



Marcelo de Souza Magalhães

**Dimensionamento de estruturas de
contenção atirantadas utilizando
os métodos de equilíbrio limite e de
elementos finitos.**

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada como requisito parcial
para obtenção do grau de Mestre pelo Programa
de Pós-graduação em Engenharia Civil do
Departamento de Engenharia Civil da PUC-Rio.

Orientador: Prof. Tácio Mauro Pereira de Campos

Rio de Janeiro
Agosto de 2015



Marcelo de Souza Magalhães

**Dimensionamento de estruturas de
contenção atirantadas utilizando
os métodos de equilíbrio limite e de
elementos finitos.**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil do Departamento de Engenharia Civil do Centro Técnico Científico da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

Prof. Tácio Mauro Pereira de Campos

Orientador

Departamento de Engenharia Civil – PUC-Rio

Prof. Pedricto Rocha Filho

Departamento de Engenharia Civil – PUC-Rio

Prof. Maurício Martines Sales

Departamento de Engenharia Civil – UFG

Prof. José Eugenio Leal

Coordenador Setorial do Centro
Técnico Científico – PUC-Rio

Rio de Janeiro, 07 de agosto de 2015.

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem a autorização da universidade, do autor e do orientador.

Marcelo de Souza Magalhães

Graduou-se em Engenharia Civil pela PUC-GO (Pontifícia Universidade Católica de Goiás) em 2013. Ingressou no Mestrado em Engenharia Civil na PUC-Rio em março de 2013, desenvolvendo dissertação na linha de pesquisa de Geotecnia Experimental.

Ficha Catalográfica

Magalhães, Marcelo de Souza

Dimensionamento de estruturas de contenção atirantadas utilizando os métodos de equilíbrio limite e de elementos finitos/ Marcelo de Souza Magalhães; orientador: Tácio Mauro Pereira de Campos. – Rio de Janeiro PUC, Departamento de Engenharia Civil, 2015.

1.1 v., 192 f.; il. ; 30 cm

Dissertação (mestrado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Civil.

Inclui referências bibliográficas.

1. Engenharia Civil – Teses. 2. Estruturas de contenção. 3. Equilíbrio limite. 4. Método clássico 5. Método dos Elementos Finitos. I. de Campos, Tácio Mauro Pereira. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Civil. III. Título.

CDD:624

Aos meus pais, Eurico e Waleska,
Pelo apoio e confiança.

Agradecimentos

Ao meu orientador Professor Tácio Mauro Pereira de Campos pelo estímulo e parceria para a realização deste trabalho.

À CAPES e à PUC-Rio, pelos auxílios concedidos, sem os quais este trabalho não poderia ter sido realizado.

Aos meus pais, pela educação, atenção e carinho de todas as horas.

Aos meus colegas da PUC-Rio, que diretamente ou indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho.

Aos professores que participaram da Comissão examinadora.

A todos os professores e funcionários do Departamento pelos ensinamentos e pela ajuda.

A todos os amigos e familiares que de uma forma ou de outra me estimularam ou me ajudaram.

A toda equipe do Laboratório de geotecnia e meio ambiente da PUC-Rio, pelo auxílio nos ensaios de laboratório.

A empresa SETE Engenharia, em especial aos engenheiros Murillo Cabral e Luciano Fonseca pelo fornecimento dos dados da obra, pelo entusiasmo e pela disposição em ajudar.

Resumo

Magalhães, Marcelo de Souza Magalhães; de Campos, Tácio Mauro Pereira (Orientador). **Dimensionamento de estruturas de contenção atirantadas utilizando os métodos de equilíbrio limite e de elementos finitos**. Rio de Janeiro, 2015. 192p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

O dimensionamento de estrutura de contenção flexíveis atirantadas geralmente representa um desafio para os engenheiros civis, devido a complexidade do tema e as severas consequências que uma eventual ruptura pode causar. Visando melhorar a compreensão do comportamento dessas estruturas, bem como o seu dimensionamento, o presente trabalho descreve os mecanismos que governam o comportamento dessas contenções, como por exemplo: o arqueamento das tensões; a redistribuição das tensões; concentração de tensões nas ancoragens, etc. Embora estes mecanismos tenha uma forte influência sobre o comportamento de cortinas atirantadas, eles geralmente não são considerados em projetos, já que na prática brasileira, os dimensionamentos dessas contenções são realizados predominantemente a partir de métodos de cálculo simples, como por exemplo o cálculo por equilíbrio limite, que não leva em conta esses efeitos. Portanto, no presente trabalho são discutidas as limitações dessa abordagem, e em contrapartida são apresentadas, através de um estudo de caso, os benefícios da aplicação do método dos elementos finitos em análises de escavações.

Palavras-chave

Estruturas de contenção; equilíbrio limite; método clássico; método dos elementos finitos; estado limite de serviço.

Abstract

Magalhães, Marcelo de Souza Magalhães; de Campos, Tácio Mauro Pereira (Advisor). **Design of anchored retaining structures using the limit equilibrium and the finite element methods.** Rio de Janeiro, 2015. 192p. MSc. Dissertation – Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

The design of anchored retaining wall usually represents a challenge for civil engineers, due to the complexity of the issue and the severe consequences that a possible rupture can cause. In order to improve understanding of the behavior of these structures, as well as its design, the present work describes the mechanisms that govern the behavior of these structures, for example: the arching of the stress, the redistribution of stress, concentration of stresses in the anchorages, etc. Although these mechanisms have a strong influence on behavior of the anchored retaining wall, they are usually not considered in design, because the Brazilian practice, the projects of these structures are made predominantly from simple calculation methods, for example by calculating the equilibrium limit, that does not account for these effects. Therefore, in the present work the limitations of this approach are discussed, and on the other hand are presented, via a case study, the benefits of the finite element method applied to the excavation analysis.

Keywords

Retaining wall; equilibrium limit; classical method; finite element method; serviceability limit state.

Sumário

1. Introdução	30
1.1 Objetivos	31
1.2 Estrutura da Dissertação	32
2. Tipos de Estruturas de Contenção	34
2.1. Estruturas Rígidas	35
2.2. Estruturas Flexíveis	36
2.2.1 Escolha do Tipo de Estruturas de Contenção Flexíveis	40
2.2.2 Perfil Pranchado	41
3. Métodos de Cálculo	44
3.1. Método Clássico	44
3.1.1 Base Livre	44
3.1.2 Base Engastada	49
3.1.3 Fator de Segurança	54
3.1.4 Estruturas de Contenção Descontínuas	56
3.1.5 Vantagens e Limitações do Método Clássico	58
3.1.6 Software de Dimensionamento – Sheeting Design	59
3.2. Método dos Elementos Finitos	60
3.2.1. Modelos Constitutivos	62
3.2.2. Modelo de Enrijecimento Plástico	62
3.2.3 Superfície de Escoamento	68
3.2.4 Obtenção dos Parâmetros	70

3.2.5	Importância da Qualidade dos Parâmetros Geotécnicos	72
3.2.6	Vantagens do Método dos Elementos Finitos	73
3.3	Estado Limite de Serviço	75
3.4	Método Observacional	76
3.5	Dimensionamento de Tirantes	78
4.	Investigação Geotécnica	82
4.1	Perfil Geotécnico	83
4.2	Seleção dos Parâmetros Geotécnicos	84
4.3	Sondagem SPT	85
4.3.1	Fatores que Influenciam os Resultados do Ensaio	86
4.3.2	Correções do N_{SPT}	87
4.3.3	Correlações	90
4.4	Ensaio de Laboratório	91
4.4.1	Efeitos de Amostragem	92
4.4.2	Anisotropia	94
4.4.3	Nível de Deformação	98
4.4.4	Nível de Tensão	100
4.4.5	Heterogeneidade dos Solos Tropicais Residuais	101
4.5	Classificação dos Solos	102
4.5.1	Distribuição Granulométrica	102
4.5.2	Limites de Atterberg	104
4.5.3	Sistema Unificado de Classificação	105
4.6	Ensaio Edométrico	108
4.7	Ensaio de Cisalhamento Direto	109
4.8	Ensaio de Compressão Triaxial	111
4.9	Ensaio Geofísico – Bender Elements	115

5. Obra Analisada	118
5.1 Contexto Geológico-Geotécnico	121
5.2 Amostragem	123
5.3 Classificação dos Solos	126
5.3.1 Solo 1,5m	126
5.3.2 Solo 3,5m	129
5.3.3 Solo 5,5m	131
5.4 Resultados – Ensaio Edométrico	134
5.4.1 Solo 1,5m	135
5.4.2 Solo 3,5m	136
5.4.3 Solo 5,5m	137
5.5 Resultados – Ensaio de Compressão Triaxial	138
5.5.1 Solo 1,5m	139
5.5.2 Solo 3,5m	143
5.5.3 Solo 5,5m	147
5.6 Resultados – Ensaio de Cisalhamento Direto	150
5.6.1 Solo 1,5m	151
5.6.2 Solo 3,5m	152
5.7 Resultados – Ensaio Geofísicos	153
5.7.1 Solo 1,5m	154
5.7.2 Solo 3,5m	155
5.7.3 Solo 5,5m	155
5.8 Resultados – Ensaio de Permeabilidade	156
5.9 Dimensionamentos Realizados	158

6. Análise – Método Clássico	159
6.1 Investigação Geotécnica	159
6.2 Empuxo Passivo Mobilizado – Estruturas Descontínuas	160
6.3 Resultados do Software – Sheeting Design	161
6.4 Dimensionamento Estrutural	162
6.4.1 Prancha Pré-Moldada	163
6.4.2 Tirantes	164
6.4.3 Perfil Metálico	166
7. Análise – Método dos Elementos Finitos	168
7.1 Investigação Geotécnica	168
7.2 Dados de Entrada – Plaxis	169
7.2.1 Dados de Entrada – Solos	170
7.2.2 Dados de Entrada – Perfil Metálico	172
7.2.3 Dados de Entrada – Prancha Pré-Moldada	173
7.2.4 Dados de Entrada – Tirantes	174
7.2.5 Dados de Entrada – Viga de Coroamento	175
7.3 Resultados– Plaxis	175
7.3.1 Coeficiente de Segurança	175
7.3.2 Resultados - Deslocamentos	176
7.3.3 Resultados – Esforços no Perfil Metálico	180
7.4 Dimensionamento Estrutural	181
7.4.1 Perfil Metálico	181
7.4.2 Prancha Pré-Moldada	182
7.5 Avaliação da Força de Percolação no Fundo da Escavação	183

8. Comparação de Custos	185
9. Conclusão	187
10. Referências Bibliográficas	189

Lista de Figuras

Figura 2.1 – Tipos de estruturas	34
Figura 2.2 – Distribuição das tensões laterais.	34
Figura 2.3 – Exemplo de estruturas rígidas	35
Figura 2.4 – Deslocamentos em um muro gravidade	35
Figura 2.5 – Empuxo idealizado versus o real	37
Figura 2.6 – Mecanismos da redistribuição das tensões laterais	37
Figura 2.7 – Efeito arco	38
Figura 2.8 – Relação entre a porcentagem do momento fletor máximo atuante na cortina e a sua flexibilidade para três densidades distintas de areias (adaptado de Rowe, 1952)	39
Figura 2.9 – Cortina do tipo perfil pranchado	41
Figura 2.10 – Cortina do tipo perfil pranchado monoapoiada.	42
Figura 2.11 – Cortina do tipo perfil pranchado em construção.	42
Figura 2.12 – Cortina atirantada do tipo perfil pranchado	43
Figura 3.1 – Hipóteses assumidas pelo método.	45
Figura 3.2 – Equilíbrio entre as forças horizontais e momentos	46
Figura 3.3 – Variações do método clássico.	46
Figura 3.4 – Método da base livre.	47
Figura 3.5 – Carregamentos sobre a estrutura de contenção.	47
Figura 3.6 – Distribuição dos empuxos.	48
Figura 3.7 – Aplicação do fator de segurança.	48
Figura 3.8 – Cálculo da ficha.	48
Figura 3.9 – Distribuição dos esforços na estrutura.	49
Figura 3.10 – Método da base engastada.	50

Figura 3.11 – Divisão da estrutura em duas vigas isostáticas.	50
Figura 3.12 – Aplicação do fator de segurança.	51
Figura 3.13 – Cálculo da força no apoio.	52
Figura 3.14 – Cálculo da profundidade enterrada.	52
Figura 3.15 – Diagramas dos esforços na estrutura.	53
Figura 3.16 – Hipóteses assumidas pelo método.	54
Figura 3.17 – Mobilização do empuxo em relação ao deslocamento.	55
Figura 3.18 – Introdução do fator de segurança.	56
Figura 3.19 – Estruturas contínuas versus descontínuas	56
Figura 3.20 – Mobilização do empuxo passivo.	57
Figura 3.21 – Porcentagem da área de empuxo passivo mobilizado.	58
Figura 3.22 – Métodos utilizados para determinar a variação do empuxo devido a um carregamento na superfície.	58
Figura 3.23 – Peça contínua transformada em vários “elementos finitos” menores.	61
Figura 3.24 – Formas de enrijecimento plástico.	63
Figura 3.25 – Variação da rigidez ao longo do ensaio triaxial.	64
Figura 3.26 – Regiões de deformação plásticas e elásticas.	64
Figura 3.27 – Parâmetros utilizados para representar cada região do comportamento do solo.	65
Figura 3.28 – Relação hiperbólica entre tensão e deformação.	66
Figura 3.29 – Definição do módulo de deformabilidade edométrico.	68
Figura 3.30 – Evolução da superfície de escoamento com o endurecimento.	68
Figura 3.31 – Superfície de escoamento do modelo Hardening Soil no plano p' - q .	69
Figura 3.32 – Superfície de escoamento do modelo hardening soil no espaço das tensões principais (com coesão nula).	69
Figura 3.33 – Curva de degradação do módulo de deformação cisalhante (G).	70

Figura 3.34 – Curva tensão-deformação no ensaio triaxial.	71
Figura 3.35 – Sensitividade dos parâmetros do modelo de enrijecimento plástico (Finno, 2011).	73
Figura 3.36 – Distribuição dos empuxos - a) Estágio 1 - b) Estágio final (Goh et al, 2005).	74
Figura 3.37 – Recalques acumulativos nos estágios construtivos.	74
Figura 3.38 – Efeitos da força de percolação.	75
Figura 3.39 – Distorção angular.	76
Figura 3.40 – Aplicação do método observacional (adaptado de Nicholson et al. 1999).	77
Figura 3.41 – Componentes do tirante.	78
Figura 3.42 – Formato e tamanho do Bulbo.	78
Figura 3.43 – Resistência lateral dos tirantes.	79
Figura 3.44 – Correlação entre a resistência lateral de solos arenosos e o N_{SPT} (adaptado de Bustamante e Doix, 1985).	80
Figura 3.45 – Recomendações em relação a posição e espaçamento dos bulbos (Sabatini et al, 1999).	81
Figura 4.1 – Processo de dimensionamento geotécnico.	82
Figura 4.2 – Simplificações realizadas no perfil geotécnico.	83
Figura 4.3 – Perfil geotécnico –a) Real –b) Opção 1 –c) Opção 2.	84
Figura 4.4 – Efeito do nível geostático.	89
Figura 4.5 – Amostragem.	93
Figura 4.6 – Efeitos do método de amostragem	93
Figura 4.7 – Análise gráfica da qualidade das amostras.	94
Figura 4.8 – Variação da resistência não drenada com o tipo de ensaio (Ladd, 1991).	95
Figura 4.9 – Comparação entre os ângulos de atrito efetivo de argilas normalmente consolidadas obtidos em ensaios triaxiais de compressão e extensão (Kulhawy e Mayne, 1990).	95
Figura 4.10 – Dados de ensaios triaxiais de um solo residual de granito, Hong Kong (Kumruzzaman, 2008).	96

Figura 4.11 – Tipos de ensaios indicados.	97
Figura 4.12 – Ensaios indicados para cada região em escavações.	97
Figura 4.13 – Curva de degradação do módulo cisalhante.	98
Figura 4.14 – Comportamento tensão-deformação do solo no ensaio triaxial.	98
Figura 4.15 – Medidores de deformação – a) Externo – b) Interno.	99
Figura 4.16 – Diferença entre as leituras nos medidores de deformação externo e interno.	99
Figura 4.17 – Comportamento típico dos solos em ensaios triaxial.	100
Figura 4.18 – Resultados do ensaio de peneiramento e sedimentação combinados.	103
Figura 4.19 – Ensaio de peneiramento.	103
Figura 4.20 – Ensaio de sedimentação.	104
Figura 4.21 – Limites de Atterberg.	104
Figura 4.22 – Ensaio de limite de liquidez.	105
Figura 4.23 – Cilindros moldados no ensaio de limite de plasticidade.	105
Figura 4.24 – Procedimento utilizado na classificação unificada.	106
Figura 4.25 – Interação entre os grãos grossos.	106
Figura 4.26 – Forma laminar.	107
Figura 4.27 – Interações entre partículas de Argila.	107
Figura 4.28 – Compressão edométrica.	108
Figura 4.29 – Esquema do equipamento edométrico.	108
Figura 4.30 – Cisalhamento entre superfícies.	109
Figura 4.31 – Esquema da caixa de cisalhamento utilizada no ensaio de cisalhamento direto.	109
Figura 4.32 – Resultados do ensaio de cisalhamento direto.	110
Figura 4.33 – Planos de cisalhamento.	110
Figura 4.34 – Esquema do equipamento utilizado no ensaio de cisalhamento direto.	111

Figura 4.35 – Ensaio triaxial.	112
Figura 4.36 – Estado de tensões.	112
Figura 4.37 – Trajetória de Tensões.	113
Figura 4.38 – Esquema do equipamento utilizado no ensaio triaxial.	114
Figura 4.39 – Medidores de deformação local utilizados.	114
Figura 4.40 – Medidores de deformação.	115
Figura 4.41 – Bender Element.	115
Figura 4.42 – Esquema do ensaio.	116
Figura 4.43 – Esquema do ensaio geofísico realizado em laboratório.	116
Figura 4.44 – Interpretação do tempo gasto para onda cisalhante percorrer a amostra.	117
Figura 5.1 – Esboço da escavação para a implantação do subsolo de um edifício.	118
Figura 5.2 – Detalhe da fundação do prédio vizinho à escavação.	119
Figura 5.3 – Prancha pré-moldada.	119
Figura 5.4 – Seção A-A: corte transversal da estrutura de contenção e das fundações do prédio vizinho.	119
Figura 5.5 – Estágio inicial e 1.	120
Figura 5.6 – Estágios 2 e 3.	120
Figura 5.7 – Estágios 4 e 5.	120
Figura 5.8 – Esboço de como a seção A-A deve ficar após a construção do edifício.	121
Figura 5.9 – Mapa geológico do município de Goiânia-GO.	122
Figura 5.10 – Sondagem SPT do local estudado.	123
Figura 5.11 – Poço de coleta.	124
Figura 5.12 – Amostra indeformada à 1,5m de profundidade.	125
Figura 5.13 – Amostra indeformada à 3,5m de profundidade.	125
Figura 5.14 – Amostra indeformada à 5,5m de profundidade.	125

Figura 5.15 – Curva granulométrica – Solo 1,5m.	127
Figura 5.16 – Fração: Pedregulho fino – Solo 1,5m.	127
Figura 5.17 – Areia grossa – retido na peneira 20 (6,9%).	128
Figura 5.18 – Areia Média – retido na peneira 40 (3,3%).	128
Figura 5.19 – Areia Média – retido na peneira 60 (13,1%).	128
Figura 5.20 – Areia fina – retido na peneira 100 (28,3%).	128
Figura 5.21 – Areia fina – retido na peneira 200 (21,4%).	129
Figura 5.22 – Curva granulométrica – Solo 3,5m.	129
Figura 5.23 – Fração: Pedregulho fino – Solo 3,5m.	130
Figura 5.24 – Fração: Areia grossa - retido na peneira 20 (2,3%).	130
Figura 5.25 – Fração: Areia Média - retido na peneira 40 (18,5%).	130
Figura 5.26 – Fração: Areia Média - retido na peneira 60 (11,2%).	131
Figura 5.27 – Fração: Areia fina – retido na peneira 100 (20,8%).	131
Figura 5.28 – Fração: Areia fina – retido na peneira 200 (22,0%).	131
Figura 5.29 – Curva Granulométrica – Solo 5,5m.	132
Figura 5.30 – Fração: Pedregulho fino – Solo 5,5m.	132
Figura 5.31 – Fração: Areia grossa – retido na peneira 20 (4,7%).	133
Figura 5.32 – Fração: Areia Média – retido na peneira 40 (5,0%).	133
Figura 5.33 – Fração: Areia Média – retido na peneira 60 (12,8%).	133
Figura 5.34 – Fração: Areia fina – retido na peneira 100 (14,6%).	134
Figura 5.35 – Fração: Areia fina – retido na peneira 200 (29,8%).	134
Figura 5.36 – Curva tensão-deformação em ensaio edométricos.	135
Figura 5.37 – Curva de compressibilidade – Solo 1,5m.	135
Figura 5.38 – Curva tensão deformação do ensaio edométrico.	136
Figura 5.39 – Curva de compressibilidade – Solo 3,5m.	137
Figura 5.40 – Curva tensão-deformação do ensaio edométrico.	137
Figura 5.41 – Curva de compressibilidade – Solo 5,5m.	138
Figura 5.42 – Curva tensão-deformação do ensaio edométrico.	138
Figura 5.43 – Estágios do ensaio triaxial.	139
Figura 5.44 – Corpos de prova utilizado no ensaio – Solo 1,5m.	140

Figura 5.45 – Curvas tensão-deformação do ensaio triaxial.	140
Figura 5.46 – Interpretação do comportamento de enrijecimento.	141
Figura 5.47 – Círculo de Mohr-Coulomb e envoltória de resistência.	141
Figura 5.48 – Parâmetros de rigidez obtidos na curva tensão-deformação.	142
Figura 5.49 – Comparação entre a rigidez obtida com medidores de deformação local e externos.	142
Figura 5.50 – Resumo do comportamento mecânico – Solo 1,5m.	143
Figura 5.51 – Corpos de prova utilizado no ensaio triaxial.	143
Figura 5.52 – Curva tensão-deformação do ensaio triaxial.	144
Figura 5.53 – Interpretação do comportamento de enrijecimento.	144
Figura 5.54 – Círculo de Mohr-Coulomb e envoltória de resistência.	145
Figura 5.55 – Parâmetros de rigidez obtido na curva tensão-deformação.	145
Figura 5.56 – Comparação entre as curvas tensão-deformação obtidas através de medidores de deformação local e externo.	146
Figura 5.57 – Resumo do comportamento mecânico – Solo 3,5m.	146
Figura 5.58 – Feições do solo 5,5m.	147
Figura 5.59 – Corpo de prova utilizado no ensaio – Solo 5,5m.	147
Figura 5.60 – Curvas tensão-deformação do ensaio triaxial.	148
Figura 5.61 – Círculos de Mohr-Coulomb e envoltória de resistência.	148
Figura 5.62 – Parâmetros de rigidez obtidos na curva tensão-deformação do ensaio triaxial.	149
Figura 5.63 – Comparação entre as curvas tensão-deformação obtidas utilizando medidores de deformação local (Hall-Interno) e externo (LVDT – Externo).	149
Figura 5.64 – Resumo do comportamento mecânico do solo 5,5m.	150
Figura 5.65 – Comportamento tensão-deslocamento obtido no ensaio de cisalhamento direto – Solo 1,5m.	151
Figura 5.66 – Envoltória de resistência obtida no ensaio de cisalhamento direto – Solo 1,5m.	152

Figura 5.67 – Comportamento tensão-deslocamento obtido no ensaio de cisalhamento direto – Solo 3,5m.	153
Figura 5.68 – Envoltória de resistência – Solo 3,5m.	153
Figura 5.69 – Exemplo do corpo de prova prismático utilizado no ensaio geofísico.	154
Figura 5.70 – Visor do osciloscópio – Solo 1,5m.	154
Figura 5.71 - Visor do osciloscópio – Solo 3,5m.	155
Figura 5.72 - Visor do osciloscópio – Solo 5,5m.	156
Figura 5.73 – Fluxo de água através da estrutura de contenção.	156
Figura 5.74 – Variação de volume d'água com o tempo - Solo 5,5m.	157
Figura 5.75 – Fluxograma dos dimensionamentos apresentados nos Capítulos 6 e 7.	158
Figura 6.1 – Divisão das camadas do subsolo estudado.	160
Figura 6.2 – Resultados do estágio 1.	161
Figura 6.3 – Resultados do estágio 3.	161
Figura 6.4 – Resultados do estágio 5.	162
Figura 6.5 – Resultados do estágio definitivo.	162
Figura 6.6 – Dimensionamento das pranchas pré-moldadas.	164
Figura 6.7 – SPT e esquema do grampo (obra próxima ao local estudado).	165
Figura 6.8 – Tensão- Deslocamento do ensaio de arrancamento do tirante T2 (solo no estado natural).	165
Figura 6.9 – Esboço dos tirantes.	166
Figura 6.10 – Dimensionamento do perfil metálico pelo software Visual Metal.	167
Figura 7.1 – Definição do perfil geotécnico.	169
Figura 7.2 – Modelo numérico utilizado na presente análise.	169
Figura 7.3 – Ensaio triaxial: real vs. modelo numérico – Solo 1,5m.	171
Figura 7.4 – Ensaio triaxial: real vs. modelo numérico – Solo 3,5m.	171
Figura 7.5 – Ensaio triaxial: real vs. modelo numérico – Solo 5,5m.	172

Figura 7.6 – Ajuste do módulo de Young do perfil metálico.	172
Figura 7.7 – Divisão da estrutura de contenção em trechos e espessuras adotadas das pranchas pré-moldadas.	173
Figura 7.8 – Esboço dos tirantes.	174
Figura 7.9 – Coeficiente de segurança.	176
Figura 7.10 – Malha deformada - Estágio 1 (escala = 100 vezes).	177
Figura 7.11 – Malha deformada - Estágio 3 (escala = 50 vezes).	177
Figura 7.12 – Malha deformada - Estágio 5 (escala = 50 vezes).	177
Figura 7.13 – Recalque e deflexão da estrutura - Estágio 1.	178
Figura 7.14 – Recalque e deflexão da estrutura - Estágio 3.	178
Figura 7.15 – Recalque e deflexão da estrutura - Estágio 5.	179
Figura 7.16 – Recalque das fundações do edifício vizinho.	179
Figura 7.17 – Esforços no perfil metálico.	180
Figura 7.18 – Força cisalhante no perfil metálico.	181
Figura 7.20 – Verificação do perfil metálico.	182
Figura 7.21 – Distribuição dos empuxos.	183
Figura 7.22 – Fluxo de água através da estrutura de contenção e no fundo da escavação.	184

Lista de Tabelas

Tabela 2.1 – Valores de rigidez para cortinas flexíveis e rígidas (adaptado de Strom e Ebeling, 2001).	36
Tabela 3.1 – Resumo dos parâmetros exigidos pelo modelo constitutivo HSM-SS.	70
Tabela 3.2 - Distorção angular máxima admissível.	76
Tabela 3.3 – Correlação entre a resistência lateral e o N_{SPT} (Sabatini et al, 1999).	80
Tabela 4.1 – Parâmetros e propriedades necessárias por método de cálculo.	84
Tabela 4.2 – Parâmetros necessários para cada tipo de modelo constitutivo.	85
Tabela 4.3 – Fator de correção devido às tensões geostáticas em solos granulares (Schnaid e Odebrecht, 2012).	88
Tabela 4.4 – Correlações entre o N_{SPT} e os parâmetros do solo (Jopper, 2007).	91
Tabela 4.5 – Desvantagens dos ensaios de campo e laboratório.	101
Tabela 4.6 – Vantagens dos ensaios de campo e laboratório.	102
Tabela 5.1 – Resumo dos dados obtido na curva granulométrica.	126
Tabela 5.2 – Resumo dos dados obtido na curva granulométrica.	129
Tabela 5.3 – Resumo dos dados obtidos na curva granulométrica.	132
Tabela 5.4 – Características iniciais do C.P – Solo 1,5m.	135
Tabela 5.5 – Características iniciais do C.P – Solo 3,5m.	136
Tabela 5.6 – Características iniciais do C.P – Solo 5,5m.	137
Tabela 5.7 – Características iniciais do C.P – Solo 1,5m.	140
Tabela 5.8 – Características iniciais do C.P – Solo 3,5m.	144
Tabela 5.9 – Características iniciais dos C.P – Solo 5,5m.	148

Tabela 5.10 – Características iniciais do C.P – Solo 1,5m.	151
Tabela 5.11 – Características iniciais do C.P – Solo 3,5m.	152
Tabela 5.12 – Dados utilizados no cálculo do G_0 – Solo 1,5m.	154
Tabela 5.13 – Dados utilizados no cálculo do G_0 – Solo 3,5m.	155
Tabela 5.14 – Dados utilizados no cálculo do G_0 – Solo 5,5m.	156
Tabela 5.15 – Dados utilizados no cálculo do coeficiente de permeabilidade.	157
Tabela 6.1 – Parâmetros utilizados no dimensionamento.	160
Tabela 6.2 – Empuxo passivo mobilizado.	161
Tabela 6.3 – Dados utilizados no dimensionamento do tirante.	165
Tabela 6.4 – Esforços máximos calculados pelo software GEO5.	166
Tabela 7.1 – Propriedade e parâmetros de resistência.	170
Tabela 7.2 – Parâmetros de rigidez.	171
Tabela 7.3 – Dados de entrada do perfil metálico.	172
Tabela 7.4 – Dados de entrada da prancha pré-moldada.	174
Tabela 7.5 – Dados de entrada dos tirantes.	174
Tabela 7.6 – Dados de entrada da viga de coroamento.	175
Tabela 7.7 – Esforços máximos atuantes sobre a estrutura.	182
Tabela 7.8 – Esforços considerados para o dimensionamento.	182
Tabela 8.1 – Comparativos de custos da estrutura de contenção analisada.	186

Lista de Abreviaturas

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

DS – Cisalhamento Direto

DSS – Cisalhamento Direto Simples

CP – Corpo de prova

ELU – Estado Limite Último

FS – Fator de Segurança

Hz – Hertz (unidade de frequência)

HSM – Hardening Soil Model

LVDT - Linear Variable Differential Transformer (Transformador Diferencial Variável Linear)

MPa – Mega Pascal

N – Newton

N.A – Nível D'água

NBR – Norma Brasileira

KN – Quilo Newton

KPa – Quilo Pascal

Pa - Pascal

SIEG – Sistema de Estatísticas e de Informação Geográficas de Goiás

SPT – Standard Penetration Test

SGM – Superintendência de Geologia e Mineração do Estado de Goiás

TC – Triaxial de Compressão

TE – Triaxial de Extensão

ULS – Ultimate Limit State

Lista de Símbolos

ϕ'_p – Ângulo de atrito do solo obtido a partir das tensões máximas

ϕ' – Ângulo de atrito interno efetivo do solo

ϕ'_{TC} – Ângulo de atrito do solo obtido no ensaio de compressão axial

ϕ'_{TE} – Ângulo de atrito do solo obtido no ensaio de extensão axial

ϕ'_{crit} – Ângulo de atrito no estado crítico

δ_a – Ângulo de atrito solo-estrutura ativo

δ_p – Ângulo de atrito solo-estrutura passivo

b_a – Braço de alavanca do empuxo ativo

b_p – Braço de alavanca do empuxo passivo

ν_{ur} – Coeficiente de Poisson no descarregamento-recarregamento

K_{ac} – Coeficiente de empuxo ativo devido à coesão

K_a – Coeficiente de empuxo ativo

K_0 – Coeficiente de empuxo em repouso

K_p – Coeficiente de empuxo passivo

k – Coeficiente de permeabilidade

c' – Coesão efetiva

L_{flx} – Comprimento de flambagem em relação ao eixo X

L_{fly} – Comprimento de flambagem em relação ao eixo Y

L_b – Comprimento de flambagem em relação ao momento fletor negativo

ε_1 – Deformação axial

$\gamma_{0.7}$ – Deformação cisalhante no qual módulo cisalhante foi reduzido à 70% do valor máximo

ε_3 – Deformação radial

ρ – Densidade do solo

G_s – Densidade relativa dos grãos

δ - Deslocamento

ψ – Dilatância

β – Distorção angular

E_a – Empuxo ativo

E_p – Empuxo passivo

E_M – Empuxo passivo mobilizado

CK_0U – Ensaio triaxial adensado na trajetória K_0 e cisalhado em condições não drenadas

CID – Ensaio triaxial adensado isotropicamente e cisalhado em condições drenadas

CIU – Ensaio triaxial adensado isotropicamente e cisalhado em condições não drenadas

V_d – Esforço cisalhante de projeto sobre o perfil metálico

N_d – Esforço normal de projeto sobre o perfil metálico

C_N – Fator de correção devido às tensões geostáticas em solos granulares

M_{sf} – Fator de redução da resistência

f_s – Fator de segurança aplicado sobre o empuxo passivo

ρ – Flexibilidade da estrutura de contenção

$Q_{Máx}$ – Força cisalhante máxima

F_a – Força no apoio

S_r – Grau de saturação

e – Índice de vazios

α – Inclinação da estrutura de contenção

β – Inclinação do terreno

b_f – Largura do perfil

w_{LL} – Limite de Liquidez

w_{LP} – Limite de Plasticidade

μs – Microsegundos (igual a 0,000001 segundos)

E – Módulo de Elasticidade.

E_0 – Módulo de Young inicial

E_{ur} –Módulo de Young obtido na trajetória de descarregamento-
recarregamento

E_{ur}^{ref} –Módulo de Young obtido na trajetória de descarregamento-
recarregamento de referência

E_{50} – Módulo de Young secante à 50% da tensão desviadora máxima

E_{50}^{ref} – Módulo de Young secante à 50% da tensão desviadora máxima de
referência

$E_{50}^{Externo}$ – Módulo de Young secante à 50% da tensão desviadora máxima
obtido através do medidor de deformação interno

$E_{50}^{Interno}$ – Módulo de Young secante à 50% da tensão desviadora máxima
obtido através do medidor de deformação interno

E_{oed} – Módulo Edométrico

E_{oed}^{ref} – Módulo Edométrico de referência

G_0 – Módulo cisalhante máximo

I – Momento de inércia

M_{dx} – Momento fleto de projeto sobre o perfil metálico (eixo X)

M_{dy} – Momento fleto de projeto sobre o perfil metálico (eixo Y)

$M_X^{M\acute{a}x.}$ – Momento fletor máximo em relação ao eixo X

$M_Y^{M\acute{a}x.}$ – Momento fletor máximo em relação ao eixo Y

N_{SPT} – Número de golpes no ensaio SPT

$N_{SPT,60}$ – Número de golpes no ensaio SPT corrigido para eficiência de
60% da energia teórica

$(N_{SPT,1})_{60}$ – Número de golpes no ensaio SPT corrigido para eficiência de 60% da energia teórica e também corrigido para os efeitos geostáticos das tensões.

f_t – Pé (unidade de comprimento)

γ_w – Peso específico da água

γ_{NAT} – Peso específico natural

γ_{SAT} – Peso específico saturado

u – Profundidade onde a resultante do empuxo é igual a zero

k – Quilo

$Rd(Vd)$ – Resistência ao esforço cisalhante (perfil metálico)

$Rd(Nd)$ – Resistência ao esforço normal (perfil metálico)

$Rd(Mdx)$ – Resistência ao momento fletor em X (perfil metálico)

$Rd(Mdy)$ – Resistência ao momento fletor em Y (perfil metálico)

Q_u – Resistência lateral última do tirante

S_u – Resistência não drenada

K – Resultante entre o empuxo ativo e passivo

$\sum F_h$ - Somatória das forças horizontais

$\sum M_A$ – Somatória dos momentos em relação ao ponto A

$\sum M_N$ – Somatório dos momentos em relação ao ponto N

q_a – Tensão axial

τ – Tensão cisalhante

σ_{SA} – Tensão de sobre adensamento

q – Tensão desviadora

p^{ref} – Tensão efetiva de confinamento de referência

σ_h - Tensão horizontal

σ – Tensão normal ao plano de referência

σ_1 – Tensão principal maior

σ_3 – Tensão principal menor

σ_V – Tensão vertical

σ_{V_0} – Tensão vertical inicial

t_s – Tempo gasto para a onda cisalhante percorrer a amostra

q_f – Tensão desviadora na ruptura

w - Umidade

Δp – Variação da pressão

V_s – Velocidade da onda cisalhante