

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA
DO RIO DE JANEIRO



Nilthson Noreña Valverde

**Análise Elasto-Plástica 3D de
Fundações Superficiais e Aterros por
Elementos Finitos**

Dissertação de Mestrado

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

Orientador: Prof. Celso Romanel.
Co-orientadora: Prof^a. Christianne de Lyra Nogueira

Rio de Janeiro
Agosto de 2010



Nilthson Noreña Valverde

Análise Elasto-Plástica 3D de Fundações Superficiais e Aterros por Elementos Finitos

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.

Prof. Celso Romanel.

Orientador
Departamento de Engenharia Civil – PUC-Rio

Prof^a. Christianne de Lyra Nogueira

Co-orientadora
Universidade Federal de Ouro Preto - UFOP

Prof^a. Michéle Dal Toé Casagrande

Departamento de Engenharia Civil – PUC-Rio

Prof^a. Andréa Sell Dyminski

Universidade Federal de Paraná – UFPR

Prof. José Eugenio Leal

Coordenador Setorial do Centro
Técnico Científico - PUC-Rio

Rio de Janeiro, 06 de agosto de 2010

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

Nilthson Noreña Valverde

Graduou-se em Engenharia Civil pela Universidad Nacional de Ingeniería UNI Lima - Perú, em 2004. Em 2008 ingressou no curso de mestrado em Engenharia Civil, da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, na área de Geotecnia, onde vem desenvolvendo investigações na linha de pesquisa em Geomecânica Computacional.

Ficha Catalográfica

Noreña Valverde, Nilthson.

Análise Elasto-Plástica 3D de Fundações Superficiais e Aterros por Elementos Finitos / Nilthson Noreña Valverde; orientador: Celso Romanel. – 2010,

122 f. : il;(color); 29,7 cm.

Dissertação (Mestrado) – Pontifícia Universidade Católica de Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Civil, 2010.

Inclui bibliografia

1. Engenharia Civil – Teses. 2. Método dos elementos finitos. 3. Modelos Constitutivos. 4. Análise Elasto-plástica. 5. Fundações. 6. Aterros. I. Romanel Celso. II. Pontifícia Universidade Católica do rio de Janeiro. III. Departamento de Engenharia Civil. IV. Título.

CDD: 624

Aos meus adorados pais María e Nicolás, pelo imenso amor e confiança.
Aos meus irmãos Berkeley, Roberth, Russell e Janeth.

Agradecimentos

À Deus, por me proteger e dar forças para chegar ao fim de mais um ciclo;

A meus orientadores, Prof. Celso Romanel, pela sua orientação impecável e paciência para o desenvolvimento deste trabalho e a Prof^a. Christianne de Lyra Nogueira, pela orientação, dedicação, e pelas longas discussões acerca da implementação numérica, obrigado mesmo por todos os conhecimentos transmitidos;

A minha querida mãe pelo amor e apoio constante e o meu pai pelo exemplo de pessoa;

A meus irmãos Berkeley, Roberth, Janeth e Russell, pelo carinho e incentivo em todo momento;

À Juliana, que foi e é meu apoio nos momentos mais difíceis, na busca de nossos objetivos;

A Carlos e Marlene, pelo apoio contínuo e incondicional, à Carlos Jr e Jimena por serem como meus irmãozinhos, obrigado mesmo;

Aos meus amigos que conheci durante a minha estadia em Ouro Preto, Daniel, Kelvinson e Diego;

Aos meus amigos da PUC-Rio, Rafael, Antonio, Gino, Carlos Paredes, Evelin, Philip, Gerson, pela amizade, convivência e apoio nestes anos de estudo;

Às Professoras Andréa e Michéle, membros da minha comissão examinadora,

pelas sugestões neste trabalho;

À Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, por ter me concedido a oportunidade de ser parte desta casa de estudos;

À UNI, Universidad Nacional de Ingenieria, Lima-Perú, em especial aos professores Zenon Aguilar e Milagro Cuba (in memoriam), pela formação na graduação, base dos conhecimentos aqui continuados;

A CAPES e FAPERJ, pelo apoio financeiro;

À Rita, pelo auxílio em todos os momentos de necessidade.

Resumo

Valverde, Nilthson Noreña; Romanel, Celso (Orientador). **Análise Elasto-plástica 3D de Fundações Superficiais e Aterros por Elementos Finitos**. Rio de Janeiro, 2010. 122p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

A grande maioria das obras geotécnicas, tais como algumas fundações, aterros e escavações, apresentam uma configuração geométrica tipicamente tridimensional. No entanto, em função da complexidade da obtenção de soluções considerando os aspectos inerentes à condição de deformação e tensão tridimensionais, as análises destas obras têm sido comumente realizadas adotando-se as aproximações de deformação plana e/ou axissimétrica. Esta dissertação apresenta um modelo computacional baseado na formulação em deslocamento do método dos elementos finitos para a simulação de problemas mecânicos de equilíbrio estático de obras geotécnicas em condição tridimensional. São ressaltados os problemas de capacidade de carga de fundações superficiais e a simulação da construção de aterros. O solo é considerado como um material não linear elasto-plástico e os modelos não associados Mohr-Coulomb modificado e Lade-Kim são adotados para representar sua relação tensão-deformação-resistência. As estratégias de solução não linear, tanto a nível global quanto em nível de ponto de Gauss, são apresentadas e discutidas. Os exemplos de capacidade de carga das fundações superficiais são comparados com os resultados da teoria do equilíbrio limite e da análise limite indicando bons resultados. O efeito da tensão intermediária na trajetória de tensão é apresentado e discutido nos exemplos de simulação da construção de aterros.

Palavras-chave

Método dos elementos finitos; Modelos constitutivos; Análise 3D; Fundações; Aterros; Processo construtivo de aterros.

Abstract

Valverde, Nilthson Noreña; Romanel, Celso (Advisor). **3D Elastoplastic Analysis for Shallow Foundations and Embankments by the Finite Element Method**. Rio de Janeiro, 2010. 122p. MSc. Dissertation - Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

The vast majority of geotechnical works, such as some foundations, embankments and excavations, show a typical three-dimensional geometric configuration. However, depending on the complexity of obtaining solutions considering the aspects inherent to the three-dimensional deformation and stress, the analysis of these works have been performed by adopting common approaches and plane strain or axisymmetric. This dissertation presents a computational model based on displacement formulation of finite element method for simulation of mechanical problems of static equilibrium condition of geotechnical works in three dimensions. It highlights the problems of load capacity of shallow foundations and the simulation of embankment construction. The soil is considered as material non-linear elastic-plastic models and non-associated Mohr-Coulomb and modified Lade-Kim are adopted to represent their relationship stress-strain-resistance. The nonlinear solution strategies, both overall and in the Gauss point level, are presented and discussed. Examples of load capacity of shallow foundations are compared with the results of the theory of limit equilibrium and limit analysis showing good results. The effect of tension in the intermediate stress path is presented and discussed in the simulation examples of the construction of embankments.

Keywords

Finite element method; Constitutive models; 3D analysis; Foundations; Landfills; Constructive process of embankments.

Sumário

1	Introdução	21
1.1.	Motivação e Objetivos	21
1.2.	Estrutura da Dissertação	22
2	O Problema Mecânico de Equilíbrio Estático em Condições Tridimensionais	23
2.1.	Formulação em deslocamento do problema mecânico de equilíbrio estático	23
2.2.	Equações Constitutivas	31
2.3.	Modelos Constitutivos	35
2.3.1.	Modelo Linear Elástico	35
2.3.2.	Modelo não Linear Elástico – Hiperbólico	36
2.3.3.	Modelo Mohr Coulomb Modificado	39
2.3.4.	Modelo Elastoplástico Lade – Kim	42
2.4.	Algoritmo de Integração de Tensão	49
3	O Programa Computacional ANLOG – Versão 3D	59
3.1.	Apresentação	59
3.2.	Elementos finitos sólidos	62
3.3.	Aproximação da geometria	64
3.4.	Operador diferencial	65
3.5.	Matriz de rigidez e vetor de força interna	66
3.6.	Simulação Numérica via MEF da construção de aterros	66
4	Verificação dos modelos constitutivos	69
4.1.	Modelo Hiperbólico ($v = \text{cte.}$)	71
4.2.	Modelo Hiperbolico ($B = \text{cte.}$)	73
4.3.	Modelo Lade – Kim	74
4.4.	Modelo Mohr - Coulomb Modificado	76

5	Análise via MEF de Fundações Superficiais	79
5.1.	Considerações Iniciais	79
5.2.	Capacidade de Carga de Fundação Superficial rasa	80
5.3.	Análise Numérica	82
5.4.	Capacidade de suporte de fundações quadradas	84
5.5.	Capacidade de suporte de fundações em condições não drenadas	93
5.6.	Influencia do tipo de análise (2D ou 3D) na determinação da capacidade de suporte de fundações	96
6	Análise de Aterros Via MEF	101
6.1.	Trajectoria de Tensões	101
6.2.	Análise e discussão dos resultados.	105
7	Conclusões e Sugestões	114
7.1.	Conclusões	114
7.2.	Sugestões	116
	Referências Bibliográficas	117

Lista de figuras

Figura 2.1 – Representação do domínio do problema e de fronteira (Adaptado de Yang, 2009)	23
Figura 2.2 – Ilustração do processo de solução não linear (adaptado de Yang, 2009)	26
Figura 2.3 – Superfície de plastificação de Mohr Coulomb (Oliveira 2006)	40
Figura 2.4 – Aproximação hiperbólica da superfície de plastificação de Mohr Coulomb	40
Figura 2.5 – Tratamento das arestas do modelo Mohr - Coulomb (Abbo e Sloan, 1986)	41
Figura 2.6 – Superfície de Plastificação do Modelo de Lade – Kim (Nogueira 1998)	44
Figura 2.7 – Modelagem do endurecimento e amolecimento (Lade e Jacobsen 2002)	47
Figura 2.8 – Representação gráfica do processo de integração explícito (Oliveira, 2006)	52
Figura 2.9 – Representação gráfica do processo de integração explícita com subincrementos (Oliveira, 2006)	53
Figura 2.10 – Tensão predita elástica incorreta (Oliveira, 2006)	55
Figura 3.1 – Ambiente de trabalho do FORTRAN	60
Figura 3.2 – Pre e post Processador GID V10	60
Figura 3.3 – Exemplo de sequencias de macro-comandos (Nogueira 1998)	62
Figura 3.4 – Elementos finitos sólidos C20	62
Figura 3.5 – Procedimento de simulação de construção em camadas “Ligar a gravidade”	67
Figura 4.1 – Simulação de ensaios CTC malha 3D de elementos finitos	70
Figura 4.2 – Carregamento da malha para a simulação da fase de cisalhamento	71
Figura 4.3 – Simulação de ensaios CTC modelo Hiperbólico ($v = cte$).	72
Figura 4.4 – Simulação dos ensaios CTC Modelo Hiperbolico ($B = cte$) “Boulder Sand” (Azevedo, 1983)	74
Figura 4.5 – Simulação de ensaio CTC Modelo Lade – Kim Areia da Lagoa Itaipu Niteroi– RJ, (Farias, 1986).	75
Figura 4.6 – Simulação de ensaios CTC modelo Mohr – Coulomb Modificado	77

Figura 4.7 – Relação tensão-deformação elástico-perfeitamente plástico	77
Figura 5.1 – Métodos para definição do fator de capacidade de suporte das fundações rasas, a partir das curvas carga-deslocamento. (Luteneger e Adams, 1998)	81
Figura 5.2 – Malha de elementos finitos - fundação superficial quadrada	84
Figura 5.3 – Simulação de fundações rígida (a), flexível (b)	85
Figura 5.4 – Fator k versus deslocamento para fundações rígida e flexível com base lisa. (para, $\phi = 10^\circ$ e ψ variável)	86
Figura 5.5 - Fator k versus deslocamento para fundações rígida e flexível com base lisa. (para, $\phi = 20^\circ$ e ψ variável)	86
Figura 5.6 – Fator k versus deslocamento para fundações rígida e flexível com base lisa. (para, $\phi = 30^\circ$ e ψ variável)	87
Figura 5.7 - Fator k versus deslocamento para fundações rígida e flexível com base rugosa. (para, $\phi = 10^\circ$ e ψ variável)	88
Figura 5.8 - Fator k versus deslocamento para fundações rígida e flexível com base rugosa. (para, $\phi = 20^\circ$ e ψ variável)	88
Figura 5.9 - Fator k versus deslocamento para fundações rígida e flexível com base rugosa. (para, $\phi = 30^\circ$ e ψ variável)	89
Figura 5.10 - Campo de deslocamento vertical (m)	91
Figura 5.11 – Campo de tensões	91
Figura 5.12 – Comparação dos valores de N_c com outros trabalhos para uma fundação quadrada, obtidos a partir de análise limite e método de equilíbrio limite.	92
Figura 5.13 - Comparação dos valores de N_c com outros trabalhos para uma fundação quadrada, obtidos a partir de análise tridimensional.	93
Figura 5.14 – Mecanismo de ruptura de Prandtl, para sapata corrida - Potts e Zdravkovic (2001).	94
Figura 5.15 – Mecanismo de colapso para fundação quadrada (Michalowsky 2001)	94
Figura 5.16 – Fator k versus δ/B para fundação rígida e flexível com base lisa.	95
Figura 5.17 - Fator κ versus δ/B para fundação rígida e flexível com base rugosa.	95
Figura 5.18 - Malha para fundação rígida-lisa com diferentes relações de L/B.	96
Figura 5.19 - Fator κ versus δ/B para fundação rígida lisa com diferentes relações de L/B.	97

Figura 5.20 - Fator κ versus δ/B para fundação rígida rugosa com diferentes relações de L/B. (solo puramente coesivo)	98
Figura 5.21 - Comparação dos valores de N_c com outros trabalhos para uma fundação com B/L variável , obtidos a partir de análise tridimensional	99
Figura 5.22 – Malha de elementos finitos para fundação circular rígido e liso.	100
Figura 5.23 - Fator κ versus δ/B para uma fundação circular rígida.	100
Figura 6.1 – Geometria de uma barragem de terra homogênea.	102
Figura 6.2 – Malha de elementos finitos para o aterro.	102
Figura 6.3 – Simulação da construção de aterros.	103
Figura 6.4 – Localização dos pontos de controle.	104
Figura 6.5 – Deslocamento vertical ao longo da linha L1.	106
Figura 6.6 - Trajetória de tensões ao longo da linha L2 (segundo Cambridge).	107
Figura 6.7 - Trajetória de tensões ao longo da linha L2 (segundo Lambe).	108
Figura 6.8 – Trajetória de tensões no ponto P.	108
Figura 6.9 – Deslocamento ao longo da linha L3.	109
Figura 6.10 - Distribuição dos deslocamentos em X no aterro simulado em 15 etapas.	110
Figura 6.11 – Distribuição dos deslocamentos em Y no aterro simulado em 15 etapas.	110
Figura 6.12 - Distribuição dos deslocamentos em X no aterro simulado em 1 etapa	111
Figura 6.13 - Distribuição dos deslocamentos em Y no aterro simulado em 1 etapa.	111
Figura 6.14 – Deslocamento vertical na linha L2 (segundo proposto por skainer)	112

Lista de quadros

Quadro 2.1 – Esquema de integração de tensão – Algoritmo Explicito	51
Quadro 2.2 – Esquema de Integração de tensão – Algoritmo explicito com subincremento	53
Quadro 2.3 – Esquema de integração de tensão – Algoritmo explícito com controle de erro (Sloan et al, 2001)	58

Lista de tabelas

Tabela 2.1 – Critérios de Convergência	29
Tabela 2.2 – Definição das constantes do vector a, Modelo Mohr – Coulomb Modificado	42
Tabela 2.3 – Definição das constantes do vector a – Modelo de Lade – Kim	45
Tabela 2.4 – Definição das constantes do vector b – Modelo Lade – Kim	46
Tabela 2.5 – Parâmetros do Modelo Lade – Kim	49
Tabela 4.1 – Parâmetros do modelo Hiperbólico ($v = cte$) Duncan e Chang (1970), tensão inicial isotrópico e carregamento axial.	72
Tabela 4.2 – Parâmetros do modelo Hiperbólico ($B = cte$) “Boulder Sand” (Azevedo 1983)	73
Tabela 4.3 – Parâmetros do modelo Lade – Kim praia Itaipu, RJ (Nogueira 1998)	75
Tabela 4.4 – Parâmetros do modelo Mohr - Coulomb Modificado	76
Tabela 4.5 – Resistencia a compressão triaxial.	78
Tabela 5.1 – Fator de capacidade de suporte (N_c) – fundação quadrada lisa	87
Tabela 5.2 – Fator de Capacidade de suporte (N_c) – fundação quadrada rugosa	89
Tabela 5.3 – Comparação do fator de capacidade de suporte N_c com outros trabalhos para uma fundação quadrada	92
Tabela 5.4 – Comparação com outros trabalhos fator de capacidade de suporte N_c – fundação quadrada – Análise 3D	93
Tabela 5.5 Comparação com outros trabalhos do fator de capacidade de suporte N_c análise para $\phi = 0^\circ$ (solo puramente coesivo)	95
Tabela 5.6 – Fator de capacidade de carga para diferentes valores de L/B fundação de base lisa.	96
Tabela 5.7 – Fator de capacidade de carga para diferentes valores de L/B fundação rígida rugosa(solo puramente coesivo)	98
Tabela 5.8 - Comparação com outros trabalhos do fator de capacidade de suporte N_c (solo puramente coesivo) com L/B variável.	99
Tabela 5.9 – Comparação com outros trabalhos (N_c para fundação circular)	100
Tabela 6.1 – Parâmetros dos solos empregados para as análises.	103

Tabela 6.2 – Resultado dos deslocamentos na crista do aterro segundo o modelo constitutivo empregado e o número de etapas da construção do aterro.

106

Lista de Símbolos

a	gradiente da função de plastificação
a	parâmetro do critério de ruptura, modelo Lade-Kim
a_h	variação da superfície de plastificação como o endurecimento
a	vetor gradiente de plastificação, modelo Lade-Kim
a	vetor gradiente de plastificação, modelo Mohr-Coulomb.
A	constante de amolecimento do modelo Lade-Kim
A	constante do modelo Mohr-Coulomb Modificado
b	gradiente da função potencial plástico, modelo Lade-Kim.
b	gradiente da função potencial plástico, modelo Mohr-Coulomb modificado.
b'	parâmetro de amolecimento, modelo Lade-Kim.
b	vetor da direção do fluxo plástico.
b	vetor de força de volume.
B	constante de amolecimento do modelo Lade-Kim.
B	constante do modelo Mohr-Coulomb Modificado.
B	matriz cinemática.
B_i	matriz da relação deformação deslocamento.
B	módulo de deformabilidade volumétrica.
c	coesão do solo.
c	parâmetro de endurecimento do modelo Lade-Kim.
C_1, C_2, C_3	constantes do modelo Lade-Kim.
C_1, C_2, C_3	constantes do modelo Mohr-Coulomb Modificado.
dv	volume elementar.
D_t	matriz constitutiva Elasto-Plástica.
D_e	matriz constitutiva elástica.
D_p	matriz constitutiva plástica.
D_m	matriz constitutiva tangente.
D	parâmetro de endurecimento, modelo Lade-Kim
E_n	matriz de endurecimento.
E	módulo de deformabilidade elástica, modelo Lade-Kim.

E_i	módulo de deformabilidade Inicial
E_t	módulo de deformabilidade tangente.
E	módulo de Young.
F_{ext}	vetor força externa.
F_{int}	vetor força interna.
F_{ext}^e	vetor de força nodal equivalente às forças externas.
F_{int}^e	vetor de força nodal equivalente às forças internas.
F_{δ}^e	vetor de força externa devido ao deslocamento prescrito.
F_b^e	vetor de força externa devido à força de peso próprio.
F_s^e	vetor de força externa devido à força de superfície.
G	módulo cisalhante.
h	parâmetro de plastificação modelo Lade-Kim.
H	módulo de endurecimento.
I_1	1º invariante do tensor de tensão.
I_2	2º invariante do tensor de tensão.
I_3	3º invariante do tensor de tensão.
I_{1D}	1º invariante do tensor de tensão desviadora.
I_{2D}	2º invariante do tensor de tensão desviadora.
I_{3D}	3º invariante do tensor de tensão desviadora.
I_d	número de iterações desejadas.
I_{i-1}	número de iterações necessárias.
J	matriz jacobiana.
K	módulo de deformação volumétrica
K_b	constante empírico do modelo hiperbólico.
K_i	constante empírico do modelo hiperbólico.
k	fator de capacidade de carga
K^e	matriz de rigidez.
K_{ur}	parâmetro empírico do modelo hiperbólico
K	parâmetro do modelo hiperbólico.

K_{ur}	parâmetro elástico do modelo Lade-Kim.
m	parâmetro de resistência, modelo Lade-Kim.
M_p	função da lei de endurecimento.
M	matriz de transformação.
M_p	módulo plástico.
M	parâmetro elástico do modelo Lade-Kim.
n	constante empírico do modelo Hiperbólico.
n	parâmetro elástico do modelo de Lade-Kim.
N_i	funções de interpolação
N	matriz das funções de forma.
N	matriz das funções de interpolação.
p	parâmetro de endurecimento do modelo Lade-Kim.
Pa	pressão atmosférica.
q	variável de estado, modelo Lade-Kim.
q	vetor de força de superfície.
Q	somatórias da força nodal equivalente ao estado de tensão.
R_k	erro relativo na integração das tensões.
R_f	parâmetro do modelo Hiperbólico.
S_u	condição de contorno essencial.
S_q	condição de contorno natural.
S	nível de tensão modelo Lade-Kim.
T	matriz de transformação.
\hat{u}	deslocamento dos pontos nodais
u	parâmetro de potencial plástico, modelo Lade-Kim.
u	vetor de deslocamento nodal a nível local.
\hat{U}	vetor de deslocamento nodal a nível global.
v	parâmetro elástico do modelo de Lade-Kim.
V	domínio do problema.
x	vetor posição no sistema de coordenada local.
X	vetor posição no sistema de coordenada global.
$w_{\xi_i}, w_{\eta_i}, w_{\zeta_i}$	pesos dos respectivos pontos de Gauss.
α	parâmetro de plastificação do modelo Lade-Kim.

δ	vetor de deslocamentos prescritos.
$\Delta\lambda_i$	fator de incremento de carga.
∇	operador diferencial.
ε	vetor de deformação.
ε_e	vetor de deformação elástica
ε_p	vetor de deformação plástica.
ξ_i	coordenada do ponto de Gauss.
η_i	coordenada do ponto de Gauss.
ζ_i	coordenada do ponto de Gauss.
ϕ	ângulo de atrito do solo.
η_1	parâmetro de resistência do modelo Lade-Kim.
σ	vetor dos componentes de tensão.
λ	constante de Lamé.
λ	parâmetro elástico do modelo de Lade-Kim.
θ	ângulo de Lode.
ν	coeficiente de Poisson.
ψ	ângulo de dilatação do solo.
ψ_2	parâmetro de potencial plástico do modelo Lade-Kim.
ψ^k	vetor da força desequilibrada em cada iteração k.