

Numerical Algorithm for modeling formation of a mine fine tailings deposit

Waldyr Lopes de Oliveira Filho

Luciana Moraes Kelly de Lima

waldyr@em.ufop.br

luciana@geotecnia.em.ufop.br

Departamento de Engenharia de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto

Campus Universitário Morro do Cruzeiro – Ouro Preto, MG 35400-000 – Brazil

Resumo

O artigo trata de um algoritmo proposto para modelar a construção de um depósito de rejeito fino de mineração. O modelo baseia-se nas teorias de adensamento a grandes deformações e de ressecamento de solos finos compressíveis e se aplica a um método construtivo conhecido como sub-aéreo. O método consiste de períodos alternados de enchimento e de espera na deposição de rejeitos num reservatório. O modelo faz um uso extensivo do código computacional CONDES (Yao et al. 2002) para prever variação de volume do depósito durante sua formação. O algoritmo estabelece um conjunto de procedimentos para análise e requer uma adequada manipulação dos dados de entrada e de saída do programa. Um caso de estudo é apresentado para ilustrar o algoritmo. Este trabalho estende as aplicações do programa e também demonstra nossa habilidade de racionalmente abordar o problema.

Palavras-chaves: *algoritmo numérico, método sub-aéreo, modelagem, adensamento, ressecamento.*

Abstract

The paper deals with a numerical algorithm for modeling construction of a mine fine tailings deposit. The model is based on the large strain consolidation and desiccation of soft soils theory applied to a construction method known as sub aerial. This method consists of alternating periods of filling and resting of tailings deposition in an impoundment. The modeling makes extensive use of a computer code, CONDES (Yao et al. 2002), to predict volume change behavior of the tailings during the deposit formation. The algorithm establishes a set of procedures for analysis and requires proper input and output manipulation. A case study is also presented to illustrate the algorithm. The work extends application of the program and also demonstrates our ability to rationally address the problem.

Keywords: *numerical algorithm, sub aerial method, modeling, consolidation, desiccation.*

1. INTRODUÇÃO

Rejeitos são resíduos provenientes dos processos de beneficiamento e concentração de minérios. São materiais fabricados cujas propriedades dependem, num primeiro momento, das características de beneficiamento e do tipo de mineral lavrado. Estes materiais podem apresentar-se em frações granulométricas, uma mais grosseira (rejeito arenoso) e outra mais fina (rejeito fino ou lama) com diferentes características e propriedades.

Os depósitos de rejeitos finos de mineração embora fabricados apresentam comportamento semelhante a depósitos naturais de solos moles devido a algumas semelhanças como, por exemplo, a sua alta compressibilidade.

Estes materiais podem ser depositados em reservatórios a partir de vários métodos. No presente trabalho, o método sub-aéreo é abordado. Este método consiste em lançar o rejeito em ciclos alternando períodos de enchimento (lançamento) e de espera (período sem lançamento) (Ulrich, 2000).

Por este método, os rejeitos lançados em reservatórios passam por alguns fenômenos físicos como sedimentação, adensamento, ressecamento e eventualmente podem chegar à condição de não saturação (“Fig. 1”). A fase de sedimentação é relativamente rápida e a magnitude das variações de volume dependem do teor de sólidos inicial da polpa. Nas fases de adensamento e de ressecamento podem ocorrer significativas recalques do material depositado e isto deferido no tempo. A fase de ressecamento é dividida em dois estágios distintos: ressecamento unidimensional e ressecamento tridimensional. Na fase tridimensional ocorre a abertura e a propagação das trincas de ressecamento. Neste trabalho será abordada somente a fase unidimensional; mais detalhes da fase tridimensional podem ser encontrados em Hejleh & Znidarcic (1995).

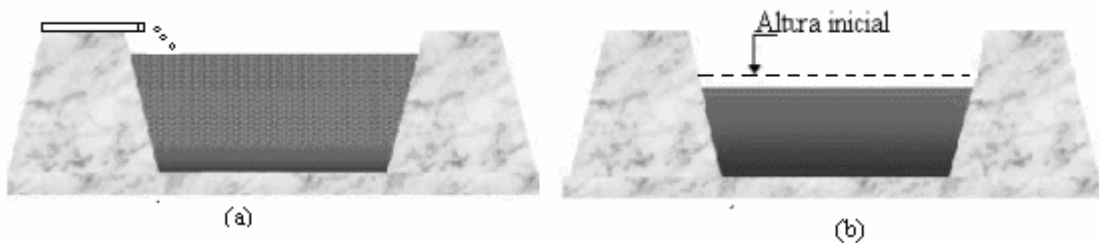


Figura 1 – Fases do método construtivo subaéreo: (a) Período de enchimento – fenômenos de sedimentação e adensamento, e (b) período de espera – fenômenos de adensamento e ressecamento (Modificado: Almeida, 2004).

O estudo do adensamento de materiais de alta compressibilidade, como os rejeitos finos de mineração, devem ser analisadas pela teoria do adensamento a grandes deformações também chamada de teoria de deformações finitas. Esta teoria pode ser estendida à fase unidimensional do processo de ressecamento (antes da abertura de trincas) e a equação diferencial da compressão unidimensional, que governa adensamento e ressecamento, é dada pela “Eq.(1)”:

$$(1 - G_s) \frac{d}{de} \left[\frac{k}{(1 + e)} \right] \frac{\partial e}{\partial a} - \frac{\partial}{\partial a} \left[\frac{k}{\gamma_w} \frac{(1 + e_0)}{(1 + e)} \frac{d\sigma'}{de} \frac{\partial e}{\partial a} \right] = \frac{1}{(1 + e_0)} \frac{\partial e}{\partial t} \quad (1)$$

Em que: G_s é a densidade real dos grãos, γ_w o peso específico da água, e o índice de vazios, a é a coordenada espacial do sistema lagrangeano, σ' a tensão vertical efetiva, k a condutividade hidráulica, e t o tempo.

A solução da equação acima requer que sejam conhecidas as relações constitutivas de compressibilidade (e vs. σ') e de permeabilidade (k vs. e) do solo.

2. CÓDIGO COMPUTACIONAL –CONDES

Para a solução do problema da compressão unidimensional e da equação acima, foi desenvolvido um código computacional chamado CONDES (Yao et al, 2002; Almeida et al, 2005). É um código empregado na solução das equações diferenciais parciais não lineares de segunda ordem que modelam os processos de adensamento e de ressecamento dos solos finos moles baseado na teoria de Abu-Hejleh (1993). A equação governadora é derivada em termos de índice de vazios como variável dependente. A poropressão é uma variável secundária obtida a partir dos cálculos da tensão efetiva e da tensão total.

O CONDES utiliza o método de diferenças finitas (MDF) na solução de equações diferenciais não lineares de segunda ordem formuladas para compressão unidimensional, contração tridimensional e propagação vertical das trincas em solos finos. A linguagem de programação é escrita em FORTRAN necessitando de uma plataforma DOS e de um arquivo do tipo DOSXMF.EXE.

No CONDES, as equações governadoras dos processos físicos de adensamento e de ressecamento e as condições de fronteira são discretizadas, especialmente, em uma malha uniforme, sendo adotada uma forma mista dos métodos das diferenças central e avançada com um esquema de integração implícito no tempo.

Dados de entrada (input) como as relações constitutivas do material (compressibilidade e permeabilidade), altura inicial, tipo de enchimento (instantâneo ou contínuo), índice de vazios mínimo, condições de contorno, entre outros são necessários para a solução da modelagem. Como arquivo de saída o programa fornece o perfil de índice de vazios versus elevação e a curva de recalque no tempo.

No caso do ressecamento, a condição de contorno a ser imposta no programa é do tipo Neuman, ou seja, taxa de evaporação (efetiva). O programa é capaz de passar automaticamente da condição de adensamento para a de ressecamento pela superfície sempre que a velocidade de drenagem devido ao adensamento na superfície for igual ou menor que aquela taxa.

3. ALGORITMO

A intenção de modelar o método construtivo adotado na formação de um depósito de rejeito fino fez com que a seguinte rotina fosse adotada:

1^a. Camada:

- Executa-se CONDES na condição de adensamento com enchimento contínuo, obedecendo a uma certa taxa de formação da camada; adota-se base impermeável. Esta fase é denominada ciclo de enchimento.
- Executa-se CONDES na condição de adensamento com possibilidade de ressecamento; neste caso a altura inicial da camada é a da simulação anterior; outras condições iniciais, como o perfil de índice de vazios, são também os da simulação anterior; a taxa de evaporação é prescrita

na fronteira superior; a base é admitida impermeável. Esta etapa é conhecida como ciclo (ou tempo) de espera.

2ª. Camada e outras sucessivas:

- Executa-se CONDES na condição de adensamento com enchimento contínuo, obedecendo a uma certa taxa de formação da camada; a altura da camada é a do final da simulação anterior; as condições iniciais são as herdadas da simulação anterior (perfil final de índice de vazios); adota-se base impermeável (ciclo de enchimento).

- Executa-se CONDES na condição de adensamento com possibilidade de ressecamento; a altura da camada é a da simulação anterior; as condições iniciais (perfil de índice de vazios) são as da simulação anterior; a taxa de evaporação é prescrita na fronteira superior; a base é admitida impermeável (ciclo de espera).

Um algoritmo semelhante a este foi adotado por Almeida (2004) para duas camadas. No entanto, a diferença entre a modelagem atual e a realizada por Almeida (2004) está em considerar que as camadas inferiores estão livres para experimentar recalques adicionais. Esta situação é diferente da estratégia adotada pelo referido autor que “congelava” a camada anterior, considerando a mesma rígida o suficiente para não sofrer recalques adicionais.

As “Figuras 2 e 3” ilustram os resultados obtidos a partir do algoritmo estabelecido com base no método construtivo adotado.

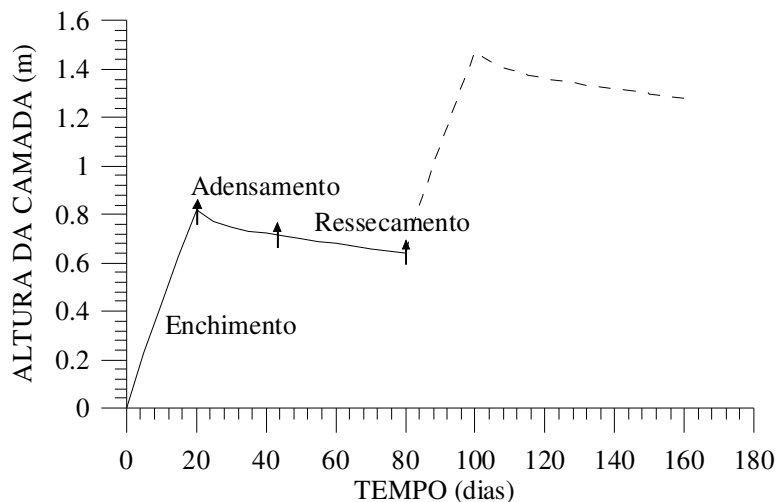


Figura 2 – Curva altura da camada versus tempo.

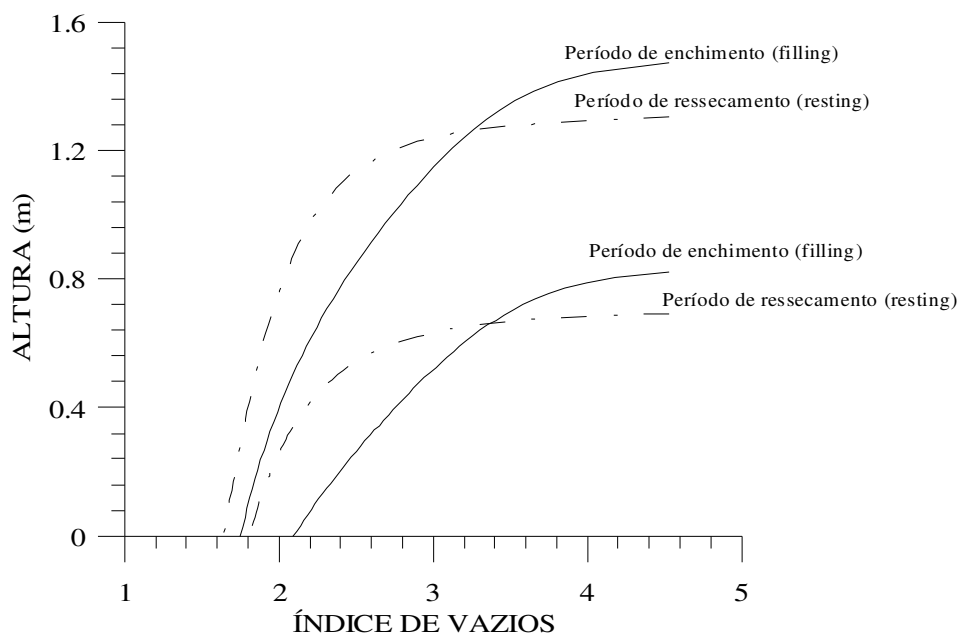


Figura 3 – Perfil de índice de vazios.

4. SIMULAÇÕES NUMÉRICAS

O algoritmo proposto anteriormente modela as fases de enchimento e de espera e segue os passos estabelecidos no manejo de um rejeito fino pelo método sub-aéreo. A seguir são apresentadas simulações para situações práticas de disposição daqueles rejeitos.

Utilizando-se os dados de entrada de Almeida (2004), as simulações foram feitas para tempos, em geral, de 20 dias de enchimento e de 60 dias de espera, e foram considerados 8 ciclos completos.

Outros dados de entrada importantes para as análises incluem as taxas de 0.002 mm/dia de evaporação potencial e de 0.06 m/dia de enchimento do reservatório, e o índice de vazios mínimo para o ressecamento, determinado em 1,05.

As condições acima de manejo supõe a existência de 4 estruturas de secagem. Ávila et al. (1995) destaca a importância de diferentes seções de um reservatório (baías) que permitam os ciclos de lançamento e de espera. Segundo Ulrich et al. (2000) estes ciclos previstos no método sub-aéreo trazem benefícios não só porque permitem a densificação do material, mas porque também há um aumento significativo da sua resistência.

4.1 Aplicação do algoritmo (tempo de espera constante)

Estas simulações objetivam mostrar, de maneira geral, as possibilidades do algoritmo modelar a formação de um depósito numa condição mais realista e, em particular, avaliar a influência do peso próprio das camadas superiores no comportamento das camadas iniciais. A “Tabela 1”, a seguir, mostra os intervalos de tempo dos ciclos correspondentes a 8 camadas.

Tabela 1. Período dos ciclos de 1 a 8, considerando tempo de espera constante.

Ciclos	Início do enchimento (dia)	Final do enchimento e início da fase de espera (dia)	Final da fase de espera (dia)
1	0	20	80
2	80	100	160
3	160	180	240
4	240	260	320
5	320	340	400
6	400	420	480
7	480	500	560
8	560	580	640

Os resultados das simulações são mostrados nas “Figs. 4 e 5”. Entretanto, antes de se analisar essas figuras, é oportuno observar a “Tabela 2” que apresenta informações sobre o ressecamento das camadas nos diversos ciclos.

Tabela 2. Tempo de ressecamento para tempo de espera constante.

Ciclo/camada	Período de espera (dia)	Tempo de espera (dia)	Início do ressecamento (dia)	Tempo de ressecamento (dia)
1	20-80	60	40	40
2	100-160	60	135	35
3	180-240	60	215	25
4	260-320	60	300	20
5	340-400	60	385	15
6	420-480	60	470	10
7	500-560	60	553	7
8	580-640	60	637	3

O início do ressecamento cada vez mais tardio em cada novo ciclo de espera, mostrado na “Tabela 2”, permite que sejam feitas algumas considerações: A primeira é a interpretação de que às deformações (recalques) por adensamento devido ao peso próprio da camada nova se somam deformações adicionais das camadas inferiores devido ao aumento da coluna de lama. Essa reativação do adensamento dessas camadas justificaria o “atraso para o início do ressecamento”. A segunda observação diz respeito à duração do ressecamento que no decorrer dos ciclos é cada vez menor e chega quase a desaparecer no último período de espera. A consequência disso serão camadas cada vez menos densificadas na sua totalidade (ação dos fenômenos físicos de adensamento e ressecamento).

A “Figura 4” mostra a progressão da espessura do depósito com o tempo segundo o manejo estabelecido. A altura de rejeito é justificada pelas etapas de enchimento e os processos físicos envolvidos, nesse caso principalmente o adensamento por peso próprio como visto na “Tabela 2”. Assim, pelo menos nessa estratégia, não muita contribuição do ressecamento na densificação do depósito.

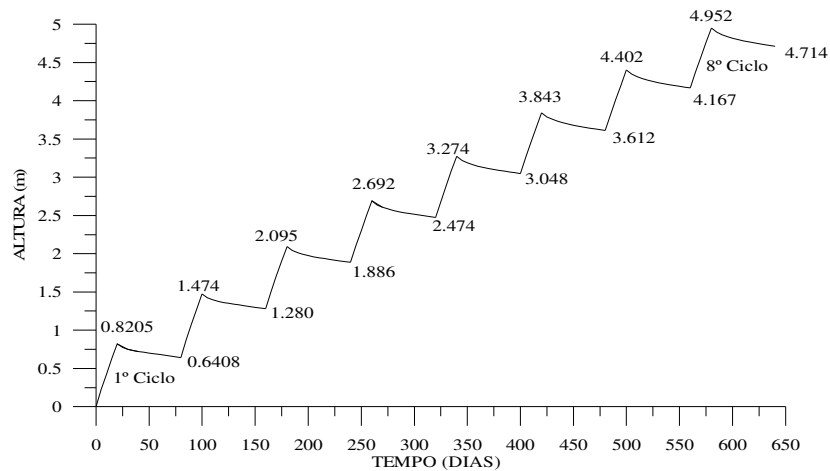


Figura 4 –Curva de altura da camada versus tempo considerando o tempo de espera constante.

A “Figura 5” mostra a evolução do perfil de índice de vazios durante a formação do depósito. Percebe-se a atuação cada vez menor do ressecamento na parte mais superficial do depósito em cada ciclo. As conseqüências já vistas quanto a densificação, podem ser estendidas à questão da resistência do material na superfície e próximo a esta, que deverá ser muito menor quando comparado com uma camada totalmente ressecada. Este último resultado pode afetar trabalhos de reabilitação do reservatório ou a execução de obras temporárias. Resumidamente, o método sub-aéreo não estaria sendo realizado na sua plenitude.

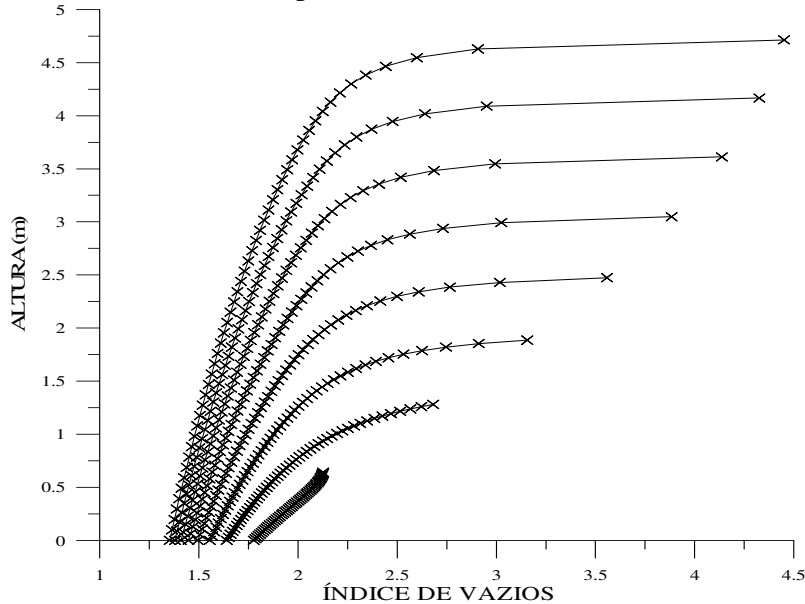


Figura 5 - Perfil de índice de vazios ao final do ressecamento considerando tempo de espera constante.

4.2 Aplicação do algoritmo (tempo de espera não constante)

Nestas simulações busca-se uma otimização da fase de ressecamento no período de espera. Assim foram utilizados os mesmos dados de entrada das simulações do item 4.1, só que com o tempo de espera variável (“Tabela 3”). A variação do tempo de espera foi estabelecido a partir de

simulações numéricas preliminares que indicavam, em cada ciclo, o início do processo de ressecamento. A essa informação (data de início do ressecamento foi somado um número constante de dias de ressecamento, no caso, adotou-se 40, o mesmo estabelecido no 1º ciclo da simulação 4.1). Desta forma, foi possível assegurar um tempo de ressecamento constante para cada camada e conseqüentemente avaliar sua interferência nos resultados finais.

Tabela 3. Períodos dos ciclos 1 ao 8 considerando o tempo de espera não constante.

Ciclos	Período de enchimento (dia)	Periodo de espera (dia)	Tempo de espera (dia)	Início do ressecamento (dia)	Tempo de ressecamento
1	0 -20	20-80	60	40	40
2	80-100	100-167	67	127	40
3	167-187	187-260	73	220	40
4	260-280	280-358	78	318	40
5	358-378	378-457	79	417	40
6	457-477	477-559	82	519	40
7	559-579	579-662	83	622	40
8	662-682	682-767	85	727	40

Os resultados dessas simulações aparecem nas “Figs. 6 e 7”. Um manejo como o proposto renderia um depósito mais densificado na comparação à proposta de manejo anterior com base nas diferenças entre as alturas finais. Adicionalmente, esse manejo possibilitaria a existência de uma camada superior mais consistente (menor índice de vazios) e conseqüentemente mais adequada a receber carregamentos de uma eventual obra temporária ou definitiva na superfície.

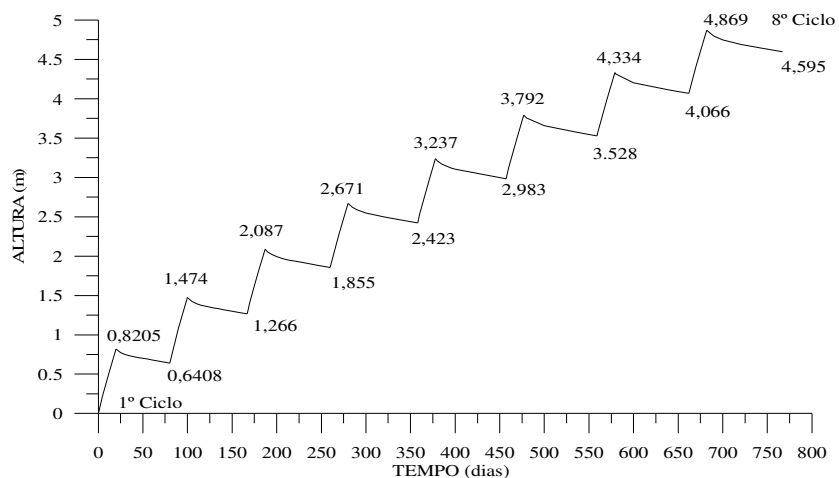


Figura 6 –Curva de Recalque considerando o tempo de espera não constante.

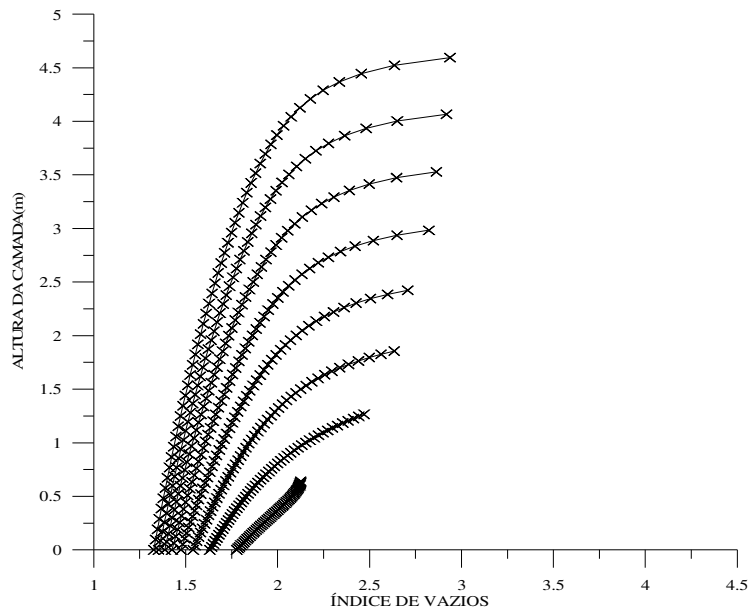


Figura 7 – Perfil de índice de vazios considerando o tempo de espera não constante.

Finalmente, vale dizer que essa última estratégia de manejo poderia ser ainda melhorada com tempos de ressecamento progressivamente maiores (maiores tempo de espera), uma vez que a estratégia de tempos de ressecamento constante ainda não corresponde a uma otimização (veja por exemplo, a recessão desigual do índice de vazios no topo da camada atual ao longo dos diversos ciclos).

5. CONCLUSÕES

O projeto de manejo de rejeitos finos de mineração pode ser adequadamente realizado por meio do algoritmo numérico proposto. A base do método é o código computacional CONDES que permite a análise de adensamento e de ressecamento de solos finos. A aplicação do algoritmo a situações práticas de manejo levou às seguintes conclusões:

- O algoritmo permite modelar a formação de um depósito de rejeito fino pelo método sub-aéreo, seguindo as fases de enchimento e de espera estabelecidos nesse manejo;
- Recalques adicionais (ou a reativação do adensamento) de camadas inferiores ocorrem e afetam significativamente a eficiência do método construtivo;
- A atuação do fenômeno de ressecamento pode ser extremamente prejudicada numa estratégia de período de espera constante, tendo como consequência camadas menos densificadas e pouco consistentes próximo à superfície;
- Uma otimização do manejo é possível com a adoção de tempos de espera progressivamente maiores, de modo a permitir a fase de ressecamento atuar num maior período;
- O algoritmo proposto representa um avanço importante na popularização do uso de ferramentas computacionais de origem acadêmica na atividade de projeto, aproximando a Indústria da Universidade.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abu-Hejleh, A. N (1993). *Desiccation Theory for Soft Soils*. Ph.D. Thesis, Department of Civil, Environmental and Architectural Engineering, University of Colorado, 206 p., Boulder, Colorado.

- Abu-Hejleh, A. N. & Znidarcic, D. (1995). Desiccation Theory for Soft Cohesive Soils. *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 121, No. 6, June, ASCE: 106-115.

- Almeida, F. E., Oliveira-Filho, W.L. & Nogueira, L.N. (2005). Análise Numérica do Processo de Ressecamento de um Rejeito Fino da Mineração de Ferro. *R. Esc. Minas (REM)*, 98 (4), p. 355-365, Ouro Preto.

- Ávila, J. P; Soares, R. & Costa, L. H. D (1995). Deposição de Rejeitos Finos pelo Método de Secagem. *III Simpósio sobre Barragens de Rejeitos e Disposição de Resíduos (REGEO)*, v. 01, p. 97-108.

- Lima, L. M. K. (2006). *Retroanálise da Formação de um Depósito de Rejeitos Finos de Mineração Construído pelo Método Sub-Aéreo*, Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Ouro Preto.

- Ulrich, B., East, D. R.; Gorman, J (2000). Subaerial tailings deposition- Design, construction and operation for facility closure and reclamation. *In: Tailings And Mine Waste'00*. Anais...Balkema, Rotterdam, p 29-37.

- Yao, T. C., Oliveira Filho, W. L., Cai, X. C. & Znidarcic, D. (2002). Numerical Solution for Consolidation and Desiccation of Soft Soils. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, v. 26, p. 139 - 161.