

Análise numérica do processo de ressecamento de um rejeito fino da mineração de ferro

Francisco Eduardo Almeida

Mestrando, Departamento de Engenharia Civil, UFOP. E-mail: francisco.eduardo@uol.com.br

Waldyr Lopes de Oliveira Filho

Professor Adjunto, Departamento de Engenharia Civil, UFOP. E-mail: waldyr@em.ufop.br

Christianne de Lyra Nogueira

Professora Adjunta, Departamento de Engenharia Civil, UFOP. E-mail: chris@em.ufop.br

Resumo

Soluções analíticas para o processo de ressecamento de um solo fino mole de alta compressibilidade, como os rejeitos finos da mineração, são de difíceis obtenções, dado a não linearidade das propriedades constitutivas do material e a complexidade das condições de contorno, que influenciam as análises desse fenômeno. Assim, o emprego de modelos numéricos, para solução desses problemas, torna-se mais vantajoso. Esse artigo apresenta um modelo numérico para análises do processo de ressecamento de um rejeito fino proveniente do beneficiamento de minério de ferro. Com base na teoria proposta por Abu-Hejleh (1993) e implementado num programa computacional de diferenças finitas, esse modelo foi calibrado a partir dos dados de um estudo de ressecamento realizado, preliminarmente, em campo e de ensaios de laboratório, para a determinação dos parâmetros constitutivos do rejeito fino. A satisfatória concordância, entre os dados das simulações e os verificados no estudo em campo, atestou a precisão do modelo obtido na análise do ressecamento do material, indicando ser o mesmo aplicável a estudos futuros, que tenham, por objetivo, aumentar a eficiência do processo de ressecamento.

Palavras-chave: ressecamento, trincas, adensamento, método das diferenças finitas, contração dos solos.

Abstract

To obtain analytical solutions for desiccation analyses of soft soil such as mine tailing slimes is difficult because of the non-linearity of the material constitutive relationships and complexity of the problem boundary conditions. Thus, it is more attractive to use of numerical models to address the desiccation phenomenon. This paper presents a numerical model for desiccation of a fine mine tailings produced by milling processes of iron ore. The modeling is based on the theory proposed by Abu-Hejleh (1993) and uses a finite difference computer code associate to that theory. This model was calibrated using field data from a previous work and results from laboratory tests. Good agreement was found between simulation results and field observations suggesting applicability of the numerical model in future designs to enhance effectiveness of the desiccation process.

Keywords: desiccation, cracking, consolidation, finite difference methods, soil shrinkage.

1. Introdução

Durante o processo de beneficiamento do minério de ferro, uma grande quantidade de rejeito fino/lama é gerada. Esse material é depositado, hidraulicamente, com baixo teor de sólidos inicial, em estruturas de contenção/barragens de rejeito, onde é submetido ao processo de ressecamento por evaporação superficial. Ao longo desse processo, o rejeito fino experimenta, seqüencialmente, os processos de sedimentação, adensamento por peso próprio e por percolação, da contração unidimensional e da contração tridimensional, onde há o desenvolvimento das trincas de ressecamento.

Apesar de ser pouco considerada nas análises de ressecamento, a sedimentação desempenha um papel importante na magnitude desse processo, pois as características iniciais da camada de solo fino mole formada dentro de um reservatório estão condicionadas a esse fenômeno físico de deposição de partículas sólidas.

A fase do adensamento, que responde à dissipação do excesso de poropressão, se inicia, mesmo, antes de concluído o estágio de sedimentação, se estendendo até o início do processo de ressecamento. Dado ao fato de o solo fino mole apresentar um elevado índice de vazios inicial, ou seja, alta compressibilidade, o seu adensamento assume grandes proporções. Assim, na sua previsão, são empregados os conceitos da teoria do adensamento a grandes deformações (Gibson et al., 1967 e 1981).

O ressecamento se inicia com a exposição do topo da camada do solo fino mole às condições atmosféricas, quando, devido à retirada de água de seu interior, a camada começa a se contrair. Ele divide-se em dois estágios. No primeiro estágio, apenas deformações verticais são originadas - contração unidimensional-, enquanto, no segundo, definido como estágio da contração tridimensional, deformações volumétricas significativas são observadas, principalmente após a abertura

e propagação das trincas de ressecamento (Abu-Hejleh, 1993).

De acordo com os conceitos da resistência dos materiais, uma trinca começa a se desenvolver em uma camada de solo fino mole submetida ao ressecamento, quando a tensão de tração, originada em qualquer posição da mesma, devido ao fenômeno da contração, alcança a resistência à tração do solo. Após se desenvolver superficialmente, uma trinca de ressecamento se propaga na direção vertical, na medida em que o índice de vazios, ao longo da profundidade, alcança o valor correspondente ao índice de vazios de abertura da trinca - e_{cr} (Abu-Hejleh e Znidarcic, 1995). Assim, após a propagação de uma trinca, no sentido vertical, tem-se a divisão da camada em dois trechos - trecho trincado e trecho não trincado/intacto. No trecho trincado, ocorrem as deformações tridimensionais, enquanto, no trecho não trincado, as deformações são apenas verticais.

O processo de ressecamento é dominado por várias condições de contorno, sendo a evaporação e a drenagem de base as que mais influenciam a sua magnitude. Além disso, uma vez desencadeado, é um processo irreversível, mesmo sob condições atmosféricas adversas.

Devido à complexidade de soluções analíticas, para o processo de ressecamento, vários modelos numéricos foram desenvolvidos, no sentido de facilitar a sua análise. Entre eles, destaca-se o desenvolvido por Abu-Hejleh (1993), que possibilitou um importante avanço no estudo de ressecamento dos solos finos moles de alta compressibilidade. Esse modelo compreende as etapas da compressão unidimensional, da abertura e da propagação das trincas verticais e da contração tridimensional, sendo aplicado às análises de ressecamento de solos finos saturados e homogêneos.

Posteriormente, Yao e Znidarcic (1997) introduziram, na equação do modelo de ressecamento, proposto por

Abu-Hejleh (1993), uma parcela para quantificar a perda de água por evaporação, durante as fases das contrações unidimensional e tridimensional. Essa introdução tornou as análises de ressecamento mais realistas, uma vez que a evaporação exerce um papel fundamental no desenvolvimento desse processo. Essa nova relação foi implementada em um programa computacional denominado CONDES, baseado no método das diferenças finitas (MDF), através de uma aproximação central. Esse programa foi utilizado no processo de validação da teoria do ressecamento, obtida através de procedimento experimental em centrífuga (Oliveira Filho, 1998), e tem se mostrado bastante eficiente, para as análises de ressecamento de solos finos moles, como os rejeitos finos da mineração de ferro.

A partir do modelo proposto por Abu-Hejleh (1993), utilizando-se o programa CONDES, foi definido um modelo numérico, para a análise do processo de ressecamento do rejeito fino do beneficiamento do minério de ferro, realizado na Unidade Industrial de Germano, propriedade da Samarco Mineração S.A. Para a calibração desse modelo, foram utilizados os dados de um estudo preliminar de campo realizado por Silva (2003) e de ensaios de laboratório executados para a determinação dos parâmetros constitutivos do material (Almeida, 2004). A comparação entre os resultados obtidos pela simulação via CONDES e os observados em campo serviu, também, para a validação do modelo numérico, que se mostrou eficiente na previsão do ressecamento do rejeito fino, dado à pequena dispersão encontrada entre os resultados.

Aspectos gerais do modelo de ressecamento proposto por Abu-Hejleh (1993) e do programa CONDES são apresentados a seguir, junto à descrição das simulações que possibilitaram a calibração do modelo numérico de ressecamento (Almeida, 2004).

2. Aspectos gerais do Modelo de Ressecamento de Abu-Hejleh (1993) e do Programa Computacional CONDES

2.1 Modelo de ressecamento proposto por Abu-Hejleh (1993)

O modelo de ressecamento de solos finos proposto por Abu-Hejleh (1993) abrange as duas fases sobre as quais se desenvolve o processo de ressecamento - compressão unidimensional e compressão tridimensional. A fase da compressão unidimensional, onde são observadas apenas deformações verticais, envolve o fenômeno do adensamento e a contração unidimensional devida à secagem do solo fino mole, sendo automática a passagem de um fenômeno para o outro. Já a fase da compressão tridimensional é caracterizada pelas deformações tridimensionais devidas à formação e propagação das trincas de ressecamento.

Na modelagem da fase da compressão unidimensional, foi utilizada a Equação (1), obtida por Gibson et al. (1967 e 1981), para o adensamento a grandes deformações.

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

em que t é o tempo, a é a coordenada lagrangeana, γ_w é o peso específico da água, G é a densidade real dos grãos, e_0 é o índice de vazios inicial, e é o índice de vazios em um tempo t , k é o coeficiente de permeabilidade e σ'_v é a tensão efetiva vertical.

As relações constitutivas índice de vazios versus tensão efetiva e índice de vazios versus coeficiente de permeabilidade são definidas, respectivamente, como relações de compressibilidade e de permeabilidade, podendo ser representadas por vários modelos matemáticos, como apresentado em Botelho (2001).

Como relações de compressibilidade e permeabilidade, para essa fase do processo, Abu-Hejleh (1993) adotou, respectivamente, as funções obtidas por Liu e Znidarcic (1991) e por Somogyi (1971).

$$e = A_1 (\sigma'_v + Z_1)^{B_1} \quad (2)$$

$$k = C e^D \quad (3)$$

em que e é o índice de vazios, k é o coeficiente de permeabilidade, σ'_v é a tensão efetiva vertical e A_1 , B_1 , Z_1 , C e D são parâmetros empíricos, obtidos, nesse estudo, através dos ensaios de adensamento induzido por percolação (HCT).

Na derivação de uma equação governadora, para a fase da contração tridimensional, Abu-Hejleh (1993) também se baseou na teoria do adensamento a grandes deformações, mas com algumas modificações, de modo a incluir aspectos da teoria do ressecamento. Posteriormente, Yao e Znidarcic (1997) introduziram, na equação por ele obtida, uma parcela para considerar, nas análises de ressecamento, a perda de água, que também ocorre pelas paredes da trinca, passando a apresentar a seguinte forma:

$$(1-G) \frac{d}{de} \left[\frac{k}{(1+e)} \right] \frac{\partial e}{\partial a} - \frac{\partial}{\partial a} \left[\frac{k}{\gamma_w} \frac{\alpha(1+e_{cr})}{(1+e)} \frac{d\sigma'_v}{de} \frac{\partial e}{\partial a} \right] + \frac{\partial}{\partial e} \left[\frac{k(e+G)}{(1+e)} \frac{d\sigma'_v}{de_{cr}} \frac{\partial e_{cr}}{\partial a} \right] \frac{\partial e}{\partial a} - \eta E \frac{\partial \alpha}{\partial a} = \frac{1}{\alpha(1+e_{cr})} \frac{\partial e}{\partial t} \quad (4)$$

em que t é o tempo, a é a coordenada lagrangeana, γ_w é o peso específico da água, G é a densidade real dos grãos, e_{cr} é o índice de vazios na abertura da trinca, e é o índice de vazios em um tempo t , k é coeficiente de permeabilidade, σ'_v é a tensão efetiva vertical, α é a "α function", E é a taxa de evaporação e η é o parâmetro de evaporação das paredes da trinca.

O índice de vazios, no instante da abertura da trinca, relaciona-se com a tensão vertical total através da "cracking function". Essa relação pode ser obtida, experimentalmente, através de ensaio de laboratório ou de observações de campo.

A "α function" foi introduzida, no modelo, para descrever a geometria das trincas, desde o momento em que a contração tridimensional livre se inicia até um determinado índice de vazios e . A "α function" é a razão entre o volume da coluna de solo trincada e a sua altura, sendo expressa em unidade de área.

Para a "cracking function" e para a "α function" da Equação 4, Yao e Znidarcic (1997) desenvolveram as seguintes funções empíricas:

$$e_{cr} = \frac{1}{d} + \frac{1}{(b\sigma_{cr} + a)^c} \quad (5)$$

$$\alpha = \frac{1+e}{1 + \frac{2}{3}e_{cr} + \frac{1}{3}e} \quad (6)$$

em que σ_{cr} é a tensão vertical na abertura da trinca, e_{cr} é o índice de vazios na abertura da trinca, e é o índice de vazios e a , b , c e d - parâmetros da equação, determinados através de ensaios de laboratório em centrífuga (Oliveira Filho, 1998) ou por medidas diretas em campo (Silva, 2003).

Em estágios mais avançados do processo do ressecamento, a perda de água por evaporação ocorre, não só a partir do topo da camada de solo fino, mas, também, através das paredes laterais das trincas. Entretanto quantificar o fluxo evaporativo, a partir dessas regiões, é muito complexo, dado às diversas condições de contorno que influenciam

a transferência de água do interior do solo para a atmosfera, como as profundidades/larguras das trincas, velocidade do vento no topo da camada, gradiente de temperatura e teor de umidade do material. Assim, para que a perda de água, através das paredes laterais das trincas, seja considerada, nas análises do ressecamento, foi introduzido, na Equação 4, o parâmetro η . Esse parâmetro multiplica a taxa de evaporação imposta sobre o topo da camada e é específico do local onde se dá o ressecamento, variando em função do clima e das configurações das próprias trincas (Yao et al., 2002).

Como relação de compressibilidade para o ressecamento tridimensional, foi adotada a mesma forma matemática expressa na Equação 2, com diferentes parâmetros empíricos. Os parâmetros A_2 , B_2 e Z_2 , que caracterizam essa nova relação, também podem ser obtidos experimentalmente, através do ensaio da sucção. Já a relação constitutiva de permeabilidade, durante a contração tridimensional, é assumida como a mesma da contração unidimensional (Abu-Hejleh & Znidarcic, 1995).

Ressalta-se que, posteriormente, comparações entre as relações constitutivas, obtidas a partir dos ensaios HCT e da sucção, mostraram que elas possuíam, não só a mesma forma matemática, como, também, parâmetros idênticos (Oliveira Filho, 1998 e Znidarcic et al., 2000). Essa descoberta, embora não possa ser generalizada pela falta de mais resultados, tem sido utilizada com bons resultados. Dessa forma, os mesmos parâmetros constitutivos são utilizados nas análises que se seguem, independentemente da fase que se deseja avaliar.

2.2 Dados gerais do CONDES

Desenvolvido por Yao e Znidarcic (1997), o CONDES é um programa computacional empregado na solução das análises de ressecamento. Nele, as equações governadoras do adensamento e do ressecamento, as condições de contorno e a equação que modela os fenô-

menos físicos na interface solo trincado/não trincado são discretizadas, espacialmente, em uma malha uniforme, sendo adotada uma forma mista dos métodos das diferenças central e avançada, com um esquema de integração implícito no tempo. Mais informações sobre os métodos e técnicas numéricas empregados pelo CONDES, para as soluções das equações que modelam os processos do adensamento e do ressecamento, podem ser obtidas em Yao e Znidarcic (1997) e Yao et al. (2002).

Escrito em linguagem de programação FORTRAN, o CONDES fornece a distribuição do índice de vazios, ao longo da camada de solo, em instantes de tempo fornecidos pelo usuário, na definição da marcha no tempo. Como variáveis secundárias, são fornecidos, em cada instante: a distribuição da poropressão ao longo da camada, a altura da camada de solo, a geometria das trincas de ressecamento, os teores de sólidos e os pesos específicos secos médios.

Como dados de entrada, para uma simulação via CONDES, devem ser fornecidos os parâmetros de compressibilidade e permeabilidade, os parâmetros da "cracking function" e o valor de η , caso se deseje avaliar a fase da contração tridimensional, a densidade real dos grãos do solo e o peso específico da água, a altura inicial (H_0) ou os dados referentes à formação da camada (fases de enchimento), a condição de contorno imposta na base e no topo da camada, o valor dos índice de vazios mínimo (e_{\min}) e o de formação da crosta (e_{cv}), o tempo inicial para a análise e os tempos definidos pelo usuário para a emissão dos arquivos de saída, o intervalo de tempo máximo a ser utilizado na marcha no tempo e o perfil de índices de vazios inicial, para o caso onde as condições iniciais não são aquelas do final da sedimentação.

O CONDES é um software numérico muito flexível e incorpora uma interface de entrada que permite a um usuário simular uma variedade de condições de campo, incluindo distribuição de índices de vazios inicial, estágios de enchimento e diversas condições de contorno.

Além disso, dispõe de uma equação particular para realizar a simulação na fronteira entre solo trincado/não trincado e de um algoritmo especial para tratar com os problemas numéricos encontrados, quando se atingem elevadas variações de índices de vazios próximos aos contornos, ou seja, da base e do topo da camada de solo fino.

Cabe ressaltar que esse algoritmo fornece solução para o adensamento e ressecamento de solos finos moles homogêneos, de alta compressibilidade, baixa resistência e baixa permeabilidade, com distribuição uniforme ou não uniforme de índice de vazios. Além disso, simula os processos para a condição de solo saturado, sendo, automaticamente, interrompido, quando o índice de vazios do solo atinge, em qualquer instante de tempo, o índice de vazios correspondente ao limite de contração (e_{\min}), obtido a partir do ensaio da contração livre. Essa condição, entretanto, não constitui uma limitação para o programa, pois é sabido que, a partir do limite de contração, embora a perda de água dos vazios do solo ainda continue a ocorrer, nenhuma variação volumétrica/deformação é significativa no mesmo.

3. Calibração do modelo numérico de ressecamento do rejeito fino da mineração de ferro

A fim de se avaliar o processo de ressecamento de um rejeito fino da mineração de ferro, Almeida (2004) calibrou um modelo numérico baseado na teoria proposta por Abu-Hejleh (1993), cuja solução pode ser obtida com o emprego do programa computacional CONDES (Yao & Znidarcic, 1997). Na etapa da calibração, foram utilizados os dados do estudo de ressecamento realizado por Silva (2003) e dos ensaios HCT e de contração livre executados por Almeida (2004). Ressalta-se que, nas simulações de calibração, partes dos dados definidos por Silva (2003), como poropressão

na base e evaporação no topo da camada, além dos parâmetros da "cracking function", foram utilizados como entrada para o CONDES, enquanto os demais dados - perfis de índice de vazios e dados de recalque e de profundidade das trincas - foram utilizados na comparação resultados da simulação versus observações de campo.

Para a calibração desse modelo, foram realizadas, primeiramente, simulações da fase de adensamento (SA). Posteriormente, os valores de altura da camada e perfis de índices de vazios finais dessas simulações foram utilizados como dados de entrada para a segunda etapa da calibração - as simulações da fase de ressecamento (SR). Essa medida se tornou necessária devido à não obtenção, entre os dados de campo, de um perfil de índice de vazios preciso correspondente à conclusão do adensamento.

3.1 Simulações da fase de adensamento

As simulações de adensamento se dividiram em dois estágios. No primeiro estágio - simulações SA1 e SA2, procurou-se avaliar o impacto das relações constitutivas do rejeito fino no processo de seu adensamento, enquanto, no segundo estágio - SA3, SA4 e SA5, buscou-se analisar o impacto das condições de contorno e o tipo de enchimento na ocorrência desse fenômeno.

Os dados de entrada para as simulações SA1 e SA2 se encontram apresentados na Tabela 1.

Ressalta-se que os parâmetros de compressibilidade e permeabilidade, apresentados na Tabela 1, foram obtidos a partir das análises dos dados dos ensaios HCT, realizados nos corpos de prova CP01 (SA1) e CP02 (SA2) de uma amostra reconstituída do rejeito fino. Os parâmetros obtidos, para um terceiro corpo de prova (CP03), não foram utilizados nas análises, por serem, praticamente, idênticos aos encontrados para o CP02. O valor do índice de vazios mínimo, $e_{\min} = 1.05$, foi definido a partir dos dados do ensaio da contração livre, realizado

com a mesma amostra utilizada para os ensaios HCT. As alturas iniciais, para as simulações, foram definidas a partir da altura de sólidos (H_s), obtida através de análises dos perfis de índice de vazios de campo (Silva, 2003) e do índice de vazios correspondente à tensão efetiva nula, obtido a partir de um ensaio de laboratório específico (Almeida, 2004). Já a carga de poropressão, para a base da camada, foi tomada como a média das leituras registradas pelos piezômetros, durante a fase do adensamento, como registrado em Silva (2003). Os demais dados foram definidos por Almeida (2004).

Os dados de recalque de campo e os obtidos nas simulações SA1 e SA2 se encontram apresentados na Figura 1.

Analisando-se os dados apresentados na Figura 1, pode-se concluir que a simulação SA1 foi a mais representativa, pois apresentou altura final de camada mais próxima da situação de campo. Essa verificação demonstrou serem os parâmetros de compressibilidade e permeabilidade do CP01 os mais represen-

tativos, para a simulação de adensamento do rejeito fino. A comparação entre os perfis de índices de vazios, verificados em campo, e o obtido na simulação SA1 (Figura 2) apresentou pouca dispersão, o que justificou ainda mais a escolha dessa simulação como a mais representativa do adensamento em campo (Almeida, 2004).

Uma vez definido que as relações constitutivas de compressibilidade e permeabilidade do CP01 foram as que possibilitaram uma maior aproximação análise numérica/dados de campo, o segundo estágio das simulações de adensamento foi iniciado, adotando-se essas relações e variando-se os valores de carga de poropressão na base da camada de lama e o processo de enchimento. Todas essas novas simulações de adensamento, classificadas como SA3, SA4 e SA5, foram realizadas em etapas, com diferentes condições de contorno de base para cada uma delas, como indicado na Tabela 2. Além disso, a SA5 considerou o enchimento contínuo, cuja ocorrência se deu durante 34 dias, a uma taxa

Tabela 1 - Dados de entrada das simulações SA1 e SA2.

Dados / Parâmetros		SA1	SA2
Par. de compressibilidade e permeabilidade - fase da contração unidimensional	A_1 (kPa^{-1})	2.5438	2.1943
	B_1	-0.1920	-0.1418
	C (m/dia)	9.45×10^{-4}	9.61×10^{-4}
	D	4.2370	5.4833
	Z_1 (kPa)	0.0495	0.0655
Altura inicial da camada - H_0 (m)		2.05	1.57
Condições de contorno	Base	$h_p = 0.34$ m	
	Topo	sobrecarga nula	
Peso específico da água - γ_w (kN/m^3)		9.81	
Densidade real dos grãos - G		3.89	
Índice de vazios mínimo - e_{\min}		1.05	
Estágio de enchimento		não considerado	
Tempo de partida (dia)		0	
Intervalo de tempo máximo (dia)		0.005	

constante de disposição de lama de 0,0603 m/dia. Nas demais análises, o estágio de enchimento não foi considerado.

Ressalta-se que os demais parâmetros e dados necessários à realização dessas simulações foram os mesmos adotados para as anteriores, estando eles apresentados na Tabela 1.

As três simulações apresentadas anteriormente foram pensadas de forma a reproduzir, cada uma a seu modo, o mais próximo possível, as condições de campo. Além disso, deve-se destacar que o tempo arbitrado, para cada condição de contorno imposta nas simulações, foi definido a partir das análises dos dados piezométricos/recalque obtidos em campo e de várias simulações preliminares realizadas via CONDES (Almeida, 2004).

Os dados de recalque e perfis de índice de vazios obtidos em campo e nas simulações SA3, SA4 e SA5 se encontram apresentados, respectivamente, nas Figuras 3 e 4.

A interrupção das simulações de adensamento, antes dos tempos estipulados na Tabela 2, deve-se ao alcance da condição de regime permanente, o que constitui um critério de parada automática pelo CONDES.

A análise da Figura 3 confirma, graficamente, a boa correspondência entre os valores previstos pelas simulações SA3, SA4 e SA5 e os valores de campo. A SA3 foi a mais próxima da situação real. Ao se analisarem os resultados da SA5, constatou-se, também, que a altura da camada de lama, obtida no final do enchimento (1.27m), não apresentou grande dispersão, quando comparada à encontrada em campo, cujo valor foi de 1.35m. Além disso, os recalques experimentados pela camada na simulação e na condição de campo, após a interrupção do enchimento, também foram próximos - 27cm observados versus 20cm previstos pela análise. Notou-se, também, um significativo recalque, devido ao adensamento, mesmo durante o período de enchimento, quando da comparação das curvas de altura nominal do depósito (altura nominal versus tempo) com a de recalque da análise (altura da camada versus tempo).

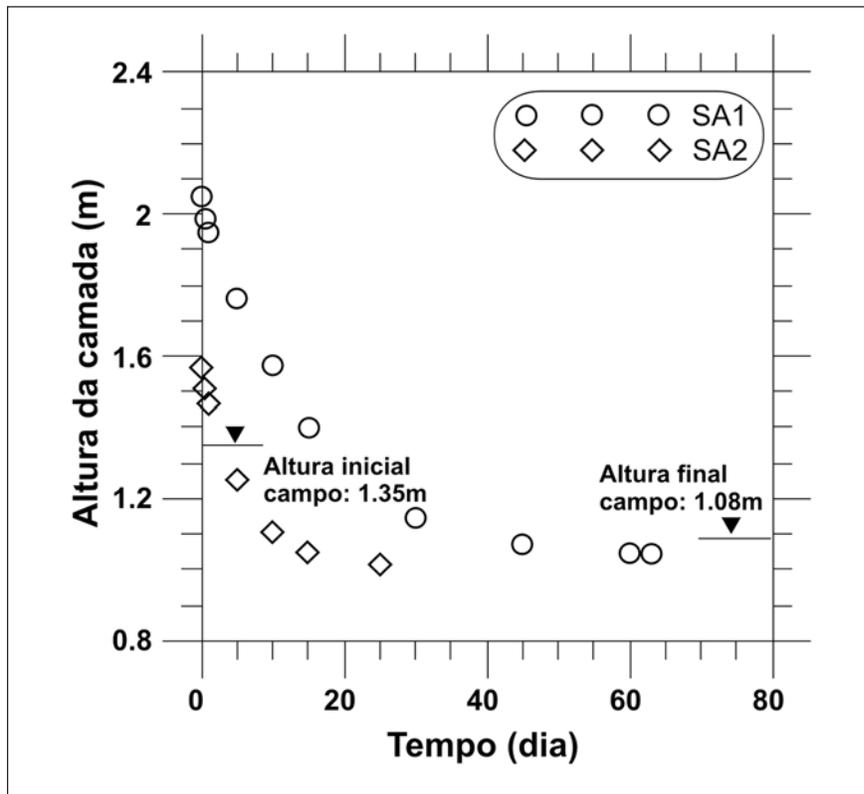


Figura 1 - Dados de recalque de campo e das simulações SA1 e SA2.

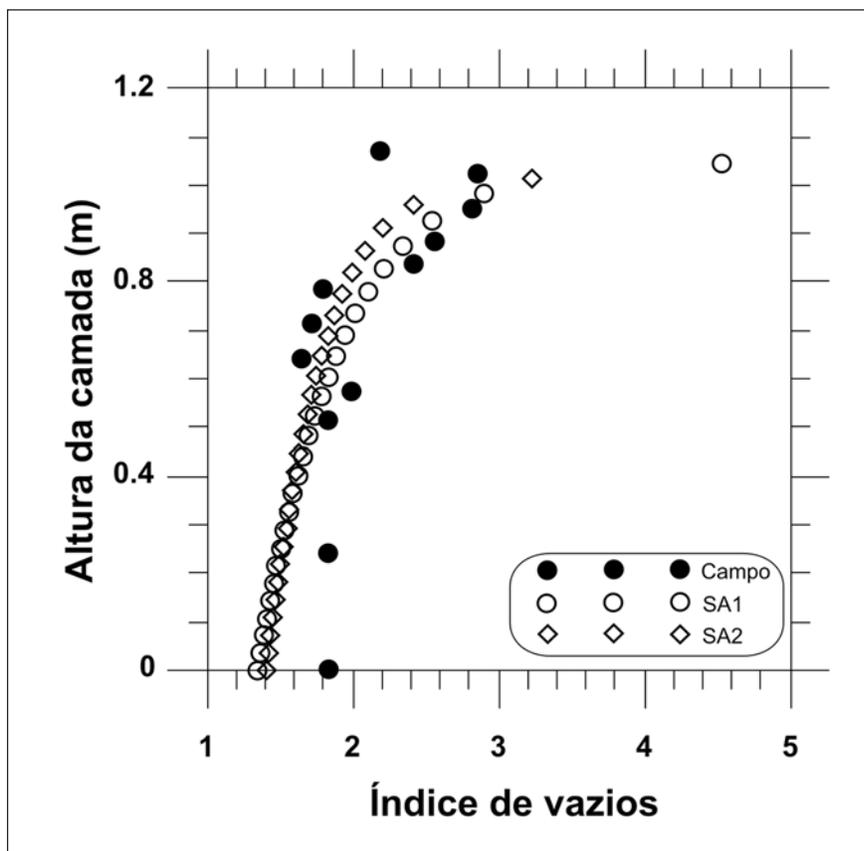


Figura 2 - Perfis de índices de vazios de campo e das simulações SA1 e SA2.

Tabela 2 - Condições de contorno para a base da camada/simulações SA3 a SA5.

Simulação	Etapa	Condição de contorno para a base	Período de tempo (dia)
SA3	1	$h_p = 1.35\text{m}$	0 a 10
	2	$h_p = 0.70\text{m}$	10 a 40
	3	$h_p = 0.34\text{m}$	40 a 140
SA4	1	impermeável	0 a 12
	2	$h_p = 0.34\text{m}$	12 a 140
SA5	1	$h_p = 0$	0 a 10
	2	$h_p = 0.17\text{m}$	10 a 20
	3	$h_p = 0.34\text{m}$	20 a 34
	4	$h_p = 0.34\text{m}$	34 a 174

A comparação entre os perfis de índices de vazios, obtidos em campo, e nas simulações SA3, SA4 e SA5 (Figura 4) não apresentou dispersão significativa, com exceção da região próxima ao topo da camada de rejeito fino.

Assim, concluiu-se que os resultados obtidos nas simulações, especialmente nas SA3 e SA5, representavam bem a condição de campo, sendo os mesmos utilizados como dados de entrada, para as simulações da fase de ressecamento.

3.2 Simulações da fase de ressecamento

As simulações da fase de ressecamento (SR) foram realizadas a partir dos dados de altura da camada e perfis de índices de vazios finais, obtidos nas simulações SA3 e SA5, além dos demais dados apresentados na Tabela 3.

Os valores dos parâmetros de compressibilidade e permeabilidade da contração unidimensional, da densidade real dos grãos do rejeito fino, do peso específico da água, do índice de vazios mínimo e do intervalo de tempo máximo, também necessários às análises da fase de ressecamento, foram os mesmos utilizados nas simulações de adensamento SA3 e SA5 e se encontram apresentados na Tabela 1. Como tempos inicial e final para as análises de ressecamento, foram escolhidos os dias 140 e 210, correspondentes ao início e interrupção do monitoramento desse processo em campo (Silva, 2003).

Analisando-se os dados apresentados na Tabela 3, observa-se que os valores dos parâmetros A_2 e B_2 da contração tridimensional são idênticos aos dos parâmetros A_1 e B_1 da compressão unidimensional. A justificativa, para essa adoção, foi anteriormente exposta no item 2.1.

Os parâmetros da "cracking function" foram os definidos por Silva (2003), a partir do ajuste dos dados índice de vazios versus tensão vertical total na abertura das trincas, obtidos do monitoramento

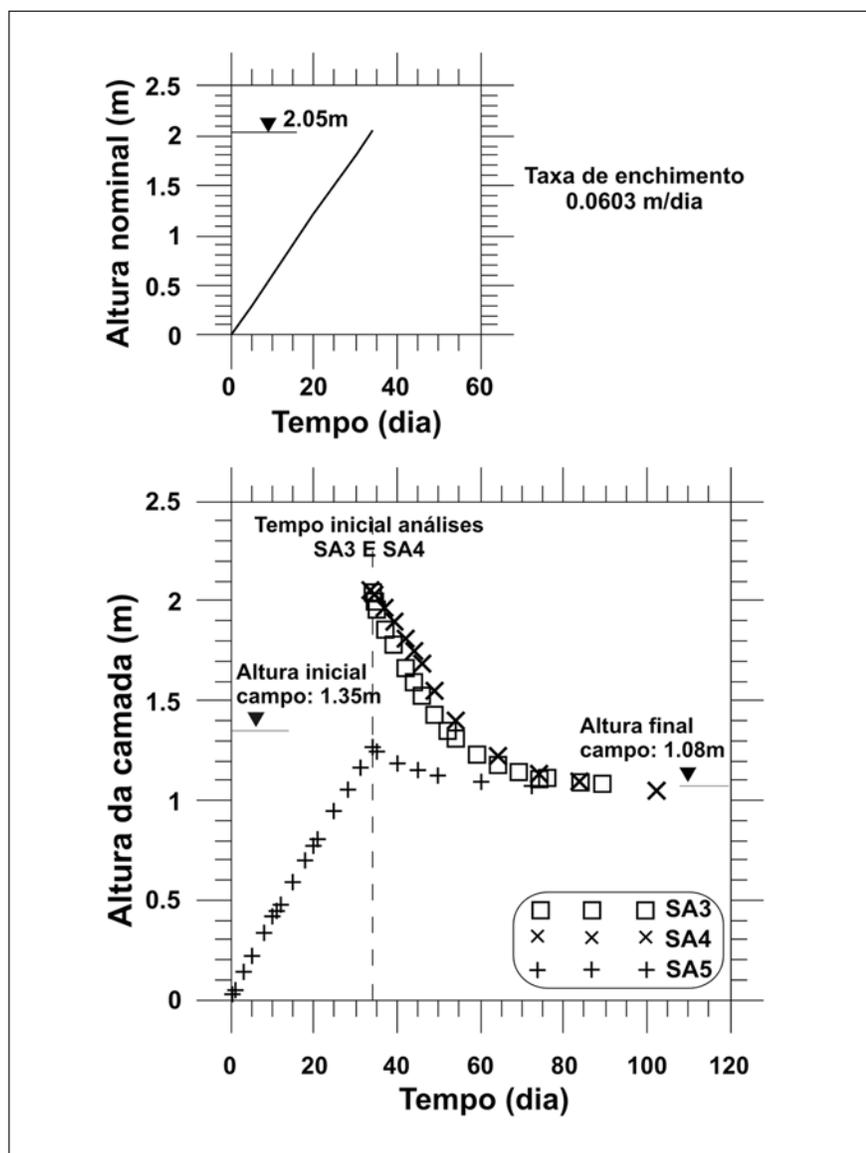


Figura 3 - Dados de recalque de campo e das simulações SA3, SA4 e SA5.

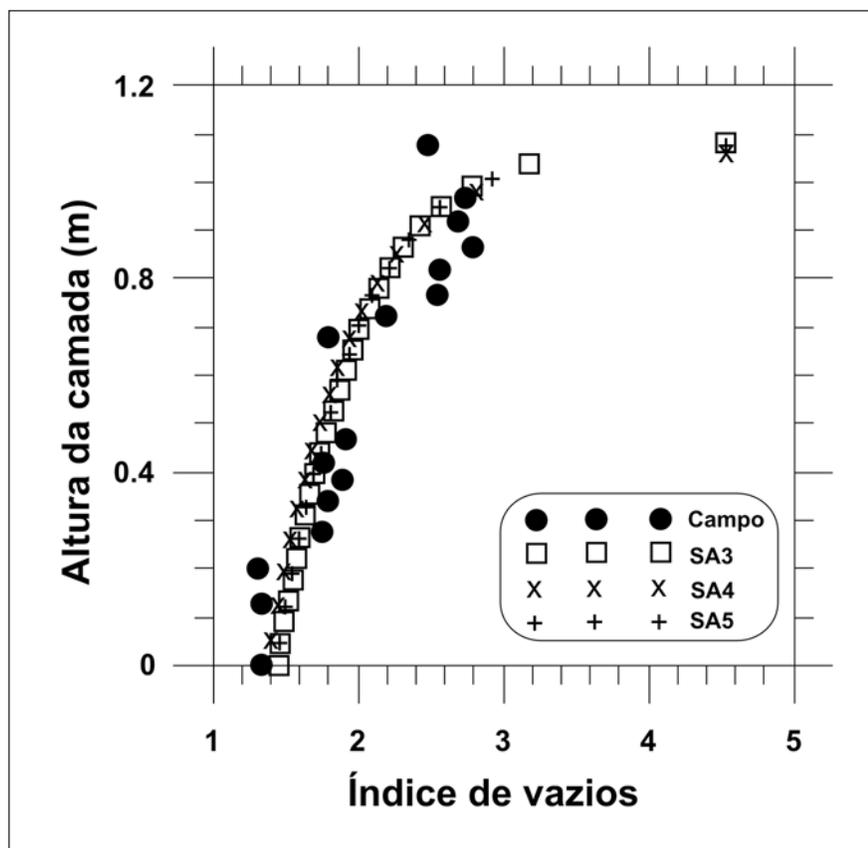


Figura 4 - Perfis de índices de vazios de campo e das simulações SA3, SA4 e SA5.

Tabela 3 - Dados de entrada das simulações de ressecamento.

Dados / Parâmetros		Valores adotados
Parâmetros da contração tridimensional	A ₂	2.5438
	B ₂	-0.1920
Parâmetros da "cracking function"	a	0.3859
	b	0.0508
	c	13665
	d	0.626 x 10 ¹⁸
Condições de contorno	Base	h _p = -0.55 m
	Topo	evaporação: 2 x 10 ⁻³ m/dia
Índice de vazios da formação de crosta - e _{cv}		1.05

da propagação de duas trincas em campo. Para o índice de vazios de formação da crosta, foi adotado o mesmo valor do índice de vazios mínimo.

Como condições de contorno, para a base e para o topo da camada de lama, foram adotados, respectivamente, os valores médios das cargas de poropressão de sucção e das taxas de evaporação registradas durante a fase de ressecamento em campo.

Devido ao fato de as simulações de ressecamento, que incluem a fase tridimensional de abertura de trincas, não poderem ser realizadas em etapas, concluiu-se que empregar valores médios para as condições de contorno do topo e da base, em análises únicas, seria uma opção.

Um outro dado importante, para a simulação de ressecamento via CONDES, é o valor do parâmetro η . Devido ao fato de esse valor não ser conhecido, para o local onde se deu a ocorrência do fenômeno, e nem por existirem disponíveis, até o presente momento, ensaios para a sua determinação, as simulações da fase de ressecamento foram realizadas para diferentes valores de η , mantendo-se fixos os demais dados e parâmetros.

Assim, foram realizadas simulações para o ressecamento, a partir dos perfis de índices de vazios/alturas de camada finais das simulações de adensamento SA3 e SA5 e dos dados apresentados nas Tabelas 1 e 3, com valores de η variando de 1.5 a 3.0, como apresentado na Tabela 4.

As simulações SR1 e SR2 apresentaram dados de recalque e perfis de índices de vazios intermediários e finais de ressecamento praticamente idênticos, o que já era esperado, pois partiram da mesma condição inicial. Assim, só se encontram apresentados, nesse artigo, os dados de recalque e perfis de índice de vazios das fases intermediária e final de ressecamento, correspondentes à simulação SR1. Mais informações sobre a simulação SR2 podem ser obtidas em Almeida (2004).

As Figuras 5, 6 e 7 apresentam os dados de recalque e os perfis de índices de vazios das fases intermediária e final de ressecamento obtidos em campo e nas simulações SR1.1 a SR1.4.

Analisando-se a Figura 5, pode-se observar uma excelente correspondência entre as alturas de camada obtidas nas simulações numéricas e as verificadas em campo durante o processo de ressecamento. A diferença máxima entre estes valores não ultrapassou 3%, estando dentro de uma margem de erro satisfatória. As simulações com η igual a 2,0 - SR1.2 e SR2.2, nos trechos correspondentes ao final do ressecamento, foram as que mais se aproximaram da condição de campo.

A simulação SR1.4 foi interrompida antes do dia 210 pelo fato de o índice de vazios ter atingido o seu valor mínimo antes desse instante. Como visto anteriormente, o alcance do índice de vazios mínimo - e_{\min} constitui o critério de parada automática de uma simulação de ressecamento pelo CONDES.

A comparação dos perfis de índice de vazios intermediários, Figura 6, permitiu perceber a influência do parâmetro nas análises de ressecamento. As simulações com η iguais a 2.0 e 2.5 foram as que mais se ajustaram aos dados de campo. Isto foi mais evidenciado no terço superior do perfil. Houve uma certa discrepância entre os valores previstos pela análise numérica e a situação de campo no terço inferior, exceto na base, onde a comparação também foi satisfatória. Essa discrepância pode ser devida, entre tantos outros fatores, ao processo de disposição da lama, que origina camadas não homogêneas, com diferentes propriedades físicas. Os perfis de índice de vazios no final do ressecamento se encontram apresentados na Figura 7. Em geral, as simulações conseguiram reproduzir, razoavelmente, os valores de campo, que apresentaram uma tendência de uniformidade no índice de vazios, com valores menores no topo da camada e quase nenhuma variação nos valores da base, na comparação com os perfis intermediários. Essa distribuição é típica

de um processo de ressecamento com dois mecanismos de compressão, um devido à evaporação superficial, que controla a parte superior do depósito, e o outro devido à ação capilar na base (Oliveira Filho, 1998).

4. Conclusão

As simulações de adensamento e ressecamento apresentadas nos itens 3.1 e 3.2 possibilitaram a calibração do modelo numérico de ressecamento implementado no programa CONDES, mos-

Tabela 4 - Classificação das simulações de ressecamento.

Simulação	Perfil de índices de vazios / altura inicial camada	η
SR1.1	Resultados finais - simulação adensamento SA3	1.5
SR1.2		2.0
SR1.3		2.5
SR1.4		3.0
SR2.1	Resultados finais - simulação adensamento SA5	1.5
SR2.2		2.0
SR2.3		2.5
SR2.4		3.0

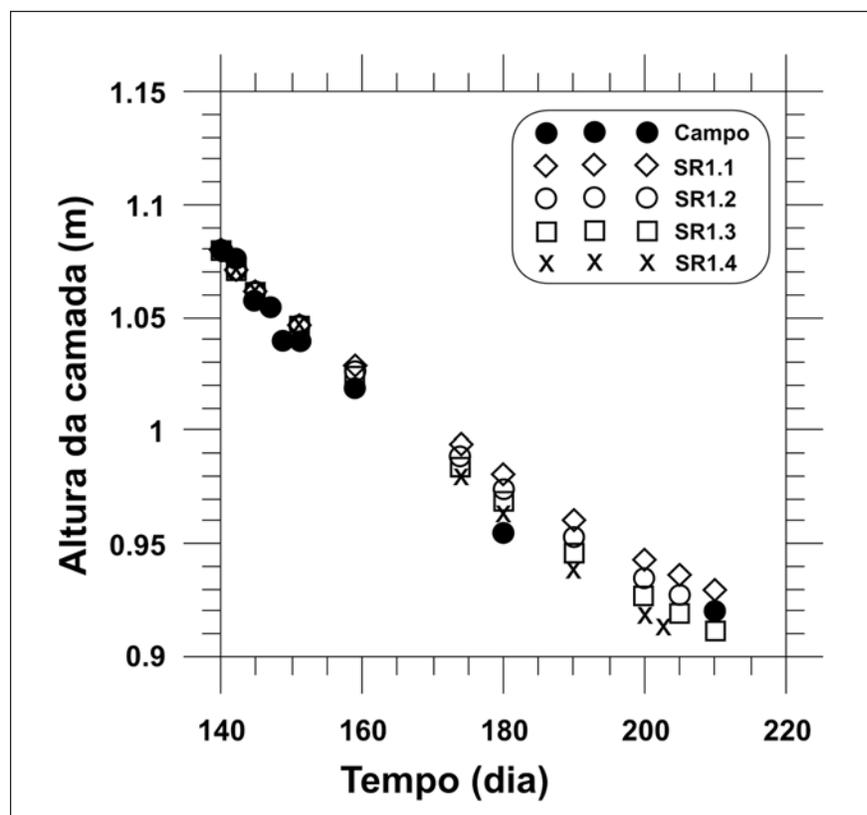


Figura 5 - Curvas de recalque de campo e das simulações SR1.1 a SR1.4.

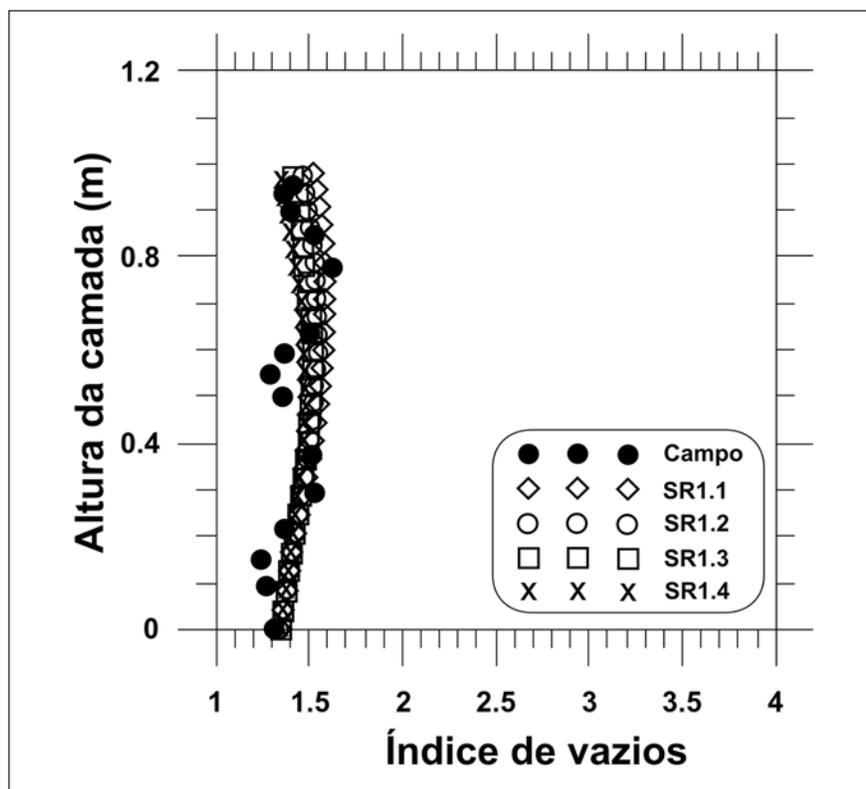


Figura 6 - Perfis de índices de vazios de campo e das simulações SR1.1 a SR1.4, fase intermediária do processo de ressecamento - dia 180.

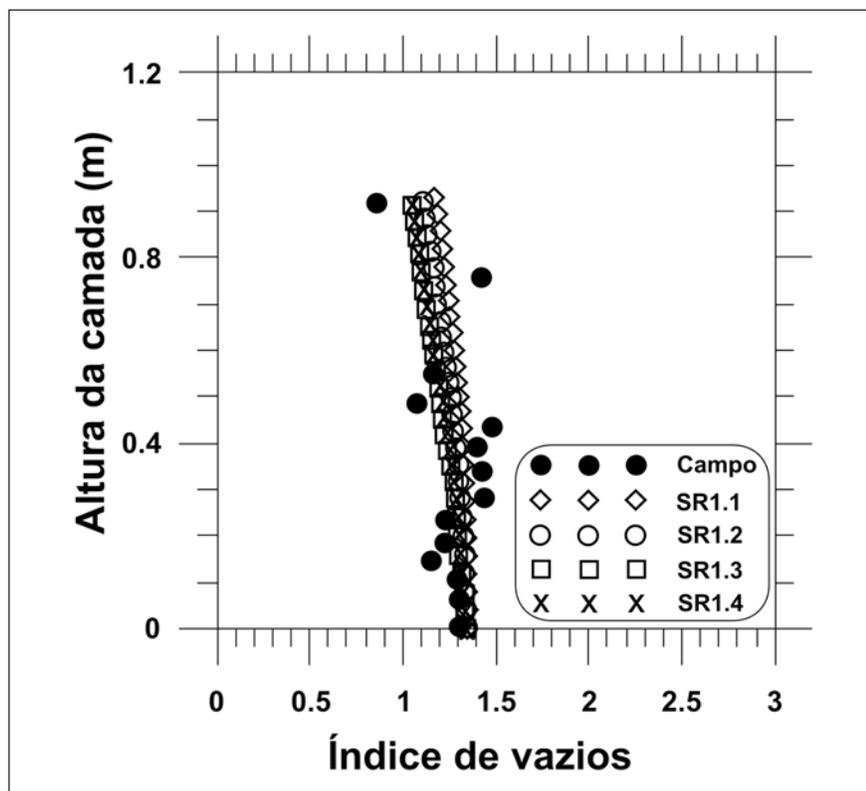


Figura 7 - Perfis de índices de vazios de campo e das simulações SR1.1 a SR1.4, fase final do processo de ressecamento - dia 210.

trando a sua eficiência nas análises numéricas dos processos de adensamento e ressecamento a que foi submetida a camada de lama disposta na área-teste (Silva, 2003). A comparação entre as curvas de recalque e os perfis de índices de vazios obtidos no monitoramento de campo e nas simulações mostrou a boa concordância entre os dados reais e numéricos encontrados. Além disso, pela calibração, foi possível avaliar as diferentes condições de contorno que influenciaram os processos de adensamento e ressecamento e descobrir uma faixa de valores representativa para o parâmetro η . De acordo com as simulações realizadas, valores de η , variando entre 2.0 e 2.5, reproduziram bem as condições verificadas em campo.

A pequena discrepância encontrada entre os perfis de índices de vazios de campo e os obtidos a partir das análises numéricas pode ser explicada pelas distintas condições de contorno sob as quais o monitoramento de campo e as simulações numéricas se desenvolveram. Sabe-se que um monitoramento de campo, por melhor que seja executado, não pode ser considerado tão preciso, dado aos inúmeros fatores que influenciam as propriedades de um solo, principalmente as condições de contorno, dos quais nem sempre se pode ter um conhecimento total. Já sob uma simulação numérica, um maior controle pode ser imposto, dado ao conhecimento/definição de todos os fatores que governam a análise. Além disso, o próprio modelo utilizado em uma simulação numérica tem suas limitações, que não podem ser desprezadas. Mesmo assim, as discrepâncias encontradas em nada afetaram a confiabilidade das simulações que calibraram o modelo numérico de ressecamento usando o programa CONDES.

Assim, pode-se concluir que o modelo numérico de ressecamento do rejeito fino da mineração de ferro foi calibrado e que o programa CONDES e os demais parâmetros e funções do material podem ser empregados na definição de novos esquemas de disposição que conduzam a processos de ressecamento mais eficazes.

5. Agradecimento

Os autores agradecem a Samarco Mineração S.A, através de seu Departamento de Geotecnia, pelo apoio e fornecimento de amostras do rejeito fino para o desenvolvimento desse trabalho de pesquisa.

6. Referências bibliográficas

- ABU-HEJLEH, A. N. *Desiccation theory for soft soils*. Boulder, Colorado: Department of Civil, Environmental and Architectural Engineering, University of Colorado, 1993. 206 p. (Ph.D. Thesis).
- ABU-HEJLEH, A. N., ZNIDARCIC, D. Desiccation theory for soft cohesive soils. *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, v.121, n. 6, p. 493-502, 1995.
- ALMEIDA, F. E. *Análise numérica do processo de ressecamento de um rejeito fino da mineração de ferro*. Ouro Preto: Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Ouro Preto, 2004. 108 p. (Dissertação de Mestrado).
- BOTELHO, A. P. D. *Implementação de metodologias de ensaios para determinação de relações constitutivas de processos de fluxo em solos com a utilização da bomba de fluxo*. Ouro Preto: Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Ouro Preto, 2001. 242 p. (Dissertação de Mestrado).
- GIBSON, R. E., ENGLAND, G. L., HUSSEY, M. J. L. The theory of one-dimensional consolidation of saturated clays: I. Finite nonlinear consolidation of thin homogeneous layers. *Geotechnique*, v. 17, n. 3, p. 261-273, 1967.
- GIBSON, R. E., SCHIFFMAN, R. L., CARGILL, K. W. The theory of one-dimensional consolidation of saturated clays: II. Finite nonlinear consolidation of thick homogeneous layers. *Canadian Geotechnical Journal*, v. 18, p. 280-293, 1981.
- LIU, J. C., ZNIDARCIC, D. Modelling one dimensional compression characteristics of soils. *Journal Geotechnical Engineering Division*, ASCE, v. 117, p. 162-169, 1991.
- OLIVEIRA FILHO, W. L. *Verification of desiccation theory for soft soils*. Boulder, Colorado: Department of Civil, Environmental and Architectural Engineering, University of Colorado, 1998. 230 p. (Ph.D. Thesis).
- SILVA, D. R. *Estudos do processo de ressecamento de um rejeito fino de minério de ferro em uma área-teste*. Ouro Preto: Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Ouro Preto, 2003. 141 p. (Dissertação de Mestrado).
- SOMOGYI, F. *Analysis and prediction of phosphatic and consolidation: implementation package*. Lakeland: Florida Phosphatic Clay Research Project, Technical Report, 1979.
- YAO, T. C., ZNIDARCIC, D. *User's manual for computer program CONDES0*. Boulder, Colorado: Department of Civil, Environmental and Architectural Engineering, University of Colorado, 1997. 98 p.
- YAO, T. C., OLIVEIRA FILHO, W. L., CAI, X. C., ZNIDARCIC, D. Numerical solution for consolidation and desiccation of soft soils. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, v. 26, p. 139-161, 2002.
- ZNIDARCIC, D., GJERAPIC, G., CARRIER, D., ZHANG, P. *Crusting of phosphatic ponds due to desiccation laboratory and field study - Report on task 17: Laboratory and centrifuge tests on phosphatic clay samples*. Boulder, Colorado: University of Colorado, 2000. 63p.

Artigo recebido em 20/10/2004 e
aprovado em 15/08/2005.

REM - Revista Escola de Minas 70 anos divulgando CIÊNCIA.

REM: a mais antiga revista técnico-científica do setor mineiro-metalúrgico.

www.rem.com.br
