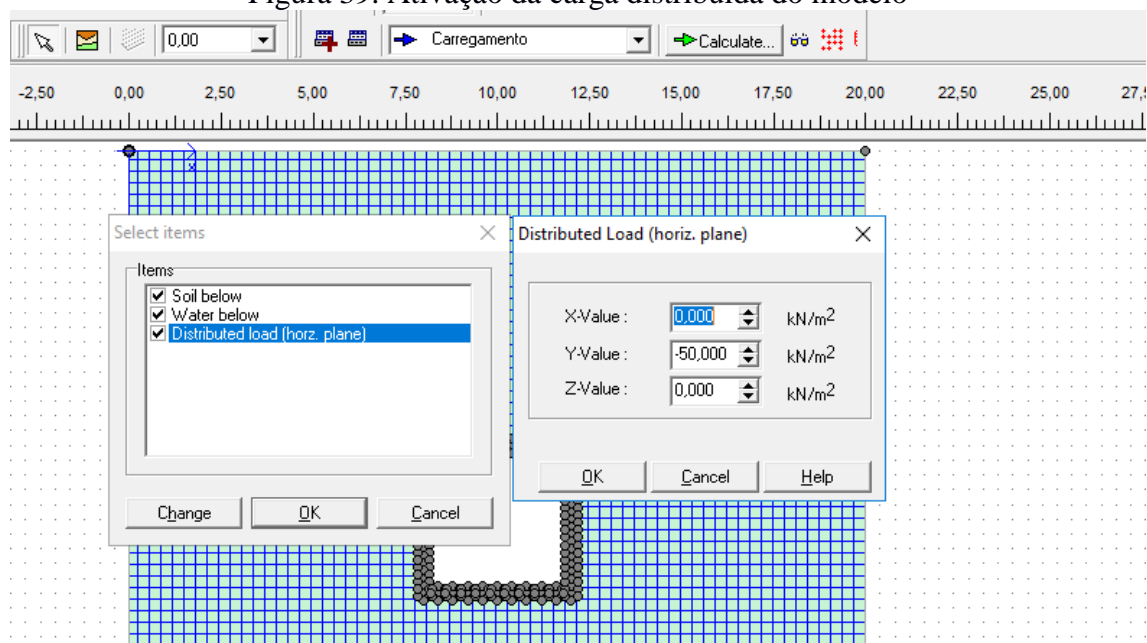
Figura 38. Processo de escavação do solo



Fonte: Autor (2018)

A quarta fase consiste na ativação e definição no valor da carga, matem-se os parâmetros da fase anterior, seleciona o *workplane* onde a carga foi inserida, clica na área que está com carregamento e aparecerá a janela de itens com a carga distribuída como opção de seleção, a carga distribuída deverá ser ativada. Selecionando-a e clicando em “change” o usuário informa o valor da carga desejada em qualquer uma das direções, para o trabalho foi adotado uma carga de 50kN/m^2 na direção y, sendo necessário colocar valor negativo para direcioná-la para baixo, Figura 39.

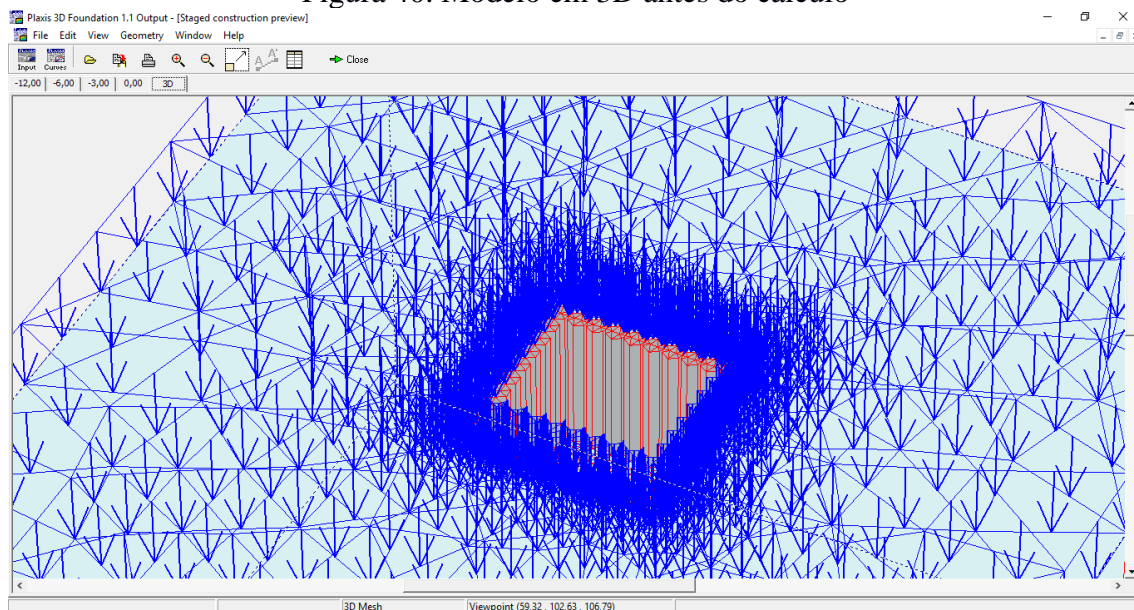
Figura 39. Ativação da carga distribuída do modelo



Fonte: Autor (2018)

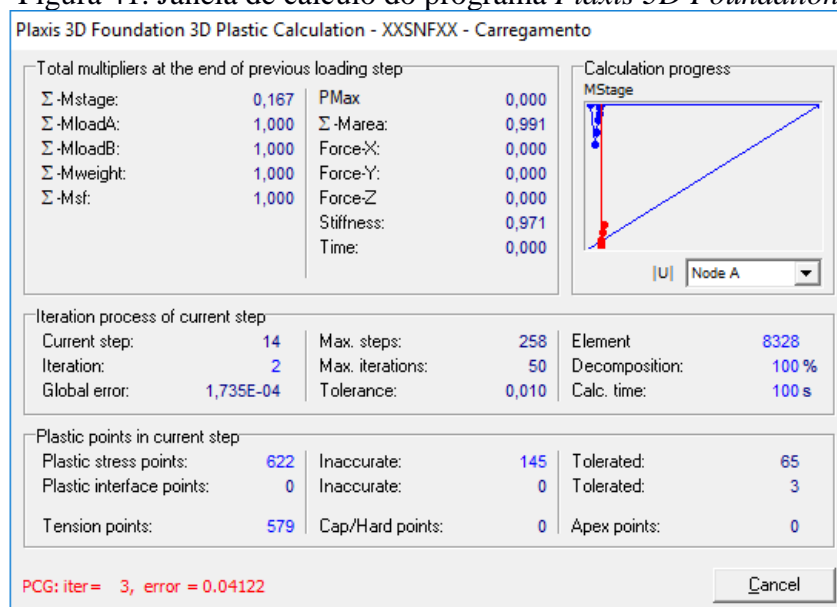
Após definidas todas as fases, o cálculo já poderá ser iniciado clicando na opção “Calculate”. Antes de iniciar os cálculos pode ser visto na Figura 40 o modelo em 3D para verificar se a modelagem foi feita corretamente.

Figura 40. Modelo em 3D antes do cálculo



Fonte: Autor (2018)

A Figura 41 mostra a janela de cálculo do programa:

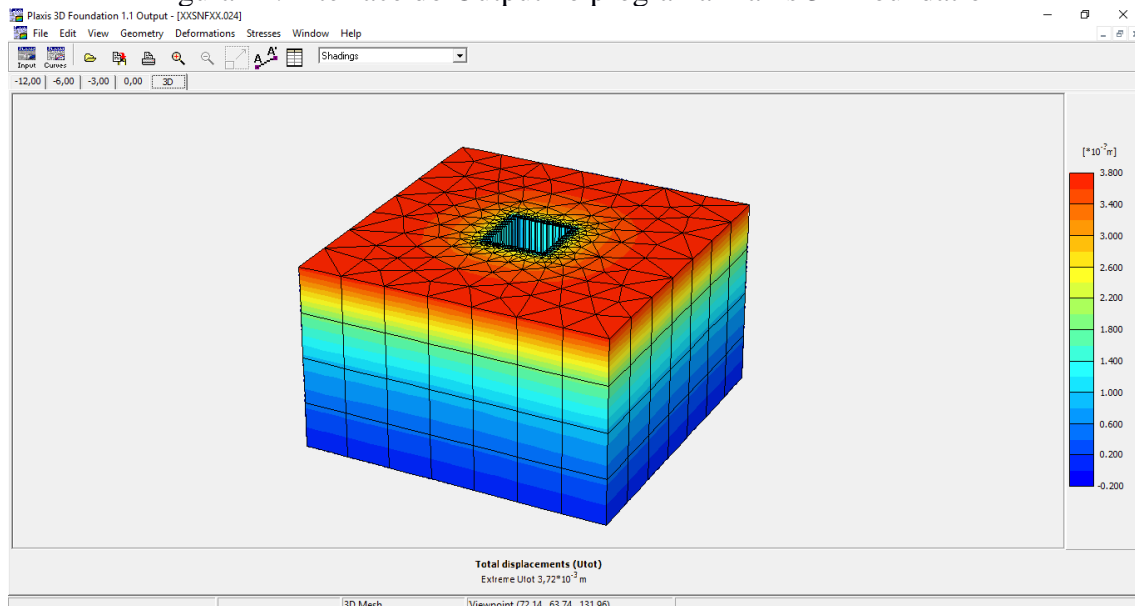
Figura 41. Janela de cálculo do programa *Plaxis 3D Foundation*

Fonte: Autor (2018)

3.5.4 Análise dos resultados

Após o término dos cálculos, é possível analisar o modelo em cada fase específica, entrando na segunda parte do programa “*Output*”, nela são feitas todas as análises de tensões e deformações causadas no modelo. A Figura 42 mostra a interface de entrada do *Output*.

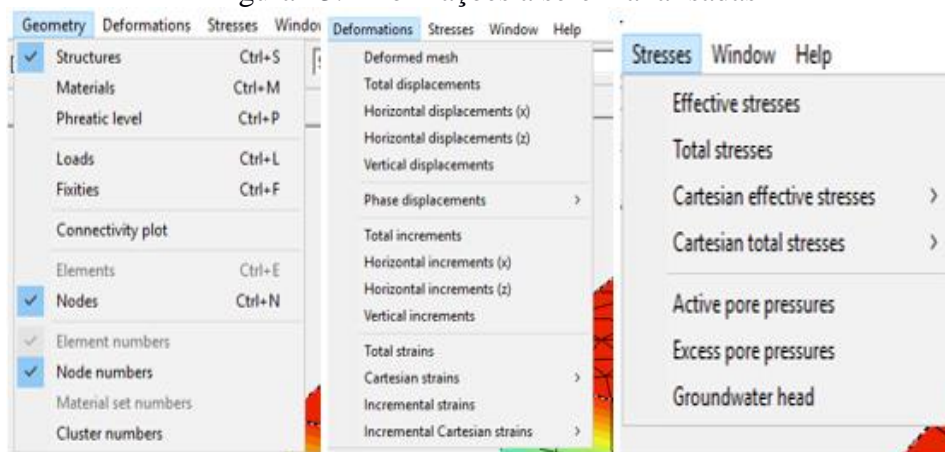
Figura 42. Interface do Output no programa Plaxis 3D Foundation



Fonte: Autor (2018)

Como pode-se observar na Figura 43, o programa dá ao usuário a possibilidade de analisar as deformações causadas pelo carregamento em todas as direções, tensões causadas em cada nó em todas as direções, diversos tipos de visualização, em escala real ou definida pelo usuário para uma melhor visualização, também a geração de cortes no desenho e uma tabela com todos os dados de todos os elementos e nós.

Figura 43. Informações a serem analisadas



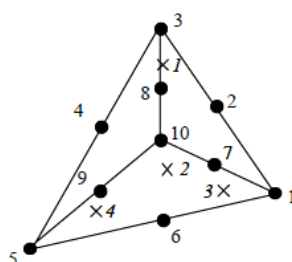
Fonte: Autor (2018)

3.5.4.1 Elementos

O programa calcula através do método dos elementos finitos, para isso ele precisa separar todo modelo em vários elementos, nesse caso foram elementos triangulares, cada elemento contém 6 nós, cada só faz parte de mais de um elemento, Figura 44.

Os deslocamentos nos nós são iguais em todos os elementos, mas as tensões geradas são diferentes, nos resultados o programa mostra a tensão no nó em cada elemento separado.

Figura 44. Exemplo de como os elementos e nós se agrupam

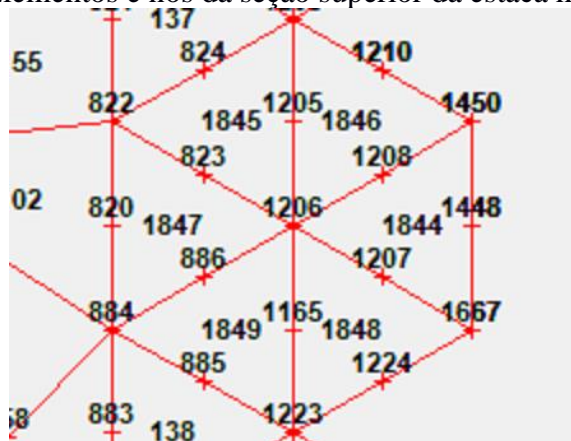


Fonte: Autor (2018)

3.5.4.2 Estacas

Cada seção da estaca contém 6 elementos, cada elemento contém 6 nós, mas como os nós se juntam a mais de um elemento a seção da estaca totaliza 19 nós. O nó analisado no trabalho é o central da estaca mais solicitada (nó 1206, Figura 45), que faz parte de todos os elementos da seção. O programa gera 6 tensões nesse ponto e apenas 1 deslocamento.

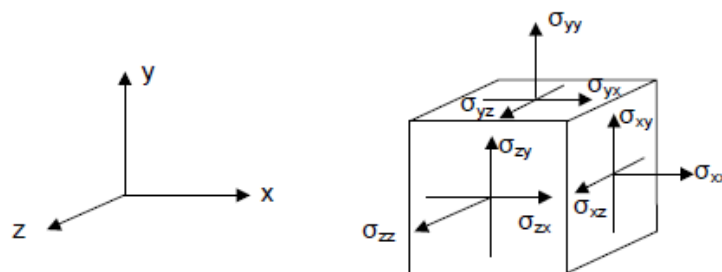
Figura 45. Elementos e nós da seção superior da estaca mais solicitada



Fonte: Autor (2018)

Para um melhor entendimento dos resultados gerados em cada ponto da estaca, a Figura 46 demonstra as tensões obtidas em cada direção:

Figura 46. Direcionamento das tensões exercidas em cada nó

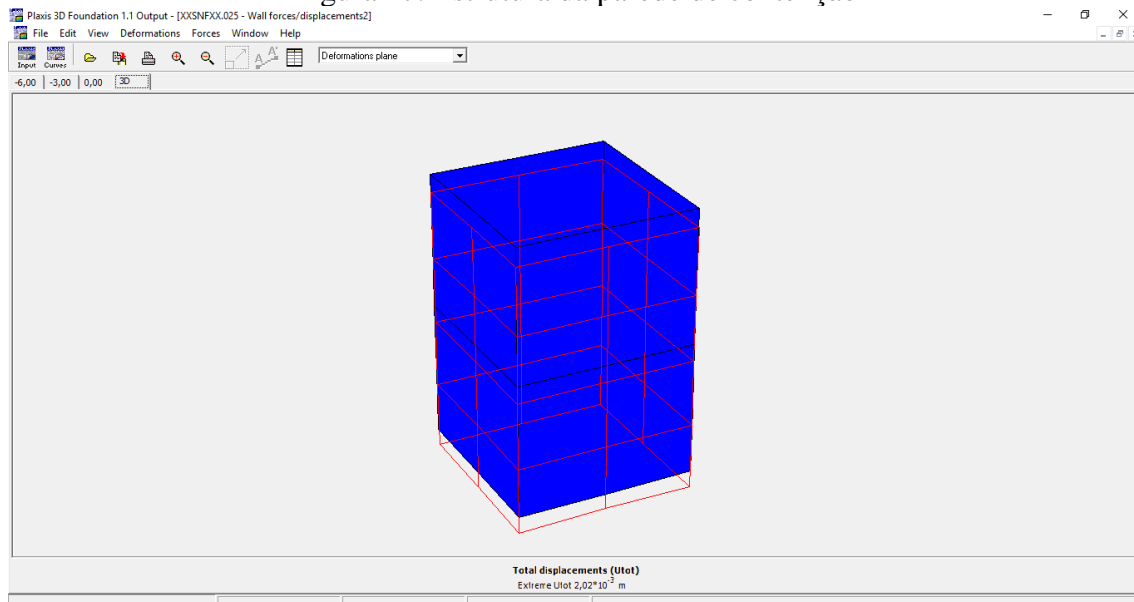


Fonte: Referencial *Plaxis 3D Foundation*

3.5.4.3 Contenção de parede

Pelo fato de o programa entender a parede como uma estrutura única, é possível visualizá-la separadamente, Figura 47. Como a malha da parede foi grosseira ela gera menos pontos que as estacas justapostas, são 8 placas, cada placa contém 8 nós.

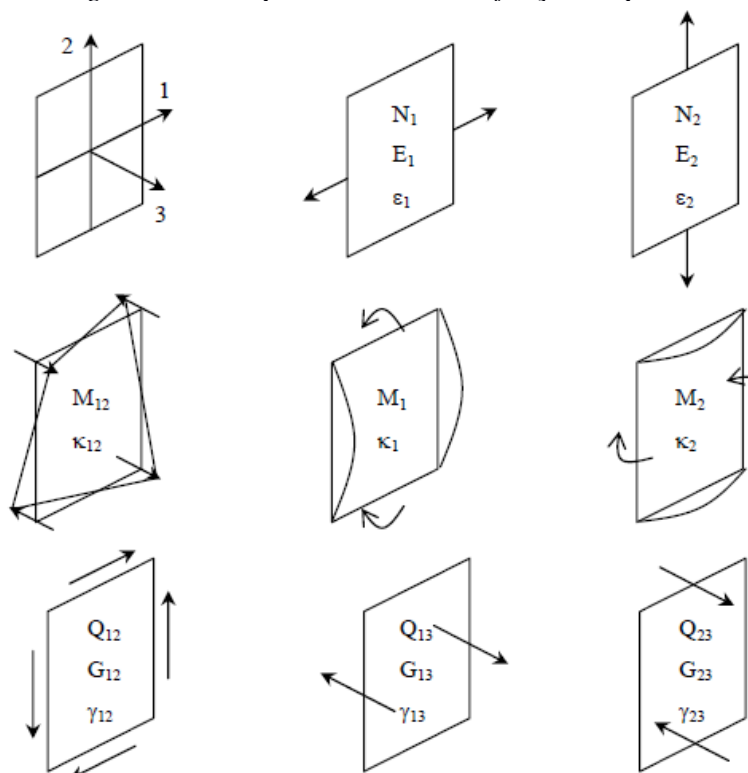
Figura 47. Estrutura da parede de contenção



Fonte: Autor (2018)

Para um melhor entendimento dos resultados encontrados, a Figura 48 demonstra como cada esforço se comporta na placa estrutural:

Figura 48. Comportamento dos esforços na placa



Fonte: Referencial *Plaxis 3D Foundation*

3.5.5 Organização dos dados

Os dados obtidos são dados em uma tabela pelo programa, para uma melhor organização dos dados eles foram copiados para o Excel.

3.5.5.1 Estacas

Para selecionar os dados da estaca a dificuldade foi maior, pois a malha foi refinada e os dados das estacas vêm junto com os dados do solo, foi necessário “enxugar” os dados para chegar apenas nos desejados. Como pode-se observar na Figura 49, são gerados 8328 elementos com 25189 nós no modelo da cortina de estacas, no Excel esses dados foram reduzidos à apenas os nós da estaca mais solicitada para comparação dos dados.

Figura 49. Dados gerais do modelo de estacas justapostas

General info

Project		General	
File name :		Model :	3D Parallel planes
Directory :	C:\Users\yhago\AppData\Local	Elements :	15-Noded wedge
Title :	Escavação 10	Dedination :	0,00 °
Comments :		Mesh	
		Number of elements :	8328
		Number of nodes :	25189
		Average element size:	759,19*10 ⁻³ m
		<input type="button" value="OK"/> <input type="button" value="Help"/>	

Fonte: Autor (2018)

As Tabelas 3 e 4 mostram um exemplo dos dados fornecidos pelo programa de tensões para o nó 1206 de uma estaca e de deformações para mesma estaca:

Tabela 3. Tensões calculadas no nó 1206 das estacas justapostas

TENSÕES										
Element	Node	X	Y	Z	s' _{xx}	s' _{yy}	s' _{zz}	s' _{xy}	s' _{yz}	s' _{zx}
Concreto		[m]	[m]	[m]	[kN/m ²]	[kN/m ²]	[kN/m ²]	[kN/m ²]	[kN/m ²]	[kN/m ²]
1844	1206	8,000	0	10	-14,6358	-126,121	14,97566	5,14145	-0,54093	0,115506
1845	1206	8,000	0	10	-59,9053	-148,929	-33,0631	-0,52907	-6,94527	-5,80153
1846	1206	8,000	0	10	-28,2457	-138,865	-20,5459	0,031615	-8,75666	-5,43878
1847	1206	8,000	0	10	-70,3806	-162,459	-74,0499	-3,8225	1,13324	-2,21824
1848	1206	8,000	0	10	-27,7187	-139,822	-24,1266	-1,61468	10,49883	5,178496
1849	1206	8,000	0	10	-50,814	-145,905	-32,8797	-0,84789	8,674376	6,015171

Fonte: Autor (2018)

Tabela 4. Deformações calculadas em uma estaca

DEFORMAÇÕES NA ESTACA						
Node	X	Y	Z	Ux	Uy	Uz
	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]
1206	8,000	0	10	0,001093	-0,00092	-2,03687E-06
4483	8,000	-1,5	10	0,00081	-0,00091	-1,47409E-06
6455	8,000	-3	10	0,000419	-0,00091	-5,46226E-07
9732	8,000	-4,5	10	0,000179	-0,00089	-2,2585E-07
11704	8,000	-6	10	0,000109	-0,00089	3,99983E-07

Fonte: Autor (2018)

3.5.5.2 Parede

Devido a malha grosseira, a quantidade de nós gerados no modelo com parede foi bem menor, foram 336 elementos com 1261 nós, mostrado na Figura 50, porém não houve necessidade de enxugar devido ao programa dar separadamente dos dados.

Figura 50. Dados gerais do modelo de contenção de parede

General info

Project
 File name :
 Directory : C:\Users\yhago\AppData\Local
 Title : Muro de contenção

General
 Model : 3D Parallel planes
 Elements : 15-Noded wedge
 Declination : 0,00 °

Comments :
 Muro de contenção com perímetro de 16 metros, fechando uma área quadrada de 16 m²

Mesh
 Number of elements : 336
 Number of nodes : 1261
 Average element size: 3,78*10⁰ m

OK Help

Fonte: Autor (2018)

As Tabelas 5 e 6 mostram exemplos de tensões e deformações obtidas no cálculo do modelo de contenção com parede:

Tabela 5. Esforços calculados em uma Parede

ESFORÇOS NA PAREDE													
Wall	Node	Node	X	Y	Z	N_11	N_22	Q_12	Q_23	Q_13	M_11	M_22	M_12
ID		ID	[m]	[m]	[m]	[kN/m]	[kN/m]	[kN/m]	[kN/m]	[kN/m]	[kNm/m]	[kNm/m]	[kNm/m]
1	1	386	12	-3	8	-105,775	-112,969	-25,8435	91,6309	-3,94226	-0,34199	-0,17149	-0,026
	2	368	10	-3	8	-105,513	-119,136	0,025948	0,008374	-3,62333	-0,43128	-0,07154	-0,01383
	3	372	8	-3	8	-105,25	-125,302	25,89535	-91,6142	-3,30439	-0,52058	0,028411	-0,00166
	4	239	8	-1,5	8	-47,679	-71,6792	5,283058	-67,6594	-0,32208	-1,00111	-0,16195	0,001888
	5	94	8	0	8	9,892477	-18,056	-15,3292	-43,7047	2,660221	-1,48165	-0,3523	0,005436
	6	90	10	0	8	10,0577	-21,474	0,12637	-0,01167	2,834535	-1,61447	-0,3196	0,011529
	7	108	12	0	8	10,22293	-24,8921	15,58197	43,68134	3,008849	-1,74729	-0,28689	0,017622
	8	245	12	-1,5	8	-47,776	-68,9304	-5,13074	67,65612	-0,46671	-1,04464	-0,22919	-0,00419

Fonte: Autor (2018)

Tabela 6. Deformações calculadas em uma parede

DEFORMAÇÕES NA PAREDE						
Node	X	Y	Z	Ux	Uy	Uz
	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]
98	8	0	10	-9,5E-05	-0,00503	3,59E-05
376	8	-3	10	0,000118	-0,00212	8,43E-06
647	8	-6	10	9,62E-05	-0,00181	4,03E-06

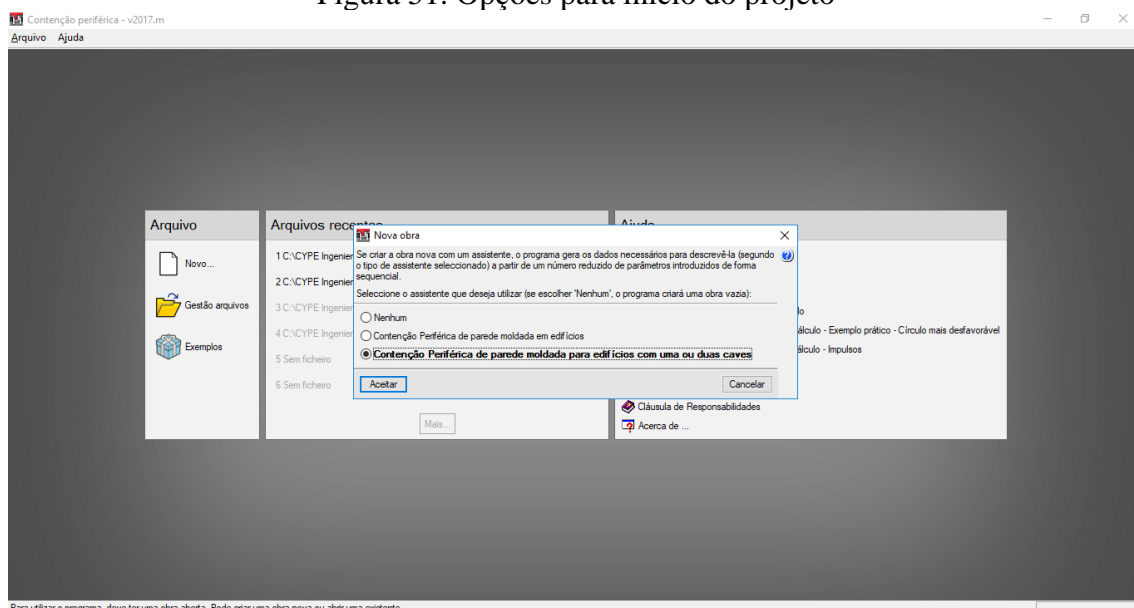
Fonte: Autor (2018)

3.6 Metodologia utilizada para o trabalho no Cype

Para o dimensionamento da estrutura foi utilizado o programa Cype no módulo “Contenção Periférica”. A estrutura foi modelada tal qual no programa *Plaxis 3D Foundation* para que não apresentassem divergências e possibilitasse a comparação de resultados, o Cype gera esforços e deslocamentos na estrutura com a vantagem de dimensionar as estacas e a parede.

Como pode ser visto na Figura 51, ao selecionar novo projeto o programa nos dá opções para iniciar do zero ou com algumas informações já inseridas. No caso do presente trabalho foi escolhida a opção inicial “Contenção periférica de parede moldada para edifícios com uma ou duas caves”, apesar de ser uma opção com paredes, dentro do programa é possível alterar para outros tipos de contenções.

Figura 51. Opções para início do projeto



Fonte: Autor (2018)

Ao entrar com essa opção, o programa pede as informações mostradas nas Figuras 52 e 53. As informações inseridas com as dimensões da escavação e do solo foram idênticas às inseridas no *Plaxis 3D Foundation*.

Figura 52. Dados iniciais da edificação

Fonte: Autor (2018)

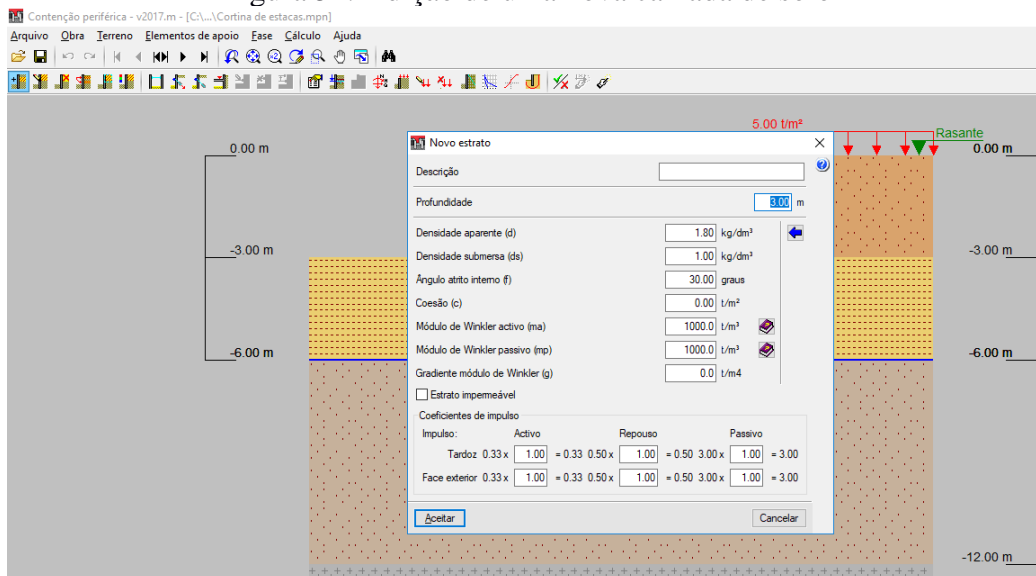
Em relação às sobrecargas no solo, deixou-se para adicionar com o programa já iniciado, pois teria a opção de adicionar um valor específico, podendo igualar à carga adicionada no *Plaxis*.

Figura 53. Dados iniciais do terreno

Fonte: Autor (2018)

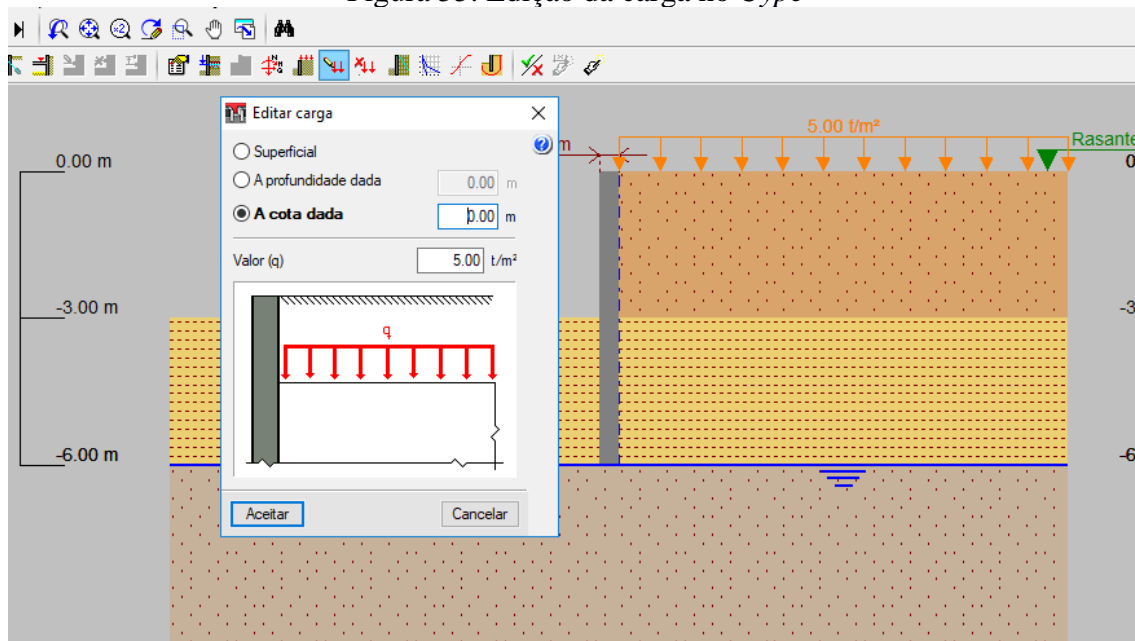
Após adicionadas todas as informações iniciais, o programa abre a interface de modelagem com um modelo com os dados iniciais já inseridos. Esse modelo vem com um tipo de solo predeterminado, para adicionar novas camadas de solo, clica em “Novo estrato”, Figura 54, e insere as informações do solo iguais as que foram inseridas no *Plaxis* e para modificar a camada já existente seleciona o ícone “Editar estrato” e clica em cima da camada que se deseja modificar, então aparecerá a mesma janela de adicionar um estrato com as informações da camada existente, podendo modificar os valores para os desejáveis pelo usuário.

Figura 54. Adição de uma nova camada de solo



Fonte: Autor (2018)

Para alterar a carga determinada pelo programa, seleciona o ícone de editar carga e clica na carga que se deseja alterar, na janela que abre mostrada na Figura 55, tem-se a opção de colocar o valor da carga e também a cota em que ela está.

Figura 55. Edição da carga no *Cype*

Fonte: Autor (2018)

O programa nos dá a possibilidade de trabalhar com alguns tipos de contenção, para o presente trabalho foram utilizadas as contenções de “Parede de estaca de concreto” e “Parede moldada de concreto armado”. Com o mesmo modelo é possível alterar a

tipologia da contenção. Clicando em “Obra” na barra de ferramentas, seleciona a opção “Tipologia” e seleciona o tipo de cortina desejada, mostrada na Figura 56.

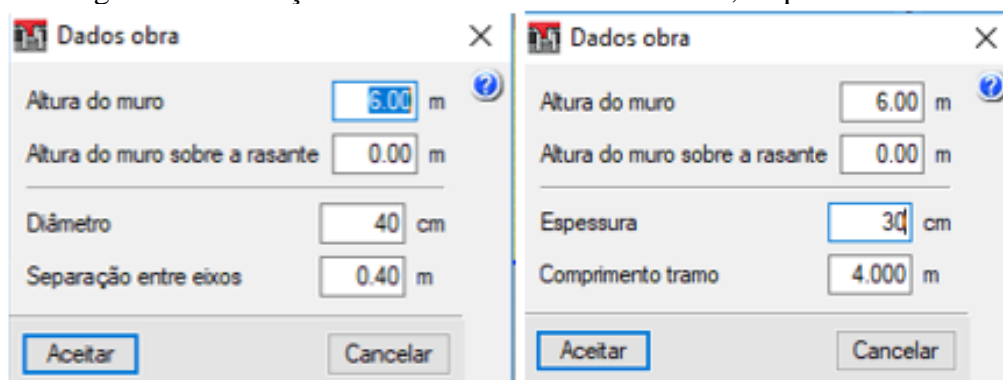
Figura 56. Definição da tipologia da cortina



Fonte: Autor (2018)

Após definida a tipologia da cortina, é necessário modificar a estrutura para os dados do projeto. Ainda na opção “Obra”, clica em “Dados de obra” e define altura da estaca/muro, diâmetro da estaca e a separação entre os eixos e espessura e comprimento do muro, mostrado na Figura 57.

Figura 57. Definição dos dados da estaca e do muro, respectivamente



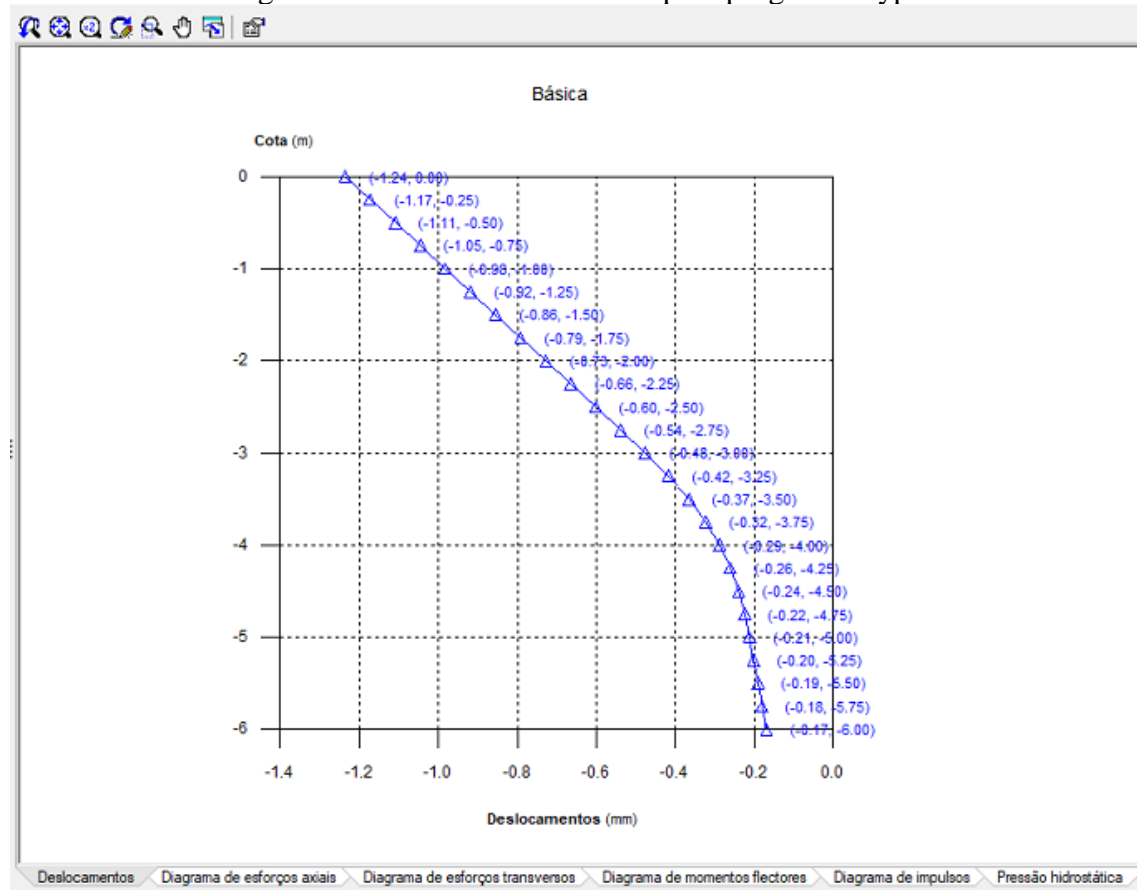
Fonte: Autor (2018)

Após o modelo estar pronto, podemos calcular a estrutura. Caso a estrutura esteja atendendo a todas as verificações, o programa mostra uma mensagem confirmando o dimensionamento correto e gera uma janela mostrando todas as verificações.

Para visualizar os resultados, seleciona o ícone de “Diagrama de esforços” e abrirá uma janela contendo diversas opções de resultados mostrados através de gráficos. São gerados gráficos de deslocamentos, esforços axiais, esforços transversais, momento

fletor, impulsos e pressão hidrostática. Para a comparação foi utilizado os dados de deslocamentos e os esforços axiais e transversais. Na Figura 58 temos um exemplo de como o programa *Cype* mostra os resultados calculados.

Figura 58. Resultados calculados pelo programa Cype



Fonte: Autor (2018)

4. RESULTADOS

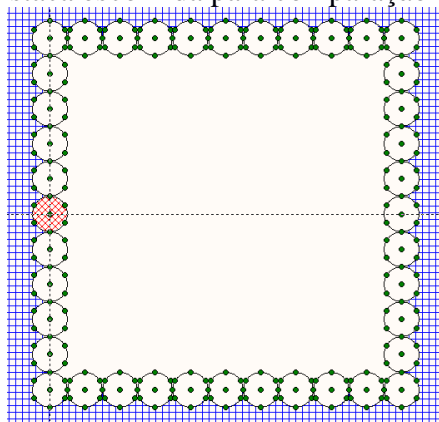
Neste capítulo é apresentada a comparação entre os resultados dos modelos de estacas e paredes utilizados para fins de estruturas de contenção do problema em estudo, calculados no *Plaxis 3D Foundation* e no *Cype*. São apresentados também os esforços atuantes tanto nas estacas e nas paredes.

Apesar de existir diferenças no tipo de modelagem para estacas e paredes no *Plaxis 3D Foundation*, ou seja, nas estacas obtêm-se tensões em seu interior (e não os esforços), e nos muros obtêm-se os esforços resultantes (momentos fletores, momentos torsores, esforços axiais e cortantes), em comum têm-se os deslocamentos que serão utilizados para comparação dos resultados.

4.1 Comparação entre estacas e muros modelados no *Plaxis 3D Foundation*

A estaca escolhida para a análise foi a mais solicitada, mostrada na Figura 59, sendo esta a que está no ponto médio do muro, destacada em vermelho. Considerando a estrutura de contenção como sendo estacas justapostas, estas, apesar de trabalharem de forma individual, funcionam como uma cortina. Por outro lado, a parede estrutural funciona como uma placa única. Devido a simetria da geometria do modelo, foi desnecessário mostrar os dados para todos os lados da escavação, pois os esforços resultantes são iguais. Para efeito de comparação foi escolhida a mesma coordenada geométrica no muro equivalente ao da estaca.

Figura 59. Estaca escolhida para comparação de resultados

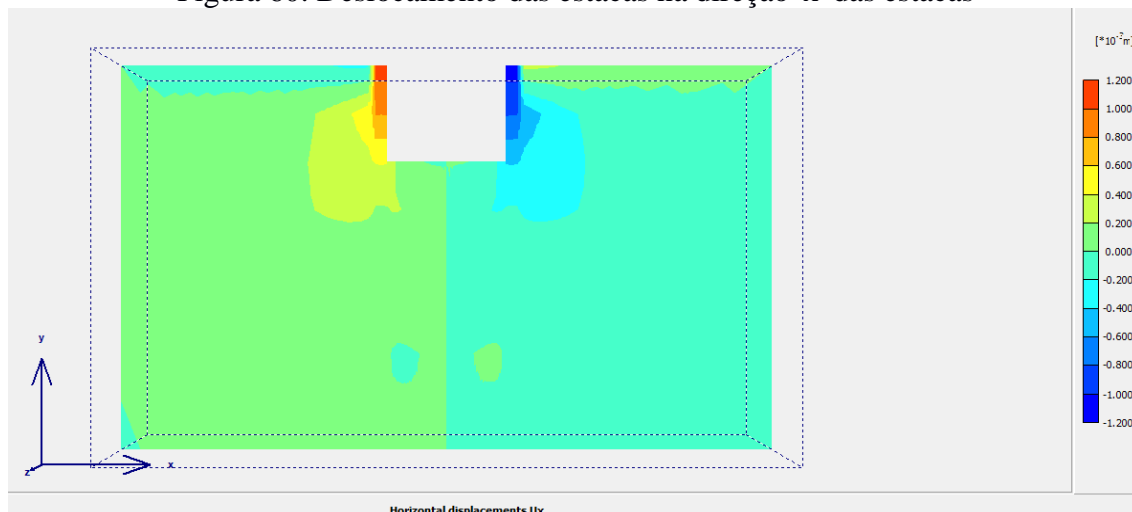


Fonte: Autor (2018)

4.1.1 Deslocamentos na direção 'x' - horizontal

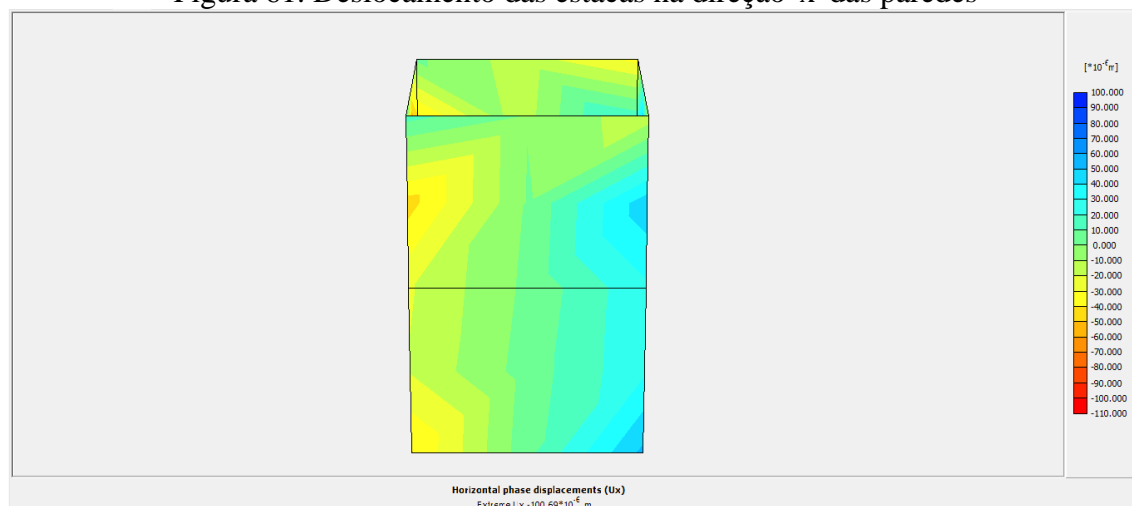
Para as estacas o deslocamento principal deu-se na direção 'x', pois é a direção onde o empuxo de terra atua de modo que o solo se deslocaria para o interior da escavação causando um carregamento na estaca fletindo-a até que, provavelmente, a ruptura da estrutura. A Figura 60 mostra os deslocamentos horizontais por meio de uma legenda de cores, a cor vermelha representa os maiores deslocamentos positivos e a cor azul representa os maiores deslocamentos negativos. Daí se pode observar que as estacas possuem o maior deslocamento em seu topo (profundidade = 0,00 m). Já nos muros, Figura 61, os maiores deslocamentos horizontais acontecem não mais no topo como caso das estacas, e sim na profundidade de 3 m.

Figura 60. Deslocamento das estacas na direção 'x' das estacas



Fonte: Autor (2018)

Figura 61. Deslocamento das estacas na direção 'x' das paredes



Fonte: Autor (2018)

A Tabela 7 apresenta os valores dos deslocamentos horizontais para os dois casos estudados (estacas/muros). Percebe-se nesta tabela que os deslocamentos na estaca são bem mais acentuados que na parede, isto ocorre pela rigidez do elemento parede.

Tabela 7. Tabela comparativa entre os deslocamentos na direção 'x' entre estaca e parede

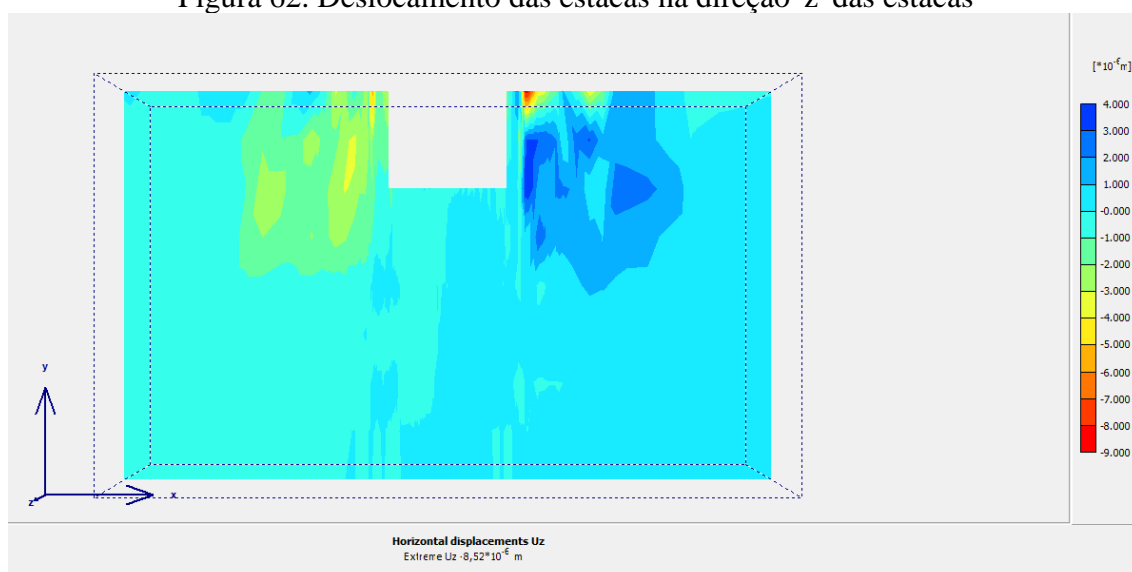
			ESTACA	PAREDE
X	Y	Z	U _x	U _x
[m]	[m]	[m]	[m]	[m]
8,000	0	10	0,001093	-9,5E-05
8,000	-3	10	0,000419	0,000118
8,000	-6	10	0,000109	9,62E-05

Fonte: Autor (2018)

4.1.2 Deslocamentos na direção 'z'

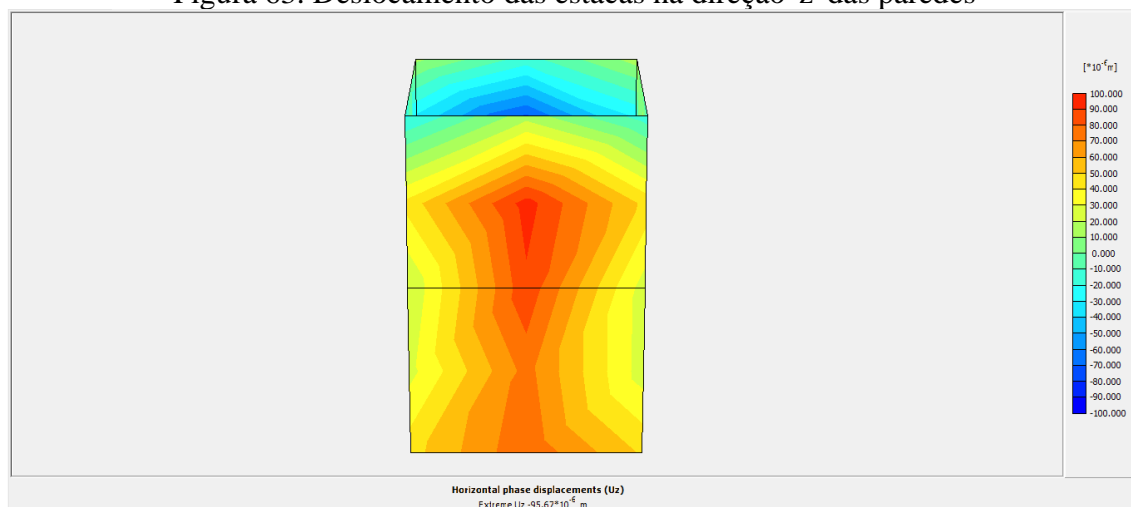
Na Figura 62, observa-se o deslocamento na direção 'z' é desprezível em relação à direção 'x', visto que, pela forma de atuação do empuxo de terra o mesmo se dá fundamentalmente na direção 'x', onde atua o maior esforço. Não se observa nesta situação esforços nas estacas. Na Figura 63, observa-se este mesmo deslocamento, porém agora para a estrutura como sendo muro, verifica-se que o comportamento é análogo ao das estacas, nesta direção os deslocamentos são desprezíveis. A magnitude dos deslocamentos pode ser visto na Tabela 8.

Figura 62. Deslocamento das estacas na direção 'z' das estacas



Fonte: Autor (2018)

Figura 63. Deslocamento das estacas na direção 'z' das paredes



Fonte: Autor (2018)

Tabela 8. Tabela comparativa entre os deslocamentos na direção 'z' entre estaca e parede

			ESTACA	PAREDE
X	Y	Z	Uz	Uz
[m]	[m]	[m]	[m]	[m]
8,000	0	10	-2E-06	3,59E-05
8,000	-3	10	-5,5E-07	8,43E-06
8,000	-6	10	4E-07	4,03E-06

Fonte: Autor (2018)

4.2 Tensões obtidas nas estacas

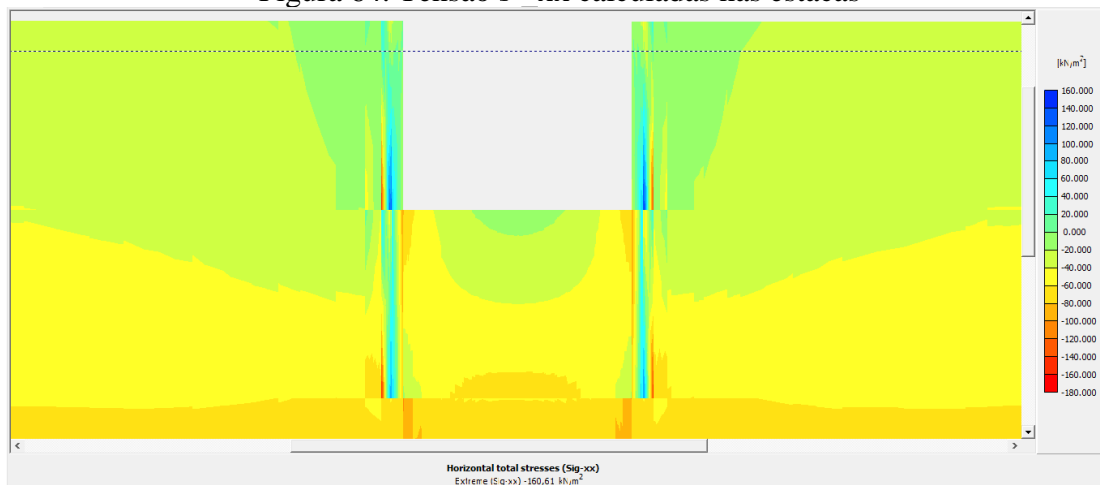
Os resultados mostrados neste item são aqueles que a análise por elementos finitos nos permite, que são as tensões resultantes do carregamento do empuxo de terra, pois não tem como comparar diretamente elementos que têm modelagens distintas no *software*.

4.2.1 Tensões na direção 'x'

Para uma melhor visualização, é mostrada na Figura 64 onde as tensões de compressão (positiva) e de tração (negativa) de acordo com a convenção adotada pelos engenheiros geotécnicos. Verifica-se que a parte da estaca que está em contato com a escavação encontra-se comprimida, enquanto a face oposta encontra-se tracionada. Já este comportamento não é verificado na ficha por causa da presença do solo, que está contendo este trecho da estaca. Também é possível verificar o que acontece no fundo da escavação

devido à presença da cortina de estacas, verifica-se que existe uma tendência de levantamento do solo do fundo.

Figura 64. Tensão s'_{xx} calculadas nas estacas



Fonte: Autor (2018)

Na Tabela 10 são apresentadas as tensões mínimas, máximas e médias ao longo do comprimento da estaca. Sendo as tensões médias as mais importantes, pois o valor da mesma varia conforme os pontos nodais comuns dos elementos em estudo, isto também foi considerado para as demais tensões normais e cisalhante nas 3 direções (x, y e z).

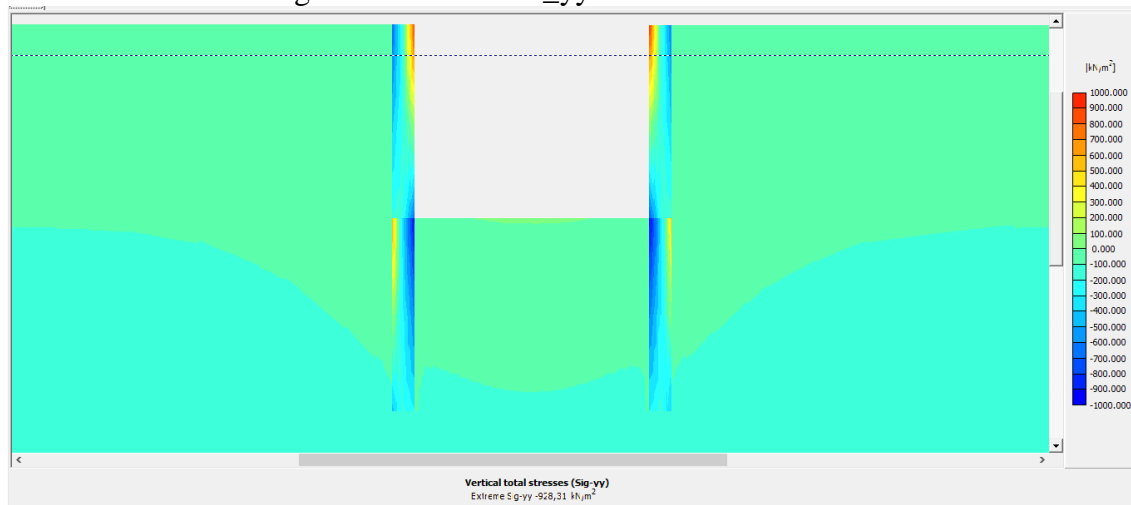
Tabela 9. Tabela de tensões s'_{xx}

X	Y	Z	$s'_{xx}, \text{mín}$	$s'_{xx}, \text{máx}$	$s'_{xx}, \text{méd}$
[m]	[m]	[m]	[kN/m²]	[kN/m²]	[kN/m²]
8,000	0	10	-70,38	-14,64	-41,95
8,000	-1,5	10	28,98	64,41	45,48
8,000	-3	10	-86,16	65,07	-6,21
8,000	-4,5	10	18,66	74,84	50,29
8,000	-6	10	67,94	144,10	106,80

Fonte: Autor (2018)

4.2.2 Tensões na direção 'y'

Verificou-se que nesta direção, na Figura 65, que toda a estaca se comportou como tracionada (tensões negativas), no ponto médio da profundidade da estaca, que está em contato com a interface entre escavação e solo, é o ponto onde se encontra a maior tensão. No fundo da escavação verifica-se que tendência de tensão positiva (compressão) de pequena intensidade. Na Tabela 11, pode-se observar que todas as tensões encontradas foram negativas.

Figura 65. Tensões s'_{yy} calculadas nas estacas

Fonte: Autor (2018)

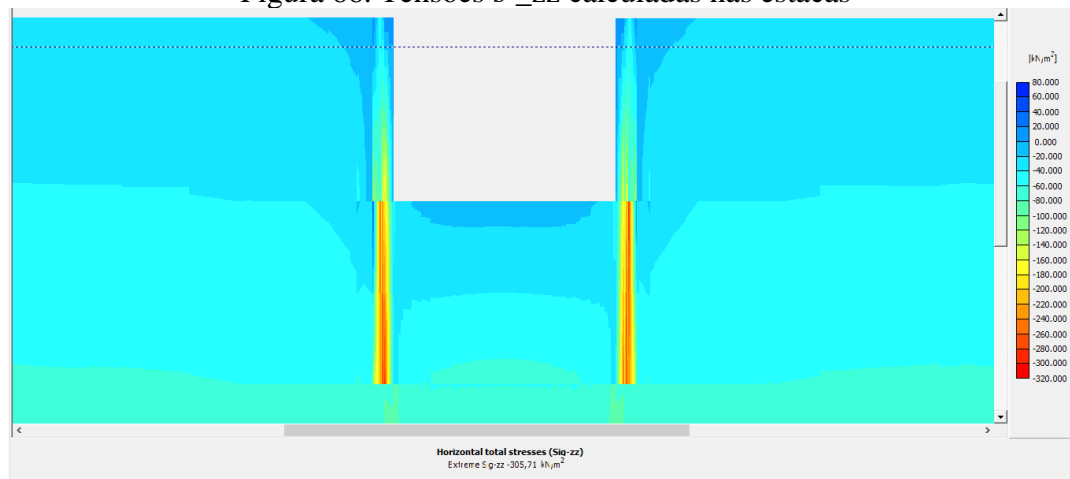
Tabela 10. Tabela de tensões s'_{yy}

X	Y	Z	$s'_{yy}, \text{mín}$	$s'_{yy}, \text{máx}$	$s'_{yy}, \text{méd}$
[m]	[m]	[m]	[kN/m²]	[kN/m²]	[kN/m²]
8,000	0	10	-162,46	-126,12	-143,68
8,000	-1,5	10	-175,72	-148,59	-161,72
8,000	-3	10	-474,80	-377,39	-414,99
8,000	-4,5	10	-316,00	-275,39	-290,58
8,000	-6	10	-196,71	-147,54	-166,17

Fonte: Autor (2018)

4.2.3 Tensões na direção 'z'

Verifica-se para direção 'z', Figura 66, que em toda a estaca desenvolveu-se tensões negativas (tracionadas), tensão esta que aumenta ao longo do comprimento da estaca. No fundo da escavação verifica-se que existem tensões normais muito próximas de zero, o que significa que o solo permanece sem movimentação devido à presença das forças de empuxo. Na Tabela 12, pode-se observar que todas as tensões encontradas foram negativas e que vão se tornando constante após o contato com o solo.

Figura 66. Tensões s'_{zz} calculadas nas estacas

Fonte: Autor (2018)

Tabela 11. Tabela de tensões s'_{zz}

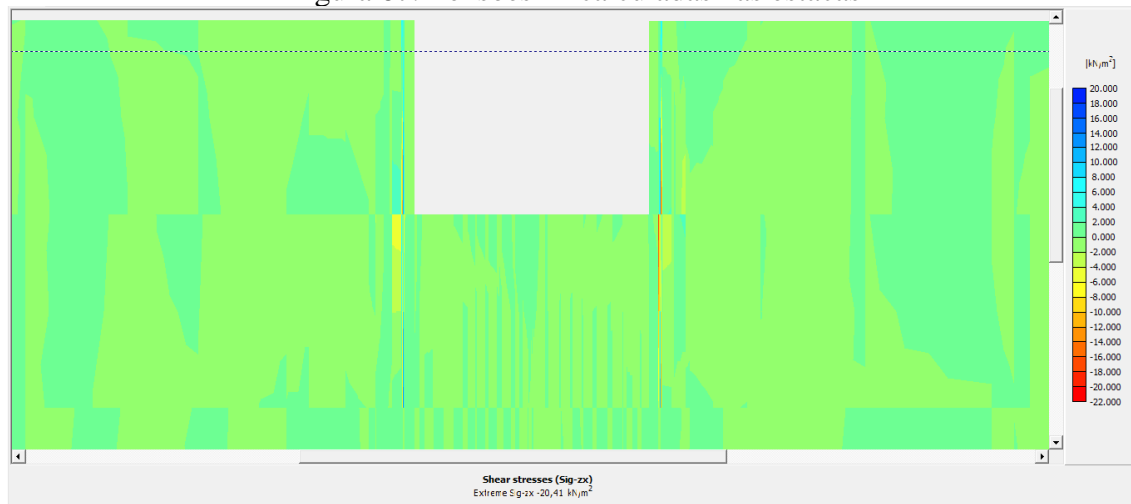
X	Y	Z	$s'_{zz, \text{mín}}$	$s'_{zz, \text{máx}}$	$s'_{zz, \text{méd}}$
[m]	[m]	[m]	[kN/m²]	[kN/m²]	[kN/m²]
8,000	0	10	-74,05	14,98	-28,28
8,000	-1,5	10	-106,07	-69,05	-86,71
8,000	-3	10	-370,76	-192,17	-247,47
8,000	-4,5	10	-315,52	-231,23	-258,55
8,000	-6	10	-331,30	-244,68	-269,62

Fonte: Autor (2018)

4.2.4 Tensão cisalhante na direção 'zx'

Agora será apresentado a tensão cisalhante apenas na direção 'zx', visto que através desta é possíveis exemplificar que este esforço é desprezível neste tipo de análise. A tensão 'zx', é uma tensão calculada no plano z na direção x, como mostrado no item 7.4.4.2. São tensões de baixa intensidade neste tipo de problema que pode ser observado na Figura 67. Na Tabela 13, pode-se verificar a proximidade de zero das tensões obtidas.

Figura 67. Tensões zx calculadas nas estacas



Fonte: Autor (2018)

Tabela 12. Tabela de tensões s'_{zx}

X	Y	Z	$s'_{zx,mín}$	$s'_{zx,máx}$	$s'_{zx,méd}$
[m]	[m]	[m]	[kN/m ²]	[kN/m ²]	[kN/m ²]
8,000	0	10	-5,80	6,02	-0,36
8,000	-1,5	10	-2,66	0,92	-0,41
8,000	-3	10	-15,27	16,09	-0,49
8,000	-4,5	10	-10,55	10,50	-0,26
8,000	-6	10	-8,17	7,22	-0,02

Fonte: Autor (2018)

4.3 Comparações dos esforços calculados nas paredes via *Plaxis 3D Foundation* e *Cype*

Neste item é abordado uma comparação, através de tabelas, entre os esforços calculados no *Plaxis 3D Foundation* e no *Cype*. O *Plaxis 3D Foundation* é um programa que calcula os esforços em um modelo tridimensional, o que possibilita uma visão mais real do problema, pois todas as paredes trabalham em conjunto, afetando os deslocamentos e esforços calculados em cada muro. Já no *Cype*, é calculado um modelo bidimensional, onde não tem interferência de outras paredes, o que acarreta diferente comportamento entre os modelos, obtendo-se resultados totalmente divergentes.

Para a comparação, foi analisado a profundidade do ponto mediano do comprimento do muro, pois é onde os dois modelos têm comportamentos mais parecidos. Pelo fato de a parede de contenção ter sido modelada com uma malha grosseira não são gerados pontos médios entre as cotas 0,-3 e -6 (profundidade de -1,5m e -4,5m), portanto, no ponto geométrico da parede escolhido, tem-se apenas 3 pontos para análise. Cada tipo

de esforço está detalhado no item 7.5.4.3 na Figura 48. O *Cype* não gera esforços em todas as direções como no *Plaxis 3D Foundation*, portanto analisou-se, para as comparações, os esforços calculados na direção em que o *Cype* permitiu comparar.

4.3.1 Esforços axiais

Para a comparação dos esforços axiais calculados nos dois programas para as paredes de contenção. Foi escolhido o tipo de esforço axial N_11 para análise, pois é o esforço obtido nos dois programas. A Tabela 13 mostra os valores obtidos e a diferença dos valores calculados no *Plaxis 3D Foundation* e no *Cype*.

Tabela 13. Tabela comparativa dos esforços axiais

Esforços Axiais					
X	Y	Z	N_11 Plaxis	N_11 Cype	ΔN_{11}
[m]	[m]	[m]	[kN/m]	[kN/m]	[kN/m]
8	0	10	10,15	0,00	10,15
8	-3	10	-70,83	22,50	-93,33
8	-6	10	-133,07	45,00	-178,07

Fonte: Autor (2018)

4.3.2 Esforços Transversais

Aqui será mostrada a comparação entre os esforços transversais, o tipo de esforço escolhido para análise foi o Q_23, esforço calculado nos dois programas. A Tabela 14 mostra os valores obtidos e a diferença entre os esforços transversais calculados no *Plaxis 3D Foundation* e no *Cype*.

Tabela 14. Tabela comparativa dos esforços transversais

Esforços Transversais					
X	Y	Z	Q_23 Plaxis	Q_23 Cype	ΔQ_{23}
[m]	[m]	[m]	[kN/m]	[kN/m]	[kN/m]
8	0	10	-0,01	0,00	-0,01
8	-3	10	-0,70	19,10	-19,80
8	-6	10	0,02	2,20	-2,18

Fonte: Autor (2018)

4.3.3 Momentos fletores

Agora será feita a comparação dos momentos fletores calculados, o tipo de momento escolhido foi o M_{11} , que se obtém no *Plaxis 3D Foundation* e no *Cype*. Devido à diferença de comportamento dos dois modelos, percebe-se que os momentos nos extremos verticais do muro calculado no *Cype* são 0, pois não há engaste nos extremos horizontais. A Tabela 15 mostra os valores calculados e também a diferença entre os valores encontrados, tanto no *Plaxis 3D Foundation* como no *Cype*.

Tabela 15. Tabela comparativa dos momentos fletores

Momentos Fletores					
X	Y	Z	M ₁₁ Plaxis	M ₁₁ Cype	ΔM_{11}
[m]	[m]	[m]	[kN/m]	[kN/m]	[kN/m]
8	0	10	-1,51	0,00	-1,51
8	-3	10	0,06	4,40	-4,34
8	-6	10	-0,31	0,00	-0,31

Fonte: Autor (2018)

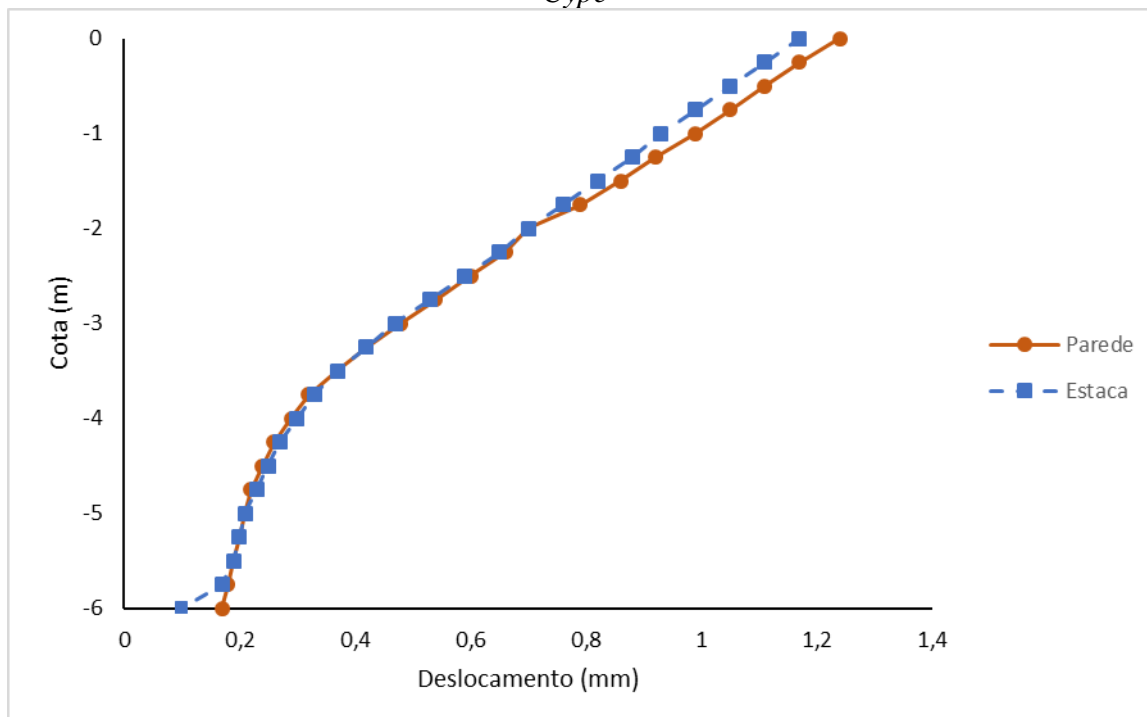
4.4 Comparação dos resultados calculados no *Cype* para as estacas e muros

Neste item será feita a comparação dos dados calculados no programa *Cype* Contenção Periférica. Os resultados obtidos serão mostrados através de gráficos comparativos, onde mostrará os resultados de deslocamentos, esforço axial, esforço transversal e momento fletor. Os dados calculados são obtidos separadamente no *Cype*, para uma melhor visualização, esses dados foram para o Excel para geração de gráficos com os dados dos muros e estacas juntos. Como o *Cype* calcula o modelo da parede de forma bidimensional, o mesmo se comporta de forma semelhante à estaca, encontrando-se resultados próximos.

4.4.1 Comparação dos deslocamentos calculados no *Cype*

A Figura 68 representa um gráfico comparativo mostrando o comportamento em relação ao deslocamento do muro e da estaca, percebe-se que o deslocamento da parede fica mais acentuado à medida que aparece o efeito da escavação. A Tabela 16 mostra os valores dos deslocamentos a cada metro de profundidade e também a diferença em porcentagem entre muro e estaca, ou seja, quantos porcentos o valor calculado no muro difere do calculado para a estaca.

Figura 68. Gráfico comparativo de deslocamento entre parede e estaca calculados no *Cype*



Fonte: Autor (2018)

Tabela 16. Tabela comparativa de deslocamentos calculados no *Cype*

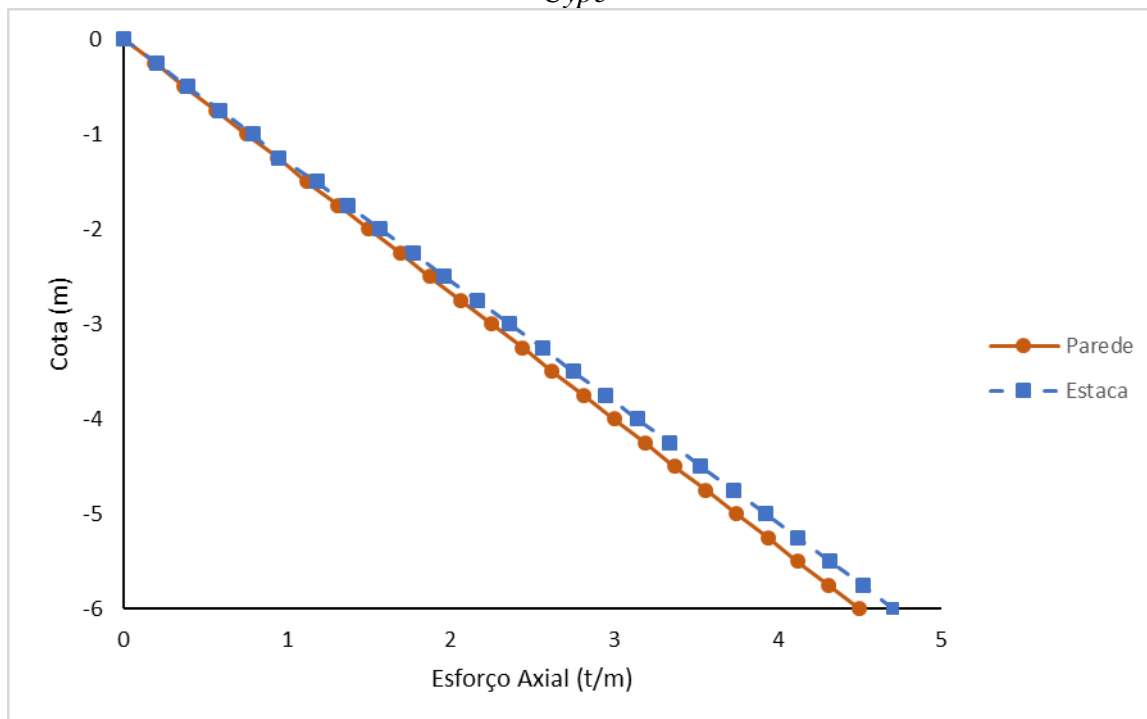
DESLOCAMENTOS			
Cota	Estaca	Muro	Diferença
[m]	[mm]	[mm]	[%]
0	1,17	1,24	5,98
-1	0,93	0,98	5,38
-2	0,70	0,73	4,29
-3	0,47	0,48	2,13
-4	0,30	0,29	-3,33
-5	0,21	0,21	0,00
-6	0,16	0,17	6,25

Fonte: Autor (2018)

4.4.2 Comparação dos esforços axiais calculados no *Cype*

A Figura 69 representa um gráfico comparativo mostrando o comportamento em relação ao esforço axial do muro e da estaca, percebe-se que o esforço que o empuxo de terra gera na estrutura da estaca é sempre maior que na parede. A Tabela 17 mostra os valores dos esforços axiais obtidos a cada metro de profundidade e também a diferença em porcentagem entre muro e estaca, ou seja, quantos porcentos o valor do esforço obtido no muro é menor que o obtido na estaca.

Figura 69. Gráfico comparativo de esforço axial entre parede e estaca calculados no *Cype*



Fonte: Autor (2018)

Tabela 17. Tabela comparativa de esforços axiais calculados no *Cype*

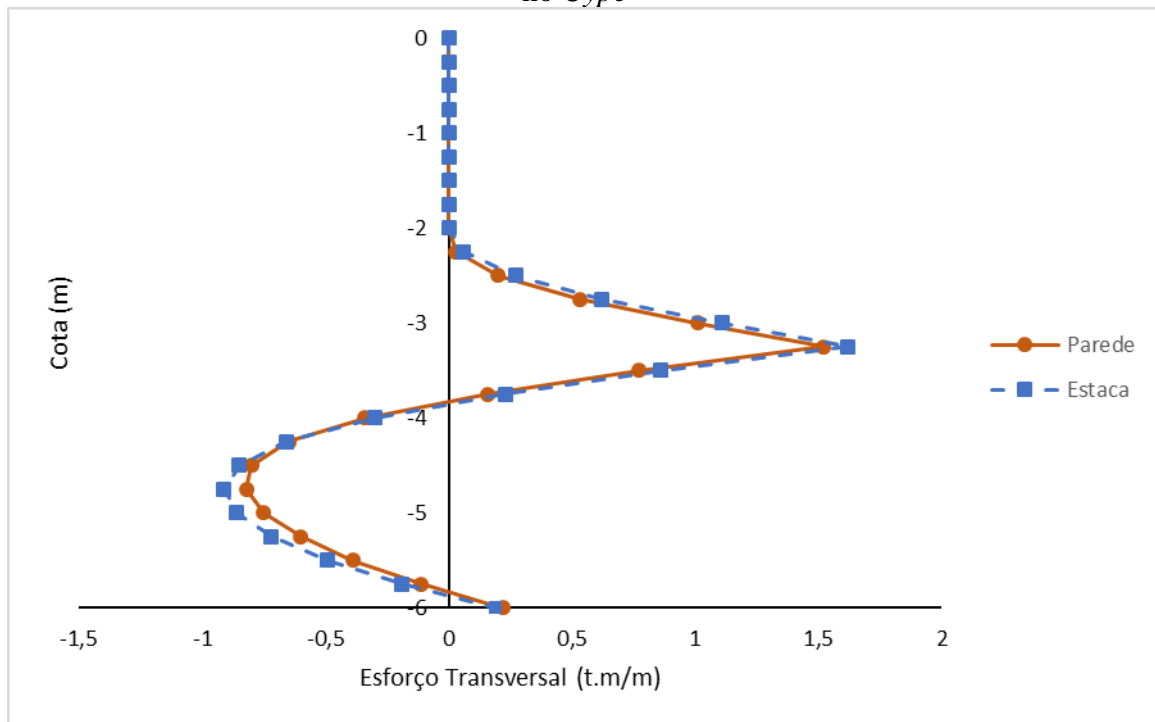
ESFORÇOS AXIAIS			
Cota	Estaca	Muro	Diferença
[m]	[t/m]	[t/m]	[%]
0	0,00	0,00	0,00
-1	0,79	0,75	-5,06
-2	1,57	1,50	-4,46
-3	2,36	2,25	-4,66
-4	3,14	3,00	-4,46
-5	3,93	3,75	-4,58
-6	4,71	4,50	-4,46

Fonte: Autor (2018)

4.4.3 Comparação dos esforços transversais calculados no *Cype*

A Figura 70 representa um gráfico comparativo mostrando o comportamento em relação ao esforço transversal do muro e da estaca, apesar de haver uma alternância entre os valores maiores mostrados na Tabela 18, percebe-se no gráfico que a estaca acaba sendo mais solicitada que a parede na maioria dos pontos.

Figura 70. Gráfico comparativo de esforço transversal entre parede e estaca calculados no *Cype*



Fonte: Autor (2018)

Tabela 18. Tabela comparativa de esforços transversais calculados no *Cype*

ESFORÇOS TRANSVERSAIS			
Cota	Estaca	Muro	Diferença
[m]	[t/m]	[t/m]	[%]
0	0,00	0,00	0,00
-1	0,00	0,00	0,00
-2	0,00	0,00	0,00
-3	1,11	1,01	-9,01
-4	-0,30	-0,34	13,33
-5	-0,86	-0,75	-12,79
-6	0,19	0,22	15,79

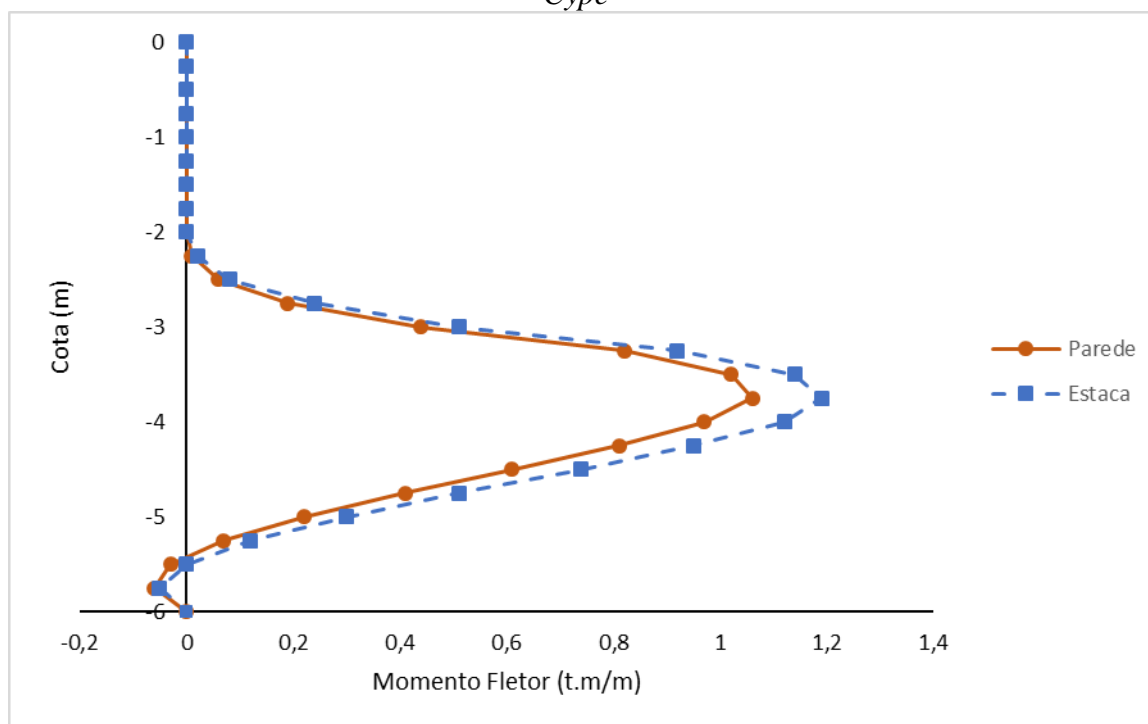
Fonte: Autor (2018)

4.4.4 Comparação dos momentos fletores calculados no *Cype*

A Figura 71 representa um gráfico comparativo mostrando o comportamento em relação ao momento fletor atuante no muro e na estaca, percebe-se que a estaca é sempre mais solicitada que a parede. A Tabela 19 mostra os valores dos momentos fletores obtidos a cada metro de profundidade e também a diferença em porcentagem entre muro

e estaca, ou seja, quantos porcentos o valor do momento atuante obtido no muro é menor que o obtido na estaca.

Figura 71. Gráfico comparativo de momento fletor entre parede e estaca calculados no *Cype*



Fonte: Autor (2018)

Tabela 19. Tabela comparativa de momentos fletores calculados no *Cype*

MOMENTOS FLETORES			
Cota	Estaca	Muro	Diferença
[m]	[t.m/m]	[t.m/m]	[%]
0	0,00	0,00	0,00
-1	0,00	0,00	0,00
-2	0,00	0,00	0,00
-3	0,51	0,44	-13,73
-4	1,12	0,97	-13,39
-5	0,30	0,22	-26,67
-6	0,00	0,00	0,00

Fonte: Autor (2018)

4.5 Comparação entre os resultados de deslocamento obtidos no *Plaxis 3D Foundation* e no *Cype*

Neste item serão comparados os modelos de muros e estacas calculados no *Plaxis 3D Foundation* e no *Cype*. As leituras de comparação deveriam ser as reais feitas em obra,

porém, pela falta desses dados, a comparação foi feita entre os dados calculados nos dois programas.

4.5.1 Comparação entre os deslocamentos obtidos nas estacas

Os valores de deslocamentos calculados no *Cype*, apesar de também trabalhar com o Método dos Elementos Finitos, são sempre maiores que os calculados no *Plaxis 3D Foundation*. Os modelos calculados nos dois programas têm comportamento semelhantes, o que acarreta em uma pequena diferença dos resultados obtidos. Na Tabela 20 são mostrados os valores calculados nos dois programas e a diferença percentual dos deslocamentos do *Cype* em relação ao *Plaxis 3D Foundation* para as estacas, ou seja, quantos porcentos o deslocamento calculado no *Cype* é maior que no *Plaxis 3D Foundation*.

Tabela 20. Tabela comparativa entre deslocamentos calculados no *Plaxis 3D Foundation* e no *Cype* (estacas justapostas)

			Plaxis	Cype	
X	Y	Z	Ux	Ux	Diferença
[m]	[m]	[m]	[mm]	[mm]	[%]
8,0	0,0	10,0	1,09	1,17	7,04
8,0	-1,5	10,0	0,81	0,82	1,26
8,0	-3,0	10,0	0,42	0,47	12,25
8,0	-4,5	10,0	0,18	0,25	39,68
8,0	-6,0	10,0	0,11	0,16	46,18

Fonte: Autor (2018)

4.5.2 Comparação entre os deslocamentos obtidos nas paredes

Diferente das estacas, os valores de deslocamentos calculados no *Cype* são muito maiores que os calculados no *Plaxis 3D Foundation*. Os modelos calculados nos dois programas não têm comportamento semelhantes, o que acarreta numa diferença muito grande dos resultados obtidos. Na Tabela 21 são mostrados os valores calculados nos dois programas e a diferença percentual dos deslocamentos do *Cype* em relação ao *Plaxis 3D Foundation* para os muros, ou seja, quantos porcentos o deslocamento calculado no *Cype* é maior que no *Plaxis 3D Foundation*.

Tabela 21. Tabela comparativa entre deslocamentos calculados no *Plaxis 3D Foundation* e no *Cype* (parede de contenção)

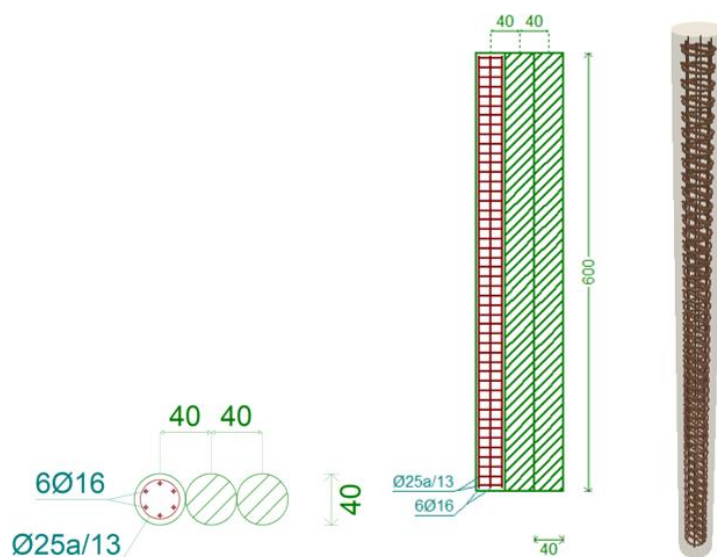
			Plaxis	Cype	
X	Y	Z	Ux	Ux	Diferença
[m]	[m]	[m]	[mm]	[mm]	[%]
8,0	0,0	8,0	0,170000	1,240000	6,29E+02
8,0	-3,0	8,0	0,000042	0,480000	1,15E+06
8,0	-6,0	8,0	0,000060	0,170000	2,85E+05

Fonte: Autor (2018)

4.6 Detalhes das armaduras obtidas no dimensionamento

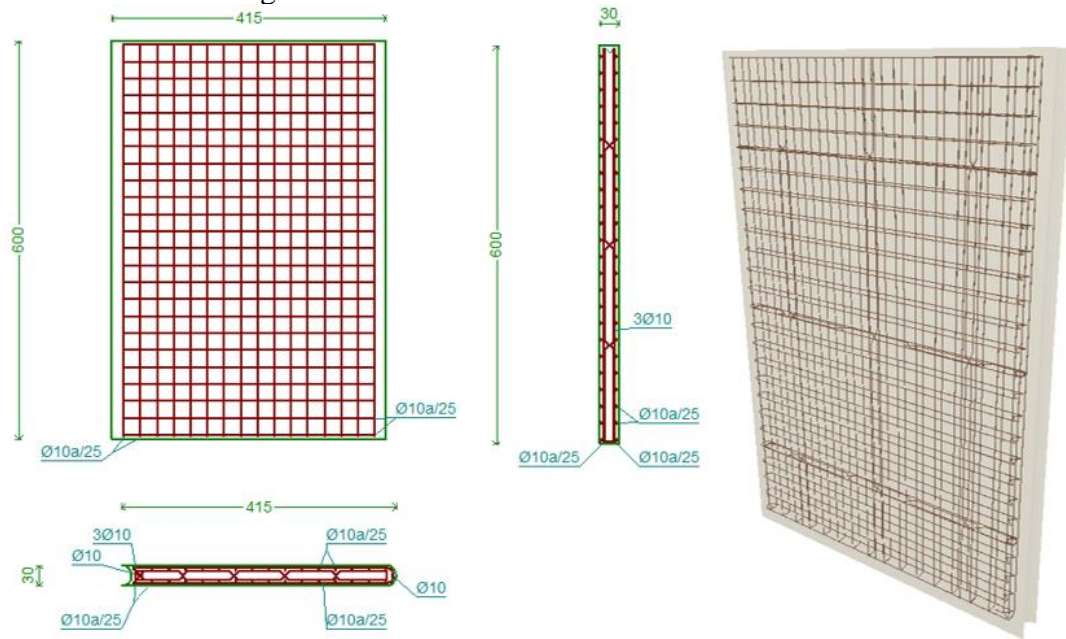
Será apresentado agora, do ponto de vista estrutural, os resultados dos cálculos das armaduras apenas no programa *Cype* Contenção Periférica, pois o *Plaxis 3D Foundation* não possui essa função de dimensionamento das armaduras, apenas calcula os esforços. Nas Figuras 72 e 73, são representados os detalhamentos calculados no programa *Cype* e também um modelo 3D para uma visualização de como ficará as estacas e muros ao término da montagem.

Figura 72. Detalhamento da armadura da estaca



Fonte: Autor (2018)

Figura 73. Detalhamento da armadura do muro



Fonte: Autor (2018)

5. CONCLUSÕES

Agora será apresentada as principais conclusões obtidas através deste estudo, como também as sugestões para trabalhos futuros para que sejam desenvolvidos estudos com base no presente trabalho.

5.1 Conclusões do trabalho

Este trabalho teve como objetivo inicial o cálculo dos esforços em estacas justapostas de um edifício existente em Brasília-DF, através do programa *Plaxis 3D Foundation*. Pela limitação encontrada do número de estacas modeladas, partiu-se para um modelo reduzido, onde mostra que o programa é capaz de calcular este tipo de estrutura. Para este modelo reduzido, foram calculados esforços tanto em uma cortina de estacas como em uma contenção com muros e realizou-se a comparação desses dois modelos, para o dimensionamento das estruturas, foi utilizado o programa *Cype* no módulo de Contenção Periférica.

Realizou-se uma revisão bibliográfica sobre alguns tipos de contenções de solo encontradas, bem como tipos de estacas justapostas e métodos de execução. A análise do trabalho foi feita pelo Método dos Elementos Finitos utilizado pelos dois programas.

Nos modelos simulados no *Plaxis 3D Foundation*, concluiu-se que em um modelo tridimensional, a forma como estrutura é calculada aproxima-se mais da realizada, pois recebe influência em todos os sentidos. Verificou-se que para os muros, o contato entre eles permitia uma maior rigidez e teve influência nos resultados encontrados, diferente da estaca, que apesar de ter alguma influência das estacas vizinhas, não possui grande rigidez entre elas. Logo, os dois modelos trabalharam de formas diferentes, com maiores deslocamentos nas estacas.

A comparação entre os esforços nas paredes obtidos no *Plaxis* e no *Cype* são muito divergentes, o que já era esperado, devido à diferença nos modelos, tridimensional e bidimensional, respectivamente, as estruturas trabalharam de formas diferentes, no modelo tridimensional com os outros muros interferindo nos deslocamentos sofridos pelo muro analisado, e no modelo bidimensional com as bordas livres tem um comportamento constante ao longo de todo comprimento do muro, acarretando resultados diferentes.

Quando se fala das estacas em relação aos dois programas, os resultados são mais satisfatórios, pois, diferente do muro, a estaca no *Cype* e no *Plaxis* se comporta de forma

semelhante, resultando deslocamentos muito próximos. Os deslocamentos no *Cype* são sempre maiores que os encontrados no *Plaxis 3D Foundation*, um dos fatores que podem explicar esse fato é a questão do dimensionamento, podendo ter esforços majorados no *Cype*.

Por fim, a comparação entre os resultados dos modelos da estaca e do muro calculados no *Cype* também obtiveram resultados bem próximos, como não há engaste nos extremos do muro, o mesmo se comporta com deslocamentos constantes ao longo de seu comprimento, o que acaba assemelhando-se com a estaca, onde a estaca, diferente do *Plaxis*, tem deslocamentos menores que o muro, porém é mais solicitada pelos esforços e momentos atuantes na estrutura.

Pelos resultados apresentados e pela segurança dos modelos no *Cype* e no *Plaxis* para as estacas serem semelhantes, de acordo com a análise feita para o presente trabalho, as estacas justapostas seria a solução adotada.

5.2 Sugestões para trabalhos futuros

Uma vez feito o estudo nesse Trabalho de Conclusão de Curso, se verificou que ao longo de seu desenvolvimento despertaram-se curiosidades, as quais poderiam ser exploradas:

- Modelagem do muro e das estacas com elementos de interface, obtendo-se resultados mais precisos;
- Modelagem dos muros utilizando materiais com comportamento não linear para comparação;
- Otimização do dimensionamento de muros e estacas, propondo seções diferentes das adotadas no projeto do Edifício Park In, fazendo a verificação da taxa de armadura;
- Realizar o dimensionamento dos modelos com os esforços encontrados no programa *Plaxis 3D Foundation* para se fazer uma comparação com o dimensionamento do *Cype*;
- Através das tensões geradas no interior das estacas pelo programa *Plaxis 3D Foundation*, encontrar os valores dos esforços e momentos atuantes para realização do dimensionamento.

REFERÊNCIAS

ABNT, NBR. 5629 Ancoragens injetadas no terreno, Norma Brasileira. **Associação Brasileira de Normas Técnicas**.

ABNT. NBR 6122 – Projeto e execução de fundações. ABNT 1996.

ANTUNES, R. B. **Dimensionamento de cortina de estacas justapostas para execução de subsolo de edifício comercial**. Trabalho de Conclusão de Curso. Graduação em Engenharia Civil. Universidade Estadual do Norte Fluminense, Campos dos Goytacazes, 2007.

BRITO, Jorge de. **Cortinas de Estacas Moldadas**. Lisboa, IST, 2002.

MATOS, M. A. S. **Aplicação do método de escavação sequencial a cortinas de estacas e betão projectado**. Porto, PT 2010.

MEIRELES, A. B.; MARTINS, J. G. **Fundações e Contenção Lateral de Solos: Execução de Cortinas**. [S. N. : s. n.], 2006.

OLIVEIRA, Fernando da Silva. **Análise numérica de experimento para avaliação dos efeitos de sobrecargas assimétricas em estacas**. Rio de Janeiro, RJ, 2015.

SAES, J. L. **Fundações: teoria e prática**. Pini, 1998.

SLUIS, J. *Validation of embedded pile row in PLAXIS 2D. MSc thes., Delft: Delft University of Technology, 2012.*

SOARES, J. M. **Estudo numérico-experimental da interação solo-estrutura em dois edifícios do distrito federal**. 2004. Tese de Doutorado. Brasília/DF: Universidade de Brasília.