

SIMULAÇÃO NUMÉRICA DA CONSTRUÇÃO DE PILHAS DE ESTÉRIL DE MINERAÇÃO UTILIZANDO O SOFTWARE ANLOG

NUMERICAL SIMULATION OF THE MINING WASTE PILE CONSTRUCTION USING ANLOG SOFTWARE

Marcilio Baltazar Teixeira
Universidade Federal de Ouro Preto -UFOP

Christianne de Lyra Nogueira

RESUMO

Nas atividades que envolvem armazenamento de estéril de mineração é necessária a realização de um estudo prévio do comportamento mecânico das pilhas de estéril e do terreno de fundação. Face à complexidade relacionada a esse tipo de problema, a utilização de técnicas numéricas é indispensável, ainda que forneçam uma resposta aproximada para o problema. Dessa forma, apresentam-se, neste trabalho, os resultados da análise tensão-deformação-resistência com base no Método dos Elementos Finitos (MEF) de pilhas de estéril construídas pelo método ascendente e dispostas em encosta. Um modelo não linear elástico perfeitamente plástico, com plasticidade associada e de acordo com o critério de resistência de Mohr-Coulomb modificado é adotado para representar o comportamento constitutivo do material empilhado, enquanto o terreno de fundação é representado por um modelo linear elástico. A técnica de “ligar a gravidade” aplicada para simular a construção de aterros via MEF é adotada, neste trabalho, com o procedimento da malha dinâmica. As configurações geométricas das pilhas e do terreno de fundação analisadas fornecem a indicação de que alguns requisitos definidos pela legislação vigente devem ser reavaliados, principalmente no que diz respeito a algumas restrições geométricas, que deveriam ser revisitadas e melhor especificadas.

PALAVRAS-CHAVE:

Mineração. Pilha de estéril. Método dos Elementos Finitos.

ABSTRACT

In activities involving disposal of mine waste in a dump, it is necessary to carry out a preliminary study of the mechanical behavior of both dump and the foundation materials. Due to the complexity of this problem, numerical techniques are essential for providing an approximate answer to the problem. Thus, the Finite Element Method (FEM) was used to evaluate the stress-strain-strength behavior of a hillside waste dump built on a deformable foundation by the ascending method; the results of which are herein presented. The dump material is considered to be Mohr-Coulomb nonlinear elastic perfectly plastic while the foundation material is considered to be linear elastic. The numerical simulation of mine waste dump construction is carried out by the “gravity turn on” technique and the dynamic mesh

procedure. The geometric configurations are analyzed and it is concluded that some requirements established by law should be reviewed and refined.

KEYWORDS:

Mining. Waste dump. Finite Element Method.

INTRODUÇÃO

Neste estudo de caso, apresenta-se a modelagem numérica pelo Método dos Elementos Finitos (MEF) da pilha de estéril de Mont-Jardin, da Nickel SLN, em New Caledonia, por meio do Software ANLOG (Análise Não-Linear de Obras Geotécnicas). Essa mesma pilha de estéril foi analisada por Omraci (1996), que também utilizou o MEF por meio do Software CESAR-LCPCD.

Desde 1990, de acordo com Omraci *et al.* (2002), a Nickel SLN e o grupo de pesquisa da LAEGO (Laboratório de Geomecânica da Escola de Minas de Nancy, na França) têm analisado a estabilidade das pilhas de estéril em New Caledonia. Esses estudos possibilitaram a criação de uma metodologia para modelagem, caracterização, elaboração e acompanhamento dos processos de construção de pilhas de estéril.

De acordo com Omraci *et al.* (2002), as camadas da pilha de estéril (aterro) da Nickel SLN, em New Caledonia, basicamente são formadas por solos lateríticos provenientes do decapeamento dos depósitos e das operações de lavra. Essa pilha foi construída sobre um solo constituído pelo periodito (material rochoso levemente fraturado) e saprolito (mistura de blocos de rochas e solos).

MATERIAIS E MÉTODOS

ANLOG

O programa computacional ANLOG é escrito em linguagem de programação FORTRAN 90. Sua primeira versão foi desenvolvida por Zornberg (1989) e foi utilizada na análise de problemas mecânicos de equilíbrio estático, envolveu a simulação de aterros e escavações, sob condição de deformação plana e axisimétrica, e levou em conta o comportamento tensão-deformação elastoplástico.

Uma nova versão do programa foi desenvolvida por Nogueira (1998) e considerou o acoplamento entre fluxo e deformação. Para dar continuidade aos trabalhos desenvolvidos por

Nogueira (1998), outras versões desse código foram desenvolvidas. Machado Jr. (2000) desenvolveu uma versão (GEOFLUX) para análise de problemas de fluxo em meio poroso não saturado. Pereira (2003) incorporou os elementos de reforço que possibilitaram a análise de problemas mecânicos de equilíbrio estático de estruturas de solos reforçado (ANLOG v.2003). Pinto (2004) incorporou à formulação acoplada o efeito da variação do nível d'água (ANLOG v.2004). Silva (2005) introduziu os elementos tridimensionais e generalizou o código para situações 3D (ANLOG v.2005).

Oliveira (2006) incorporou ao código os elementos de reforço e interface axissimétricos, os modelos Mohr-Coulomb modificados para o solo, e Coulomb para a interface com comportamento elástico-perfeitamente plástico (ANLOG v.2006). Yang (2009) incorporou a versão do modelo Lade-Kim proposta por Lade e Jacobsen (2002), assim como sugeriu uma nova modificação para a função de amolecimento a fim de suavizar a curva tensão-deformação na condição pós-pico e, ainda, levar em conta o efeito da tensão de confinamento na resistência residual. Essa nova versão (ANLOG v.2009) foi verificada e calibrada a partir dos resultados de ensaio em centrífuga desenvolvidos por Arriaga (2001). Valverde (2010) generalizou os modelos constitutivos para simulações 3D.

O ANLOG roda numa plataforma Windows e o programa MTOOL desenvolvido pelo grupo de tecnologia em computação gráfica da PUC-Rio (TecGraf[®]) é usado como pré e pós-processadores gráficos.

ANÁLISE GEOMECÂNICA

A análise geomecânica, via MEF utilizando o ANLOG, foi feita considerando a construção em etapas, sem levar em conta os excessos de poro pressão gerados durante a construção da pilha. Os materiais envolvidos foram idealizados com um comportamento linear elástico perfeitamente plástico com plasticidade não associada, de acordo com o critério de Mohr-Coulomb Modificado. O resultado das análises obtidas via MEF são comparados com as medidas *in situ* (Omraci, 1996).

A Tabela 1 apresenta o módulo de deformabilidade adotado na análise tensão-deformação, considerando a pilha constituída por oito camadas (um módulo de elasticidade para cada camada do processo construtivo), em que se mantiveram constantes todos os outros

parâmetros geomecânicos: peso específico (γ) de 20 kN/m³; coesão (c) de 23 kPa; ângulo de atrito (ϕ) de 38°; ângulo de dilatação (ψ) de 0°; e coeficiente de Poisson (ν) de 0.4. A Tabela 2 apresenta as propriedades geotécnicas do terreno de fundação.

Tabela 1: Parâmetros construtivos da pilha de estéril

| Camada | Espessura (m) | E (MPa) |
|--------|---------------|---------|
| 1 | 10 | 51 |
| 2 | 10 | 47 |
| 3 | 10 | 44 |
| 4 | 10 | 40 |
| 5 | 10 | 35 |
| 6 | 10 | 30 |
| 7 | 10 | 24 |
| 8 | 10 | 16.5 |

Fonte: Omraci *et al.* (2002)

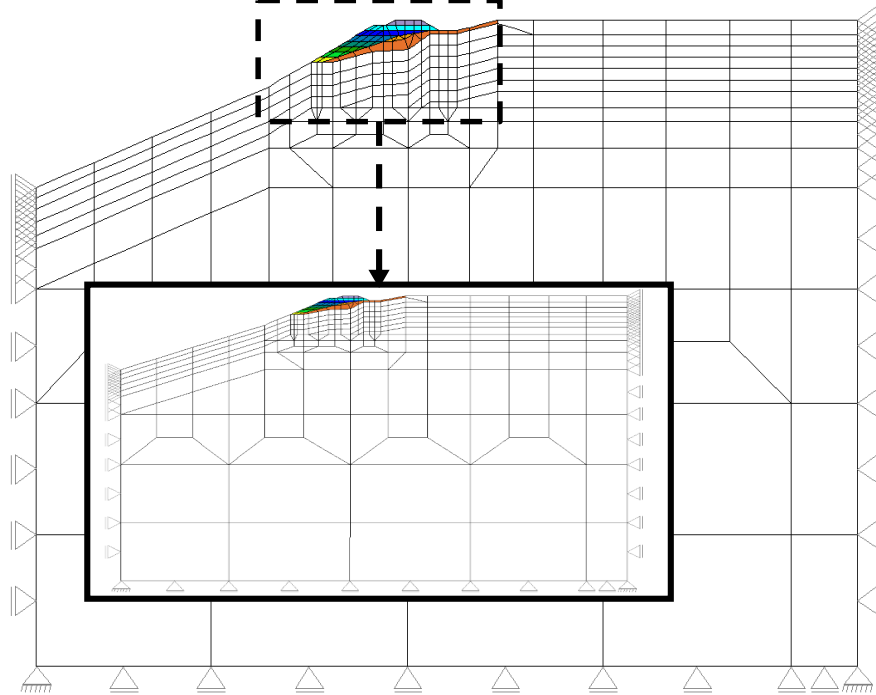
Tabela 2 Características geotécnicas dos materiais de fundação

| Material | Γ (kN/m ³) | c (kPa) | Φ (°) | Ψ (°) | E (MPa) | ν |
|-----------|-------------------------------|---------|------------|------------|-----------------|-------|
| Periodito | 27 | 100 | 30 | 0 | 10 ⁴ | 0.1 |
| Saprolito | 22 | 100 | 30 | 0 | 35 | 0.3 |

Fonte: Omraci *et al.* (2002)

Portanto, a Figura 1 apresenta a malha de elementos finitos adotada, constituída por 294 elementos Q8, 31 elementos T6 e 998 pontos nodais, construída para análise geotécnica da pilha de estéril de Mont-Jardin. Detalhe dos parâmetros geométricos da pilha de estéril de Mont-Jardin, da Nickel SLN, em New Caledonia, podem ser encontrados em Omraci (1996).

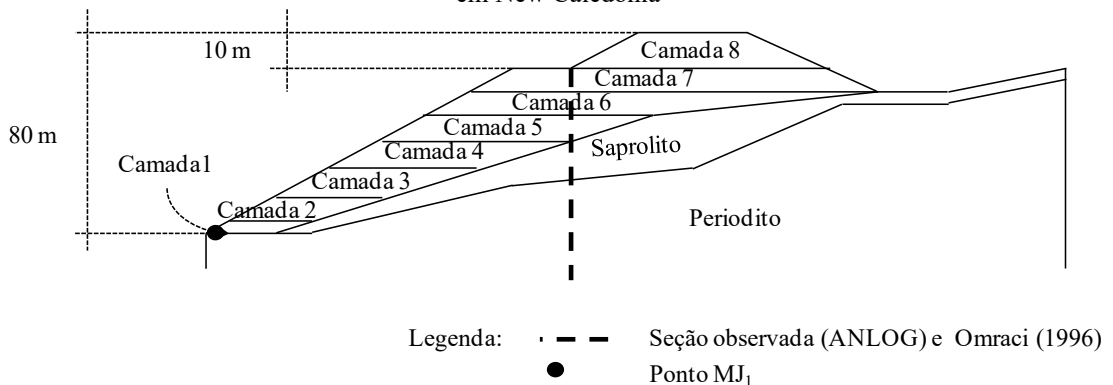
Figura 1: Malha de elementos finitos adotada



Fonte: Elaboração própria

A Figura 2 mostra o arranjo das camadas do aterro que compõem a pilha de estéril de Mont-Jardin, identifica a posição das camadas geológicas do terreno de fundação, já descritas anteriormente, e indica a seção de observação do deslocamento horizontal adotada por Omraci (1996).

Figura 2: Seção transversal do terreno de fundação e da pilha de estéril de Mont-Jardin, da Nickel SLN, em New Caledonia

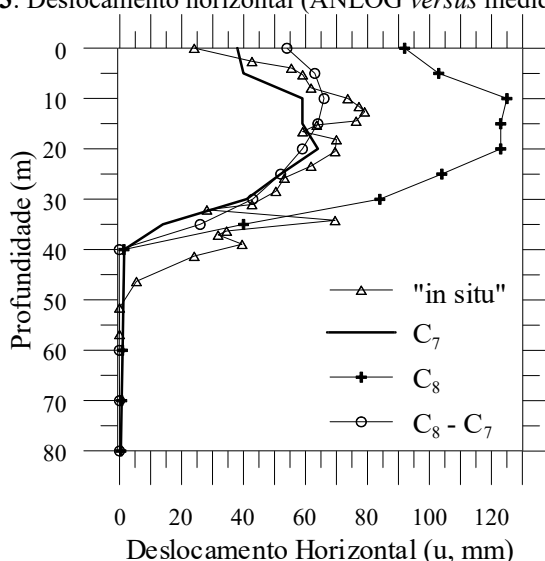


Fonte: Modificado de Omraci (1996)

RESULTADOS

A Figura 3 apresenta a variação do deslocamento horizontal ao longo da seção vertical indicada na Figura 1, obtida por este trabalho (ANLOG), e o medido *in situ*. O deslocamento horizontal *in situ* obtido por Omraci (1996) apenas coincide com o deslocamento horizontal modelado pelo ANLOG após à construção simulada da camada 8.

Figura 3: Deslocamento horizontal (ANLOG versus medida *in situ*)



C₇ – após construção da camada 7; C₈ – após construção da camada 8; C₈ - C₇ – efeito da camada 8

Fonte: Elaboração própria

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho foi utilizado o programa computacional ANLOG, que se mostrou ser uma excelente ferramenta a ser adotada na avaliação do comportamento mecânico das pilhas de estéril, tanto na fase de elaboração de projeto preliminar (para previsão do comportamento), quanto na retroanálise de situações tipicamente de risco. O estudo tensão-deformação apresentado foi conduzido sem levar em conta a geração de excessos de poro pressão durante o processo construtivo dos aterros, ou seja, considerando o comportamento mecânico sob condições drenadas.

Com o intuito de mostrar a potencialidade do programa ANLOG, foi realizada simulação numérica da construção de aterros, por meio de um estudo de caso que apresentou

a concordância dos resultados do modelo computacional com os resultados de campo. A partir das análises realizadas e apresentadas ao longo deste trabalho, chegou-se à seguinte conclusão: no estudo da pilha de estéril de uma mina da Nickel SLN, em New Caledonia, o deslocamento horizontal, ao longo de uma dada seção vertical instrumentada, apresentou uma boa concordância com os resultados numéricos

A aplicação do software ANLOG para a simulação numérica da construção de pilha de estéril de mineração pode, portanto, ser muito útil no planejamento e na avaliação dos métodos de construção de pilhas. *A priori*, a análise auxilia na escolha das possíveis configurações geométricas com base na estimativa do nível de tensão no aterro e no terreno de fundação.

REFERÊNCIAS

ARRIAGA, Fabiana. Strain distribution in geosynthetic-reinforced slopes using image analysis. **Geosynthetics** Conference. Local: Portland , Oregon, Instituição Organizadora: CMMI Div Of Civil, Mechanical, & Manufact Inn, 2001, p. 619-629.

JACOBSEN, Kim Parsberg; LADE, Poul Vestergaard. Implementation algorithm for a single hardening constitutive model for frictional materials. **International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics**, v. 26, p. 661-681, 2002.

MACHADO JR., José Christiano. **Análise de problemas de fluxo em meio poroso não saturado pelo método dos elementos finitos**. 2000. 120f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2000.

NOGUEIRA, Christianne de Lyra. **Análise não linear de escavações e aterros**. 1998. 265f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Pontifícia Universidade Católica, Rio de Janeiro, 1998.

OLIVEIRA, Rodrigo Rodrigues Vieira de. **Análise elastoplástica via MEF de problemas em solos reforçados**. 2006. 143p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2006.

OMRACI, Kamel. **Etude de la tabilité des decharges de laterites de la Nouvelle Caledonie**: application au cas de la décharge Mont-Jardin). 1996. 131f. (These de doctorat de l’Institut National Polytechnique de Lorraine INPL) – Ecole des Mines de Nancy, France, 1996.

OMRACI, Kamel; SOUKATCHOFF, Veronique Merrien; TISOT, Jean-Paul; PIGUET, Jack-Pierre. Le Nickel-SLN: stability analysis of lateritic waste deposits. **Elsevier Science, Engineering Geology**, v. 68, p. 189-199, 2002.

PEREIRA, Anderson Resende. **Modelagem numérica de estruturas de solos reforçados**. 2003. 138f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2003.

PINTO, Marcelo Antônio Furtado. **Análise numérica via MEF de problemas de adensamento devido à variação do nível d'água**. 2004. 128f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2004.

SILVA, Marco Antônio Boareto da. **Modelo computacional tridimensional pelo Método dos Elementos Finitos para solução de problemas geotécnicos**. 2005. 142f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2005.

VALVERDE, Nilthson Norena. **Análise elasto-plástica 3D de fundações superficiais e aterros por elementos finitos**. 2010. 122f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Pontifícia Universidade Católica, Rio de Janeiro, 2010.

YANG, Kuo-Hsin. **Stress distribution within Geosynthetic-Reinforced Soil Structures**. 2009. 324f. Ph.D. (Dissertation in Environmental and Civil Eng) – University of Texas, Austin, 2009.

ZORNBERG, Jorge Gabriel. **Análise por elementos finitos do comportamento de escavações utilizando um modelo elasto-plástico**. 1989. 296f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil: Geotecnia) – Pontifícia Universidade Católica, Rio de Janeiro, 1989.