

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA
DO RIO DE JANEIRO



Javier Zenobio Pérez More

**Análise Numérica do Comportamento de Cortinas
Atirantadas em Solos**

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da PUC-Rio. Área de concentração: Geotecnia

Orientador: Celso Romanel

Rio de Janeiro, junho de 2003



Javier Zenobio Pérez More

**Análise Numérica do Comportamento de Cortinas
Atirantadas em Solos**

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

Celso Romanel
Orientador
PUC/Rio

Pedricto Rocha Filho
PUC/Rio

Marcus Peigas Pacheco
Instituto Politécnico/UERJ

Ney Augusto Dumont
Coordenador Setorial do Centro
Técnico Científico – PUC/Rio

Rio de Janeiro, 13 de junho de 2003

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

Javier Zenobio Pérez More

Graduou-se em Engenharia Civil pela Universidade Nacional de Engenharia (UNI-PERU) em 1993. Trabalhou como engenheiro de projetos e obras na área de construção no período entre 1994 – 2000. Ingressou no curso de mestrado em Engenharia Civil, na área de Geotecnia, no ano de 2001, atuando na linha de pesquisa Geomecânica Computacional. Desenvolveu estudos numéricos sobre o comportamento de cortinas ancoradas em solos.

Ficha Catalográfica

Pérez More, Javier Zenobio

Análise numérica do comportamento de cortinas atirantadas em solos / Javier Zenobio Pérez More; orientador: Celso Romanel. – Rio de Janeiro: PUC, Departamento de Engenharia Civil, 2003.

[18], 120f. : il. ; 30 cm

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

Incluí referências bibliográficas.

1. Engenharia civil – Teses. 2. Tirantes. 3. Cortinas ancoradas em solo. 4. Estabilidade. 5. Capacidade de carga. 6. Modelagem numérica. 7. Plaxis. I. Celso Romanel. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Civil. III. Título.

Para minha mãe e meu pai, pelos valores morais de amor e respeito,
Para minha esposa e filha, por saberem me compreender,
Para meus irmãos, com muito amor, sempre.

Agradecimentos

Desejo expressar minha gratidão ao professor Celso Romanel pelo estímulo e orientação durante a realização deste trabalho.

Ao professor Manuel Matos Fernandes, pelo apoio incondicional e auxílio na pesquisa bibliográfica.

A todos os professores do DEC da área de Geotecnia pelos conhecimentos transmitidos em cada uma das disciplinas que cursei.

À minha família e a meus amigos, que sempre me apoiaram e incentivaram para a realização deste curso de mestrado.

À minha esposa Eusebia e à minha filha Rubi, porque sempre estiveram em mim presentes, muito obrigado.

À nossa querida e estimada Ana, secretária da pós-graduação, por sua disponibilidade e atenção.

À PUC-Rio e à Capes pelos auxílios financeiros concedidos, sem os quais meus estudos no Brasil não teriam sido possíveis.

A todos os colegas da PUC-Rio, muito obrigado pela convivência.

A meus amigos, em especial aos estudantes peruanos e estrangeiros da PUC-Rio, pela amizade e carinho.

À Deus, porque sem a ajuda d'Ele, nada acontece.

Resumo

Pérez More, Javier Zenobio; Romanel Celso. **Análise Numérica do Comportamento de Cortinas Atirantadas em Solos**. Rio de Janeiro, 2003. 120p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

A necessidade da execução de escavações urbanas cada vez mais profundas tem imposto aos engenheiros geotécnicos o grande desafio de equilibrar elevados esforços horizontais com um mínimo de deslocamentos do maciço de solo e das estruturas localizadas nas vizinhanças. Para muitos destes casos, a utilização de cortinas atirantadas se constitui na solução técnica mais adequada. As primeiras obras com ancoragem em solo surgiram em diversos países (Alemanha, Itália, França) no final da década de 1950, numa evolução direta da técnica de ancoragem em maciços de rocha, e no Brasil esta técnica foi pela primeira vez empregada no Rio de Janeiro em 1957 nas rodovias Rio – Teresópolis e Grajaú – Jacarepaguá. Um grande avanço ocorreu na década de 1970, na implantação das obras do metrô de São Paulo, com a introdução de ancoragens reinjetáveis com calda de cimento sob altas pressões. Atualmente, ancoragens em solo são executadas intensamente em muitos países com cargas que em geral ainda não ultrapassam a 1500 kN.

Esta dissertação tem como objetivo principal o estudo do comportamento de cortinas ancoradas em solo, incluindo uma revisão dos principais métodos para análises de estabilidade e obtenção da capacidade de carga. A utilização do método dos elementos finitos, através do programa comercial Plaxis v.7.2, permitiu a comparação dos valores do fator de segurança calculados com métodos de equilíbrio limite, bem como a realização de estudos paramétricos com o objetivo de verificar a influência no comportamento mecânico da cortina de vários parâmetros de projeto, tais como a espessura da cortina, ângulo de inclinação dos tirantes, embutimento da estrutura, etc.

Palavras-chave

Tirantes; cortinas ancoradas em solo; estabilidade; capacidade de carga; modelagem numérica; Plaxis

Abstract

Pérez More, Javier Zenobio; Romanel Celso (Advisor). **A Numerical Analysis of the Behavior of Tied-back Earth Retaining Walls**. Rio de Janeiro, 2003. 120p. MSc. Dissertation - Department of Civil Engineering, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

The need for deeper urban excavations has imposed to geotechnical engineers the great challenge of balancing high horizontal forces with occurrence of minimum displacements in soil as well as in the structures nearby. In many of such cases, tied-back earth retaining walls are the technical solution the most recommended. The use of ground anchorage, as a direct extension of the rock anchoring technique, began in several countries (Germany, Italy, France) during the decade of 1950. In Brazil, the first application occurred in the construction of the Rio – Teresópolis and Grajaú – Jacarepaguá highways in the State of Rio de Janeiro, in 1957, and it experimented an important development during excavation of galleries for the Sao Paulo subway, in the decade of 1970, where high pressure grouting has been firstly applied as an industrial process. Currently, soil anchorages are intensely executed throughout the world, carrying loads that in general are not higher than 1500 kN yet.

This main objective of this thesis is to study the mechanical behavior of tied-back earth retaining walls, including a comprehensive review on the main methods used for stability analyses and load capacity calculation. The finite element method, through the commercial software Plaxis v.7.2, is employed in order to compare the values obtained for the safety factors through several techniques, as well as to carry out a parametric study to better understand the influence on the retaining wall of several engineering parameters such as the wall thickness, angle and number of ties, depth of wall embedment, etc.

Keywords

Anchors; tied-back walls in soil; stability of tied-back walls; numerical modeling; Plaxis

Sumário

1 INTRODUÇÃO	18
1.1. Objetivos da pesquisa e estrutura da dissertação	19
2 ASPECTOS BÁSICOS DE ANCORAGENS	21
2.1. Partes do tirante	21
2.1.1. Cabeça	21
2.1.2. Trecho livre	22
2.1.3. Trecho ancorado	22
2.2. Protensão de ancoragem	25
2.3. Tipos de tirantes	27
2.3.1. Quanto à vida útil	27
2.3.2. Quanto à forma de trabalho	28
2.3.3. Quanto à constituição	29
2.3.4. Quanto ao sistema de injeção	32
2.4. Grau de injetabilidade de solos	33
2.5. Especificações da GeoRio	34
2.6. Vantagens e desvantagens do uso de ancoragens em solo	35
2.7. Combate a empuxo de terra	37
3 ESTABILIDADE E CAPACIDADE DE CARGA DE CORTINAS ANCORADAS EM SOLO	39
3.1. Introdução	39
3.2. Modos de ruptura de cortinas atirantadas em solo	41
3.3. Estimativa da capacidade de carga de ancoragem em solo	43
3.3.1. Norma Brasileira NBR-5629	43
3.3.2. Método de Ostermayer (1974)	44
3.3.3. Método de Bustamante & Doix (1985)	47
3.3.4. Método de Costa Nunes (1987)	50
3.3.5. Método de Mecsi (1997)	51
3.4. Análise da estabilidade global pelo método das cunhas	57

3.4.1. Método de Kranz (1953)	58
3.4.2. Generalização do método de Kranz	59
3.4.3. Outros métodos	65
3.4.3.1. Definições do fator de segurança	65
3.4.3.2. Método de Costa Nunes e Velloso (1963)	66
3.4.3.3. Método de Broms (1968)	68
3.5. Método dos elementos finitos na análise da estabilidade	69
3.6. Dimensionamento das ancoragens	71
4 ANÁLISE DE CORTINAS ANCORADAS PELO MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS	76
4.1. Aspectos da modelagem de cortinas ancoradas	76
4.2. Modelagem com o programa computacional Plaxis	77
4.3. Validação da modelagem	82
4.4. Cortina ancorada em solo residual	87
4.5. Análise paramétrica de cortina ancorada em solo	99
4.5.1. Influência da espessura da cortina	103
4.5.2. Influência do ângulo de inclinação dos tirantes	105
4.5.3. Influência do embutimento da cortina	107
4.5.4. Influência do número de tirantes	108
4.5.5. Influência do nível da água	109
4.5.6. Influência da rigidez do bulbo ancorado	110
5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES	112
6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	116

Lista de figuras

Figura 2.1 – Esquema de Tirante (Yassuda e Vieira Dias, 1998)	23
Figura 2.2 – Ensaio de recebimento (NBR-5629).	26
Figura 2.3 – Ensaio de recebimento (esquerda) e ensaio de fluência (direita) recomendados pela NBR-5629	27
Figura 2.4 – Tirante típico permanente (GeoRio, 2000).	28
Figura 3.1 – Mecanismo de transferência de carga em ancoragens (Juran e Elias, 1991).	40
Figura 3.2 – Sistema idealizado de forças sobre cortinas atirantadas (Hanna, 1982).	40
Figura 3.3 – Ensaio em cortinas multi-ancoradas em solos: rotação ao redor do topo (foto superior); rotação ao redor da base (foto média); cortina inclinada de 15° com rotação ao redor da base (foto inferior) – Dina (1973)	41
Figura 3.4 – Tipos de ruptura de uma cortina ancorada em solo (GeoRio, 2000).	42
Figura 3.5 – Tipos de ruptura global: em cunha e generalizada (GeoRio, 2000).	43
Figura 3.6 – Capacidade de carga limite de ancoragem em solos granulares de acordo com Ostermayer (1974).	45
Figura 3.7 – Resistência ao cisalhamento por unidade de comprimento de ancoragens em solos coesivos (Ostermayer, 1974).	46
Figura 3.8 – Influência da pressão de injeção na resistência ao cisalhamento em solos coesivos (Ostermayer, 1974).	46
Figura 3.9 – Correlações empíricas para resistência ao cisalhamento por unidade de comprimento em areias / cascalhos (Bustamante & Doix, 1985).	49
Figura 3.10 – Correlações empíricas para a resistência ao cisalhamento por unidade de comprimento em argilas / siltes (Bustamante & Doix, 1985).	49
Figura 3.11 – Modelo de mobilização da resistência ao cisalhamento na	

interface bulbo-solo (Mecsi, 1997).	52
Figura 3.12 – Diagrama para cálculo da variação de volume do trecho ancorado (esquerda) e seção transversal da ancoragem após injeção (direita) - Mecsi (1997).	56
Figura 3.13 – Tipos de ruptura na análise da estabilidade global de cortinas ancoradas: (a) em cunha; (b) generalizada (Matos Fernandes, 1990).	57
Figura 3.14 – Análise de estabilidade do “maciço de ancoragem” (Kranz, 1953).	59
Figura 3.15 – Generalização do método de Kranz (Ranke & Ostermayer, 1968).	60
Figura 3.16 – Análise de estabilidade global para uma cortina bi-ancorada – caso 1 (Ranke & Ostermayer, 1968)	61
Figura 3.17 – Análise de estabilidade global para uma cortina bi-ancorada – caso 2. (Ranke & Ostermayer, 1968).	62
Figura 3.18 – Análise de estabilidade global para uma cortina bi-ancorada – caso 3 (Ranke & Ostermayer, 1968).	63
Figura 3.19 – Polígono de forças do método de Ranke e Ostermayer para o caso de solos com coesão (Pacheco & Danziger, 2001).	64
Figura 3.20 – Análise de estabilidade pelo método de Costa Nunes e Velloso (GeoRio, 2000)	67
Figura 3.21 – Análise de estabilidade considerando o equilíbrio do solo e da cortina (Broms, 1968).	69
Figura 3.22 – Aspectos do dimensionamento de cortinas ancoradas (Littlejohn, 1972; Ostermayer, 1976).	72
Figura 3.23 – Espaçamentos entre ancoragens (Pinelo, 1980).	73
Figura 4.1 – Modelagem de ancoragem com mola e elementos planos (Potts, D. & Zdravkovic, L., 2001).	78
Figura 4.2 – Determinação de tensões nos cantos de estruturas: a) sem elementos de interface; b) considerando elementos de interface (Manual Plaxis v.7.2).	80
Figura 4.3 – Corte do túnel projetado mostrando posição das cortinas principais e secundárias de estaca prancha (Gysi & Morri, 2002).	84

Figura 4.4 – Geometria da parede – LARSSSEN 23 e 24.	84
Figura 4.5 – Comparação de deslocamentos horizontais medidos e previstos para as cortinas principais (esquerda) e secundárias (direita).	86
Figura 4.6 – Comparação das distribuições dos momentos fletores finais medidos e previstos ao longo das cortinas principais (esquerda) e secundárias (direita).	87
Figura 4.7 – Geometria do problema e malha de elementos finitos triangulares quadráticos (15 nós).	88
Figura 4.8 – Deslocamentos horizontais da cortina durante processos de escavação e ancoragem.	90
Figura 4.9 – Componentes de deslocamento vertical (acima) e horizontal (abaixo) no maciço.	91
Figura 4.10 – Componentes de deslocamento e de tensões na cortina ancorada.	92
Figura 4.11 – Deslocamentos totais previstos para o solo de interface (acima) e bulbos (abaixo) nas linhas de tirantes superior e inferior.	93
Figura 4.12 – Distribuição de tensões ao longo do bulbo para as linhas de tirante superior (acima) e inferior (abaixo).	93
Figura 4.13 – Influência da espessura da cortina nos deslocamentos horizontais e distribuição dos momentos fletores.	94
Figura 4.14 – Geometria da cunha, tirante e dados do solo para determinação de FS pelo método de Costa Nunes e Velloso (1963).	95
Figura 4.15 – Polígono de forças e valores para cálculo do FS pelo método de Kranz generalizado.	95
Figura 4.16 – Zona de plastificação no solo na iminência do colapso.	96
Figura 4.17 – Distribuição dos deslocamentos na iminência do colapso do solo.	97
Figura 4.18 – Superfícies de ruptura nos métodos de equilíbrio limite de Costa Nunes e Velloso (esquerda) e Kranz generalizado (direita).	98
Figura 4.19 – Distribuições dos contornos de deformação cisalhantes com a aproximação das condições de colapso do maciço do solo.	98
Figura 4.20 – Geometria do problema e malha de elementos finitos utilizada (elementos quadráticos de 6 nós).	100

Figura 4.21 – Deslocamentos horizontais da cortina durante as etapas de construção.	101
Figura 4.22 – Deslocamentos horizontais (acima) e verticais (abaixo) no maciço de solo ao final da construção da cortina.	102
Figura 4.23 - Deslocamentos verticais da superfície do terreno	102
Figura 4.24 – Influência da espessura da cortina e da carga de protensão nos deslocamentos horizontais finais da cortina ancorada.	104
Figura 4.25 – Variação da carga efetiva no tirante com sua profundidade e espessura da cortina. Carga de protensão nominal $T = 875 \text{ kN}$.	104
Figura 4.26 – Momentos fletores finais para as cortinas analisadas considerando-se $T=875 \text{ kN}$.	105
Figura 4.27 – Carga efetiva nas linhas de tirantes para protensão nominal $T = 875 \text{ kN}$.	106
Figura 4.28 – Influência dos ângulos de inclinação dos tirantes nos deslocamentos horizontais e verticais da cortina ancorada.	106
Figura 4.29 – Influência do embutimento da cortina nos deslocamentos horizontais.	107
Figura 4.30 – Influência no número de tirantes nos deslocamentos horizontais da cortina ($e=0,30\text{m}$. $T=875 \text{ kN}$, $\alpha = 15^\circ$).	108
Figura 4.31 – Influência nos deslocamentos horizontais da cortina da espessura da mesma e do número de tirantes.	109
Figura 4.32 – Influência da profundidade do lençol freático nos deslocamentos horizontais e verticais da cortina ancorada.	110
Figura 4.33 – Influência da rigidez do bulbo nos deslocamentos horizontais da cortina ($e = 0,30\text{m}$. $T = 875 \text{ kN}$, $\alpha = 15^\circ$).	111

Lista de tabelas

Tabela 2.1- Resistência média ao cisalhamento de bulbos injetados (Jimenez Salas, 1980).	24
Tabela 2.2 – Características principais das cordoalhas e fios (Sondasa, 2001)	31
Tabela 2.3 – Grau de injetabilidade de solos (Novais, 2001).	33
Tabela 2.4 – Principais tipos de aços (adaptado de GeoRio, 2000)	35
Tabela 3.1 – Coeficiente de ancoragem k_f para solos granulares (NBR-5629).	44
Tabela 3.2 – Coeficiente de majoração β do diâmetro do bulbo devido à injeção	48
Tabela 4.1 – Valores típicos do fator de redução de resistência R_{inter} .	81
Tabela 4.2 – Características dos perfis de aço LARSEN 24 e LARSEN 23 utilizados nas cortinas de estacas-prancha principais e secundárias, respectivamente.	84
Tabela 4.3 – Propriedades das camadas de solo	85
Tabela 4.4 – Propriedades geomecânicas (GeoRio, 2003).	89
Tabela 4.5 – Variação do parâmetro M para cálculo de FS pelo método dos elementos finitos.	96
Tabela 4.6 – Fatores de segurança determinados pelo três métodos de cálculo analisados.	97
Tabela 4.7 – Propriedades geomecânicas (Pereira Lima, 2002).	99

Lista de Símbolos

A	Área da superfície potencial de ruptura por metro linear
$A_{aço}$	Área da seção transversal do aço
A_s	Área da seção transversal do tirante
c	Coesão do solo
c'	Coesão efetiva do solo
CF	Coeficiente de fluência
D	Diâmetro do bulbo ancorado
D_e	Diâmetro médio adotado para o trecho ancorado
D_p	Diâmetro perfurado do trecho ancorado
e	Espessura da parede
$E_{aço}$	Módulo de elasticidade do aço
E_{solo}	Módulo de Young do solo
E_{parede}	Módulo de Young da parede
$E_{injeção}$	Módulo de Young da calda de cimento
f_y	Tensão de escoamento
$F_a^{trabalho}$	Força de tração máxima
F_a^{ult}	Força de tração de trabalho
FS	Fator de segurança
h	Profundidade do centro do bulbo
H	Altura de escavação
$H_{emb.}$	Altura de embutimento
IGU	Injeção em estagio único
IRS	Injeção em estagio repetitivo
K_f	Coeficiente de ancoragem
K_o	Coeficiente de empuxo em repouso do solo
k	Índice de rigidez da ancoragem
L_b	Comprimento do bulbo de ancoragem
l_o	Trecho do bulbo em que a capacidade de carga já foi plenamente atingida

N	Número de golpes do ensaio SPT
n_d	Coeficiente de aumento do diâmetro pela pressão de injeção
n_l	Coeficiente de redução do comprimento do bulbo devido à pressão não uniforme sobre o mesmo
n_h	Fator de redução da profundidade quando esta for superior a 9m
q_s	Resistência ao cisalhamento
r_o	Raio médio do bulbo após a injeção
R_{inter}	Resistência de interface
s_{r0}	Tensão normal à superfície do bulbo, depois de completada a injeção
S_u	Resistência ao cisalhamento não drenado
T	Força atuante na seção do bulbo considerada
T_{max}	Capacidade de carga limite (ou última)
T_o	Carga no topo da ancoragem
t_{ult}	Capacidade de carga especifica da ancoragem, por metro de comprimento do bulbo
U	Perímetro médio da seção transversal do bulbo de ancoragem
W	Peso da cunha mais a componente devida ao carregamento distribuído na superfície do talude, por metro linear
α	Inclinação da ancoragem em relação à horizontal
α_o	Coeficiente redutor da resistência ao cisalhamento não drenada S_u
β	Coeficiente de majoração do diâmetro do bulbo devido à injeção
Δ	Alongamento da ancoragem até uma seção considerada
$d\Delta$	Deslocamento infinitesimal da seção do bulbo considerada
Δ_{l0}	Alongamento do trecho ancorado onde a resistência por atrito unitária já foi totalmente mobilizada
Δ_{L1}	Alongamento do trecho livre
$\Delta_{(Lb-l0)}$	Alongamento do sub-trecho ancorado onde a resistência ao cisalhamento está sendo gradualmente mobilizada
Δ_{total}	Deslocamento total da ancoragem

γ_c	Peso específico do solo na profundidade do centro do bulbo
γ_{concreto}	Peso específico do concreto
γ_{solo}	Peso específico do solo
ε	Deformação específica do aço
ϕ	Ângulo de resistência ao cisalhamento do solo
$\phi_{\text{aço}}$	Diâmetro do aço
σ_z	Tensão vertical efetiva
σ_z'	Tensão vertical efetiva no ponto médio da ancoragem
σ_{r0}	Tensão radial normal à superfície do bulbo após a injeção
σ_{0m}	Tensão normal média inicial
τ_{ult}	Resistência ao cisalhamento na interface solo-bulbo
ν	Coefficiente de Poisson
θ	Ângulo de inclinação da ancoragem em relação à normal superfície potencial de ruptura
ψ	Ângulo de dilatação
ψ_{pcr}	Inclinação da superfície de ruptura