UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JULIO DE MESQUITA FILHO"
CAMPUS DE GUARATINGUETÁ

ANA JÚLIA DO AMARAL SOUZA

PREVISÃO DO COMPORTAMENTO DE ESTRUTURAS DE CONTENÇÃO ATIRANTADAS UTILIZANDO O *SOFTWARE* FTOOL

Guaratinguetá
2012

ANA JÚLIA DO AMARAL SOUZA

PREVISÃO DO COMPORTAMENTO DE ESTRUTURAS DE CONTENÇÃO ATIRANTADAS UTILIZANDO O *SOFTWARE* FTOOL

Trabalho de Graduação apresentado ao Conselho de Curso de Graduação em Engenharia Civil da Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Graduação em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. George de Paula Bernardes

Guaratinguetá
2012

Souza, Ana Júlia do Amaral

S729p Previsão do comportamento de estruturas de contenção atirantadas utilizando o *software* FTool / Ana Júlia do Amaral Souza – Guaratinguetá : [s.n], 2012.

95 f. : il.

Bibliografia : f. 68-69

Trabalho de Graduação em Engenharia Civil – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2012.

Orientador: Prof. Dr. George de Paula Bernardes

1. Mecânica do solo I. Título

CDU 624.13

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JULIO DE MESQUITA FILHO"
CAMPUS DE GUARATINGUETÁ

PREVISÃO DO COMPORTAMENTO DE ESTRUTURAS DE CONTENÇÃO ATIRANTADAS UTILIZANDO O *SOFTWARE* FTOOL

ANA JÚLIA DO AMARAL SOUZA

ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO COMO PARTE DO REQUISITO PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE **"GRADUADO EM ENGENHARIA CIVIL"**

APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO CONSELHO DE CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

Prof. Dr. YZUMI TAGUTI
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. George de Paula Bernardes
Orientador/UNESP-FEG

Prof. Dr. Antonio Wanderley Terni
UNESP-FEG

Prof. Dr. Luiz Eduardo de Oliveira
UNESP-FEG

Novembro de 2012

A Deus. Deus que me conheceu antes que eu fosse gerada, e me viu quando meu corpo era ainda informe. Que me sustentou em cada dia da minha vida, que me deu o crescimento, e me concedeu a salvação em seu Filho, justificando e redimindo a minha alma. Deus que me abriu portas, e me fez andar por lugares espaçosos, me alegrando com grandes presentes que, assim como este, eu jamais teria conquistado sozinha. Deus que até aqui esteve comigo e me ajudou. Que eu nunca me esqueça de que tudo o que eu tenho, tudo que eu sou, e tudo o que vier a ser e possuir vem dEle. Porque dEle, e por Ele, e para Ele, são todas as coisas.

AGRADECIMENTOS

Ao Meu Deus, Pai, Filho e Espírito Santo, cuja magnitude jamais poderia caber em três linhas de agradecimento. Obrigada por *tudo*, mas, principalmente, por Sua presença constante em minha vida.

À mamãe, meu esconderijo, meu conforto, meu encorajamento e minha coluna; ao papai, o pai mais presente na vida dos filhos que eu já conheci, e que me ensinou tudo o que sei sobre integridade e honra, sem sequer precisar usar palavras. Obrigada pela dedicação, instrução, doação e amor. Vocês são um casal incrível, e é meu orgulho tê-los por pais.

A meu irmão João Gustavo, pelo exemplo. À minha Sarinha, alegria dos meus sorrisos. É muito bom tê-los sempre perto, apesar da distância.

Ao Fernando, meu companheiro e ajudador, e, sobretudo, meu melhor amigo, que usou de muita compreensão, e me prestou grande auxílio neste processo.

Aos irmãos Annie, Cláudio e Rute, pela fidelidade e cumplicidade. Esta vitória também é de vocês!

A meus pastores, tio Ivan e tia Cely, que sempre me amaram e me cobriram de orações, sem as quais e nem sequer estaria aqui.

Aos colegas de classe, em especial aos amigos André, Aluízio, Allan, Adriano e Juninho, a quem devo muito pelos anos que caminhamos juntos. Também, às amigas Amandinha e Bruna, pela amizade sincera.

Ao Engenheiro Eduardo Kobayashi, pelo apoio, incentivo, e compreensão, essenciais à concretização deste trabalho.

Aos professores do DEC desta faculdade, responsáveis pela minha formação, especialmente ao professor Sílvio, pela prontidão e disposição a ajudar. Também ao professor Renato Zacharias, a quem devo eterna gratidão por chegar aqui.

À Banca Examinadora, nas pessoas dos professores Luiz Eduardo, Wanderley e George, por terem aceitado o convite. Principalmente ao professor George, por ter-me dado a oportunidade de ser sua orientada, como desejei desde meu ingresso na faculdade, em 2008.

A todos que contribuíram de alguma forma, não só para a elaboração deste trabalho, mas para a minha formação técnica e pessoal.

- Cada um teve um papel importante, e, se qualquer de vocês faltasse, eu não teria chegado aqui hoje. Que Deus os abençoe, e retribua. Muito obrigada!

“Quem ouve esses meus ensinamentos e vive de acordo com eles é como um homem sábio que construiu a sua casa na rocha. Caiu a chuva, vieram as enchentes, e o vento soprou com força contra aquela casa. Porém ela não caiu porque havia sido construída na rocha.”

Jesus Cristo

O Evangelho Segundo Escreveu Mateus, cap. 7, vv 24 e 25

SOUZA, A. J. A. **Previsão do Comportamento de Estruturas de Contenção Atirantadas utilizando o *Software* FTool.** 2012. 82f. Trabalho de Graduação (Graduação em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2012.

RESUMO

O crescimento populacional, atrelado à gradativa ascensão social no Brasil, reflete na cada vez mais urgente necessidade de aproveitamento do espaço. Neste contexto, a quantidade de novos edifícios destinados a atender a demanda do mercado imobiliário, a criação de novos trechos de ligação entre estradas, entre outros, tornam as obras de geotecnia e, mais especificamente, de contenções, diariamente mais comuns. Uma das soluções mais compactas e simples em contenções de solo são as cortinas atirantadas, empregadas aqui como objeto de estudo. Este trabalho propõe testar o uso do *software* FTool na previsão de deformações de cortinas atirantadas, comparando simulações realizadas em um modelo proposto a um caso real, na Formação Guabirotuba (PR), instrumentado. Os resultados mostraram a importância da definição dos parâmetros de rigidez e geometria da cortina, bem como da definição das cargas de empuxo atuantes sobre ela. Ainda, evidenciou-se o comportamento passivo dos tirantes, respondendo às solicitações do muro. O trabalho concluiu que o programa gera resultados bem representativos do comportamento real, podendo ser empregado no dimensionamento de tirantes.

PALAVRAS-CHAVE: cortinas atirantadas, FTool, retroanálise.

SOUZA, A. J. A. **Prediction of tied back retaining structures displacements using FTool *Software*.** 2012. 82f. Graduate Work (Graduate in Civil Engineering) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2012.

ABSTRACT

Population growth, together with the gradual social ascent in Brazil, reflects at the growing need for better use of urban spaces. In this context, the amount of new buildings to meet the demand in property market, the needs for creating new roads and highways, among others, make the use of geotechnical works and, more specifically, retaining walls, more and more common. One of the simplest solutions for underground works is the use of retaining structures using tie back walls for soil support, therefore, the present work deals with this kind of structures. This paper proposes the use of FTOOL software testing in predicting deformations in tie back walls, by comparing simulations of the presented model to a real and measured deformation case in Guabirotuba Formation (PR). The results showed the importance of defining the parameters such as stiffness and curtain geometry, as well as the definition of representative loads acting on it. Also, it was pointed out that the passive response of the steel rods depends on the horizontal displacement of the wall. The study concluded that the program generates very representative results when compared to field data and seems to be a promising tool for tie back structures displacement predictions.

KEY-WORDS: tie back walls, FTool, back-analysis.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Cortina Atirantada 16
Figura 2 – Tirante. 17
Figura 3 – Estrutura de um Tirante 18
Figura 4 – Perfuratriz fazendo um furo para instalação do tirante. 19
Figura 5 – Operários executando a injeção em um tirante 20
Figura 6 – Tirantes de Monobarra. 22
Figura 7 – Tirante Multibarras. 23
Figura 8 – Escavação Inicial. 27
Figura 9 – Atirantamento da Primeira Linha. 27
Figura 10 – Concretagem do Muro. 28
Figura 11 – Escavação Secundária. 28
Figura 12 – Visão Geral do FTOOL 31
Figura 13 – Menu Units & Number Formatting 32
Figura 14 – Menu de Edição 33
Figura 15 – Menu de Atributos de Nós e Barras 33
Figura 16 – Novo Material 34
Figura 17 – Propriedados do Material 34
Figura 18 – Nova Seção 35
Figura 19 – Propriedades da Seção 35
Figura 20 – Visão Espacial de um trecho de uma Cortina Atirantada 36
Figura 21 – Perfil da Cortina, com orientação das vistas geradoras das seções transversais da Cortina Atirantada em estudo. 36
Figura 22 – Face Frontal de uma Cortina Atirantadaem estudo 37
Figura 23 – Vista em Planta da Cortina Atirantada em estudo 37
Figura 24 – Submenu Condições de Apoio 38
Figura 25 – Menu de Controle de Cargas 38
Figura 26 – Submenu de Cargas Concentradas Nodais 39
Figura 27 – Menu de Resultados 39
Figura 28 – Gráfico de Deslocamentos dos topos de estacas no Setor Bancário Sul 41
Figura 29 – Gráfico de Deslocamentos dos topos de estacas no Setor Autarquias do Sul 42
Figura 30 – Força Horizontal Equivalente 43
Figura 31 – Formação Guabirotuba, Paraná 46

Figura 32 – Mapa de Deformações Instrumentadas 47
Figura 33 – Modelo Estrutural Proposto para a Cortina Atirantada 50
Figura 34 – Forças Atuantes na Execução da Cortina, Fase 1: EscavaçãoInicial 53
Figura 35 – Forças Atuantes na Execução da Cortina, Fase 2: Atirantamento da linha 2,50m 54
Figura 36 – Forças Atuantes na Execução da Cortina, Fase 3: Escavação Secundária 54
Figura 37 – Forças Atuantes na Execução da Cortina, Fase 4: Atirantamento da linha 5,50m 54
Figura 38 –Forças Atuantes na Execução da Cortina, Fase 5: Escavação Final 55
Figura 39 – Forças Atuantes na Simulação da situação sem o emprego de Tirantes 55
Figura 40 – Deformações após Fase 1 da Execução da Cortina: Escavação Inicial 62
Figura 41 – Deformações após Fase 2 da Execução da Cortina: Atirantamento (Z = 2,50m) 62
Figura 42 – Deformações após Fase 3 da Execução da Cortina: Escavação Secundária 62
Figura 43 – Deformações após Fase 4 da Execução da Cortina: Atirantamento(Z = 5,50m) 63
Figura 44 – Deformações após Fase 5 da Execução da Cortina: Escavação Final 63
Figura 45 – Deformações na Cortina-Exemplo 65

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Modelos Estruturais propostos para a representação do caso em estudo.....52
Tabela 2 – Resumo de Implementações 56
Tabela 4 – Coeficientes de Empuxo 58
Tabela 3 – Tensões e Forças Horizontais aplicadas à Cortina.....58
Tabela 5 – Valores de k_δ para a Cortina-Exemplo.....66

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 14

2 OBJETIVO 15

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 16

3.1 CORTINAS ATIRANTADAS 16

3.1.1 Definição 16

3.1.2 Tirantes 17

3.1.2.1 Definição 17

3.1.2.2 Partes Construtivas 17

3.1.2.3 Execução 19

3.1.2.4 Princípio de Funcionamento 21

3.1.2.5 Tipos de Tirante 22

3.1.2.6 Inclinação 24

3.1.2.7 Atividade 24

3.1.2.8 Vida Útil 24

3.1.2.9 Vantagens 24

3.1.2.10 Limitações 25

3.1.3 Muro 26

3.1.4 Aplicação e Execução 26

3.1.4.1 Cortes 27

3.1.4.2 Aterros 28

3.1.5 Modelo de Cálculo 28

3.2 FTOOL 30

3.2.1 Apresentação 30

3.2.2 Disponibilidade 30

3.2.3 Familiarização com o Software 30

3.2.3.1 Menus suspensos 31

3.2.3.2 Edição de Entidades 33
3.2.3.3 Atributos de Nós e Barras 33
3.2.3.4 Controle das Cargas 38
3.2.3.5 Menu de Resultados 39
4 ESTUDOS SIMILARES 41
5 METODOLOGIA 43
6 ESTUDO DE CASO 46
6.1 APRESENTAÇÃO 46
6.2 IMPLEMENTAÇÃO 48
6.3 RESULTADOS E ANÁLISES 58
6.3.1 Tensões e Forças Aplicadas 58
6.3.2 Escolha do Modelo de Implementação 59
6.3.3 Deformações na Cortina 61
7 CONCLUSÃO 67
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 68
APÊNDICES 70
APÊNDICE A – Definição dos Parâmetros de Entrada da Cortina no *FTool* 71
APÊNDICE B – Cálculo dos Comprimentos e Posicionamentos dos Tirantes 73
APÊNDICE C - Diagramas de Deformações para os Modelos propostos – Apoio Móvel 75
APÊNDICE D - Diagramas de Deformações para os Modelos propostos – Apoio Fixo 76
APÊNDICE E – Deformações na Cortina para os Modelos Propostos sob Ação do Empuxo Ativo 77
APÊNDICE F – Deformações da Cortina sob ação do Empuxo Ativo 78
APÊNDICE G - Deformações da Cortina sob ação das Forças Horizontais 79
APÊNDICE H - Deformações da Cortina sob ação de 30% do Empuxo Passivo 80
APÊNDICE I – Deformações da Cortina sob ação de 55% do Empuxo Passivo 81
APÊNDICE J – Deformações da Cortina sob ação de 80% do Empuxo Passivo 82
APÊNDICE K – Deformações da Cortina sob ação do Empuxo Passivo 83

APÊNDICE L – Deformações da Cortina sob ação do Empuxo Ativo..... 84
APÊNDICE M – Deformações da Cortina sob ação das Forças Horizontais..... 85
APÊNDICE N – Deformações da Cortina sob ação de 30% do Empuxo Passivo..... 86
APÊNDICE O – Deformações da Cortina sob ação de 55% do Empuxo Passivo..... 87
APÊNDICE P – Deformações da Cortina sob ação de 80% do Empuxo Passivo 88
APÊNDICE Q – Deformações da Cortina sob ação do Empuxo Passivo..... 89
APÊNDICE R – Deformações da Cortina sob ação do Empuxo Ativo 90
APÊNDICE S – Deformações da Cortina sob ação das Forças Horizontais..... 91
APÊNDICE T – Deformações da Cortina sob ação de 30% do Empuxo Passivo 92
APÊNDICE U – Deformações da Cortina sob ação de 55% do Empuxo Passivo..... 93
APÊNDICE V – Deformações da Cortina sob ação de 80% do Empuxo Passivo..... 94
APÊNDICE W – Deformações da Cortina sob ação do Empuxo Passivo..... 95

1 INTRODUÇÃO

Obras de contenção são obras que introduzem ao solo a ser retido uma estrutura com rigidez diferente da sua, objetivando opor-se a empuxos e tensões nele originados, decorrentes da inserção de aterros, ou realização de escavações ou cortes no terreno, que propiciam o desequilíbrio; e cujo projeto é função de cargas iterativamente condicionadas a deslocamentos.

O uso de contenções de solo como soluções de engenharia data de séculos atrás, muito antes desta ciência sequer ser categorizada como tal. Como ilustração deste conceito, pode-se fazer menção dos muros de alvenaria em argila que continham aterros, assentados pelos sumérios na Mesopotâmia entre os séculos XXXII e XXVIII a.C.; ou dos escoramentos necessários aos famosos fossos inundáveis, escavados ao redor de castelos na Idade Média.

A engenharia moderna de obras de contenção tem como marco inicial o trabalho de Coulomb (1776), e vem se desenvolvendo até os dias atuais, dada a expansão do mercado da construção civil, motivadora da busca de técnicas mais rápidas, precisas, baratas e sustentáveis.

Existem diversas modalidades de contenções. Dentre todas as existentes, este trabalho tratará sobre cortinas atirantadas, a serem explanadas mais adiante. Esta técnica tem ganhado muito espaço no cenário atual, uma vez que atende muito bem a vários níveis de solicitação, e se trata de uma obra de relativa simplicidade executiva.

Um dos maiores desafios no dimensionamento de escavações escoradas é a determinação dos parâmetros a serem utilizados nas análises. O programa *FTool* permite representar o sistema solo-cortina-tirante com elementos de barras. Neste contexto, a simulação proposta neste trabalho pretende representar uma contenção em cortina atirantada, adotando o sistema mencionado.

Para tanto, primeiramente foi adotado um modelo julgado representativo do caso estudado, e, então, testadas diversas possibilidades entre variações de cargas, rigidez das barras de solo, módulo de elasticidade da cortina, bem como sua espessura.

Os resultados revelam a influência de cada um destes parâmetros no comportamento da cortina, e a necessidade de que eles sejam bem fundamentados. Ainda, comprovou-se o comportamento da cortina simulada, assumindo como base a instrumentação do estudo de caso, concluindo-se que o FTool pode ser empregado para o dimensionamento de cortinas atirantadas.

2 OBJETIVO

Testar se o programa *FTool* pode ser utilizado como ferramenta para prever o comportamento de deformações em cortinas atirantadas, por meio de comparações com um caso real.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Cortinas Atirantadas

3.1.1 Definição

Cortinas são contenções ancoradas, ou acopladas a outras estruturas, caracterizadas por sua pouca deslocabilidade. Isto acontece pelo aumento da rigidez que traz ao solo, e permite o comportamento elasto-plástico dos maciços por elas contidos.

As cortinas podem ser classificadas como *flexíveis*, quando seus deslocamentos por flexão são suficientemente significativos na distribuição de tensões aplicadas pelo volume de terra; ou *rígidas*, quando tais deslocamentos são desprezíveis.

Cortinas atirantadas (Figura 1), especificamente, são estruturas compostas, essencialmente, por duas partes. A primeira é um muro, de espessura relativamente pequena (cerca de 30 a 40cm), a que pertencem os principais deslocamentos a serem levados em consideração, resultantes dos esforços cortantes e de flexão. Seu segundo componente é a ancoragem, realizada por meio de tirantes (daí o nome), que são embutidos na própria massa de solo arrimada. Existem, ainda, os elementos drenantes, que por não se tratarem de uma especificidade da técnica em questão, não serão abordados.

Figura 1 – Cortina Atirantada
(Disponível em: http://ecologiaemfoco.blogspot.com.br. Acessado em outubro de 2012.)

3.1.2 Tirantes

3.1.2.1 Definição

Tirantes (Figura 2) são elementos estruturais lineares destinados a trabalhar, principalmente, resistindo à tração, transmitindo esforços entre suas extremidades. Pode-se, também, empregá-los em compressão, o que, porém, não é de uso no Brasil.

Pensando no princípio de tração, pode-se rapidamente associar seu emprego à adoção do aço, ainda que este não seja o único material passível de ser utilizado com tal finalidade. Mesmo assim, assumir-se-á neste trabalho tirantes unicamente desta composição, em função da técnica enfocada, que possui poucos estudos acerca do emprego de outros materiais.

Figura 2 – Tirante.
(Disponível em: http://www.geodactha.com.br/obras/tiberio9.htm. Acessado em outubro de 2012)

3.1.2.2 Partes Construtivas

Um tirante é composto por três partes, a saber, uma *cabeça*, um *trecho livre*, e um *bulbo ancorado*.

A cabeça é a parte extrema externa ao maciço, responsável por suportar a estrutura. Pode-se dizer, simplificadamente, que a compõem três peças: o *bloco de ancoragem*, que fixa o elemento tracionado na cabeça; a *cunha de grau*, com um plano perpendicular ao eixo do tirante, e outro paralelo ao muro e às placas de apoio, a fim de diminuir a flexão no tirante; e a(s) *placa(s) de apoio*, na interface do muro, com a função de distribuir as tensões sobre o ele. Em casos nos quais a carga no tirante for

baixa, a placa de apoio e a cunha poderão estar fundidas em uma mesma peça, que desempenhará simultaneamente a função das duas. A cabeça deverá ser revestida de argamassa, para que haja, assim, proteção contra ação de agentes externos.

O trecho livre (L_l) recebe este nome por estar isolado da calda de injeção. A normatização brasileira define o seu comprimento, compreendido desde a cunha de grau (plano perpendicular ao tirante), até o início do bulbo de ancoragem, com tamanho mínimo de 3m. A partir deste parâmetro, determina-se os limites toleráveis para o *comprimento livre efetivo* (L_{le}), que deve ser, no mínimo, 80% de L_l, e, no máximo, a extensão de L_l acrescida de metade do comprimento do trecho ancorado (L_b). Nesse trecho, o tirante possui uma proteção sintética (PVC, por exemplo), além da bainha, que será a camada mais externa, e, portanto, a que terá contato com o solo.

O trecho ancorado, também chamado de *bulbo*, é a parte responsável por transmitir os esforços ao terreno. É o outro extremo do tirante, compreendendo parte da barra ou cabo de aço que, diferentemente de no trecho livre, estão envoltos pela calda de injeção (aglutinante), que, inclusive, é o que dá aderência da estrutura ao solo. Seu comprimento é identificado como L_b, e é definido em função de, primeiramente, a perfeita ancoragem da barra na calda de cimento, e, também, da ancoragem da calda no solo. Ainda, deve-se garantir o cobrimento mínimo da barra, o que se dá pelo emprego de espaçadores.

Figura 3 – Estrutura de um Tirante
(Disponível em: http://www.otemplodesalomao.com. Acessado em outubro de 2012)

3.1.2.3 Execução

A execução dos tirantes pode ser segmentada em quatro fases distintas:

- Furo: Primeiramente faz-se a locação do tirante. Posteriormente, o solo é perfurado com uma perfuratriz (Figura 4), nas dimensões necessárias à especificação do projeto. Deve-se tomar muito cuidado com o ângulo de perfuração exigido, para que seja rigorosamente executado. O processo de avanço é facilitado pelo emprego de bombas d'água, que auxiliam, também, a limpeza do furo, além de garantir a refrigeração das brocas. Vale lembrar a importância de prezar pela integridade do estado natural da massa de solo, buscando a minimização de alterações nela.

Figura 4 – Perfuratriz fazendo um furo para instalação do tirante.
(Disponível em: http://ltgouveia.blogspot.com.br/. Acessado em outubro de 2012)

- Instalação do Tirante: O elemento trator é posicionado dentro do furo, devidamente tratado contra corrosão, como define a norma. A faixa correspondente ao trecho livre deve ser engraxada, de forma a impedir a exposição do aço. Comumente em tubulação de PVC ou mangueira, um tubo é inserido dentro do furo, de forma a envolver o tirante, mas apenas até a profundidade do trecho livre: o bulbo deverá ter contato com o solo, ao qual precisa se aderir.

- Injeção: É a inserção da calda de cimento (em proporção 2:1 com a água) na estrutura (Figura 5). A injeção é possibilitada por um sistema auxiliar, constituído, basicamente, de um tubo de PVC com válvulas manchete ao longo de si, distantes 0,50m umas das outras. Estas válvulas não passam de uma borracha flexível que cobre alguns orifícios abertos ao longo do tubo, e que, pela injeção pressurizada da calda de cimento em seu interior, acabam por se abrir, dando espaço à vazão do material, que pára de fluir imediatamente após cessão da pressão. Este processo permite a reinjeção, bastando, para isso, apenas que se mantenha a limpeza do tubo. A injeção da bainha é executada a baixa pressão. Já a injeção do bulbo, posterior ao tempo de pega da injeção de bainha, ocorre a pressões mais elevadas, e é executada em tantas etapas quanto se necessite para atingir a pressão desejada. O trecho livre é injetado em outro momento, separado, podendo haver o emprego outro material inerte, que não seja necessariamente a calda de cimento.

Figura 5 – Operários executando a injeção em um tirante
(Disponível em: http://www.geodactha.com.br. Acessado em outubro de 2012)

- Protensão: Depois de observado o tempo mínimo de cura da última fase de injeção, iniciam-se os ensaios de protensão nos tirantes, a fim de monitorar suas resistências à tração. A principal ferramenta para este procedimento são os macacos hidráulicos. Todos os tirantes devem passar por esta verificação, que

deve ter seus valores de tensões aplicadas e deformações registrados em boletins apropriados. A cabeça é montada nesta etapa.

Outra forma de realizar a execução dos tirantes, dita *injeção em estágio único*, é, após a perfuração, executar a injeção, e posterior locação do tirante no furo, que é um método mais simplificado, empregado, em geral, em casos onde a solicitação não é elevada e/ou existe boa capacidade de suporte do solo.

Vale ressaltar que a estrutura de aço do tirante (barras/fios engraxados, tubo de PVC, manchetes, etc), é toda montada antes de sua instalação no furo, preparação esta que pode incluir a injeção da bainha.

3.1.2.4 Princípio de Funcionamento

A proposta acerca da técnica de atirantamento é relativamente simples. O caso mais comum, único em uso no Brasil, inclusive, é o emprego de tirantes que trabalham à tração. O conceito que envolve esta aplicação pode ser analogica e simplificadamente traduzida na proposição que segue.

Tome-se um pedaço de papelão retangular de poucos centímetros de dimensão, um elástico de escritório, e um prego sobre um chão de argila. Faça-se um pequeno furo no papelão perto de sua região superior central. Cave-se um estreito sulco no chão, a fim de encaixar-se o pedaço de papelão ali, e, posicione-se-o.

Atrás do pedaço de papelão, com distância mínima igual ao comprimento total do da circunferência do elástico, firme-se o prego sobre o solo. Então, corte-se o elástico, e amarre-se firmemente uma de suas pontas no prego. Então, passe-se a outra extremidade do elástico pelo orifício do papelão, e dê-se um nó. Note, por fim, a força que o elástico faz sobre o papelão, “empurrando”-o no sentido do prego.

O papelão representa o muro de uma cortina atirantada, e o elástico representa um tirante, sendo o prego como o bulbo, e o nó por fora do papelão, a cabeça. O efeito gerado ilustra bem a aplicação mais comum de um tirante, e de interesse neste trabalho: seu esforço de tração (cabeça “empurra” o muro) ajuda o muro a manter o maciço de terra contido, colaborando grandemente com o equilíbrio do sistema.

Praticamente toda carga é transmitida ao bulbo, por meio do elemento de aço, que deve ser adequadamente dimensionado, considerando o escoamento do aço. Ainda, é necessário que o bulbo suporte a protensão, de forma a impedir o arrancamento, e garantir o seu funcionamento, ainda que com o efeito da fluência (deformação por efeito

contínuo de uma carga de intensidade constante) no concreto (fator de segurança normatizado pela NBR5629/96 no valor de 1,5).

3.1.2.5 Tipos de Tirante

Existem diversos tipos de tirantes. Os mais empregados seguem listados e definidos.

- Tirante Monobarra: Como sugerido pelo nome, são tirantes que têm como elemento resistente à tração, uma única barra de aço (Figura 6). Sua aplicação é um pouco limitada, pois geralmente é fabricado em unidades de até 12m, e, para serem emendadas, precisam de uma luva de emenda, cujo diâmetro necessário de perfuração é significativamente maior que se utilizado só o da barra. Usualmente, têm tensão de escoamento na casa dos 500 MPa (CA-50) a 600 MPa (CA-60), existindo, porém, aços com tensão de escoamento especial, atingindo os 850 MPa.

Figura 6 – Tirantes de Monobarra.
(Disponível em: http://www.geodactha.com.br/obras/brl1.htm. Acessado em outubro de 2012)

- Tirante de Múltiplas Barras: São os tirantes que têm sua seção resistente composta por mais de uma barra. Distinguem-se dos tirantes de fios por, em seus blocos de ancoragem, necessitarem de um bloco auxiliar que permita a protensão e a posterior incorporação do tirante. Seu uso é relativamente pouco frequente no Brasil.

Figura 7 – Tirante Multibarras.
(Disponível em: http://assuntoscruzados.blogspot.com.br. Acessado em outubro de 2012)

- Tirante de fios: Executados em feixes, montados ao redor de um tubo de injeção central. Similar ao de múltiplas barras, o tirante de fios tem a seção resistente equivalente à soma das áreas das seções dos fios. Portanto, para maiores cargas de trabalho, são necessários mais fios, que, por sua vez, demandam um volume – e área, em seção – maior. A limitação ocorrerá em função do diâmetro de perfuração que for possível ser executado. Na prática, a execução desta classe de tirante se dá para até 12 fios, suportando uma solicitação de cerca de 420 kN. Sua maleabilidade permite que sejam produzidos em rolos, o que facilita o transporte, e, ainda, viabiliza o alcance de grandes profundidades sem necessidade de emendas. Antes do revestimento com a bainha, seus fios costumam ser duplamente pintados contra a corrosão, e engraxados.
- Tirante de Cordoalhas: Quando seu elemento resistente à tração é um "cabo" composto pela torção de sete fios de menor diâmetro, que pode estar sozinho (uma cordoalha), ou não (como barras múltiplias e fios). Sua constituição é similar aos de fios, diferenciando-se, apenas, pelo tipo de espaçador empregado. Sua adoção é a mais comum para tirantes de alta capacidade.

3.1.2.6 Inclinação

Estudos realizados mostram que a melhor posição para a instalação de tirantes, em termos de resistência, seria a horizontal. Porém, esta execução é muito dificultada, tanto na fase de perfuração, quanto na fase de injeção. Este motivo torna inclinações de menos de 10º inviáveis, sendo o limite inferior de um intervalo que vai até 30º, conforme sugestão da norma regulamentadora brasileira.

3.1.2.7 Atividade

Um atirantamento pode funcionar de duas formas:

- Ativamente: Quando o aço é previamente protendido, gerando um esforço que vai "empurrar" o muro, impedindo sua deformação, ou, ainda, controlando-a a níveis aceitáveis. Ou seja, tais tirantes estão permanentemente sob carga.
- Passivamente: Quando o aço é instalado sem solicitações. O tirante começa a trabalhar quando a deformação do muro, no sentido de arrancamento do bulbo, gerar uma resposta do tirante, que será tracionado, impedindo maiores movimentos.

3.1.2.8 Vida Útil

Quanto à vida útil, os tirantes são distinguidos entre:

- Provisórios: Referentes a obras de duração inferior a dois anos, para as quais se adota coeficiente de segurança no valor de 1,5.
- Permanentes: Referentes a obras de duração a partir de dois anos, cujo coeficiente de segurança deve ser 1,75.

3.1.2.9 Vantagens

Uma grande vantagem do emprego de tirantes é que eles são autoportantes. Isso significa que eles não exigem estudos muito aprofundados para fundações, como é o caso de muros de arrimo, por exemplo. Assim, são capazes de suportar seu próprio peso sem depender da implantação de estruturas auxiliares que sejam muito complexas, o que diminui consideravelmente os volumes de escavações.

Outra vantagem é a facilidade de execução desta técnica, requerendo pouca movimentação de máquinas e equipamentos, e elementos constituientes de relativa simplicidade, como são as barras ou cordoalhas de aço.

Ainda, como já mencionado na seção anterior, a protensão dos tirantes implica em sua atividade ativa, que, apesar de parecer redundante, significa, apenas, que eles já estão trabalhando, ao invés de só iniciarem trabalho quando solicitados (atividade passiva). Este aspecto é muito importante quando se fala em arrimos que precisam impedir o movimento dos maciços contidos.

Também, como todos os tirantes são individualmente ensaiados quanto à resistência, é possível manter um controle de qualidade bem seguro.

A principal vantagem do uso de tirantes, porém, é conseguir alcançar altas cargas com peças de pequeno porte. Desta forma, sua aplicação como solução pode ser amplamente implementada. Por exemplo, o corte de um talude para a construção de uma estrada, pode ser bem menor se adotada a solução de cortina atirantada, que ocupa relativamente pouco espaço, poupando maiores recursos financeiros, além de economizar tempo.

3.1.2.10 Limitações

Um dos maiores problemas decorrentes da implantação dos tirantes é a questão dos limites físicos de território. Uma vez que sua aplicação é majoritariamente para fins de suporte de muros de arrimo (cortinas atirantadas), e, considerando o anteriormente ilustrado, de que o desenvolvimento do tirante se dá por trás do muro, não é difícil perceber que com os 3,00 m mínimos de comprimento livre normatizados, mais a extensão do bulbo (de, em média, 5,00), muitas vezes a peça acaba por extrapolar o limite da propriedade, ainda que em considerável profundidade. Ainda, extensões muito grandes de tirantes dão maior margem a desvios, que podem acabar por gerar atrito excessivo (em relação ao permitido pela norma) no trecho livre.

Também, por ter o aço como seu principal elemento, a corrosão é sempre um agente patológico muito perigoso, que pode comprometer toda a estrutua do tirante, caso consiga se iniciar. Os casos mais comuns de ocorrência são na cabeça, até cerca de 1m no trecho livre. Este risco torna imprescindível a completa proteção anticorrosiva.

Outra situação que pode acontecer é a deformação, e decorrente erguimento do terreno no trecho ancorado, consequente às altas pressões de injeção (1,0 a 1,5 MPa). Quando há multiplicidade de linhas de tirante, o problema pode ser ainda mais sério, pois as deformações se acumulam, gerando prejuízo a construções previamente estabelecidas no local, principalmente em solos argilosos.

Por fim, é sempre relevante fazer menção ao custo das soluções em análise. O atirantamento é um serviço que exige pessoal treinado e especializado, além dos equipamentos, e de um rígido controle. Por isso, sua adoção em qualquer obra deve ser analisada sob o crítico olhar da relação custo/benefício.

3.1.3 Muro

O muro, como já mencionado anteriormente, é a barreira física destinada a conter o maciço de terra em questão. Executado em concreto armado, seu perfil costuma ser bem delgado (em comparação a muros de arrimo), pois a maior parte da resistência da cortina é tida pelos próprios tirantes. O muro também pode ser executado em perfis metálicos e/ou em madeira, ficando a critério do projetista as dimensões a serem adotadas.

Seu dimensionamento deve ser calculado de forma que as tensões provenientes das placas de apoio (cabeça) dos tirantes não gerem efeito de puncionamento no concreto.

As tensões originadas nos muros de contenção são devidas ao empuxo de solo, podendo ser ativo, ou passivo. O empuxo será ativo quando a força tiver sentido solo-muro, ou seja, quando o solo empurrar o muro. Ao contrário, será passivo o empuxo que tiver o sentido muro solo, sendo, desta vez, o solo empurrado pelo muro.

Por questões de estabilidade, é usual que parte do muro fique embutida dentro solo. Este embutimento é denominado *ficha*, e deve ser dimensionado de forma a garantir a segurança contra o tombamento.

A parte do muro que fica exposta sofrerá com os efeitos do empuxo ativo, com tendência do solo derrubar o muro (se a tendência de movimento de solo fosse o lado oposto, não haveria necessidade da contenção); enquanto que sua ficha estará sujeita tanto ao empuxo passivo (início da ficha, com porção de solo sob área escavada tentando segurar o muro) quanto ativo (extremo inferior, também agindo em sentido do rompimento). Este efeito pode ser visualizado na figura abaixo.

3.1.4 Aplicação e Execução

O caso mais usual de aplicação é no combate ao empuxo de terra. Cortinas atirantadas têm-se feito cada vez mais comuns em áreas de relevo acidentado onde se pretende fazer uma regularização de terreno para implantação de estradas, rodovias, entre outros. Por isso, em uma mesma obra, é possível encontrar cortinas atirantadas sendo simultaneamente executadas em cortes de terreno, e em aterros.

3.1.4.1 Cortes

A idéia da execução destas cortinas em cortes parece muito mais familiar, e, de fato, é mais comum. Grosso modo, pode-se dizer que sua execução acontece em níveis decrescentes de cotas, com retirada do solo em etapas. Este método construtivo recebe o nome de *método descendente*.

Este método se inicia com a escavação parcial do terreno, em sua porção mais elevada (Figura 8), seguida da instalação de uma linha horizontal de tirantes (Figura 9). Então, preparam-se as formas do muro desta porção da cortina, e realiza-se sua concretagem(Figura 10). Por fim, os tirantes podem ser protendidos. A execução de uma linha inferior só pode ser iniciada quando a de cima estiver integralmente concluída (Figura 11).

Para cada linha, o atirantamento acontece na forma da alternação de nichos. Isto permite que os nichos não executados auxiliem o suporte dos nichos em execução, evitando que a protensão dos tirantes ocasionem a descompressão do terreno, reduzindo expressivamente as deformações, e favorecendo a segurança do procedimento.

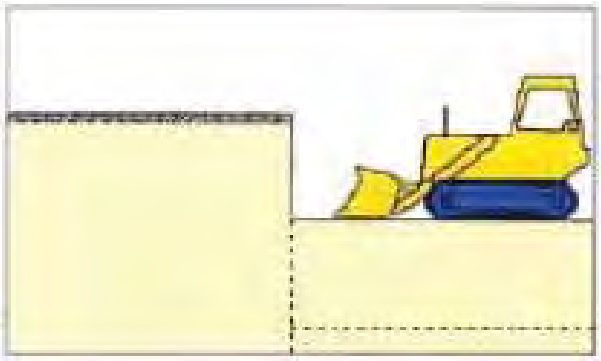


Figura 8 – Escavação Inicial.
(Disponível em: http://www.civilnet.com.br. Acessado em Novembro de 2012. Adaptado)

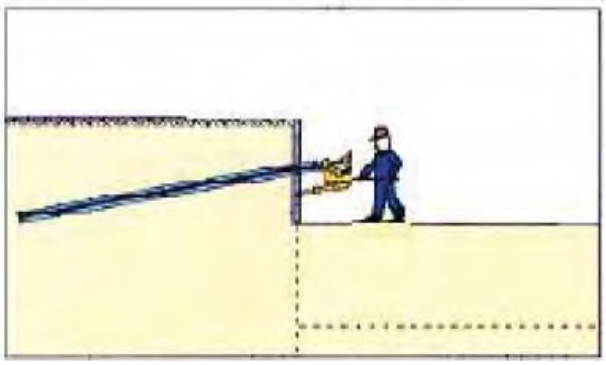


Figura 9 – Atirantamento da Primeira Linha.
(Disponível em: http://www.civilnet.com.br. Acessado em Novembro de 2012. Adaptado)

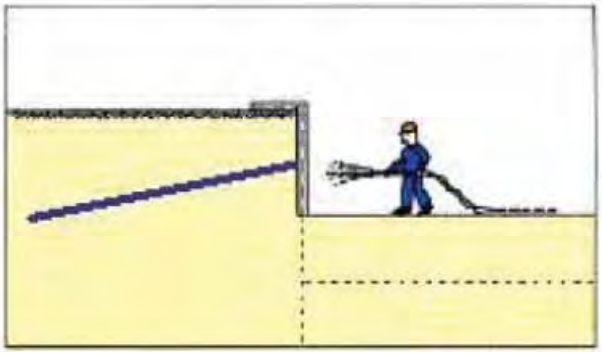


Figura 10 – Concretagem do Muro.
(Disponível em: http://www.civilnet.com.br. Acessado em Novembro de 2012. Adaptado)

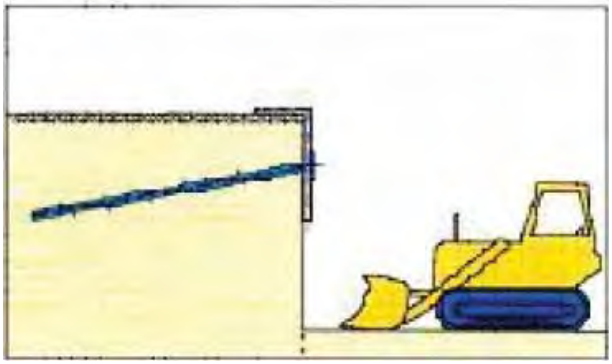


Figura 11 – Escavação Secundária.
(Disponível em: http://www.civilnet.com.br. Acessado em Novembro de 2012. Adaptado)

3.1.4.2 Aterros

A aplicação de tirantes em aterros, na verdade, chega a ser quase idêntica à aplicação em cortes. A diferença se dá no que pode chamar-se de *etapa zero*, que é a execução do aterro, propriamente dita. Após o aterramento, o atirantamento segue de acordo com os passos mencionados na seção anterior.

3.1.5 Modelo de Cálculo

No combate ao empuxo de terra, o tirante é ancorado em uma região estável, a pelo menos 8m de profundidade, passa através do volume de massa mobilizada pelo empuxo, até atingir a superfície onde se instala a cabeça que há de absorver as cargas da reação da estrutura de contenção.

A primeira fase do dimensionamento de uma cortina baseada no intuito do combate ao empuxo de terra é, de fato, o cálculo deste empuxo que se deseja combater, sem se esquecer, evidentemente, de solucionar as questões relativas à água (poropressão) no sistema. Em geral,

adota-se o empuxo ativo (fenômeno “solo empurra o muro”), majorando a intensidade desta força com os coeficientes de segurança definidos pela normatização brasileira.

Rotineiramente, considera-se um diagrama retangular (distribuição uniforme) para a distribuição dos empuxos de terra, para que as cargas nos tirantes sejam uniformemente distribuídas. O empuxo de água, como se sabe, é triangular. A composição destas solicitações acaba, portanto, originando, maiores cargas na porção inferior da cortina, que precisa, então, ser mais reforçada (ter maior resistência). Isto pode acontecer tanto com o dimensionamento de tirantes mais robustos, quanto com a diminuição do espaçamento entre eles.

Porém, é sempre necessário verificar qual é a variável que mais proporciona instabilidade no muro, uma vez que, nem sempre, o empuxo de terra é o caso mais crítico, a exemplo de um escorregamento, que pode solicitar os tirantes com valores muito diferentes dos retornados pelo cálculo do empuxo ativo.

A etapa seguinte é a determinação do comprimento livre do tirante, que deve ultrapassar o limite da cunha de deslizamentos (volume de instabilidade), até atingir solo firme dentro do maciço. Lembrando que, neste ponto, é importante verificar a estabilidade global da cortina, nunca negligenciando o fator de segurança (de valor 1,5 para esta situação).

Depois, deve-se chegar ao comprimento do trecho ancorado, para garantia da prova de ensaio, e realizar-se o dimensionamento estrutural da face da contenção. Por fim, é feita a eleição da metodologia de execução da cortina, que acaba sendo diretamente influenciada por suas fases de construção (escavação, ensaios, etc).

3.2 FTOOL

3.2.1 Apresentação

O *FTool* é, segundo conta em seu *site* na *internet*, um "programa gráfico-interativo para ensino de comportamento de estruturas", criado pelo professor Luiz Fernando Martha. Este *software* foi desenvolvido, a princípio, em um projeto de pesquisa integrado, coordenado pelo professor Marcelo Gattass do Departamento de Informática da PUC-Rio, apoiado pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq). Martha aparece como o idealizador e responsável pelo programa, cujo desenvolvimento foi destinado ao ensino do comportamento estrutural de pórticos planos, e explora uma área pouco visada por programas educativos.

Como objetivo básico, este programa procura motivar o aluno a aprender o comportamento estrutural, grande facilitador do entendimento dos métodos de análise estrutural. Por isso, a necessidade da interface do programa ser simples, aliando recursos eficientes de criação e manipulação do modelo (pré-processamento) às rápidas análises de sua estrutura, e visualização de resultados (pós-processamento).

Não existe compromisso na utilização da versão educacional do programa pelos usuários, grande atrativo para sua adoção como ferramente de trabalho, inclusive o que se tem em mãos. A desvantagem, porém, é que nem o autor, nem qualquer outra pessoa ou instituição se responsabilizam por seus resultados, ou tem algum dever legal quanto a eles, principalmente no que se diz respeito a danos causados direta ou indiretamente, resultantes de alguma informação gerada neste software.

3.2.2 Disponibilidade

O programa *FTool* está disponível na versão 3.00, atualização de 2 de agosto de 2012. Ele pode ser adquirido no site <http://www.tecfraf.puc-rio.br/*FTool*> em versões para *Windows* e *Linux*, onde também pode-se encontrar um manual de utilização do software.

Este trabalho será implementado na versão para Windows.

3.2.3 Familiarização com o Software

A interface apresenta menus suspensos, botões de atalho, caixas de entrada de dados e modo de exibições de resultados. Na figura a seguir são indicados em qual seção será tratado cada conjunto de comandos.

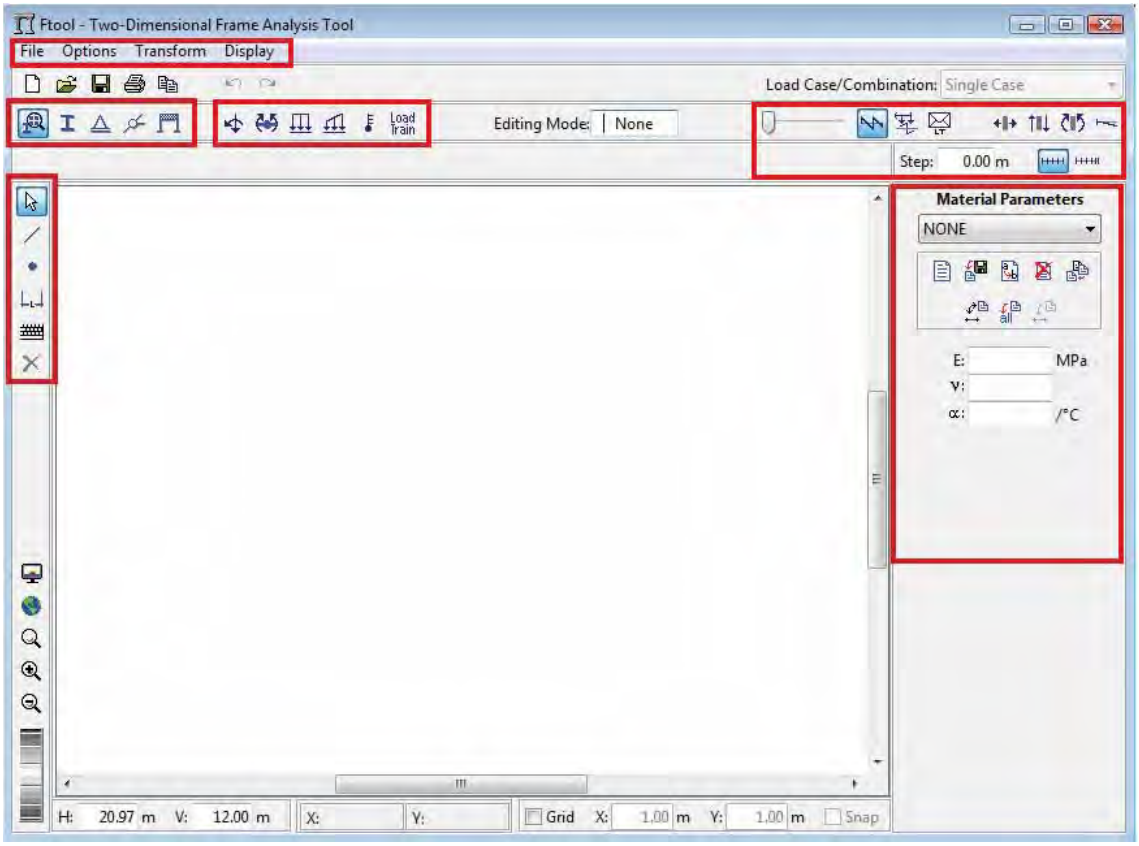


Figura 12 – Visão Geral do FTOOL
(Autoria Própria)

3.2.3.1 Menus suspensos

Menus suspensos são elementos que, ao serem solicitados, exibem uma lista de opções, das quais se há de escolher uma para a execução de uma tarefa. Estes menus são:

- *File*: permite a manipulação de arquivos. Seu escopo engloba informações sobre o programa (*About File*); indicação da convenção de sinais para esforços internos, e do padrão para traçado de diagramas (*Sign Convention*); opções de criação de um novo arquivo (*New*), abertura de um arquivo salvo anteriormente (*Open*), gravação de um arquivo editado com o mesmo nome do original (*Save*), ou com nome diferente (*Save* As); importação dos parâmetros globais e atributos de um arquivo já existente (*Import Properties*); exportação da tela em exibição para a área de transferência, ou para arquivos (*Export Screen*); contagem dos nós e barras (*Totals*); definição dos limites da janela em uso (*Limits*); e encerramento do programa (*Exit*).

- *Options*: este menu exibe opções gerais do software. Dentre elas, é de relevância para o trabalho mencionar a opção *Units & Number Formatting*…. que parametriza as unidades de medida das grandezas existentes nas simulações. A seleção desta opção abre a caixa ilustrada abaixo (Figura 13).

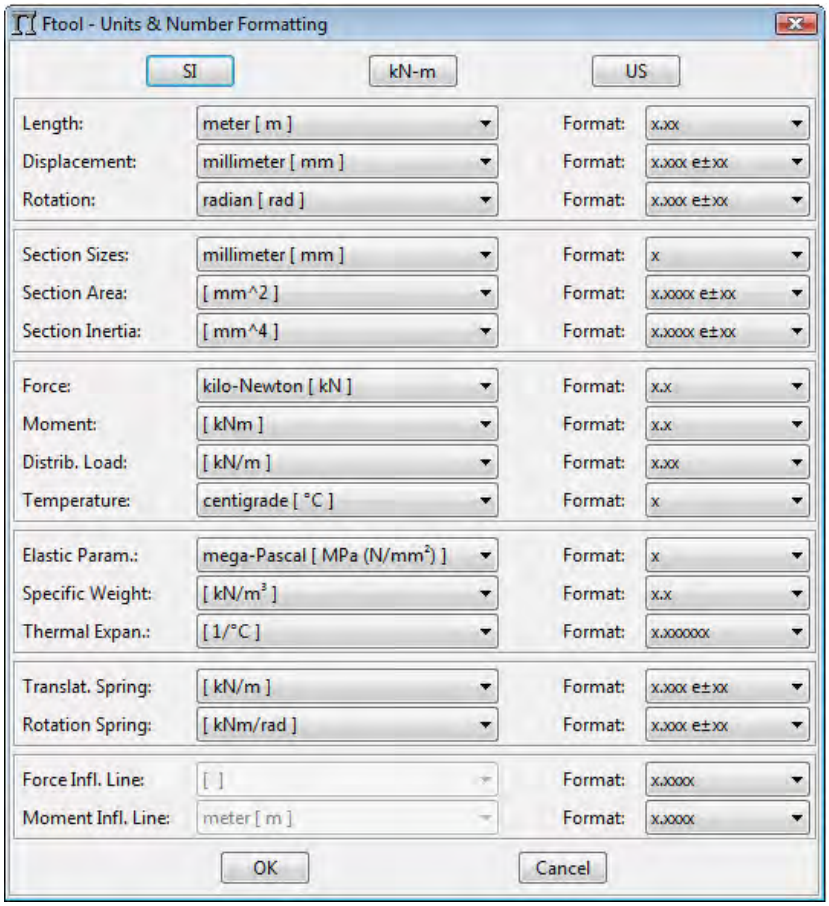


Figura 13 – Menu Units & Number Formatting
(Autoria Própria)

Além de se manipular as unidades das grandezas separadamente, pode-se configurá-las automaticamente para os padrões *SI* (Sistema Internacional de Unidades), *kN-m* (SI em quilo-Newtons e metros) *e US* (Sistema Americano), conforme se observa na parte superior da janela.

- *Transform*: este menu exibe opções para se manipular os itens já criados pelo programa. Estas opções são: mover (*move*); espelhar (*mirror*); rotacionar (*rotate*); modificar escala (*scale*); e repetir última ação (*repeat*). A opção *Leave Original*, quando selecionada, mantém o item original em sua posição, e quando não selecionada, faz com que este seja eliminado.

- *Display:* Além da modificação da cor do *background* da tela, permite escolher quais atributos serão mostradas durante o pré-processamento e/ou o pós-processamento.

3.2.3.2 Edição de Entidades

Este menu, localizado na barra vertical, à esquerda da tela, é responsável pela criação e edição de entidades dentro do programa, sendo estas: barras, nós e cotas, conforme mostra a Figura 14.

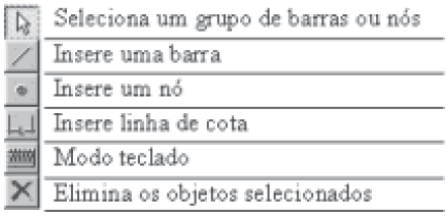


Figura 14 – Menu de Edição
(Fonte: AMARAL et.al, 2010)

3.2.3.3 Atributos de Nós e Barras

Este menu, mostrado na Figura 15, abre o acesso às caixas de entrada de dados, responsáveis pela criação e atribuição de propriedades às entidades do modelo.

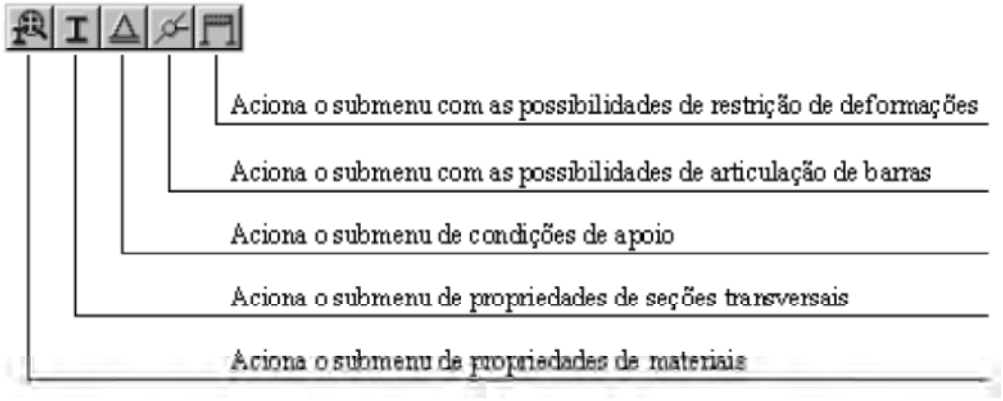


Figura 15 – Menu de Atributos de Nós e Barras
(Fonte: AMARAL et.al, 2010)

Estes submenus aparecerão na barra lateral direita da janela em execução.

- *Propriedades de Materiais:* Para criar um novo conjunto de parâmetros de um material, deve-se selecionar o ícone , que direciona à tela da Figura 16, na qual pode-se selecionar previamente os materiais Aço (*Steel*) ou Concreto (*Concrete*), que têm suas propriedades salvas na memória do programa, ou,

então, criar um novo material, genérico. Como se pode perceber, o programa não aceita outra condição a não ser a isotropia do material, ou seja, só é possível definir membros com as mesmas propriedades físicas em toda sua extensão.

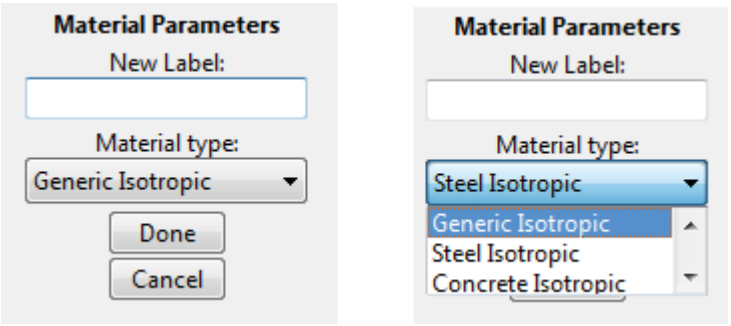


Figura 16 – Novo Material
(Autoria Própria)

Os parâmetros do material utilizados são o módulo de elasticidade, coeficiente de Poisson, e coeficiente de dilatação térmica, conforme Figura 17.

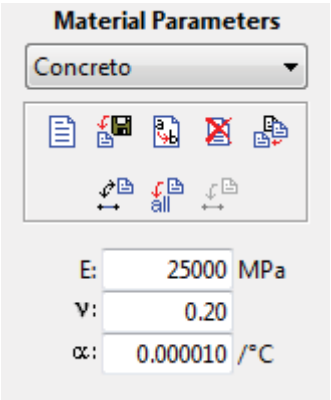


Figura 17 – Propriedados do Material
(Autoria Própria)

Propriedades de Seções Transversais: Da mesma forma que o submenu anterior, utiliza o ícone para criar uma nova seção transversal para uma barra, resultando na tela abaixo (Figura 18). Como se observa, há 15 diferentes tipos de seção pré-definidos, além da possibilidade de criação de outras seções genéricas. As seções-padrão já vêm com fórmulas que fornecem a Área (A), a altura da linha neutra ($\tilde{y}$), e o momento de inércia (I) assim que as dimensões da seção são informadas. O tipo de seção a ser utilizada neste trabalho será a retangular (*rectangle*), gerando a tela da (Figura 19).

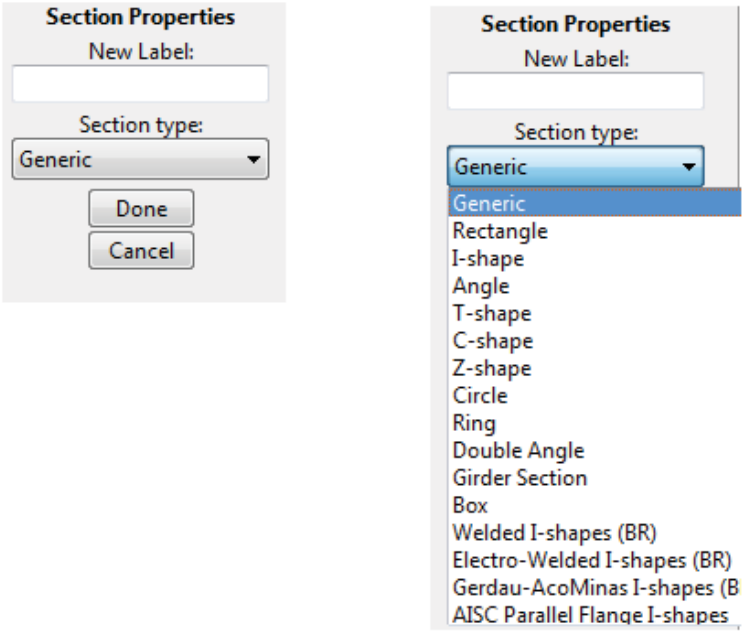


Figura 18 – Nova Seção
(Fonte: AMARAL et.al, 2010)

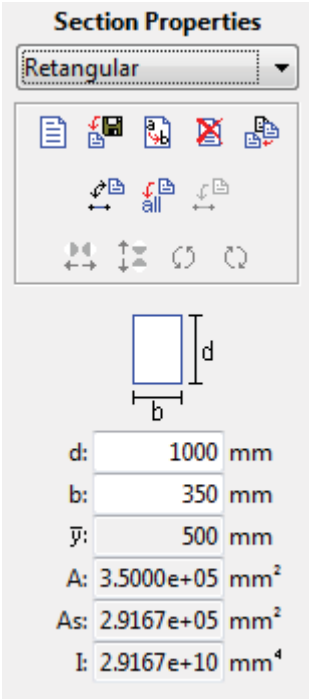


Figura 19 – Propriedades da Seção
(Autoria Própria)

É importante lembrar que, sendo o *FTool* um programa destinado a pórticos planos, as seções transversais incluídas deverão sempre ter como sua base as extensões de profundidade, ou seja, o quanto se extende pelo eixo *z*, não visível

na tela. A Figura 20 mostra a visão espacial de um exemplo de corte de uma cortina atirantada.

Figura 20 – Visão Espacial de um trecho de uma Cortina Atirantada
(Autoria Própria)

A tela de vizualização do *FTool* mostra os tirantes, em perfil, e a face que, na Figura 20, está em amarelo. Assim, as dimensões que o programa entende como sendo as *bases* das seções transversais são as *bases* vistas ao se encarar a face azul (Figura 22) e, seguir girando em torno do eixo *z* (Figura 21), passando, por exemplo, pela vista superior (Figura 23).

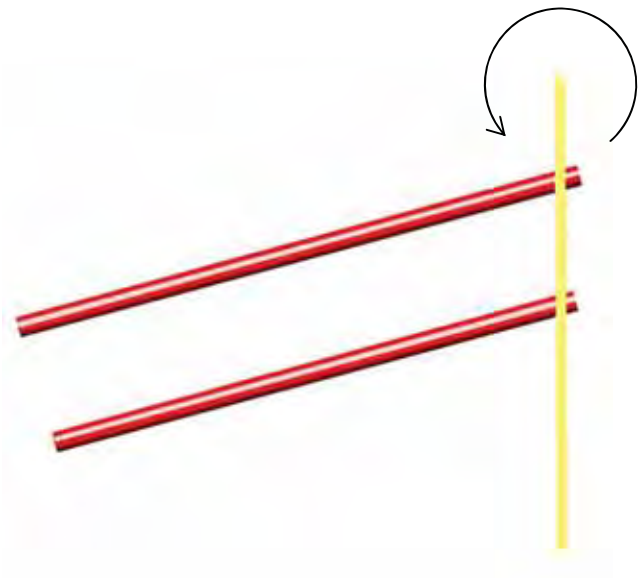


Figura 21 – Perfil da Cortina, com orientação das vistas geradoras das seções transversais da Cortina Atirantada em estudo.
(Autoria Própria)

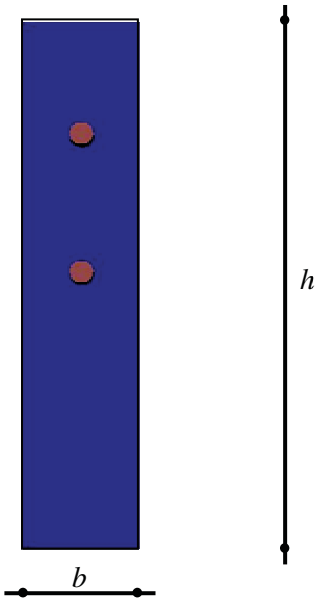


Figura 22 – Face Frontal de uma Cortina Atirantadaem estudo
(Autoria Própria)

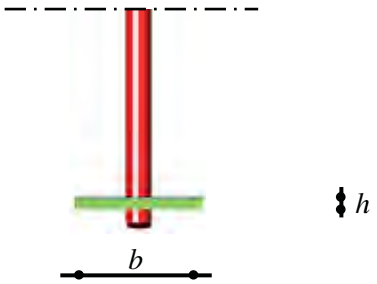


Figura 23 – Vista em Planta da Cortina Atirantada em estudo
(Autoria Própria)

Nota: os tirantes estão fora de escala, a fim de apresentar didaticamente a idéia, sem preocupação com as corretas dimensões.

- Condições de Apoio: este submenu define as condições do apoio nas componentes *x*, *y* e *z*, conforme Figura 24.

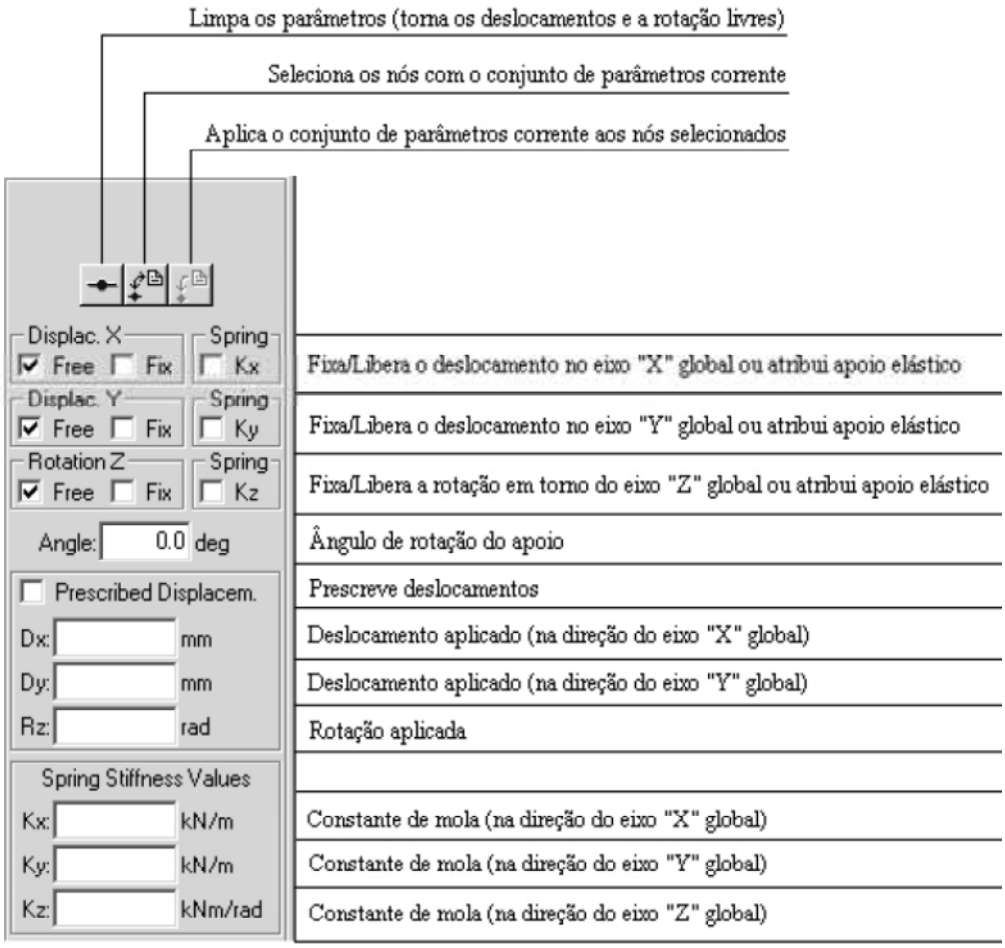


Figura 24 – Submenu Condições de Apoio
(AMARAL et. al, 2010)

3.2.3.4 Controle das Cargas

Este menu, localizado na parte superior esquerda da tela, aciona os submenus responsáveis pela atribuição de carregamentos às barras e/ou nós. Os tipos de carregamentos disponíveis são mostrados na Figura 25.

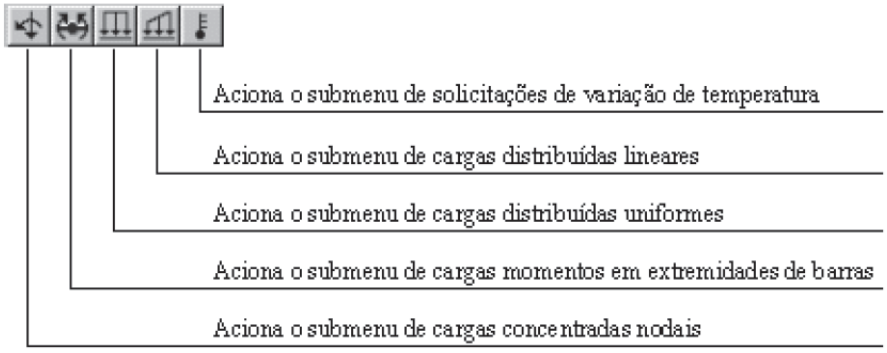


Figura 25 – Menu de Controle de Cargas
(AMARAL et. al, 2010)

Dentre estes, o único a ser utilizado neste trabalho é o submenu de cargas concentradas nodais. Este, quando selecionado, exibe a tela mostrada na Figura 26. Como se observa, é possível a atribuição pontual de forças (direção *x* e *y*) e momentos (em torno do eixo *z*). É importante frisar que, limitando as definições de forças às suas componentes horizontal e vertical, é necessário que os valores de entrada relativos a elas sejam, então, decompostas nos eixos x e y, sendo esta a maneira como elas serão exibidas graficamente (não se exibe a resultante inclinada).

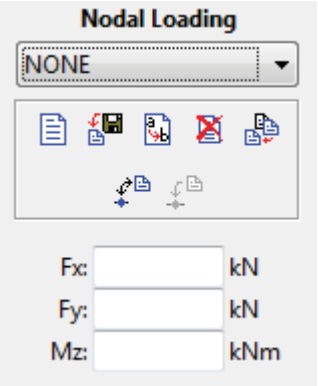


Figura 26 – Submenu de Cargas Concentradas Nodais
(Autoria Própria)

3.2.3.5 Menu de Resultados

Este menu seleciona quais resultados referentes à simulação serão exibidos na tela principal, conforme Figura 27.

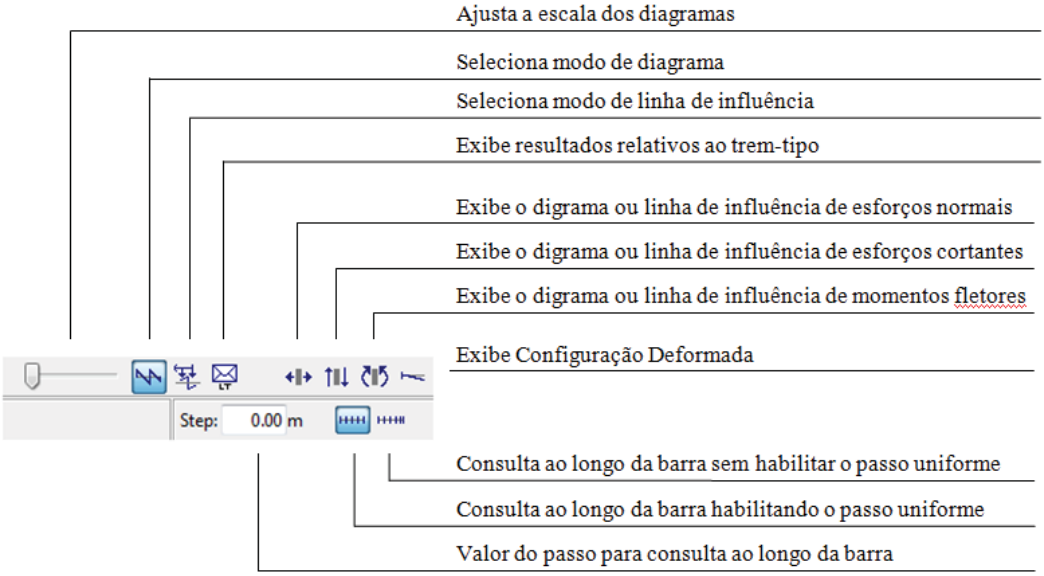


Figura 27 – Menu de Resultados
(AMARAL et. al, 2010)

Neste trabalho só serão de interesse os resultados referentes à configuração deformada, e em pontos específicos, sendo a consulta, ao longo das barras, realizada de 0,50m em 0,50m.

4 ESTUDOS SIMILARES

Estudos realizados a partir da instrumentação em estruturas de contenção têm sido cada vez mais comuns, a fim de conhecer melhor seus esforços solicitantes, viabilizando a melhoria nas técnicas de dimensionamento.

Como exemplo, pode-se citar o trabalho de Medeiros *et. al.*, que analisou duas estruturas de contenção tipo estacas justapostas no Distrito Federal.

A primeira obra de seu estudo foi o Setor Bancário Sul, construída com quatro linhas de grampos, em uma área total de 900 m², com ancoragem dimensionada para sua permanência provisória. As estacas possuiam 50 cm de diâmetro.

Os deslocamentos monitorados foram os do topo das estacas e das 4 linhas de grampos, nas quatro fachadas da obra, processo este realizado por um topógrafo, por meio de um teodolito. Os dados de deformação foram gerados semanalmente por quase 4 meses (abril a julho de 2005), que foi seu período escavação, e podem ser visualizados na Figura 28, na qual *W* indica a identificação da estaca..

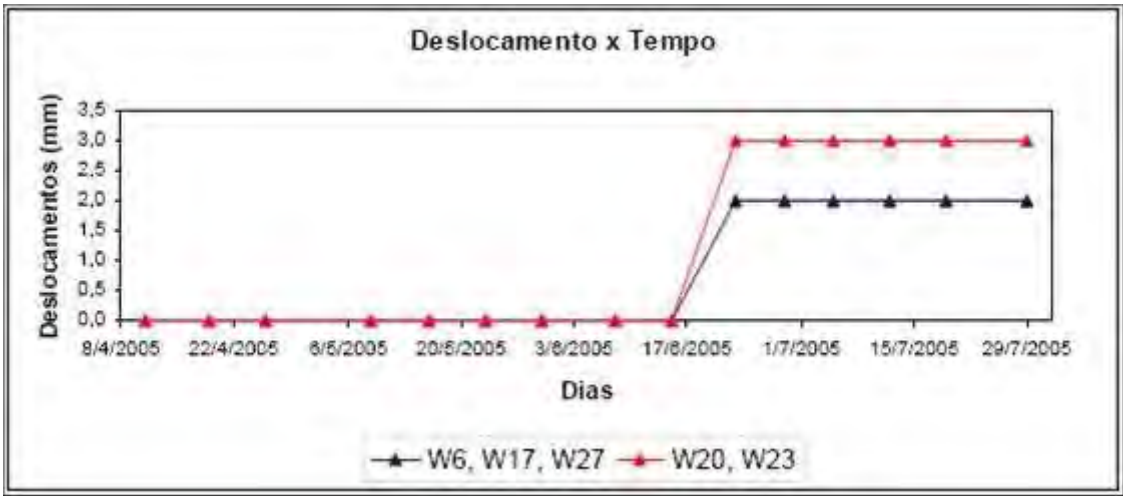


Figura 28 – Gráfico de Deslocamentos dos topos de estacas no Setor Bancário Sul (MEDEIROS, 2007)

A segunda obra de seu estudo foi o Setor de Autarquias do Sul, construído com 3 linhas de grampos nas fachadas leste e oeste, também projetada para situação de permanência provisória, com estacas de 50 cm de diâmetro

Nesta obra, foram instrumentados os topos das estacas, mas apenas uma linha de grampo. As medições foram obtidas de maneira direta, com a fixação de barras no topo das estacas, e um arame transpassasse todas as estacas, fixado em dois pontos sem deslocabilidade, distante uniformemente 10 cm das barras fixas. Um segundo arame foi

fixado internamente às barras fixas, e, ao deslocamento da estaca, as barras se deslocavam, e por consequencia, o arame preso a si. Assim, as medidas foram realizadas entre os dois arames. O período de instrumentação foi de 2 meses, e os resultados podem ser vistos abaixo (Figura 29).

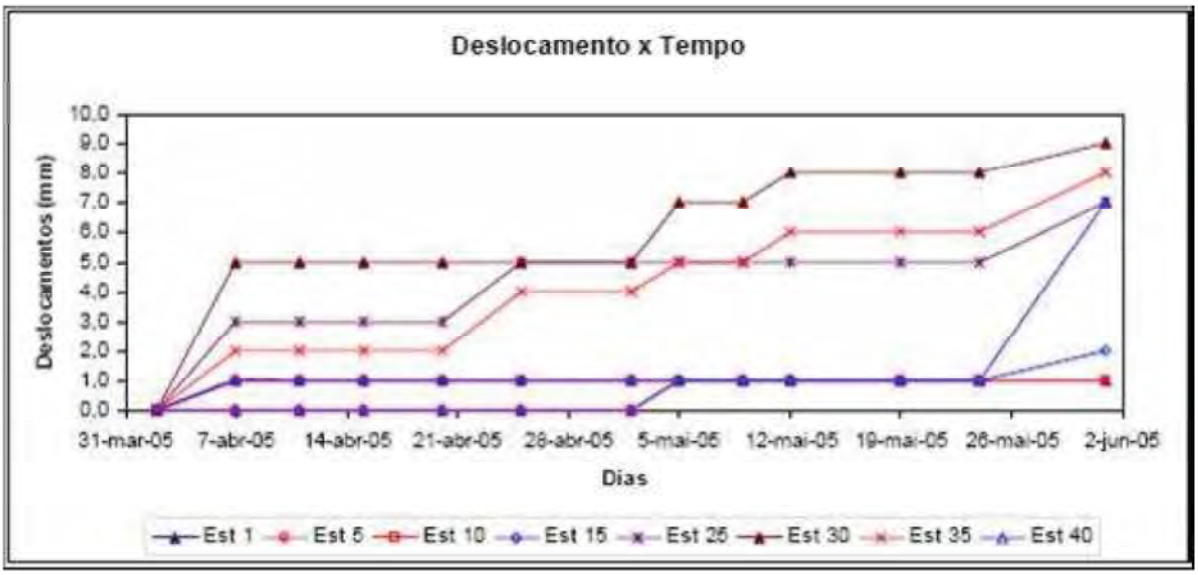


Figura 29 – Gráfico de Deslocamentos dos topos de estacas no Setor Autarquias do Sul (MEDEIROS, 2007)

Com os resultados, foram realizadas simulações numéricas, cujas deformações, segundo o autor, satisfizeram as deformações instrumentadas.

Sales (2010) também aplicou a retroanálise do comportamento tensão-deformação em uma obra, em Goiânia (GO), comparando os resultados medidos em laboratóro aos obtidos pelo monitoramento da obra.

Após realizadas as medições, usou o programa SIGMA/W , seguindo o modelo constitutivo de Mohr-Coulomb para o solo. Adotou uma análise plana, com uma malha verticalmente simétrica e, ajustando os parâmetros iniciais de módulo de elasticidade (E) e ângulo de atrito (φ) das camadas de solo envolvidas, atingiu os deslocamentos máximos instrumentados.

Sua conclusão foi de que sua representação do comportamento interativo entre uma estrutura de contenção e as camadas de solo adjacentes foi bem sucedida, apesar de ter sugerido maior estudo acerca do módulo de elasticidade, para facilitar a adoção inicial de valores, pois esta divergiu bastante do resultado final.

5 METODOLOGIA

A metodologia de execução do presente trabalho tem como princípio a retroanálise, ou seja, uma análise que parte do fim – que são as deformações instrumentadas – visando retornar à situação inicial – isto é, definir os parâmetros de entrada no software para condições de projeto.

É possível definir uma seqüência de etapas a serem seguidas, de modo a facilitar a compreensão do objetivo de cada uma delas. Esta sequenciação foi organizada pela autora, e empregada durante a implementação no programa *FTool*, sendo explicitada a seguir.

A princípio, deu-se a adoção de um solo original, de características e parâmetros geotécnicos (peso específico, coesão, ângulo de atrito interno, coeficiente de empuxo no repouso, etc.) médios, para início da iteração. A partir disto, definiu-se o diagrama de tensões horizontais efetivas σ_h' (condição drenada), função da tensão vertical σ_v', e do coeficiente de empuxo no repouso, k_0.

A seguir, calculou-se a força horizontal equivalente em um ponto, considerando como área de influência o range de forças compreendidas desde a metade da distância ao próximo ponto superior, até metade da distância ao próximo ponto inferior (Figura 30). Esta etapa supõe, por um momento, a cortina (barra) como sendo enterrada, ou seja, cercada por solo de todos os lados, visando sua condição de não deformação, pois, com o mesmo solo a todo seu redor, as tensões aplicadas em um ponto devem ser iguais de ambos os lados, em intensidade.

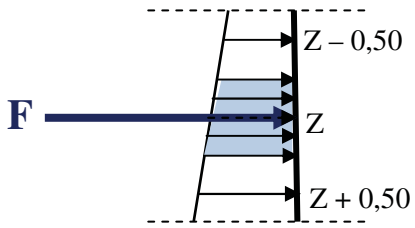


Figura 30 – Força Horizontal Equivalente
(Autoria Própria)

Também, avaliaram-se quais seriam as distribuições das forças de Empuxo Ativo e Empuxo Passivo ao longo de toda a estrutura da cortina, caso viessem a ocorrer, e, seguindo o mesmo conceito empregado nas determinações nodais da força horizontal, definiu-se as cargas pontuais para cada profundidade múltipla de 50cm.

Então, fez-se a proposição de variados modelos que poderiam representar o caso em estudo. Para cada um destes modelos, seguiram-se as etapas:

- Inclusão do modelo no software, com extensão (altura) da cortina, seção, definições de material da barra, nós e apoios.
- Inserção das forças ao longo da barra longitudinal (cortina), e posicionamento das barras horizontais (solo) e suas propriedades, conforme o modelo em estudo, bem como das barras de tirantes.
- Verificação da deformação da cortina, e comparação de seu comportamento com a instrumentação de referência.

A partir da análise comportamental dos modelos propostos, foram descartados os modelos julgados não representativos, enquanto que foram escolhidos outros, que se mostraram mais coerentes, para a continuação do estudo, eleição esta segundo critérios a definir-se mais adiante, na seção *Resultados*.

Continuando a análise, adotou-se apenas um modelo, para ser empregado até o fim do trabalho, a saber, com barras de apoio fixo representativas do solo somente onde ele é comprimido (altura da ficha, no lado escavado do muro), e forças pontuais agindo na cortina, em toda sua extensão restante.

Definido este modelo, foram simuladas as etapas de execução da cortina, a fim de verificar a evolução das deformações, bem como a influência do atirantamento sobre elas. As etapas são em número de cinco, as quais cita-se a seguir:

- Escavação inicial, até 3,00m de profundidade;
- Instalação da primeira alinha de tirantes, a 2,50m de altura;
- Escavação secundária, de 3,00m a 6,00m de profundidade;
- Instalação da segunda linha de tirantes, a 5,50m de profundidade;
- Escavação final, de 6,00 a 9,00m de profundidade.

Ainda, verificou-se quais seriam as deformações ocasionadas caso os tirantes não existissem.

Da resistência dos materiais, sabe-se que as deformações são influenciadas, também, pela espessura da cortina, pois reflete em sua rigidez. Portanto, as simulações foram feitas para diferentes espessuras, gerando um volume maior de informações a serem analisadas.

Todas estas caracterizações de deformação foram testadas para as mobilizações em nível ativo, passivo, em repouso, e, ainda, para porcentagens da mobilização passiva.

Por fim, passou-se à alteração das forças atuantes sobre a cortina, testando empiricamente (mas dentro da coerência física), quais seriam seus valores numéricos, que proporcionariam chegar-se o mais próximo possível das deformações instrumentadas às quais se em acesso.

Com o gráfico de deformações obtido, foi possível interpretar a mobilização de empuxo ao longo da profundidade do solo, bem como definir a carga de trabalho do tirante, comparando com as informações reais do caso estudado.

6 ESTUDO DE CASO

6.1 Apresentação

De maneira a cumprir o objetivo proposto, uma obra real foi selecionada para estudo. A cortina estudada está situada em Curitiba, estado do Paraná, na Formação Guabirotuba (Figura 31). O solo característico desta unidade geológica são as argilas rijas e duras, expansivas e higroscópicas, com alta suscetibilidade à erosão e movimento de massa em encosta.

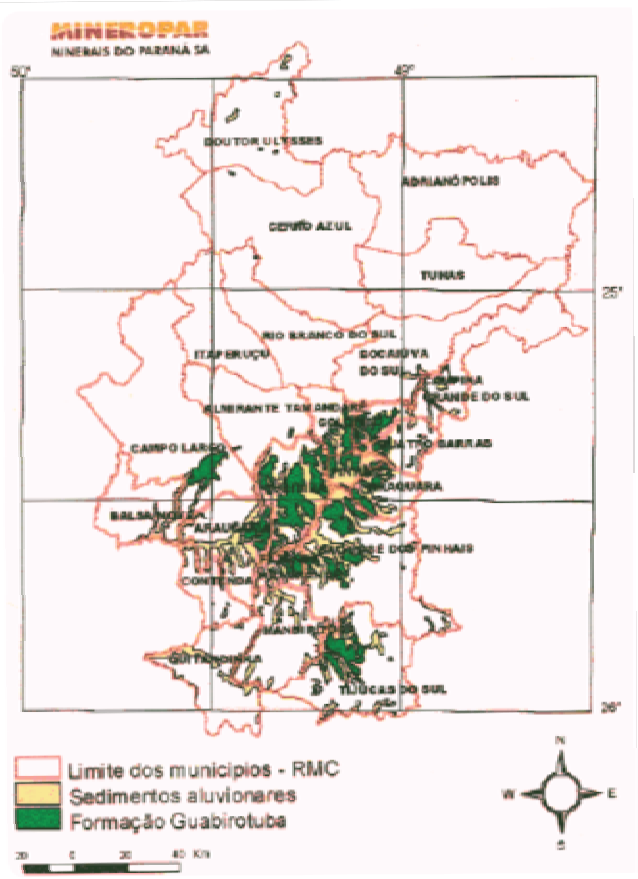


Figura 31 – Formação Guabirotuba, Paraná
(FELIPE, 2011)

Das informações disponíveis, relativas à cortina constavam:

- Local de execução da obra, isto é, o tipo de solo característico da região;
- Relatório de sondagem à percussão (SPT) do terreno;
- Altura da cortina, de 11,50m, sendo 2,50m de ficha;
- Mapa de deformações da cortina, conforme Figura 32;
- Linhas de tirantes, inclusive posicionamento (altura), sendo uma linha a 2,50m de profundidade, e outra a 5,50m;

- Inclinação de instalação dos tirantes de 15º;
- Dimensionamento dos tirantes para esforço de 25tf (250kN), com fator de segurança 2,0; ou seja, carga limite de 50tf, ou 500kN.
- Diâmetro dos tirantes de 5cm;
- Espaçamento entre linhas verticais de tirantes de 2,50m;
- Material da cortina, com perfis metálicos de seção I, associados a madeira;

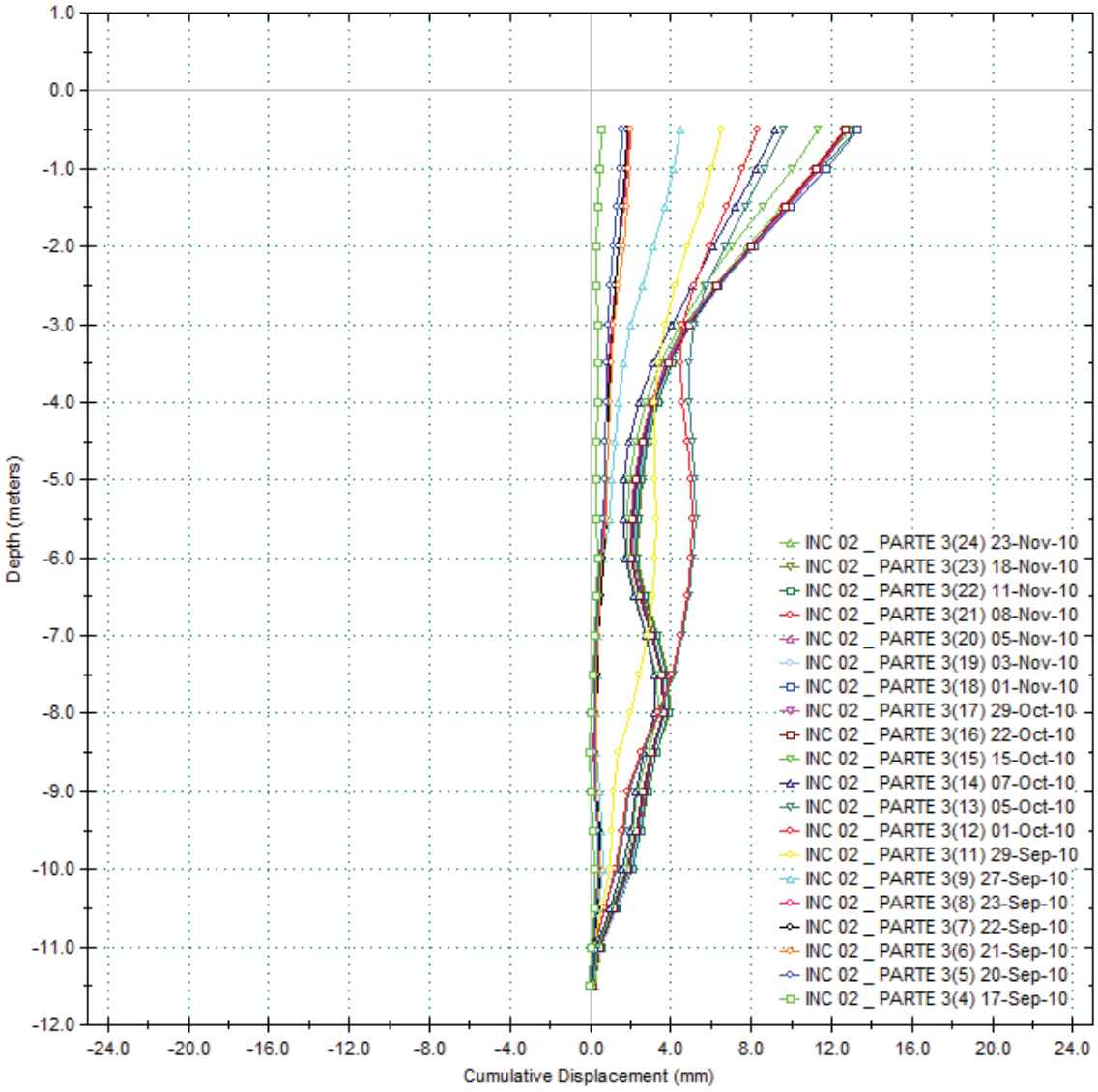


Figura 32 – Mapa de Deformações Instrumentadas
(Cedida pela Empresa que airantou o muro)

Baseada nestas informações, deu-se início, propriamente, à implementação do caso no programa *FTool*.

6.2 Implementação

Conforme a metodologia proposta, primeiramente, adotou-se um peso específico correspondente à argila típica da região. Baseado nos estudos realizados por Kormann *et. al.* (pag 31), estipulou-se, então, para este trabalho, o valor seguinte:

$$\gamma_n = 19{,}1 \ \ kN/m^3$$

Outros parâmetros definidos na produção de Kormann foram a coesão do solo, *c'*, e seu ângulo de atrito interno, φ', provenientes dos gráficos de resistência ao cisalhamento, seu objeto de estudo. Seus ensaios foram realizados para três diferentes velocidades de aplicação de tensão, das quais foram adotados os resultados relativos à menor delas, por ser a que mais se aproxima do fenômeno natural, estudado aqui. Tais parâmetros são:

$$\varphi' = 23{,}9^o$$
$$c' = 22 \ kPa$$

Para determinação das tensões horizontais, foi empregada a fórmula convencional, função do coeficiente de empuxo no repouso, k_0', e das tensões verticais, σ_v'. Usou-se, primeiramente, a fórmula desenvolvida por Caputo para estimar k_0':

$$k_0' = 1 - sen\varphi' \qquad (1)$$

Apesar de esta fórmula ser mais indicada para a plicação sobre areias, o valor retornado foi adotado, com pequena aproximação, por estar dentro dos limites esperados para argilas, em geral, variando de 0,50 a 0,70. Assim, definiu-se as tensões horizontais, sendo:

$$\sigma_h{}' = k_0 \sigma_v{}' \qquad \text{[kPa]} \qquad (2)$$

com

$$\sigma_v' = \gamma_n Z \qquad \text{[kPa]} \qquad (3)$$

onde Z é a profundidade, em metros.

Definida a tensão horizontal para cada profundidade, a equivalente em força aplicada pontualmente, que é, numericamente, a integral da tensão,

$$F = \int \sigma \, dZ, \qquad \text{[kN]} \qquad (4)$$

foi calculada segundo o critério já mencionado, a saber:

$$F'_{h_Z} = \left(\frac{\sigma'_{h_{Z+0,25}} + \sigma'_{h_{Z-0,25}}}{2}\right) * 0{,}50 \qquad \text{[kN]} \qquad (5)$$

Deste cálculo, excetua-se, apenas, a força horizontal na superfície (Z igual a zero), em que há influência apenas dos primeiros 25 centímetros de solo, cujo valor foi

$$F'_{h_0} = \left(\frac{\sigma'_{h_0} + \sigma'_{h_{0,25}}}{2}\right) * 0{,}25 \qquad \text{[kN]} \qquad (6)$$

Considerando que a tensão é nula na superfície, pode-se simplificar a expressão, fazendo, apenas:

$$F'_{h_0} = \frac{\sigma'_{h_{0,25}}}{8} \qquad \text{[kN]} \qquad (7)$$

O mesmo procedimento seguiu-se para o cálculo das pressões de empuxo ativo, P_a, e passivo, P_p, alterando-se, apenas, seus respectivos coeficientes. Para estimar o coeficiente de empuxo ativo, k_a, deu-se:

$$k_a = \frac{1 - sen\varphi'}{1 + sen\varphi'} \qquad (8)$$

Para o coeficiente de empuxo passivo, k_p, deu-se:

$$k_p = \frac{1 + sen\varphi'}{1 - sen\varphi'} \qquad (9)$$

Assim,

$$P_a = k_a {\sigma_v}' \qquad \text{[kPa]} \qquad (10)$$

$$P_p = k_p {\sigma_v}' \qquad \text{[kPa]} \qquad (11)$$

e

$$E_{a_Z} = \left(\frac{P_{a_{Z+0,25}} + P_{a_{Z-0,25}}}{2}\right) * 0{,}50 \qquad \text{[kN]} \qquad (12)$$

$$E_{p_Z} = \left(\frac{P_{p_{Z+0,25}} + P_{p_{Z-0,25}}}{2}\right) * 0{,}50 \qquad \text{[kN]} \qquad (13)$$

com a mesma excessão para a superfície adotada nas forças horizontais:

$$E_{a_0} = \frac{P_{a_{0,25}}}{8} \qquad \text{[kN]} \qquad (14)$$

$$E_{p_0} = \frac{P_{p_{0,25}}}{8} \qquad \text{[kN]} \qquad (15)$$

Passadas estas definições, foram inseridos, no *Software FTool*, a cortina e os tirantes, conforme a Figura 33, com as seguintes características:

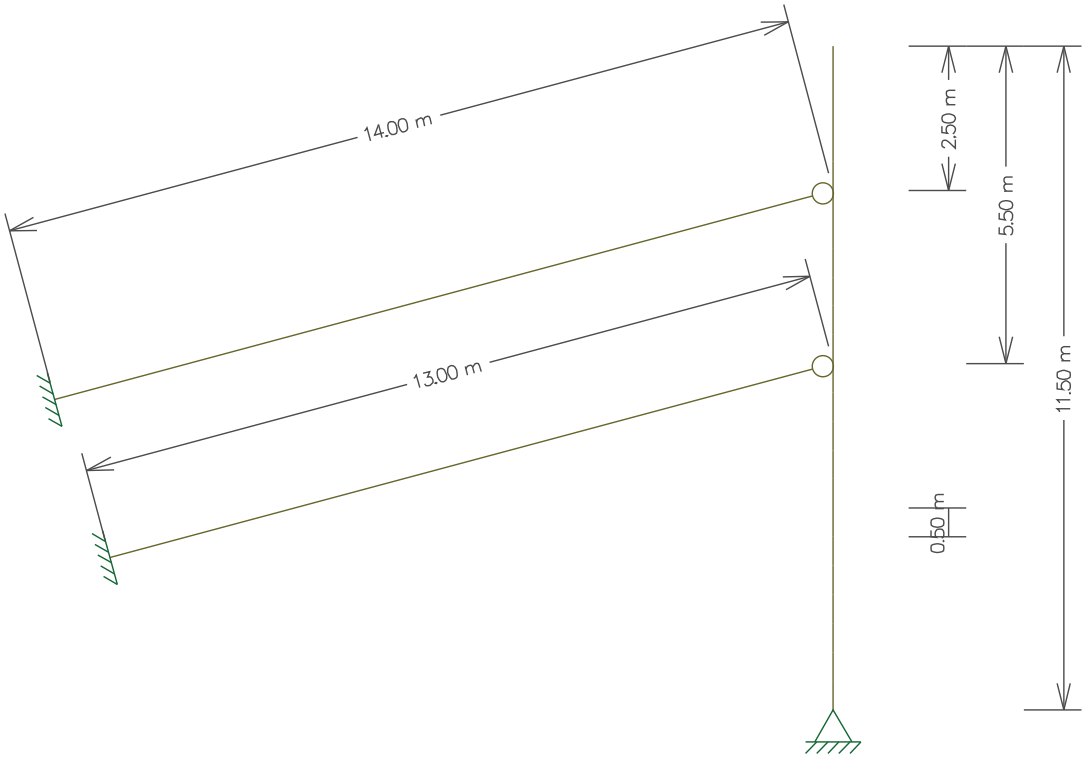


Figura 33 – Modelo Estrutural Proposto para a Cortina Atirantada (Autoria Própria)

Cortina:

- Barra de 11,50m de altura, apoiada fixamente em seu ponto de maior profundidade;
- Seção *b*x*h* de 250x25cm;
- 24 nós espaçados de 0,50m em 0,50m,
- Módulo de elasticidade, *E*, de 25GPa;
- Coeficiente de Poisson, *v*, igual a 0,30.

Tirantes:

- Barras de seção circular com diâmetro de 5cm;
- Módulo de elasticidade, *E*, de 205Gpa;

- Coeficiente de Poisson, *v*, igual a 0,30;
- Fixação à cortina com ligação articulada (para impedir a flexão na barra);
- Engastamento na outra extremidade, perpendicular ao eixo dos tirantes;
- Tirantes da linha de 2,50m, com 14,00m de extensão;
- Tirantes da linha de 5,50m, com 13,00m de extensão.

Os cálculos que conduziram às adoções realizadas podem ser encontrados nos APÊNDICE A e APÊNDICE B.

Então, 30 modelos que pudessem figurar o caso estudado foram propostos, conforme a Tabela 1, para avaliação de qual seria a melhor representação a ser adotada neste trabalho.

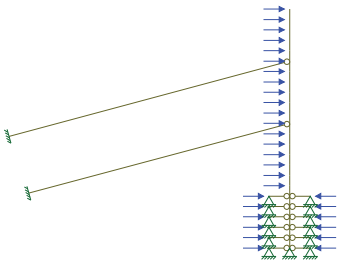
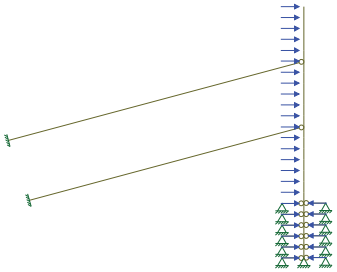
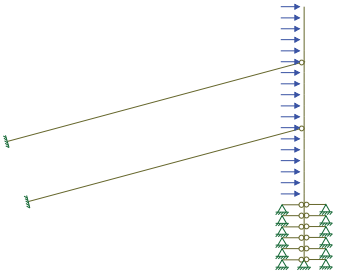
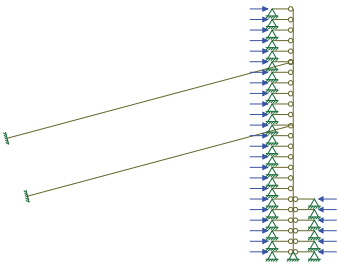
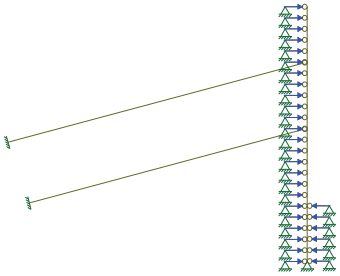
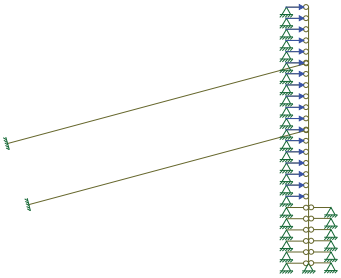
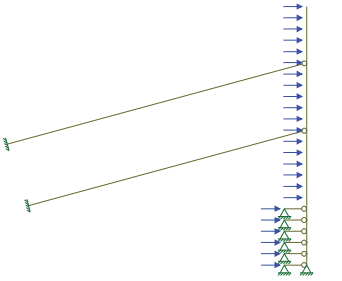
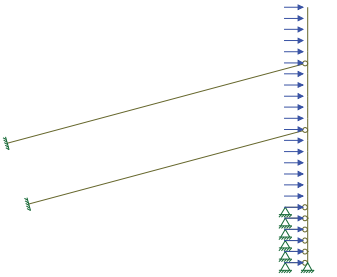
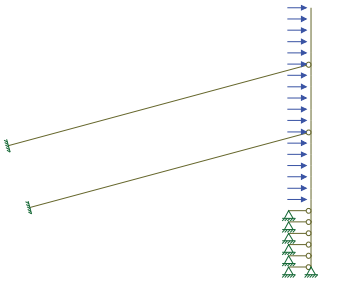
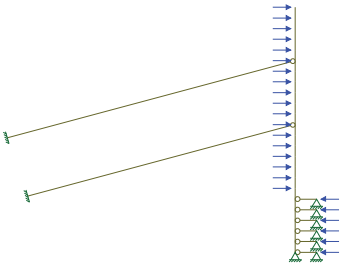
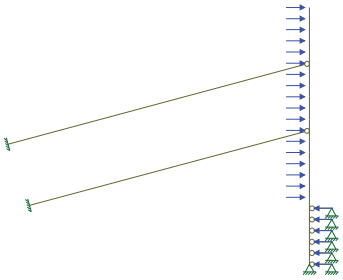
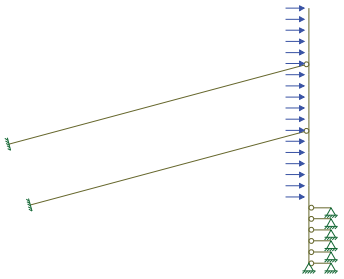
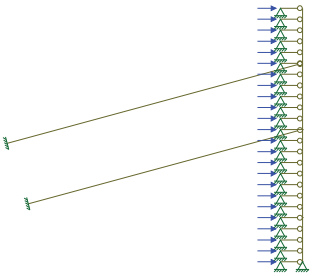
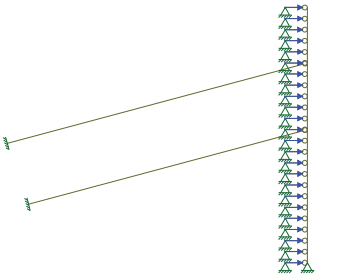
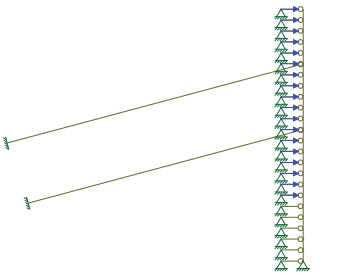
A numeração principal dos modelos define onde há de se considerar o solo com o conceito de barras. O Modelo 1 propõe barras apenas no comprimento da ficha, dos dois lados da cortina. O Modelo 2 já sugere barras ao longo de todo contato da cortina com o solo. Os Modelos 3 e 4 restringem, novamente, as barras à altura da ficha, porém, apenas para um dos lados cortina (lado não escavado para Modelo 3, e escavado para Modelo 4). Por fim, o Modelo 5 testa o comportamento quando as barras são consideradas ao longo de toda a cortina, mas apenas no lado da conteção.

Os sub-modelos *a*, *b* e *c* se diferem apenas na aplicação das forças na extensão da ficha. O sub-modelo *a* prevê a aplicação das forças de empuxo, tanto ativo, quanto passivo (quando existentes, de acordo com a numeração do modelo), sobre os nós dos apoios das barras representativas de solo. O sub-modelo *b* faz esta aplicação de forças diretamente sobre a cortina.

O sub-modelo *c*, por sua vez, retira a aplicação de forças na ficha, fazendo com que as barras de solo apenas reajam, de acordo com sua rigidez, à aplicação de forças na extensão escavada da cortina.

Para cada um dos modelos explicados, que somam 15 propostas, foram realizados testes com dois tipos diferentes de fixação, sendo o primeiro a restrição em ambas direções, *x* e *y* (apoio fixo); e o segundo caso a restrição apenas na direção *y* (apoio móvel), totalizando os 30 modelos mencionados.

Tabela 1 – Modelos Estruturais propostos para a representação do caso em estudo.

	a	**b**	**c**
1			
2			
3			
4			
5			

As propriedades adotadas para as barras representativas de solo foram:

- Seção *b*x*h* de 250x50cm, ou 250x25cm, conforme posição da barra ;

- Módulo de elasticidade, *E*, de 2*N*, sendo *N* o número de golpes obtidos no ensaio de SPT;
- Coeficiente de Poisson, *v*, igual a 0,50;
- Fixação à cortina com ligação articulada (para impedir a flexão na barra);
- Apoio, fixo ou móvel, na extremidade oposta à ligação com a cortina;
- Comprimento unitário (1,00m).

As forças utilizadas nesta fase de experimentação foram as de Empuxo Ativo.

Após analisadas as deformações em cada um dos modelos (ver seção seguinte, *Resultados*), elegeu-se um apenas um deles, a saber, o Modelo *4c*, para seguir com a implementação do caso.

Então, conforme explicado na seção anterior, seguiu-se em aplicar, para o caso escolhido, as forças de empuxo ativo, forças horizontais, empuxo passivo, e porcentagens de empuxo passivo (30%, 55% e 80%), nas cinco etapas executivas da cortina, assim como na suposição de uma situação sem tirantes para a etapa final, conforme exemplo genérico das Figura 34 à Figura 39. Destaca-se, aqui, que as barras de solo adotadas no lado escavado da cortina devem, para haver coerência no modelo, ser consideradas em todo o comprimento ainda não escavado.

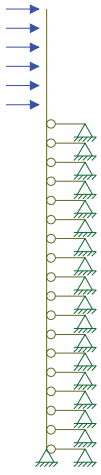


Figura 34 – Forças Atuantes na Execução da Cortina, Fase 1: EscavaçãoInicial (Autoria Própria)

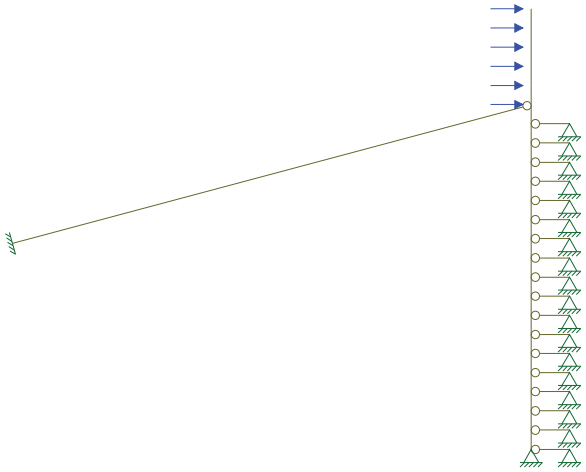


Figura 35 – Forças Atuantes na Execução da Cortina, Fase 2: Atirantamento da linha 2,50m (Autoria Própria)

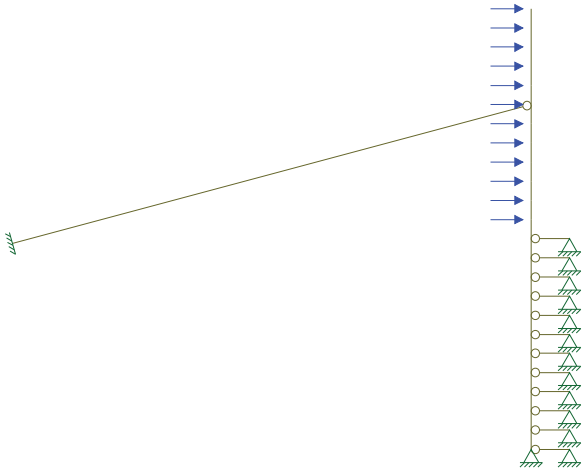


Figura 36 – Forças Atuantes na Execução da Cortina, Fase 3: Escavação Secundária (Autoria Própria)

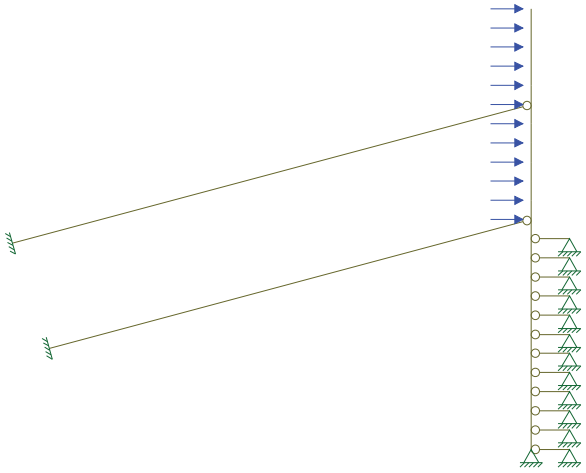


Figura 37 – Forças Atuantes na Execução da Cortina, Fase 4: Atirantamento da linha 5,50m (Autoria Própria)

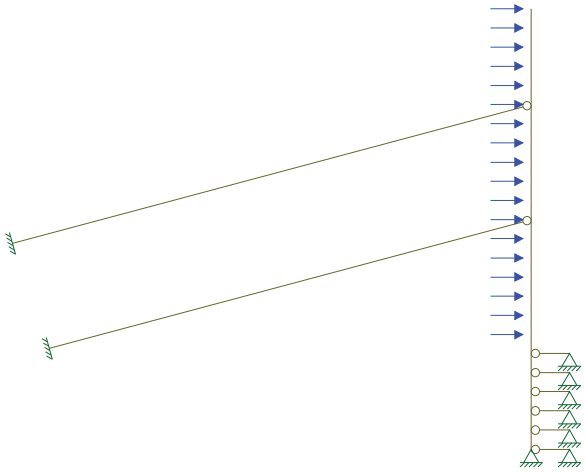


Figura 38 –Forças Atuantes na Execução da Cortina, Fase 5: Escavação Final
(Autoria Própria)

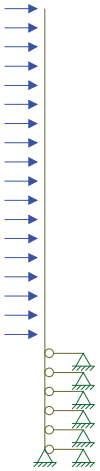


Figura 39 – Forças Atuantes na Simulação da situação sem o emprego de Tirantes
(Autoria Própria)

Para facilitar a visualização de toda implementação realizada a partir do Modelo *4c*, segue a tabela abaixo, que relaciona as simulações para cada nível de mobilização.

Tabela 2 – Resumo de Implementações

	Mobilizações	**Espessura**	**Etapa**
MODELO 4c	• Ativa • Horizontal • 30% Passiva • 55% Passiva • 80% Passiva • Passiva	15 cm	Etapa 1: Escavação 1
			Etapa 2: Atirantamento 1
			Etapa 3: Escavação 2
			Etapa 4: Atirantamento 2
			Etapa 5: Escavação 3
			Remoção do Atirantamento
		25cm	Etapa 1: Escavação 1
			Etapa 2: Atirantamento 1
			Etapa 3: Escavação 2
			Etapa 4: Atirantamento 2
			Etapa 5: Escavação 3
			Remoção do Atirantamento
		35cm	Etapa 1: Escavação 1
			Etapa 2: Atirantamento 1
			Etapa 3: Escavação 2
			Etapa 4: Atirantamento 2
			Etapa 5: Escavação 3
			Remoção do Atirantamento

Após tais simulações, arbitrariamente foram testados intensidades de forças que fariam a deformação do muro se aproximar ao máximo do instrumentado. Esta força pode se relacionar com o empuxo passivo, representando uma porcentagem, i, de E_p, ou seja:

$$F_\delta = iE_p \qquad \text{[kN]} \qquad (16)$$

onde F_δ é a força que causa a deformação instrumentada.

Esta relação pode, também, ser expressa na forma de tensões, isto é:

$$P_\delta = iP_p \qquad \text{[kPa]} \qquad (17)$$

Substituindo as Equações (11) e (3) na equação acima, tem-se:

$$P_\delta = ik_p\gamma_n Z \qquad \text{[kPa]} \qquad (18)$$

Esta tensão, P_δ, também pode ser escrita como

$$P_\delta = k_\delta \gamma_n Z \quad \text{[kPa]} \quad (19)$$

Substituindo (19) em (18), chega-se a:

$$k_\delta \gamma_n Z = i k_p \gamma_n Z \quad \text{[kPa]} \quad (20)$$

Como as profundidades, e o peso específico para o solo serão sempre os mesmos,

$$k_\delta = i k_p \quad (21)$$

Como F_δ foi encontrado empiricamente, da Equação (16), tira-se:

$$i = \frac{F_\delta}{E_p} \quad \text{[kN]} \quad (22)$$

Portanto:

$$k_\delta = \frac{F_\delta}{E_p} k_p \quad \text{[kN]} \quad (23)$$

Para definir as cargas no tirante, basta observar a deformação na cortina à profundidade onde há a ligação entre os dois elementos. Assim, pela teoria de elasticidade,

$$\tau = E\varepsilon \quad \text{[kPa]} \quad (24)$$

Esta formulação pode, ainda, ser escrita da seguinte forma:

$$\frac{F}{A} = E \frac{\delta}{l_0} \quad \text{[kPa]} \quad (25)$$

Em que:

- F é a carga no tirante, em *kN*, a qual se deseja determinar;
- A é a área da seção transversal do tirante, em m^2;
- E é o módulo de elasticidade do aço, em MPa;
- δ é o deslocamento restringido pelo tirante; e
- l_0 é o comprimento original do tirante.

Assim, é possível definir a força F:

$$F = \frac{AE\delta}{l_0} \qquad [kN] \qquad (26)$$

Por fim, com os valores conhecidos de A, E e l_0, tem-se

$$F_{T_1} = 28{,}75\delta \qquad [kN] \qquad (27)$$

$$F_{T_2} = 30{,}96\delta \qquad [kN] \qquad (28)$$

para δ em milímetros.

6.3 Resultados e Análises

6.3.1 Tensões e Forças Aplicadas

Com as formulações definidas na seção anterior (Equações (1) a (15)), as tensões horizontais, de empuxo ativo e de empuxo passivo foram estabelecidas, bem como suas forças correspondentes, para cada profundidade. Os resultados foram organizados na

Tabela 4. Os valores dos coeficientes de empuxo que proporcionaram estes cálculos podem ser visualizados na Tabela 3.

Tabela 3 – Coeficientes de Empuxo

	Calculado	Tabelado	Adotado
k_a	0,42	0,40 – 0,80	0,45
k_0'	0,59	0,50 – 0,70	0,60
k_p	2,36	1,20 – 3,40	2,35

Tabela 4 – Tensões e Forças Horizontais aplicadas à Cortina

Z (m)	**γ_n** (kN/m³)	**σ_h'** (kPa)	**F_h'** (kN)	**Pa** (kPa)	**Ea** (kN)	**Pp** (kPa)	**Ep** (kN)	**0,30*Ep** (kN)	**0,55*Ep** (kN)	**0,80*Ep** (kN)
0,00	19,10	0,0	0,4	0,0	0,3	0,0	1,4	0,4	0,8	1,1
0,25	19,10	2,9	1,4	2,1	1,1	11,2	5,6			
0,50	19,10	5,7	2,9	4,3	2,1	22,4	11,2	3,4	6,2	9,0
0,75	19,10	8,6	4,3	6,4	3,2	33,7	16,8			
1,00	19,10	11,5	5,7	8,6	4,3	44,9	22,4	6,7	12,3	18,0
1,25	19,10	14,3	7,2	10,7	5,4	56,1	28,1			
1,50	19,10	17,2	8,6	12,9	6,4	67,3	33,7	10,1	18,5	26,9
1,75	19,10	20,1	10,0	15,0	7,5	78,5	39,3			
2,00	19,10	22,9	11,5	17,2	8,6	89,8	44,9	13,5	24,7	35,9
2,25	19,10	25,8	12,9	19,3	9,7	101,0	50,5			
2,50	19,10	28,7	14,3	21,5	10,7	112,2	56,1	16,8	30,9	44,9
2,75	19,10	31,5	15,8	23,6	11,8	123,4	61,7			
3,00	19,10	34,4	17,2	25,8	12,9	134,7	67,3	20,2	37,0	53,9

Z (m)	**γ_n** (kN/m³)	**σ_h'** (kPa)	**F_h'** (kN)	**Pa** (kPa)	**Ea** (kN)	**Pp** (kPa)	**Ep** (kN)	**0,30*Ep** (kN)	**0,55*Ep** (kN)	**0,80*Ep** (kN)
3,25	19,10	37,2	18,6	27,9	14,0	145,9	72,9			
3,50	19,10	40,1	20,1	30,1	15,0	157,1	78,5	23,6	43,2	62,8
3,75	19,10	43,0	21,5	32,2	16,1	168,3	84,2			
4,00	19,10	45,8	22,9	34,4	17,2	179,5	89,8	26,9	49,4	71,8
4,25	19,10	48,7	24,4	36,5	18,3	190,8	95,4			
4,50	19,10	51,6	25,8	38,7	19,3	202,0	101,0	30,3	55,5	80,8
4,75	19,10	54,4	27,2	40,8	20,4	213,2	106,6			
5,00	19,10	57,3	28,7	43,0	21,5	224,4	112,2	33,7	61,7	89,8
5,25	19,10	60,2	30,1	45,1	22,6	235,6	117,8			
5,50	19,10	63,0	31,5	47,3	23,6	246,9	123,4	37,0	67,9	98,7
5,75	19,10	65,9	32,9	49,4	24,7	258,1	129,0			
6,00	19,10	68,8	34,4	51,6	25,8	269,3	134,7	40,4	74,1	107,7
6,25	19,10	71,6	35,8	53,7	26,9	280,5	140,3			
6,50	19,10	74,5	37,2	55,9	27,9	291,8	145,9	43,8	80,2	116,7
6,75	19,10	77,4	38,7	58,0	29,0	303,0	151,5			
7,00	19,10	80,2	40,1	60,2	30,1	314,2	157,1	47,1	86,4	125,7
7,25	19,10	83,1	41,5	62,3	31,2	325,4	162,7			
7,50	19,10	86,0	43,0	64,5	32,2	336,6	168,3	50,5	92,6	134,7
7,75	19,10	88,8	44,4	66,6	33,3	347,9	173,9			
8,00	19,10	91,7	45,8	68,8	34,4	359,1	179,5	53,9	98,7	143,6
8,25	19,10	94,5	47,3	70,9	35,5	370,3	185,2			
8,50	19,10	97,4	48,7	73,1	36,5	381,5	190,8	57,2	104,9	152,6
8,75	19,10	100,3	50,1	75,2	37,6	392,7	196,4			
9,00	19,10	103,1	51,6	77,4	38,7	404,0	202,0	60,6	111,1	161,6
9,25	19,10	106,0	53,0	79,5	39,8	415,2	207,6			
9,50	19,10	108,9	54,4	81,7	40,8	426,4	213,2	64,0	117,3	170,6
9,75	19,10	111,7	55,9	83,8	41,9	437,6	218,8			
10,00	19,10	114,6	57,3	86,0	43,0	448,9	224,4	67,3	123,4	179,5
10,25	19,10	117,5	58,7	88,1	44,0	460,1	230,0			
10,50	19,10	120,3	60,2	90,2	45,1	471,3	235,6	70,7	129,6	188,5
10,75	19,10	123,2	61,6	92,4	46,2	482,5	241,3			
11,00	19,10	126,1	63,0	94,5	47,3	493,7	246,9	74,1	135,8	197,5
11,25	19,10	128,9	64,5	96,7	48,3	505,0	252,5			
11,50	19,10	131,8	65,9	98,8	49,4	516,2	258,1	77,4	141,9	206,5
11,75	19,10	134,7		101,0		527,4				

6.3.2 Escolha do Modelo de Implementação

Das forças obtidas, usaram-se, a princípio, apenas os valores do empuxo ativo, e, em alguns casos, do empuxo passivo, os quais foram aplicados nos modelos propostos. As deformações obtidas podem ser visualizadas nos APÊNDICE C e

APÊNDICE D, bem como seus respectivos valores numéricos (APÊNDICE E), para as profundidades de 0,00m, 2,50m, 5,50m, 9,00m, 10,00m, 11,00m e 11,50m.

Observando as deformações dos casos com apoios móveis, vê-se que, em todos eles, a rigidez adotada para o solo, em associação com as demais características dos sistemas, não é suficiente para apenas associar a deformação da barra à da cortina, fazendo com que o solo todo seja transladado, isto é, arrastado pelo movimento do muro. Trazendo isto para a realidade, este modelo de deformação poderia ser interpretado como a abertura de uma fenda ao longo de toda a profundidade na qual se considerou as barras. Tal fenômeno não é representativo, visto que o solo acomoda seu volume de massa ao novo volume disponível à medida que o muro se deforma.

Além disso, como mostrado na Tabela, as deformações na superfície chegam a ter, em todos os casos, valores negativos, divergindo grandemente do comportamento esperado (ver Figura 32), que possui deformações positivas ao longo de toda extensão da cortina. Sendo assim, os 15 modelos representados pelo apoio móvel nas barras de solo foram descartados, sendo todos os comentários, deste ponto em diante, referentes aos modelos de apoios unicamente fixos.

Os modelos nos quais se apoiaram fixamente as barras de solo apresentaram o comportamento esperado, no sentido de não se deslocarem. O fato de elas se deformarem acompanhando o muro desta forma retrata justamente o que se deseja simular, que é, como dito acima, a adaptação do solo ao novo espaço decorrente do movimento do muro.

Destes 15 modelos restantes, é possível, de início, descartar os modelos *2a* e *5a*, uma vez que não geraram deformação de nenhuma espécie. Isto é facilmente compreendido, pois se trata de casos com aplicações de força em nós com movimentos restritos na direção *x* e na direção *y*. Desta forma, independente da intensidade de força que se aplique sobre estes pontos, a deformação será sempre nula. Esta mesma observação pode, ainda, ser feita para os casos *1a*, *3a* e *4a*, que têm deformações idênticas às dos casos *1c*, *3c* e *4c*, respectivamente, confirmando que a aplicação de forças sobre os nós fixos é irrelevante para a deformação.

Ainda, comparando as deformações do *Modelo 2* às do *Modelo 1*, pode-se notar que o posicionamento das barras no trecho entre 0,00m e 9,00m de profundidade estão apenas restringindo a deformação da cortina. Fisicamente falando, o Modelo *2* está simulando uma situação na qual o solo, de alguma forma, segura o muro, ajudando na estabilidade da contenção. A mesma comparação pode ser feita entre os *Modelos 3* e *5*.

Quanto aos *Modelos 1* e *3*, por sua vez, considerou-se que, conceitualmente, não é representativo que o muro de contenção aja como se puxando o solo (tração nas barras adjacentes), pois, ao contrário, o solo é que causa a deformação na cortina.

Quer-se dizer aqui, então, que o solo não restringe o movimento da cortina, tampouco a cortina traciona o solo para acompannhar seu movimento. Portanto, o modelo escolhido não deve possuir barras no lado interno da contenção, sendo os *Modelos 1*, *2*, *3* e *5* descartados.

Restam, então, os *Modelos 4b* e *4c*, que são, numericamente, muito semelhantes. Entendendo, porém, que o solo agirá apenas ou respondendo às deformações do muro, ou agindo em prol destas deformações, o solo deve ser representado como uma barra ou como uma força. Assim, exclui-se o modelo *4b,* para cada profundidade.

O modelo *4c*, eleito para as implementações, traz barras representativas de solo no lado escavado da contenção, à altura da ficha, a serem comprimidas com o movimento do muro; e forças atuantes ao longo da cortina, até a profundidade de 8,50m.

6.3.3 Deformações na Cortina

Como mencionado anteriormente, implementou-se a aplicação das forças (

Tabela 4) à cortina, conforme as condições explicitadas na Tabela 2. As deformações observadas podem ser encontradas nos APÊNDICE F a APÊNDICE W.

Fazendo uma análise qualitativa, é interessante observar que as deformações, para todos os casos, seguem o formato instrumentado (Figura 32) até a quarta etapa de execução da cortina, sendo o comportamento das deformações mais acentuado em alguns casos, e suavizado em outros. Um exemplo genérico é apresentado a seguir.

A primeira escavação, que faz surgir as primeiras forças no trecho de 0,00m – 3,00m produz um leve arqueamento da porção superior da cortina (Figura 40). A realização da primeira linha de tirantes, a 2,50m, reduz parte destas deformações (Figura 41). A terceira etapa (segunda escavação) proporciona aumento das deformações, sendo que se percebe nitidamente a influência do tirante no sentido de contê-las (Figura 42). A seguir, a instalação da segunda linha de tirantes, mais uma vez, limita as deformações (Figura 43), gerando o comportamento esperado (Figura 32).

Quando se realiza a terceira escavação (Figura 44), porém, ocorre um grande retorno da deformação em direção à condição inicial, estática, mudando completamente o gráfico de deformações ao longo da cortina.

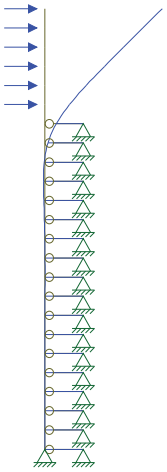


Figura 40 – Deformações após Fase 1 da Execução da Cortina: Escavação Inicial
(Autoria Própria)

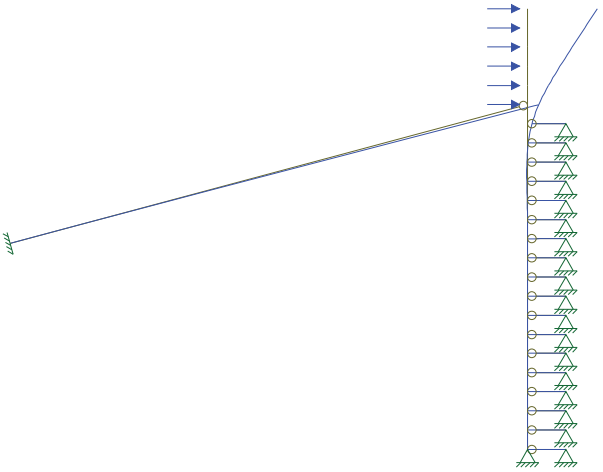


Figura 41 – Deformações após Fase 2 da Execução da Cortina: Atirantamento (Z = 2,50m)
(Autoria Própria)

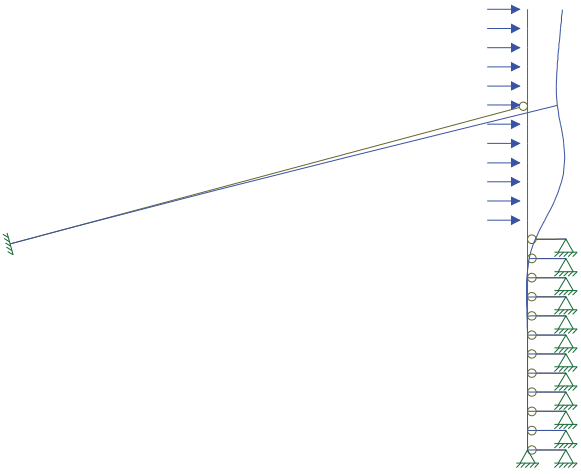


Figura 42 – Deformações após Fase 3 da Execução da Cortina: Escavação Secundária
(Autoria Própria)

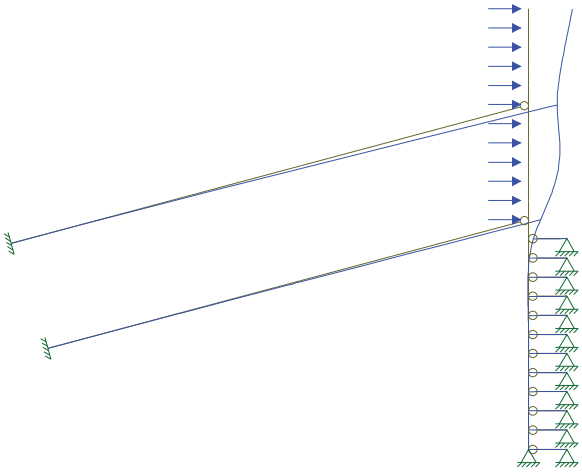


Figura 43 – Deformações após Fase 4 da Execução da Cortina: Atirantamento (Z = 5,50m)
(Autoria Própria)

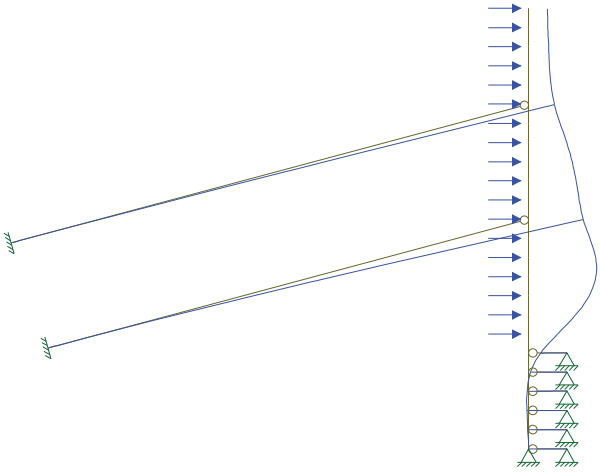


Figura 44 – Deformações após Fase 5 da Execução da Cortina: Escavação Final
(Autoria Própria)

Este fenômeno pode ser explicado porque, ao tirar, pela escavação, o solo das profundidades de 6,00 a 9,00m, o modelo perde as barras de solo relativas a estas profundidades, e lhe são adicionadas forças atuando no sentido de deformar mais o muro. Esta nova situação solicita maior carga reativa dos tirantes, ou seja, aumenta a força resistiva do sistema nos pontos de 2,50 e 5,50m. Estas forças, porém, não agem apenas nestes pontos, tendo influência sobre a deformação de toda a cortina. Assim, as forças reativas decorrentes do aumento de tensão no trecho especificado são as responsáveis pela mudança de comportamento no gráfico de deformação da cortina.

É importante ressaltar que, para cada etapa, o programa calcula as deformações a partir da condição inicial, ou seja, do muro reto, sem deformações. Desta forma, os valores de

deformação encontrados ao final da simulação de cada etapa não representam os deslocamentos *a mais* entre uma etapa e outra, mas sim as deformações totais até aquele ponto de execução. Portanto, a soma destes gráficos não pode ser usada para retratar as reais deformações na cortina.

Os resultados da simulação das cortinas sob ação das forças, e sem a ação resistiva dos tirantes, podem ser visualizados nas mesmas tabelas dos APÊNDICES mencionados acima (colunas "Livre"), os quais mostram deformações excessivas, evidenciando, se comparados aos casos atirantados, a força dos tirantes sobre o muro. Estas deformações exageradas ilustram que a contenção teria se rompido sem os tirantes.

Comparando-se as tabelas dos APÊNDICE F ao APÊNDICE W, é possível verificar que as deformações na cortina, para mesmas cargas aplicadas, são, em geral, mais expressivas nas paredes de espessuras menores. Isto acontece porque a diminuição da seção da contenção acarreta na diminuição de sua rigidez, tornando-a mais vulnerável às ações das forças. Os poucos casos em que ocorre a inversão, ou seja, as deformações são maiores quando a cortina é mais espessa, são vistos nas primeiras profundidades, até a altura do primeiro tirante, e podem ser explicados pelo mesmo pensamento descrito anteriormente: a maior tendência de deformação solicita mais os tirantes, que responderão com maior força resistiva, de influência em toda a cortina, restringindo as deformações superiores.

Comparando, também, as deformações geradas para cada empuxo, é notável que quanto maior a força aplicada, maior a deformação. Como

$$k_a < k_0' < 0{,}30k_p = 0{,}70 < 0{,}55k_p = 1{,}30 < 0{,}80k_p = 1{,}88 < k_p$$

para todas as profundidades,

$$\delta_{E_a} < \delta_{F_h} < \delta_{0{,}30E_p} < \delta_{0{,}55E_p} < \delta_{0{,}80E_p} < \delta_{E_p}$$

Isto posto, chega-se à simulação principal do trabalho, que determina as forças que causariam as deformação instrumentadas. Após diversos testes, chegou-se a uma condição aproximada para um caso em que a espessura do muro é de 15 cm. Este caso foi tomado como exemplo para dar seguimento ao estudo, o qual é apresentado na Tabela 5, podendo ser visualizado na Figura 45. Destaque-se, aqui, que para que surgisse deformações na altura da ficha, foram necessárias alterações nos módulos *E* dos solos, sendo aplicados valores correspondentes a 0,5N, e não 2,0N, como inicialmente.

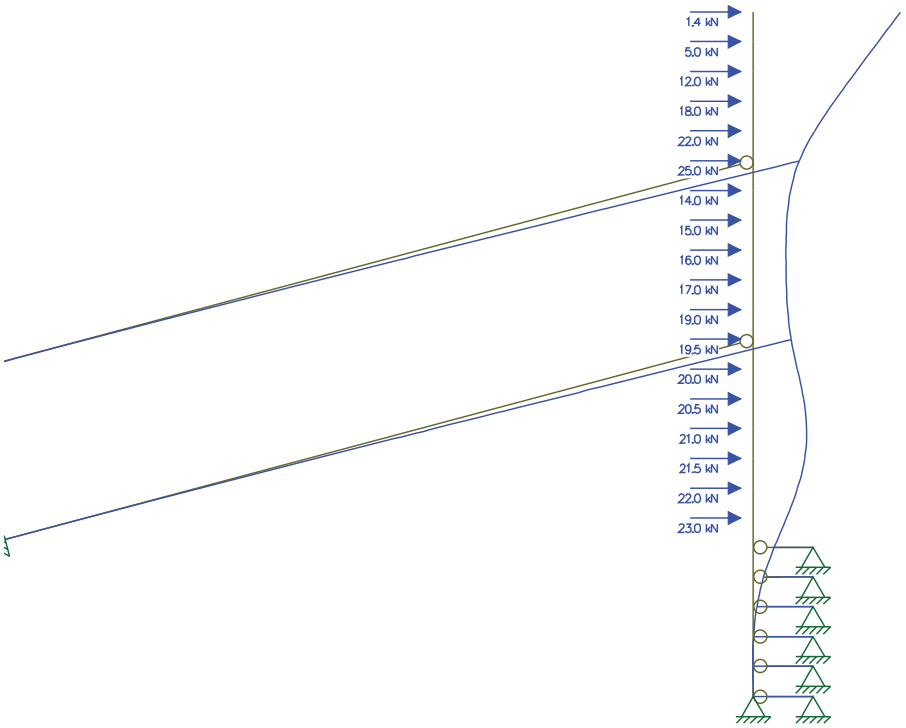


Figura 45 – Deformações na Cortina-Exemplo
(Autoria Própria)

Se comparado o gráfico de deformações da Figura 45 ao da Figura 32, é possível atestar a representatividade do modelo proposto, pois ambos apresentam o mesmo comportamento. Vê-se, também, que o solo se mobiliza em níveis mais altos que do empuxo ativo na superfície, até a profundidade de 2,50m, mostrando que, então, que não ocorre apenas o fenômeno de o solo empurrar o muro, mas, também, do muro empurrando o solo, movimento este que acontece pela ação dos tirantes.

Para estas deformações, pelas equações definidoras da carga nos tirantes (Equações (27) e (28)), Tem-se:

$$T_1 = 140\ kN$$

$$T_2 = 127\ kN$$

Tabela 5 – Valores de k_δ para a Cortina-Exemplo

Z	δ_{inst}	δ	F_δ	E_p	k_δ	i
(m)	(mm)	(mm)	(kN)	(kN)	-	-
0,00	14,5	15,9	1,4	1,4	2,35	1,00
0,50	13,1	13,5	5,0	11,2	1,05	0,45
1,00	11,6	11,1	12,0	22,4	1,26	0,53
1,50	9,6	8,7	18,0	33,7	1,26	0,53
2,00	7,7	6,6	22,0	44,9	1,15	0,49
2,50	6,2	4,9	25,0	56,1	1,05	0,45
3,00	4,6	4,0	14,0	67,3	0,49	0,21
3,50	3,9	3,6	15,0	78,5	0,45	0,19
4,00	3,1	3,5	16,0	89,8	0,42	0,18
4,50	2,8	3,6	17,0	101,0	0,40	0,17
5,00	2,5	3,7	19,0	112,2	0,40	0,17
5,50	2,2	4,1	19,5	123,4	0,37	0,16
6,00	2,2	4,8	20,0	134,7	0,35	0,15
6,50	2,6	5,4	50,5	145,9	0,81	0,35
7,00	3,2	5,7	21,0	157,1	0,31	0,13
7,50	3,8	5,5	21,5	168,3	0,30	0,13
8,00	4,1	4,8	22,0	179,5	0,29	0,12
8,50	3,5	3,6	23,0	190,8	0,28	0,12
9,00	3,1	2,3	-	-	-	-
9,50	2,6	1,2	-	-	-	-
10,00	2,3	0,4	-	-	-	-
10,50	1,3	0,0	-	-	-	-
11,00	0,6	0,0	-	-	-	-
11,50	0,1	0,0	-	-	-	-

7 CONCLUSÃO

O presente trabalho mostrou que o solo da formação Guabirotuba pode agir sobre uma cortina com forças de intensidades maiores que as intensidades teóricas definidas pela teoria de empuxo ativo, mobilizando-se de forma a atingir valores de até $1{,}0k_p$. Isto se explica por se tratar de um solo expansivo.

Também, mostrou que a rigidez de uma cortina é influenciada diretamente por sua geometria, verificando-se que, quando submetidas às mesmas ações, menores espessuras acarretam em maiores deformações, significando que são menos rígidas. Cabe salientar que a rigidez, propriamente, do material adotado é representada pelo módulo de elasticidade, E, sendo mais rígido quanto maior for seu valor.

Outrossim, acompanhou-se a evolução das deformações de uma cortina à medida é construída, verificando o seu comportamento sob ação de cargas de variadas intensidades. Para cargas de maior intensidade, aplicadas a um mesmo ponto, maiores são as deformações. Além disto, foi possível verificar a ação dos tirantes em associação à cortina, tornando nítida a sua atuação passiva, que apenas responde, em sentido contrário, às solicitações ocasionadas pelos empuxos, sem gerar qualquer esforço extra.

Comprovou-se a teoria de arqueamento de Terzaghi quando maiores deformações surgiram sob ação de forças de menor intensidade.

Ainda, para o exemplo simulado, calculou-se a carga de solicitação nos tirantes, as quais são, para a primeira linha de tirantes, no valor de 140kN, e, para a segunda linha, 127kN.

Por fim, provou-se que é possível prever deformações de uma cortina atirantada fazendo uso do *software* FTool. Apesar de os valores de deformação obtidos da simulação não corresponderem exatamente às instrumentações realizadas no caso real, o modelo desenvolvido representou muito bem o comportamento que se esperava. As diferenças existentes justificam-se pela incerteza de quais forças, de fato, estavam sendo aplicadas em cada ponto, além das aproximações e adoções realizadas.

Portanto, quando pretender-se projetar uma cortina atirantada pela metodologia proposta nestre trabalho, bastar-se-á conhecer os parâmetros que o programa exige como valores de entrada, a saber, a seção transversal da cortina (ou seção representativa equivalente) e dos outros elementos, módulo de elasticidade, coeficiente de Poisson, e esforços atuantes.

As maiores dificuldades estão relacionadas à determinação da rigidez relativa para estruturas de contenção mistas, no caso, perfil metálico e estroncas de madeira; e a determinação do módulo de elasticidade do solo (rigidez), a ser definida para o elemento de barra simulando o solo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1 ABMS; ABEF. **Fundações:** Teoria e Prática. 2ª. ed. São Paulo: Pini, 1998.

2 AMARAL, A. B., *et al*. **FTOOL**: Aplicação de Conceitos de Mecânica de Estruturas. Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2010.

3 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5629**: Execução de tirantes ancorados no terreno. Rio de Janeiro, 1996.

4 BOWLES, J. E. **Foundation analysis and design**. New York: Mcgraw-Hill. 1982.

5 FELIPE, R. S. **Características Geológico-Geotécnicas na Formação Guabirotuba**. 1ª. ed. Curitiba: MINEROPAR, 2011.

6 FERNÁNDEZ, S. P. E. **Efeitos de Arqueamento em Aterros sobre Solo Estaqueado**. 136 f. Dissertação de Mestrado. Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília. Brasília, 2006.

7 FTOOL - Two-dimensional Frame Analysis Tool. Rio de Janeiro, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Disponível em: http://www.tecgraf.puc-rio.br/ftool/. Acesso em: 31 ago. 2012.

8 FIAMONCINI, C. M. **Estabilização de Taludes Através da Técnica de Cortina Atirantada – Estudo de Caso.** 110 f. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade do Extremo Sul Catarinense. Criciúma, 2009.

9 FORMIGHERI, L. E. **Comportamento de um Aterro Sobre Argila Mole da Baixada Fluminense**. 203 f. Dissertação de Mestrado. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2003.

10 GONÇALVES, C.; BERNARDES, G. D. P.; NEVES, L. F. D. S. **Estacas Pré-Fabricadas de Concreto**. 1ª. ed. Caçapava, v. II, 2012.

11 KORMANN, A. C. M. et al. Ensaios de Cisalhamento Direto em Argila Rija da Formação Guabirotuba: Influência da Velocidade de Deslocamento. In: ABMS; UFPR **Características Geotécnicas da Formação Guabirotuba**. Curitiba: 1999. p. 29-36.

12 MEDEIROS, A. G. B.; CUNHA, R. P.; SILVA, C. M. **Utilização da Instrumentação no Topo das Estacas em Estruturas de Contenção Grampeadas no DF**. In: SIMPÓSIO SOBRE SOLOS TROPICAIS E PROCESSOS EROSIVOS NO CENTRO-OESTE/NORTE, 3, 2007, Cuiabá. Anais Eletrônicos... Cuiabá, 2007. 1 CD-ROOM.

13 MENDES, F. B. **O uso de Ferramenta Computacional na Avaliação e Dimensionamento de Cortina Atirantada**. 148 f. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, 2010.

14 MOTA, R. J.; VARGAS, C. A. L.; SALES, M. M. **Análise da Interação Solo-Estrutura em uma Obra de Contenção na Cidade de Goiânia**. In: SIMPÓSIO SOBRE SOLOS TROPICAIS E PROCESSOS EROSIVOS NO CENTRO-OESTE/NORTE, 3, 2007, Cuiabá. Anais Eletrônicos... Cuiabá, 2007. 1 CD-ROOM.

15 OLIVEIRA, A. L. C. **Análise do comportamento de vigas mistas de madeira laminada colada e concreto.** Universidade Federal de Minas Gerais.

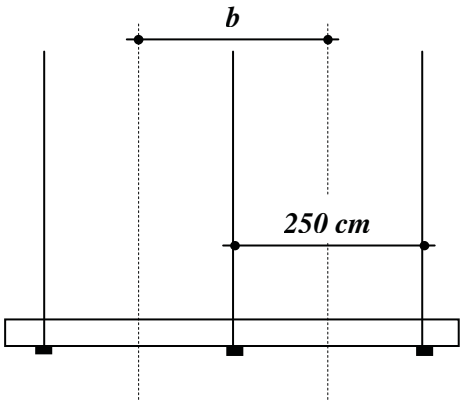
16 SOUZA, R. A.; REIS, J. H. C. **Interação solo-estrutura para edifícios sobre fundações rasas**. Universidade Estadual de Maringá. Maringá, 2008.

APÊNDICES

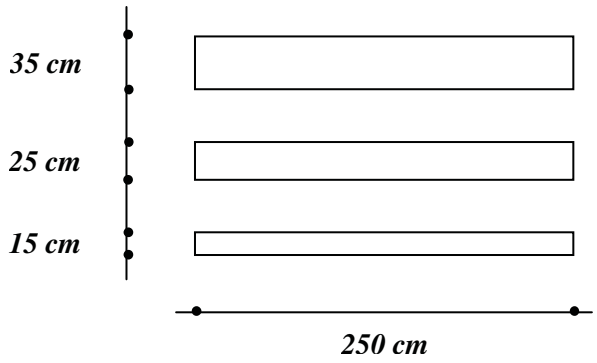
APÊNDICE A – Definição dos Parâmetros de Entrada da Cortina no *FTool*

- Seção Transversal:

A cortina projetada para conter o muro é composta de perfis I metálicos de aço, e por madeira. Por não ser possível adotar uma seção conjugada para o a cortina no *FTool*, foi necessário procurar uma seção equivalente. Desta maneira, julgou-se favorável adotar uma seção regular simples, e, então, elegeu-se uma que fosse retangular. A base da seção foi adotada de 250cm, já que é este o espaçamento entre os tirantes.



Como o objetivo, nesta fase, era comparar o comportamento das deformações ao longo da cortina nos modelos propostos, adotou-se a espessura de 25cm. Nas implementações posteriores (após definido o modelo adotado), já que não era possível determinar, ao certo, qual a espessura do muro, por se tratar do desenvolvimento de um modelo, foram adotadas três espessuras diferentes para simular a cortina, e avaliar qual era mais representativa. Assim, as seções testadas foram:



- Módulo de Elasticidade:

Considerando que o aço e a madeira são materiais bem distintos, foi necessário, mais uma vez, achar uma equivalência entre estes dois materiais, desta vez quanto ao módulo de elasticidade, *E* (MPa). O valor de *E*, para o aço, é de 205 GPa, enquanto que para a madeira este valor é drasticamente menor, podendo variar entre 11 e 20 MPa,

sendo considerado o valor médio de 16 MPa. Supondo um comprimento de mesa para o perfil I de 30cm, fez-se a média ponderada em relação ao comprimento da seção (2,50m), encontrando-se o módulo de elasticidade da cortina, E_c:

$$E_c = \frac{205000 * 0{,}30 + 16 * 2{,}20}{2{,}50} = 24{,}6 \cong 25\ MPa$$

Sabe-se que a rigidez de um perfil I deve ser menor que de uma seção retangular no mesmo material. Por isso, o comprimento de mesa adotado, de 30cm, poderia ser menor, conduzindo a um valor de *Ec* também menor, ou seja, diminuindo a rigidez média da cortina. Porém, avaliando que as instrumentações são feitas na parte metálica da cortina, ou seja, em sua parte mais rígida, avaliou-se que um fator compensaria o outro, sendo, então, adotado o valor de 25 MPa, conforme calculado.

- Coeficiente de Poisson

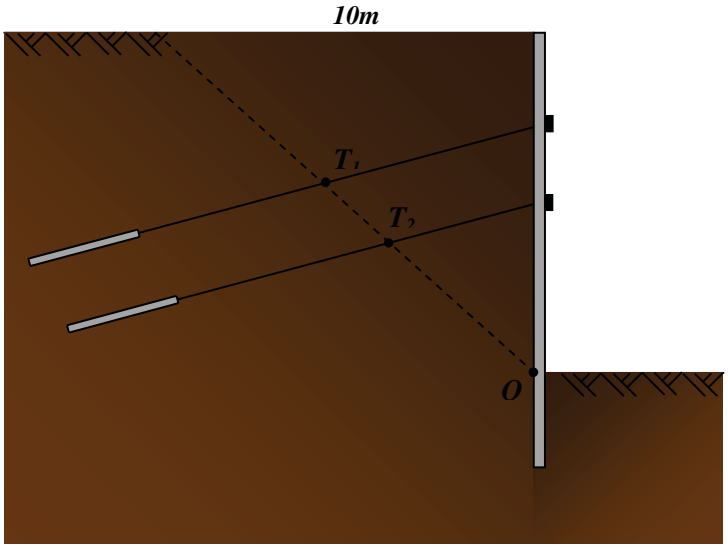
O coeficiente de Poisson, relação entre as deformações transversal e longitudinal, representado por *v*, costuma estar compreendido entre a faixa de 0,25 a 0,30 para elementos metálicos. Na madeira, este range vai de 0,05 até 0,80, conforme dureza e umidade da peça. O valor médio adotado para a cortina foi o de 0,30, tendo-se, ainda, constatado que variações de 0,1 neste índice, para mais ou para menos, geraram variações insignificantes nas deformações da cortina, na ordem de centésimos de milímetro.

APÊNDICE B – Cálculo dos Comprimentos e Posicionamentos dos Tirantes

As informações quanto ao comprimento dos tirantes não estava disponível. Este parâmetro precisou ser, então, estimado.

Primeiramente, definiu-se a cunha de ruptura do solo, começando a 10m atrás do muro, para que os tirantes pudessem ser ancorados após esta linha, a fim de desempenhar corretamente sua função.

Colocando o esquema em um plano cartesiano, de origem O (0,0) na parte interna da cortina, à altura da linha de escavação, pode-se chegar, geometricamente, ao comprimento dos tirantes, ao definir-se equações de reta para a cunha e para os tirantes, os quais estão instalados, conforme mencionado, a 15º de rotação do eixo horizontal.



Seja a equação C, referente à cunha:

$$C: y = -0{,}9x$$

Seja a equação da primeira linha de tirantes, a 2,50m de profundidade, T_1:

$$T_1: y = tg\,(15°)x + 6{,}50$$

Seja a equação da segunda linha de tirantes, a 5,50m de profundidade, T_2:

$$T_2: y = tg\,(15°)x + 3{,}50$$

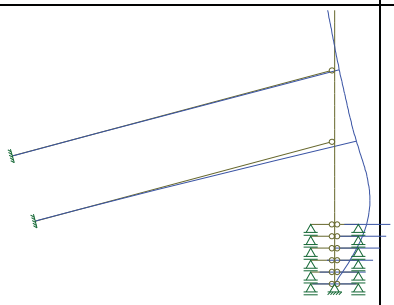
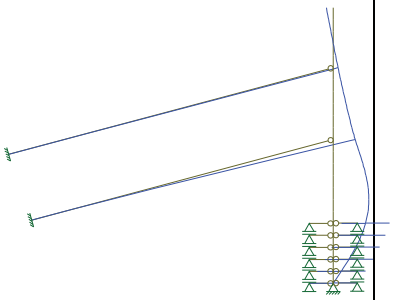
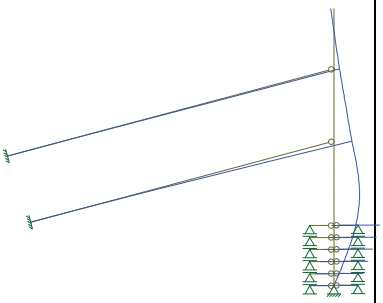
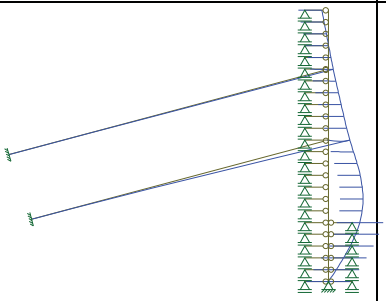
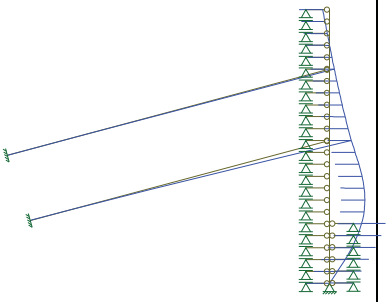
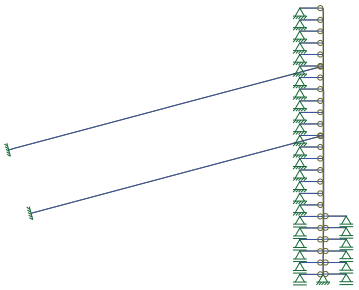
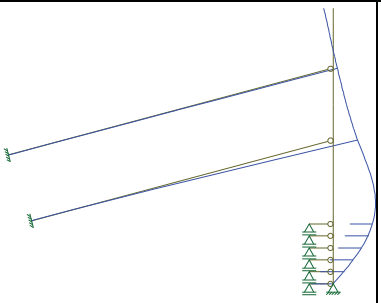
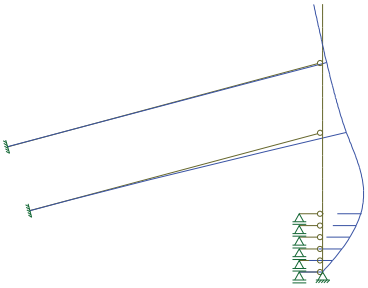
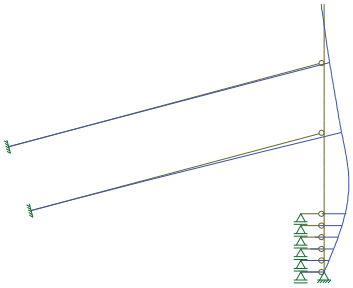
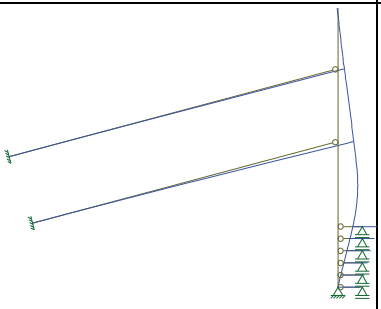
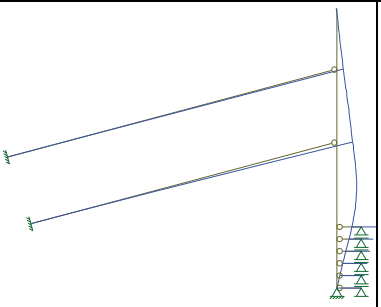
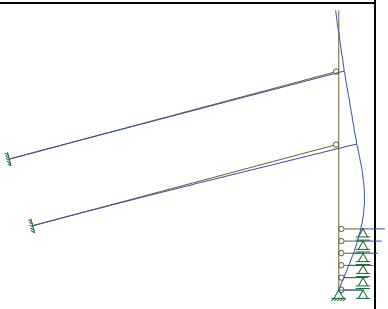
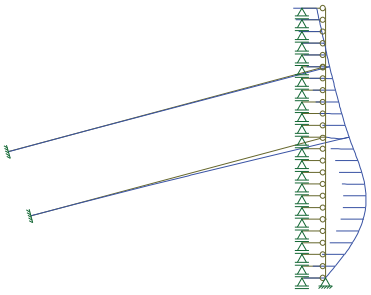
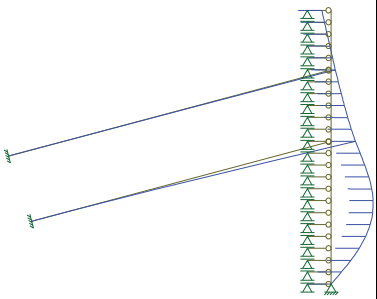
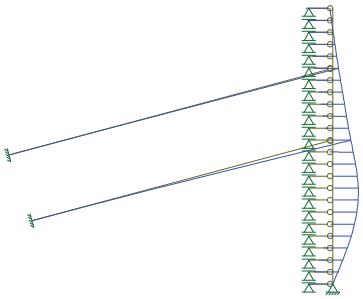
Igualando as equações C e T1, e C e T2, determina-se o ponto em que os tirantes cruzarão a linha da cunha, os quais são $T_1(-5{,}56\ ,\ 5{,}00)$ e $T_2(-3{,}00\ ,\ 2{,}70)$. Então, calcula-se a distância destes pontos até o início do tirante, na cortina, o que mostrará um comprimento de 5,76m para o primeiro tirante, e 3,10m para o segundo.

Para a primeira linha de tirantes, adotou-se, para o trecho livre efetivo, l_{le}, o comprimento de 5,00m, e, para o bulbo de ancoragem, 3,00m. Assim, o comprimento total do tirante deve ser de 13,76m. Como, porém, o fracionamento do comprimento dos tirantes é feito de metro em metro, adota-se 14,00m para esta linha.

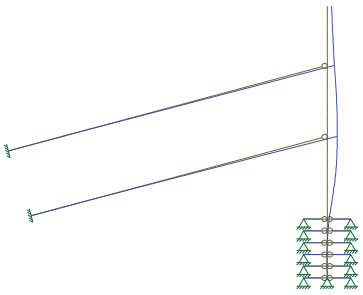
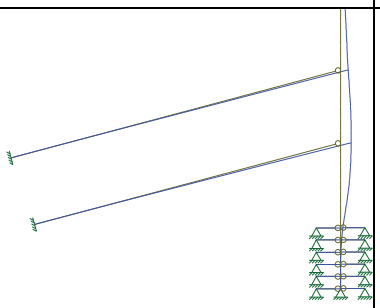
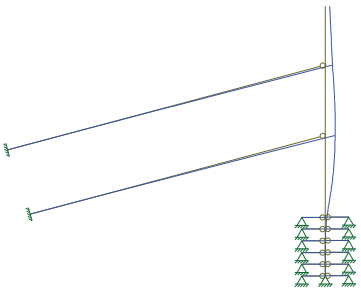
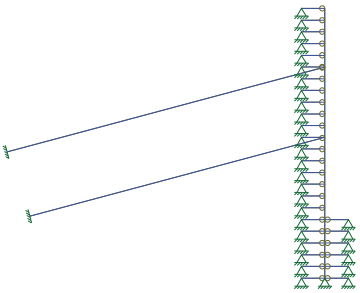
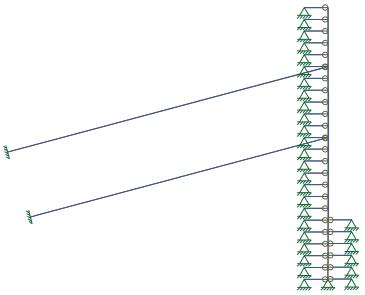
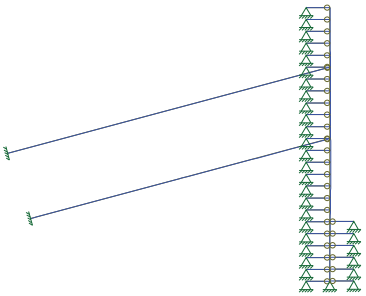
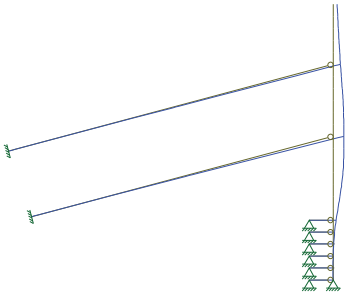
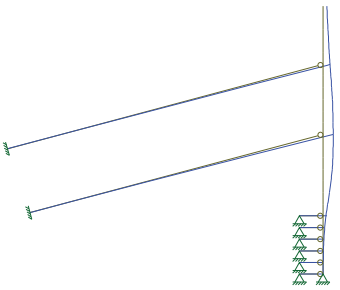
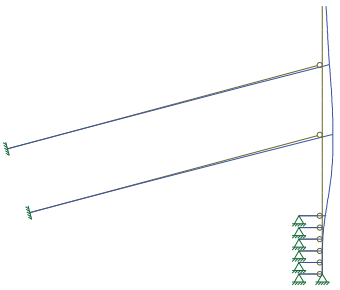
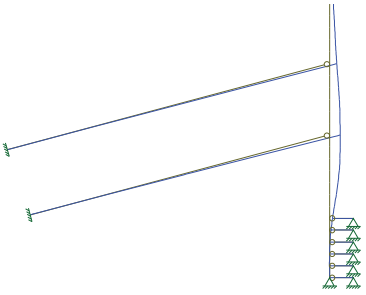
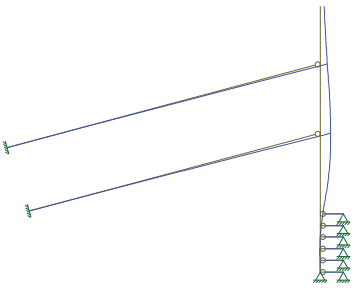
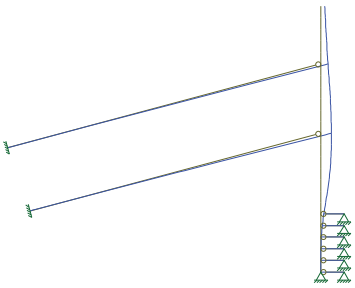
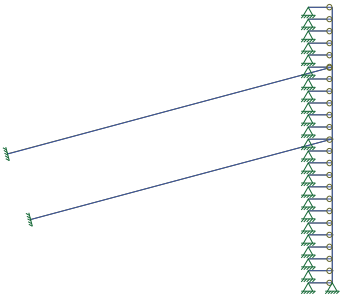
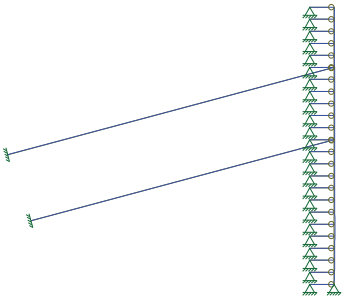
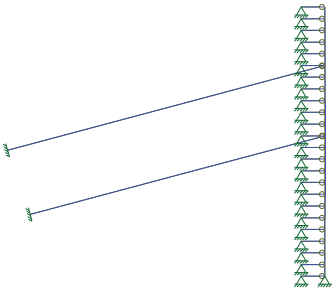
Para a segunda linha de tirantes, adotou-se, para o trecho livre efetivo, l_{le}, o comprimento de 5,50m, e, para o bulbo de ancoragem, 3,50m. Assim, o comprimento total do tirante deve ser de 12,10m. Seguindo a aproximação proposta acima, a segunda linha de tirantes ficou com 13,00m de comprimento.

Assim, com o comprimento total, e a angulação de instalação dos tirantes, é possível determinar as coordenadas de sua extreminada ancorada, necessários à criação da barra nos modelos estudados.

APÊNDICE C- Diagramas de Deformações para os Modelos propostos – Apoio Móvel

	a	b	c
1			
2			
3			
4			
5			

APÊNDICE D - Diagramas de Deformações para os Modelos propostos – Apoio Fixo

	a	b	c
1			
2			
3			
4			
5			

APÊNDICE E – Deformações na Cortina para os Modelos Propostos sob Ação do Empuxo Ativo

		Apoio Fixo			Apoio Móvel		
1	Z	δ_a	δ_b	δ_c	δ_a	δ_b	δ_c
	0,0	1,926	1,849	1,926	-2,890	-2,876	-1,274
	2,5	3,090	3,076	3,090	1,978	1,982	2,361
	5,5	4,186	4,249	4,186	9,151	9,136	7,485
	9,0	0,734	0,898	0,734	13,420	13,410	9,060
	10,0	0,000	0,093	0,000	9,349	9,368	6,066
	11,0	-0,057	-0,031	-0,057	3,345	3,397	2,153
	11,5	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
2	Z	δ_a	δ_b	δ_c	δ_a	δ_b	δ_c
	0,0	0,000	0,090	0,090	-2,789	-2,876	0,090
	2,5	0,000	0,179	0,179	2,073	1,982	0,179
	5,5	0,000	0,274	0,279	9,096	9,136	0,271
	9,0	0,000	0,210	0,105	13,240	13,410	0,274
	10,0	0,000	0,097	0,008	9,227	9,368	0,184
	11,0	0,000	0,023	-0,006	3,302	3,397	0,066
	11,5	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
3	Z	δ_a	δ_b	δ_c	δ_a	δ_b	δ_c
	0,0	1,629	1,687	1,629	-3,890	-3,890	-1,274
	2,5	3,042	3,037	3,042	1,726	1,726	2,361
	5,5	4,489	4,415	4,489	10,170	10,170	7,485
	9,0	1,241	1,333	1,241	16,340	16,340	9,037
	10,0	0,203	0,436	0,203	11,710	11,710	6,031
	11,0	-0,028	0,110	-0,028	4,283	4,283	2,112
	11,5	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
4	Z	δ_a	δ_b	δ_c	δ_a	δ_b	δ_c
	0,0	1,638	1,655	1,638	-0,274	-0,265	-1,274
	2,5	3,043	3,054	3,043	2,613	2,615	2,361
	5,5	4,479	4,466	4,479	6,466	6,456	7,485
	9,0	1,240	1,104	1,240	6,121	6,117	9,037
	10,0	0,202	0,025	0,202	3,675	3,681	6,031
	11,0	-0,029	-0,133	-0,029	1,174	1,190	2,112
	11,5	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
5	Z	δ_a	δ_b	δ_c	δ_a	δ_b	δ_c
	0,0	0,000	0,090	0,090	-3,767	-3,890	-1,274
	2,5	0,000	0,180	0,179	1,843	1,726	2,361
	5,5	0,000	0,270	0,278	10,100	10,170	7,485
	9,0	0,000	0,366	0,125	16,120	16,340	9,037
	10,0	0,000	0,337	0,023	11,560	11,710	6,031
	11,0	0,000	0,155	-0,002	4,230	4,283	2,112
	11,5	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000

APÊNDICE F – Deformações da Cortina sob ação do Empuxo Ativo

		Empuxo Ativo – e = 15cm					
Z (m)	**δ_{inst}**	**Esc. 1**	**Tirante 1**	**Esc. 2**	**Tirante 2**	**Esc. 3**	**Livre**
0,00	0,0	11,7	6,9	3,4	4,4	2,0	1356,0
0,50	13,1	9,8	5,7	3,3	4,0	2,0	1269,0
1,00	11,6	7,9	4,5	3,1	3,6	2,1	1181,0
1,50	9,6	6,0	3,2	3,0	3,3	2,1	1093,0
2,00	7,7	4,1	2,1	2,9	3,0	2,3	1005,0
2,50	6,2	2,5	1,1	3,0	2,8	2,6	917,7
3,00	4,6	1,1	0,4	3,3	3,0	3,1	830,5
3,50	3,9	0,3	0,1	3,6	3,1	3,7	743,8
4,00	3,1	0,1	-0,1	3,6	3,0	4,3	658,1
4,50	2,8	0,0	-0,1	3,3	2,6	4,7	573,6
5,00	2,5	0,0	-0,1	2,6	2,0	5,0	491,0
5,50	2,2	0,0	0,0	1,7	1,2	5,4	411,0
6,00	2,2	0,0	0,0	0,7	0,5	6,2	334,1
6,50	2,6	0,0	0,0	0,2	0,1	6,9	262,2
7,00	3,2	0,0	0,0	-0,1	-0,1	7,0	195,5
7,50	3,8	0,0	0,0	-0,1	-0,1	6,4	135,9
8,00	4,1	0,0	0,0	-0,1	0,0	5,1	84,9
8,50	3,5	0,0	0,0	0,0	0,0	3,4	44,3
9,00	3,1	0,0	0,0	0,0	0,0	1,7	16,6
9,50	2,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,5	1,9
10,00	2,3	0,0	0,0	0,0	0,0	-0,1	-2,8
10,50	1,3	0,0	0,0	0,0	0,0	-0,2	-2,7
11,00	0,6	0,0	0,0	0,0	0,0	-0,1	-1,4
11,50	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Obs.: Todos os valores apresentados na tabela estão em milímetros, exceto onde indicado.

APÊNDICE G - Deformações da Cortina sob ação das Forças Horizontais

		Forças Horizontais – e = 15cm					
Z (m)	**δ_{inst}**	**Esc. 1**	**Tirante 1**	**Esc. 2**	**Tirante 2**	**Esc. 3**	**Livre**
0,00	0,0	15,7	13,5	-29,9	4,6	4,0	12590,0
0,50	13,1	13,1	11,1	-23,0	4,4	3,5	12000,0
1,00	11,6	10,5	8,6	-16,0	4,1	3,1	11410,0
1,50	9,6	8,0	6,2	-9,0	3,9	2,7	10820,0
2,00	7,7	5,5	3,9	-1,9	3,7	2,4	10230,0
2,50	6,2	3,3	1,9	5,4	3,8	2,3	9664,0
3,00	4,6	1,5	0,2	12,9	4,2	2,6	9055,0
3,50	3,9	0,4	-1,2	20,3	4,7	3,2	8466,0
4,00	3,1	0,1	-2,1	26,7	4,9	4,1	7897,0
4,50	2,8	0,0	-2,8	31,9	4,6	5,5	7294,0
5,00	2,5	0,0	-3,3	35,4	3,9	7,6	6711,0
5,50	2,2	0,0	-3,5	37,3	3,1	11,0	6131,0
6,00	2,2	0,0	-3,6	37,7	2,3	15,9	5556,0
6,50	2,6	0,0	-3,6	36,7	1,6	21,4	4987,0
7,00	3,2	0,0	-3,4	34,7	1,1	26,4	4426,0
7,50	3,8	0,0	-3,1	32,0	0,6	30,1	3874,0
8,00	4,1	0,0	-2,8	28,7	0,3	31,9	3333,0
8,50	3,5	0,0	-2,5	25,0	0,1	31,6	2806,0
9,00	3,1	0,0	-2,1	21,2	-0,3	29,4	2306,0
9,50	2,6	0,0	-1,7	17,1	-0,1	25,4	1815,0
10,00	2,3	0,0	-1,3	12,9	-0,1	20,2	1343,0
10,50	1,3	0,0	-0,9	8,6	-0,1	14,0	887,6
11,00	0,6	0,0	-0,4	4,4	-0,1	7,2	4449,0
11,50	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Obs.: Todos os valores apresentados na tabela estão em milímetros, exceto onde indicado.

APÊNDICE H - Deformações da Cortina sob ação de 30% do Empuxo Passivo

		30% de Empuxo Passivo – e = 15cm					
Z (m)	**δ_{inst}**	**Esc. 1**	**Tirante 1**	**Esc. 2**	**Tirante 2**	**Esc. 3**	**Livre**
0,00	0,0	18,4	10,9	5,5	6,9	3,1	1998,0
0,50	13,1	15,4	8,9	5,2	6,3	3,2	1866,0
1,00	11,6	12,3	7,0	4,9	5,7	3,3	1735,0
1,50	9,6	9,4	5,1	4,6	5,1	3,4	1604,0
2,00	7,7	6,5	3,3	4,5	4,7	3,6	1473,0
2,50	6,2	3,9	1,8	4,7	4,5	4,1	1343,0
3,00	4,6	1,8	0,7	5,2	4,7	5,0	1213,0
3,50	3,9	0,5	0,1	5,7	4,9	5,9	1083,0
4,00	3,1	-0,1	-0,1	5,8	4,8	6,8	955,4
4,50	2,8	-0,2	-0,1	5,3	4,2	7,3	829,6
5,00	2,5	-0,2	-0,1	4,2	3,1	7,7	706,7
5,50	2,2	-0,1	0,0	2,7	1,9	8,3	587,8
6,00	2,2	0,0	0,0	1,2	0,8	9,2	474,3
6,50	2,6	0,0	0,0	0,3	0,1	10,0	367,7
7,00	3,2	0,0	0,0	-0,1	-0,1	10,0	269,8
7,50	3,8	0,0	0,0	-0,2	-0,1	8,9	183,0
8,00	4,1	0,0	0,0	-0,1	-0,1	6,8	109,6
8,50	3,5	0,0	0,0	0,0	0,0	4,2	52,6
9,00	3,1	0,0	0,0	0,0	0,0	1,7	15,7
9,50	2,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,3	-1,3
10,00	2,3	0,0	0,0	0,0	0,0	-0,2	-4,9
10,50	1,3	0,0	0,0	0,0	0,0	-0,2	-3,5
11,00	0,6	0,0	0,0	0,0	0,0	-0,1	-1,5
11,50	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Obs.: Todos os valores apresentados na tabela estão em milímetros, exceto onde indicado.

APÊNDICE I – Deformações da Cortina sob ação de 55% do Empuxo Passivo

		55% de Empuxo Passivo – e = 15cm					
Z (m)	**δ_{inst}**	**Esc. 1**	**Tirante 1**	**Esc. 2**	**Tirante 2**	**Esc. 3**	**Livre**
0,00	0,0	33,7	20,0	10,2	12,8	5,8	3662,0
0,50	13,1	28,2	16,4	9,6	11,6	5,9	3442,0
1,00	11,6	22,6	12,8	9,1	10,5	6,0	3182,0
1,50	9,6	17,2	9,3	8,6	9,4	6,2	2941,0
2,00	7,7	11,9	6,0	8,3	8,5	6,6	2701,0
2,50	6,2	7,1	3,2	8,5	8,2	7,5	2462,0
3,00	4,6	3,3	1,3	9,4	8,5	9,1	2223,0
3,50	3,9	0,9	0,2	10,3	8,9	10,9	1986,0
4,00	3,1	-0,2	-0,2	10,5	8,7	12,4	1752,0
4,50	2,8	-0,4	-0,2	9,5	7,6	13,4	1521,0
5,00	2,5	-0,3	-0,1	7,5	5,7	14,1	1296,0
5,50	2,2	-0,1	-0,1	4,8	3,3	15,1	1078,0
6,00	2,2	0,0	0,0	2,1	1,3	16,9	869,6
6,50	2,6	0,0	0,0	0,5	0,2	18,3	674,1
7,00	3,2	0,0	0,0	-0,2	-0,2	18,3	494,7
7,50	3,8	0,0	0,0	-0,3	-0,2	16,4	335,4
8,00	4,1	0,0	0,0	-0,2	-0,1	12,5	200,9
8,50	3,5	0,0	0,0	-0,1	0,0	7,6	96,4
9,00	3,1	0,0	0,0	0,0	0,0	3,2	28,8
9,50	2,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,5	-2,3
10,00	2,3	0,0	0,0	0,0	0,0	-0,4	-9,0
10,50	1,3	0,0	0,0	0,0	0,0	-0,4	-6,4
11,00	0,6	0,0	0,0	0,0	0,0	-0,2	-2,8
11,50	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Obs.: Todos os valores apresentados na tabela estão em milímetros, exceto onde indicado.

APÊNDICE J – Deformações da Cortina sob ação de 80% do Empuxo Passivo

		80% de Empuxo Passivo – e = 15cm					
Z (m)	**δ_{inst}**	**Esc. 1**	**Tirante 1**	**Esc. 2**	**Tirante 2**	**Esc. 3**	**Livre**
0,00	0,0	49,1	29,1	14,9	18,5	8,3	5327,0
0,50	13,1	41,0	23,9	14,0	16,9	8,5	4997,0
1,00	11,6	32,9	18,7	13,2	15,2	8,7	4628,0
1,50	9,6	25,0	13,6	12,5	13,7	9,0	4278,0
2,00	7,7	17,3	8,8	12,1	12,4	9,6	3929,0
2,50	6,2	10,4	4,7	12,4	11,9	10,9	3581,0
3,00	4,6	4,8	1,8	13,7	12,4	13,2	3234,0
3,50	3,9	1,3	0,3	14,9	12,9	15,8	2889,0
4,00	3,1	-0,2	-0,3	15,2	12,6	18,0	2548,0
4,50	2,8	-0,6	-0,3	13,9	11,1	19,5	2212,0
5,00	2,5	-0,4	-0,2	11,0	8,3	20,6	1885,0
5,50	2,2	-0,2	-0,1	7,0	4,9	22,0	1568,0
6,00	2,2	-0,1	0,0	3,1	1,9	24,6	1265,0
6,50	2,6	0,0	0,0	0,7	0,3	26,6	980,4
7,00	3,2	0,0	0,0	-0,3	-0,3	26,6	719,5
7,50	3,8	0,0	0,0	-0,4	-0,3	23,8	487,9
8,00	4,1	0,0	0,0	-0,2	-0,2	18,3	292,2
8,50	3,5	0,0	0,0	-0,1	-0,1	11,1	140,2
9,00	3,1	0,0	0,0	0,0	0,0	4,6	41,9
9,50	2,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,7	-3,4
10,00	2,3	0,0	0,0	0,0	0,0	-0,6	-13,1
10,50	1,3	0,0	0,0	0,0	0,0	-0,6	-9,4
11,00	0,6	0,0	0,0	0,0	0,0	-0,3	-4,0
11,50	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Obs.: Todos os valores apresentados na tabela estão em milímetros, exceto onde indicado.

APÊNDICE K – Deformações da Cortina sob ação do Empuxo Passivo

		Empuxo Passivo – e = 15cm					
Z (m)	**δ_{inst}**	**Esc. 1**	**Tirante 1**	**Esc. 2**	**Tirante 2**	**Esc. 3**	**Livre**
0,00	0,0	61,3	36,3	18,2	22,9	9,8	6754,0
0,50	13,1	51,2	29,8	17,2	18,9	10,1	6312,0
1,00	11,6	41,1	23,3	16,3	17,0	10,4	5869,0
1,50	9,6	31,2	16,9	15,5	15,5	10,9	5427,0
2,00	7,7	21,6	11,0	15,1	14,9	11,8	4985,0
2,50	6,2	12,9	5,9	15,5	15,6	13,5	4544,0
3,00	4,6	6,0	2,3	17,2	16,3	16,6	4104,0
3,50	3,9	1,6	0,3	18,9	16,0	20,0	3667,0
4,00	3,1	-0,3	-0,4	19,3	14,0	22,9	3236,0
4,50	2,8	-0,7	-0,4	17,7	10,5	24,9	2811,0
5,00	2,5	-0,5	-0,3	14,0	6,2	26,5	2395,0
5,50	2,2	-0,3	-0,1	9,0	2,5	28,6	1993,0
6,00	2,2	0,0	0,0	4,0	0,4	32,1	1609,0
6,50	2,6	0,0	0,0	0,9	-0,3	34,9	1248,0
7,00	3,2	0,0	0,0	-0,3	-0,4	35,1	916,8
7,50	3,8	0,0	0,0	-0,5	-0,1	31,6	622,3
8,00	4,1	0,0	0,0	-0,3	0,0	24,4	373,2
8,50	3,5	0,0	0,0	-0,1	0,0	15,0	179,3
9,00	3,1	0,0	0,0	0,0	0,0	6,2	53,7
9,50	2,6	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0	-4,2
10,00	2,3	0,0	0,0	0,0	0,0	-0,8	-16,7
10,50	1,3	0,0	0,0	0,0	0,0	-0,9	-12,0
11,00	0,6	0,0	0,0	0,0	0,0	-0,4	
11,50	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Obs.: Todos os valores apresentados na tabela estão em milímetros, exceto onde indicado.

APÊNDICE L – Deformações da Cortina sob ação do Empuxo Ativo

		Empuxo Ativo – e = 25cm					
Z (m)	**δ_{inst}**	**Esc. 1**	**Tirante 1**	**Esc. 2**	**Tirante 2**	**Esc. 3**	**Livre**
0,00	0,0	4,0	2,8	4,4	4,5	1,6	348,9
0,50	13,1	3,4	2,3	4,1	4,2	1,9	327,1
1,00	11,6	2,8	1,9	3,8	3,8	2,2	305,3
1,50	9,6	2,2	1,5	3,5	3,4	2,4	283,6
2,00	7,7	1,7	1,1	3,2	3,1	2,7	261,8
2,50	6,2	1,1	0,7	2,9	2,8	3,0	240,1
3,00	4,6	0,7	0,4	2,7	2,5	3,4	218,4
3,50	3,9	0,3	0,2	2,4	2,3	3,8	196,9
4,00	3,1	0,1	0,0	2,2	2,0	4,1	175,6
4,50	2,8	0,0	0,0	1,9	1,6	4,3	154,4
5,00	2,5	-0,1	0,0	1,4	1,2	4,4	133,9
5,50	2,2	-0,1	0,0	1,0	0,8	4,5	113,8
6,00	2,2	-0,1	0,0	0,1	0,5	4,5	94,4
6,50	2,6	0,0	0,0	0,3	0,2	4,4	76,0
7,00	3,2	0,0	0,0	0,1	0,0	4,1	58,8
7,50	3,8	0,0	0,0	-0,3	0,0	3,5	43,2
8,00	4,1	0,0	0,0	-0,1	-0,1	2,8	29,3
8,50	3,5	0,0	0,0	-0,1	0,0	2,0	17,7
9,00	3,1	0,0	0,0	0,0	0,0	1,2	9,0
9,50	2,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,6	3,1
10,00	2,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2	0,1
10,50	1,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	-1,0
11,00	0,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	-0,8
11,50	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Obs.: Todos os valores apresentados na tabela estão em milímetros, exceto onde indicado.

APÊNDICE M – Deformações da Cortina sob ação das Forças Horizontais

		Forças Horizontais – e = 25cm					
Z (m)	**δ_{inst}**	**Esc. 1**	**Tirante 1**	**Esc. 2**	**Tirante 2**	**Esc. 3**	**Livre**
0,00	0,0	5,4	5,3	-4,0	4,6	-1,6	10880,0
0,50	13,1	4,6	4,6	-2,1	4,4	-0,6	10400,0
1,00	11,6	3,8	3,8	-0,1	4,3	0,3	9915,0
1,50	9,6	3,0	3,1	1,8	4,1	1,2	9433,0
2,00	7,7	2,2	2,4	3,8	4,0	2,2	8951,0
2,50	6,2	1,5	1,8	5,8	3,9	3,2	8496,0
3,00	4,6	0,9	1,2	7,8	3,9	4,3	7987,0
3,50	3,9	0,4	0,7	9,8	3,8	5,4	7505,0
4,00	3,1	0,1	0,3	11,6	3,8	6,5	7023,0
4,50	2,8	0,0	0,0	13,0	3,6	7,6	6542,0
5,00	2,5	-0,1	-0,3	14,0	3,3	8,7	6061,0
5,50	2,2	-0,1	-0,5	14,6	3,0	9,9	5581,0
6,00	2,2	-0,1	-0,6	14,8	2,6	11,2	5102,0
6,50	2,6	0,0	-0,7	14,5	2,3	12,4	4625,0
7,00	3,2	0,0	-0,8	13,9	2,0	13,4	4149,0
7,50	3,8	0,0	-0,8	13,1	1,7	13,8	3675,0
8,00	4,1	0,0	-0,8	11,9	1,5	13,7	3203,0
8,50	3,5	0,0	-0,7	10,6	1,2	13,0	2735,0
9,00	3,1	0,0	-0,6	9,1	1,0	11,8	2279,0
9,50	2,6	0,0	-0,5	7,5	0,8	10,0	1818,0
10,00	2,3	0,0	-0,4	5,7	0,6	7,9	1361,0
10,50	1,3	0,0	-0,3	3,9	0,4	5,4	908,3
11,00	0,6	0,0	-0,1	2,0	0,2	2,8	457,9
11,50	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Obs.: Todos os valores apresentados na tabela estão em milímetros, exceto onde indicado.

APÊNDICE N – Deformações da Cortina sob ação de 30% do Empuxo Passivo

		30% de Empuxo Passivo – e = 25cm					
Z (m)	**δ_{inst}**	**Esc. 1**	**Tirante 1**	**Esc. 2**	**Tirante 2**	**Esc. 3**	**Livre**
0,00	0,0	6,3	4,3	7,0	7,1	2,9	506,4
0,50	13,1	5,4	3,7	6,4	6,5	3,2	474,3
1,00	11,6	4,4	3,0	5,9	5,9	3,6	442,1
1,50	9,6	3,5	2,3	5,4	5,4	4,0	410,0
2,00	7,7	2,6	1,7	5,0	4,8	4,4	377,9
2,50	6,2	1,8	1,1	4,5	4,4	4,8	345,8
3,00	4,6	1,1	0,6	4,2	4,0	5,4	313,9
3,50	3,9	0,5	0,3	3,9	3,6	5,9	282,2
4,00	3,1	0,2	0,1	3,5	3,1	6,3	250,7
4,50	2,8	0,0	0,0	2,9	2,6	6,6	219,7
5,00	2,5	-0,1	-0,1	2,3	2,0	6,7	189,3
5,50	2,2	-0,1	-0,1	1,6	1,3	6,7	159,8
6,00	2,2	-0,1	-0,1	0,9	0,8	6,6	131,5
6,50	2,6	-0,1	0,0	0,4	0,3	6,3	104,6
7,00	3,2	0,0	0,0	0,1	0,1	5,8	79,7
7,50	3,8	0,0	0,0	0,0	-0,1	4,9	57,1
8,00	4,1	0,0	0,0	-0,1	-0,1	3,8	37,4
8,50	3,5	0,0	0,0	-0,1	-0,1	2,6	21,3
9,00	3,1	0,0	0,0	-0,1	-0,1	1,4	9,6
9,50	2,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,6	2,3
10,00	2,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	-1,1
10,50	1,3	0,0	0,0	0,0	0,0	-0,1	-1,9
11,00	0,6	0,0	0,0	0,0	0,0	-0,1	-1,2
11,50	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Obs.: Todos os valores apresentados na tabela estão em milímetros, exceto onde indicado.

APÊNDICE O – Deformações da Cortina sob ação de 55% do Empuxo Passivo

		55% de Empuxo Passivo – e = 25cm					
Z (m)	**δ_{inst}**	**Esc. 1**	**Tirante 1**	**Esc. 2**	**Tirante 2**	**Esc. 3**	**Livre**
0,00	0,0	11,6	8,0	12,8	13,0	5,3	928,4
0,50	13,1	9,9	6,7	11,8	12,0	5,9	869,5
1,00	11,6	8,2	5,5	10,9	10,9	6,6	810,6
1,50	9,6	6,5	4,3	10,0	9,9	7,3	751,7
2,00	7,7	4,8	3,1	9,1	8,9	8,0	692,8
2,50	6,2	3,3	2,0	8,3	8,0	8,8	634,1
3,00	4,6	2,0	1,1	7,7	7,2	9,8	575,5
3,50	3,9	1,0	0,5	7,0	6,5	10,8	517,3
4,00	3,1	0,3	0,1	6,3	5,7	11,6	459,7
4,50	2,8	0,0	-0,1	5,3	4,7	12,1	402,8
5,00	2,5	-0,2	-0,1	4,2	3,5	12,3	347,1
5,50	2,2	-0,2	-0,1	2,9	2,4	12,3	293,0
6,00	2,2	-0,1	-0,1	1,7	1,3	12,1	241,1
6,50	2,6	-0,1	-0,1	0,8	0,5	11,6	191,8
7,00	3,2	0,0	0,0	0,2	0,1	10,6	146,1
7,50	3,8	0,0	0,0	-0,1	-0,1	9,0	104,7
8,00	4,1	0,0	0,0	-0,2	-0,2	7,0	68,6
8,50	3,5	0,0	0,0	-0,2	-0,1	4,7	39,0
9,00	3,1	0,0	0,0	-0,1	-0,1	2,7	17,5
9,50	2,6	0,0	0,0	-0,1	-0,1	1,1	4,2
10,00	2,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2	-2,0
10,50	1,3	0,0	0,0	0,0	0,0	-0,1	-3,5
11,00	0,6	0,0	0,0	0,0	0,0	-0,1	-2,3
11,50	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Obs.: Todos os valores apresentados na tabela estão em milímetros, exceto onde indicado.

APÊNDICE P – Deformações da Cortina sob ação de 80% do Empuxo Passivo

		80% de Empuxo Passivo – e = 25cm					
Z (m)	**δ_{inst}**	**Esc. 1**	**Tirante 1**	**Esc. 2**	**Tirante 2**	**Esc. 3**	**Livre**
0,00	0,0	16,8	11,6	18,6	18,9	7,7	1350,0
0,50	13,1	14,3	9,8	17,2	17,4	8,6	1265,0
1,00	11,6	11,9	8,0	15,8	15,8	9,6	1179,0
1,50	9,6	9,4	6,2	14,5	14,3	10,6	1093,0
2,00	7,7	7,0	4,5	13,2	12,9	11,7	1008,0
2,50	6,2	4,8	2,9	12,1	11,6	12,9	922,2
3,00	4,6	2,9	1,7	11,1	10,5	14,3	837,1
3,50	3,9	1,4	0,7	10,2	9,5	15,7	752,4
4,00	3,1	0,4	0,2	9,1	8,3	16,8	668,6
4,50	2,8	-0,1	-0,1	7,7	6,8	17,6	585,9
5,00	2,5	-0,3	-0,2	6,0	5,2	17,9	504,9
5,50	2,2	-0,3	-0,2	4,2	3,4	17,9	426,2
6,00	2,2	-0,2	-0,1	2,4	1,9	17,6	350,6
6,50	2,6	-0,1	-0,1	1,1	0,8	16,9	279,0
7,00	3,2	0,1	0,0	0,3	0,1	15,4	212,5
7,50	3,8	0,0	0,0	-0,1	-0,2	13,1	152,2
8,00	4,1	0,0	0,0	-0,3	-0,2	10,2	99,8
8,50	3,5	0,0	0,0	-0,2	-0,2	6,9	56,7
9,00	3,1	0,0	0,0	-0,2	-0,1	3,9	25,5
9,50	2,6	0,0	0,0	-0,1	-0,1	1,6	6,1
10,00	2,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,3	-2,9
10,50	1,3	0,0	0,0	0,0	0,0	-0,2	-5,0
11,00	0,6	0,0	0,0	0,0	0,0	-0,2	-3,3
11,50	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Obs.: Todos os valores apresentados na tabela estão em milímetros, exceto onde indicado.

APÊNDICE Q – Deformações da Cortina sob ação do Empuxo Passivo

		Empuxo Passivo – e = 25cm					
Z (m)	**δ_{inst}**	**Esc. 1**	**Tirante 1**	**Esc. 2**	**Tirante 2**	**Esc. 3**	**Livre**
0,00	0,0	21,0	14,5	23,2	23,6	8,9	1715,0
0,50	13,1	17,9	12,2	21,5	21,7	10,3	1607,0
1,00	11,6	14,8	10,0	19,8	19,8	11,6	1498,0
1,50	9,6	11,8	7,7	18,1	17,9	13,0	1389,0
2,00	7,7	8,8	5,6	16,5	16,1	14,5	1281,0
2,50	6,2	6,0	3,7	15,1	14,5	16,1	1172,0
3,00	4,6	3,6	2,1	14,0	13,2	18,1	1064,0
3,50	3,9	1,7	0,9	12,9	11,9	20,0	957,0
4,00	3,1	0,5	0,2	11,6	10,4	21,5	850,6
4,50	2,8	-0,1	-0,1	9,8	8,6	22,6	745,7
5,00	2,5	-0,3	-0,2	7,7	6,5	23,1	642,9
5,50	2,2	-0,3	-0,2	5,3	4,4	23,2	543,0
6,00	2,2	-0,3	-0,1	3,1	2,4	23,0	447,0
6,50	2,6	-0,2	0,0	1,4	1,0	22,1	355,9
7,00	3,2	-0,1	0,0	0,4	0,2	20,3	271,3
7,50	3,8	0,0	0,0	-0,2	-0,2	17,3	194,6
8,00	4,1	0,0	0,0	-0,3	-0,3	13,5	127,7
8,50	3,5	0,0	0,0	-0,3	-0,3	9,2	72,7
9,00	3,1	0,0	0,0	-0,2	-0,2	5,2	32,8
9,50	2,6	0,0	0,0	-0,1	-0,1	2,2	7,9
10,00	2,3	0,0	0,0	-0,1	0,0	0,5	-3,7
10,50	1,3	0,0	0,0	0,0	0,0	-0,2	-6,4
11,00	0,6	0,0	0,0	0,0	0,0	-0,3	-4,2
11,50	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Obs.: Todos os valores apresentados na tabela estão em milímetros, exceto onde indicado.

APÊNDICE R – Deformações da Cortina sob ação do Empuxo Ativo

		Empuxo Ativo – e = 35cm					
Z (m)	**δ_{inst}**	**Esc. 1**	**Tirante 1**	**Esc. 2**	**Tirante 2**	**Esc. 3**	**Livre**
0,00	0,0	2,1	1,6	4,3	4,2	3,0	145,4
0,50	13,1	1,8	1,3	4,0	3,9	3,1	136,6
1,00	11,6	1,5	1,1	3,6	3,5	3,2	127,8
1,50	9,6	1,3	0,9	3,3	3,2	3,3	119,0
2,00	7,7	1,0	0,7	3,0	2,9	3,3	110,2
2,50	6,2	0,7	0,5	2,7	2,6	3,4	101,4
3,00	4,6	0,5	0,3	2,4	2,3	3,6	92,7
3,50	3,9	0,3	0,2	2,1	2,0	3,7	84,0
4,00	3,1	0,1	0,1	1,8	1,7	3,7	75,4
4,50	2,8	0,0	0,0	1,5	1,4	3,8	66,8
5,00	2,5	0,0	0,0	1,2	1,0	3,7	58,5
5,50	2,2	0,0	0,0	0,8	0,7	3,6	50,3
6,00	2,2	0,0	0,0	0,5	0,5	3,5	42,4
6,50	2,6	0,0	0,0	0,3	0,2	3,3	34,8
7,00	3,2	0,0	0,0	0,1	0,1	3,0	27,7
7,50	3,8	0,0	0,0	0,0	0,1	2,6	21,1
8,00	4,1	0,0	0,0	0,0	0,0	2,1	15,2
8,50	3,5	0,0	0,0	-0,1	-0,1	1,6	10,1
9,00	3,1	0,0	0,0	-0,1	-0,1	1,1	6,1
9,50	2,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,7	3,1
10,00	2,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,4	1,2
10,50	1,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2	0,3
11,00	0,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
11,50	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Obs.: Todos os valores apresentados na tabela estão em milímetros, exceto onde indicado.

APÊNDICE S – Deformações da Cortina sob ação das Forças Horizontais

		Forças Horizontais – e = 35cm					
Z (m)	**δ_{inst}**	**Esc. 1**	**Tirante 1**	**Esc. 2**	**Tirante 2**	**Esc. 3**	**Livre**
0,00	0,0	2,8	3,4	3,0	4,8	0,9	10580,0
0,50	13,1	2,4	3,1	3,6	4,6	1,5	10120,0
1,00	11,6	2,1	2,7	4,1	4,4	2,2	9652,0
1,50	9,6	1,7	2,4	4,7	4,2	2,9	9189,0
2,00	7,7	1,3	2,0	5,3	4,1	3,6	8726,0
2,50	6,2	1,0	1,7	5,9	3,9	4,3	8262,0
3,00	4,6	0,7	1,4	6,5	3,8	5,1	7799,0
3,50	3,9	0,4	1,2	7,1	3,7	5,8	7336,0
4,00	3,1	0,2	1,0	7,6	3,5	6,5	6873,0
4,50	2,8	0,1	0,8	8,0	3,3	7,2	6410,0
5,00	2,5	0,0	0,6	8,2	3,1	7,8	5947,0
5,50	2,2	0,0	0,5	8,3	2,9	8,3	5485,0
6,00	2,2	-0,1	0,3	8,2	2,6	8,7	5023,0
6,50	2,6	-0,1	0,2	7,9	2,4	9,1	4561,0
7,00	3,2	0,0	0,2	7,5	2,1	9,2	4100,0
7,50	3,8	0,0	0,1	6,9	1,9	9,1	3640,0
8,00	4,1	0,0	0,1	6,3	1,6	8,7	3180,0
8,50	3,5	0,0	0,0	5,6	1,4	8,1	2722,0
9,00	3,1	0,0	0,0	4,8	1,2	7,2	2274,0
9,50	2,6	0,0	0,0	3,9	0,9	6,0	1819,0
10,00	2,3	0,0	0,0	3,0	0,7	4,7	1365,0
10,50	1,3	0,0	0,0	2,0	0,5	3,2	911,9
11,00	0,6	0,0	0,0	1,0	0,2	1,6	460,2
11,50	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Obs.: Todos os valores apresentados na tabela estão em milímetros, exceto onde indicado.

APÊNDICE T – Deformações da Cortina sob ação de 30% do Empuxo Passivo

		30% de Empuxo Passivo – e = 35cm					
Z (m)	**δ_{inst}**	**Esc. 1**	**Tirante 1**	**Esc. 2**	**Tirante 2**	**Esc. 3**	**Livre**
0,00	0,0	3,3	2,5	6,8	6,6	5,0	209,2
0,50	13,1	2,8	2,1	6,2	6,1	5,1	196,3
1,00	11,6	2,4	1,8	5,7	5,6	5,2	183,4
1,50	9,6	2,0	1,4	5,2	5,1	5,2	170,5
2,00	7,7	1,5	1,1	4,7	4,5	5,3	157,6
2,50	6,2	1,1	0,8	4,2	4,0	5,4	144,7
3,00	4,6	0,8	0,5	3,8	3,6	5,5	131,9
3,50	3,9	0,5	0,3	3,3	3,1	5,6	119,2
4,00	3,1	0,2	0,1	2,9	2,6	5,7	106,5
4,50	2,8	0,1	0,0	2,4	2,2	5,7	94,0
5,00	2,5	0,0	0,0	1,9	1,7	5,6	81,8
5,50	2,2	-0,1	0,0	1,3	1,2	5,4	69,8
6,00	2,2	-0,1	-0,1	0,9	0,7	5,1	58,3
6,50	2,6	-0,1	0,0	0,5	0,4	4,7	47,3
7,00	3,2	0,0	0,0	0,2	0,2	4,2	37,1
7,50	3,8	0,0	0,0	0,0	0,0	3,6	27,6
8,00	4,1	0,0	0,0	-0,1	-0,1	2,8	19,3
8,50	3,5	0,0	0,0	-0,1	-0,1	2,0	12,2
9,00	3,1	0,0	0,0	-0,1	-0,1	1,3	6,8
9,50	2,6	0,0	0,0	-0,1	-0,1	0,8	3,0
10,00	2,3	0,0	0,0	-0,1	0,0	0,4	0,8
10,50	1,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	-0,2
11,00	0,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	-0,3
11,50	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Obs.: Todos os valores apresentados na tabela estão em milímetros, exceto onde indicado.

APÊNDICE U – Deformações da Cortina sob ação de 55% do Empuxo Passivo

		55% de Empuxo Passivo – e = 35cm					
Z (m)	**δ_{inst}**	**Esc. 1**	**Tirante 1**	**Esc. 2**	**Tirante 2**	**Esc. 3**	**Livre**
0,00	0,0	6,0	4,5	12,4	12,2	9,2	383,6
0,50	13,1	5,2	3,9	11,4	11,2	9,3	359,9
1,00	11,6	4,4	3,3	10,5	10,2	9,5	336,2
1,50	9,6	3,6	2,6	9,5	9,2	9,6	312,6
2,00	7,7	2,8	2,0	8,6	8,3	9,7	289,0
2,50	6,2	2,1	1,5	7,7	7,4	9,9	265,4
3,00	4,6	1,4	1,0	6,9	6,5	10,1	241,9
3,50	3,9	0,8	0,6	6,1	5,7	10,4	218,5
4,00	3,1	0,4	0,3	5,2	4,8	10,5	195,3
4,50	2,8	0,1	0,1	4,3	3,9	10,4	172,4
5,00	2,5	0,0	0,0	3,4	3,0	10,2	149,9
5,50	2,2	-0,1	-0,1	2,4	2,1	9,9	128,0
6,00	2,2	-0,1	-0,1	1,6	1,3	9,4	106,9
6,50	2,6	-0,1	-0,1	0,9	0,7	8,6	86,8
7,00	3,2	-0,1	-0,1	0,4	0,3	7,7	68,0
7,50	3,8	-0,1	0,0	0,1	0,0	6,5	50,7
8,00	4,1	0,0	0,0	-0,1	-0,1	5,2	35,4
8,50	3,5	-0,2	0,0	-0,2	-0,2	3,7	22,4
9,00	3,1	0,0	0,0	-0,2	-0,2	2,4	12,4
9,50	2,6	0,0	0,0	-1,4	-0,1	1,4	5,4
10,00	2,3	0,0	0,0	-0,1	-0,1	0,7	1,4
10,50	1,3	0,0	0,0	-0,1	-0,1	0,3	-0,3
11,00	0,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	-0,6
11,50	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Obs.: Todos os valores apresentados na tabela estão em milímetros, exceto onde indicado.

APÊNDICE V – Deformações da Cortina sob ação de 80% do Empuxo Passivo

		80% de Empuxo Passivo – e = 35cm					
Z (m)	**δ_{inst}**	**Esc. 1**	**Tirante 1**	**Esc. 2**	**Tirante 2**	**Esc. 3**	**Livre**
0,00	0,0	8,8	6,6	18,0	17,7	13,4	557,9
0,50	13,1	7,6	5,7	16,6	16,3	13,6	523,5
1,00	11,6	6,4	4,7	15,2	14,9	13,8	489,1
1,50	9,6	5,2	3,8	13,9	13,4	13,9	454,7
2,00	7,7	4,1	2,9	12,5	12,1	14,2	420,3
2,50	6,2	3,0	2,1	11,2	10,7	14,4	386,0
3,00	4,6	2,0	1,4	10,0	9,5	14,8	351,8
3,50	3,9	1,2	0,8	8,8	8,2	15,1	317,8
4,00	3,1	0,6	0,4	7,6	7,0	15,2	284,0
4,50	2,8	0,2	0,1	6,3	5,7	15,2	250,8
5,00	2,5	0,0	-0,1	4,9	4,4	14,9	218,1
5,50	2,2	-0,2	-0,1	3,5	3,1	14,4	186,2
6,00	2,2	-0,2	-0,1	2,3	1,9	13,6	155,5
6,50	2,6	-0,2	-0,1	1,3	1,0	12,6	126,2
7,00	3,2	-0,1	-0,1	0,5	0,4	11,2	98,8
7,50	3,8	-0,9	-0,1	0,1	0,0	9,5	73,7
8,00	4,1	-0,1	0,0	-0,1	-0,2	7,5	51,4
8,50	3,5	0,0	0,0	-0,2	-0,2	5,4	32,6
9,00	3,1	0,0	0,0	-0,2	-0,2	3,5	18,1
9,50	2,6	0,0	0,0	-0,2	-0,2	2,0	7,9
10,00	2,3	0,0	0,0	-0,1	-0,1	1,0	2,0
10,50	1,3	0,0	0,0	-0,1	-0,1	0,4	-0,5
11,00	0,6	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0	-0,8
11,50	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Obs.: Todos os valores apresentados na tabela estão em milímetros, exceto onde indicado.

APÊNDICE W – Deformações da Cortina sob ação do Empuxo Passivo

		Empuxo Passivo – e = 35cm					
Z (m)	**δ_{inst}**	**Esc. 1**	**Tirante 1**	**Esc. 2**	**Tirante 2**	**Esc. 3**	**Livre**
0,00	0,0	11,0	8,2	22,5	22,2	16,5	709,7
0,50	13,1	9,5	7,1	20,8	20,4	16,8	666,0
1,00	11,6	8,0	5,9	19,1	18,6	17,1	622,3
1,50	9,6	6,5	4,8	17,4	16,9	17,4	578,6
2,00	7,7	5,1	3,7	15,7	15,1	17,8	535,0
2,50	6,2	3,7	2,6	14,1	13,5	18,2	491,4
3,00	4,6	2,5	1,7	12,6	11,9	18,7	448,0
3,50	3,9	1,5	1,0	11,1	10,4	19,2	404,8
4,00	3,1	0,8	0,5	9,6	8,8	19,5	362,0
4,50	2,8	0,2	0,1	7,9	7,9	19,5	319,7
5,00	2,5	0,0	-0,1	6,2	5,5	19,2	278,1
5,50	2,2	-0,2	-0,2	4,5	3,9	18,6	237,7
6,00	2,2	-0,2	-0,2	2,9	2,4	17,7	198,6
6,50	2,6	-0,2	-0,2	1,7	1,3	16,4	161,3
7,00	3,2	-0,2	-0,1	0,7	0,6	14,7	126,4
7,50	3,8	-0,1	-0,1	0,1	0,0	12,5	943,8
8,00	4,1	-0,1	0,0	-0,2	-0,2	9,9	65,9
8,50	3,5	0,0	0,0	-0,3	-0,3	7,2	41,8
9,00	3,1	0,0	0,0	-0,3	-0,3	4,7	23,3
9,50	2,6	0,0	0,0	-0,3	-0,2	2,7	10,2
10,00	2,3	0,0	0,0	-0,2	-0,2	1,3	2,7
10,50	1,3	0,0	0,0	-0,1	-0,1	0,5	-0,6
11,00	0,6	0,0	0,0	-0,1	0,0	0,1	-1,0
11,50	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Obs.: Todos os valores apresentados na tabela estão em milímetros, exceto onde indicado.