

Simulação Numérica de Fluxo Através de Camada de Cobertura de Aterro de Resíduos Sólidos

Edil Mota Lins

Universidade Federal de Pernambuco, Recife, Brasil, E-mail: edileml@outlook.com

Lícia Mouta da Costa

Universidade Federal de Pernambuco, Recife, Brasil, E-mail: licia@ufpe.br.

Leonardo José do Nascimento Guimarães

Universidade Federal de Pernambuco, Recife, Brasil, E-mail: leonardo@ufpe.br.

José Fernando Thomé Jucá

Universidade Federal de Pernambuco, Recife, Brasil, E-mail: jucah@ufpe.br.

RESUMO: A diversidade dos materiais envolvidos nos aterros de resíduos sólidos, sua composição e alteração de propriedades com o tempo revelam a necessidade de pesquisas integrando problemas geotécnicos aos ambientais. Em geral as camadas de cobertura final em aterros de resíduos sólidos urbanos utilizam solos de baixa permeabilidade, tendo em vista a necessidade de se minimizar a infiltração de água para o interior do aterro e reduzir as emissões de gases para atmosfera. Neste trabalho, são realizadas simulações numéricas de fluxo de água através de camadas de cobertura, considerando diferentes materiais e configurações, as quais foram analisadas experimentalmente, com intuito de avaliar a eficiência destas camadas e seu comportamento geotécnico. Duas camadas são analisadas neste trabalho, a camada convencional, caracterizada por solo argiloso compactado, e a camada oxidativa, formada pela mistura de solo com composto orgânico. As análises realizadas consideraram duas situações extremas, a de maior e menor precipitação. As propriedades de fluxo necessárias para as análises, tais como permeabilidade a água e ao ar, curva de retenção, assim como as demais propriedades de caracterização das materiais usadas nas respectivas coberturas, são obtidas a partir de ensaios realizados previamente, em aterro experimental e em laboratório. Para a análise numérica a curva de retenção e a permeabilidade relativa são modeladas através de relações propostas na literatura. Como ferramenta numérica principal é utilizado o código computacional CODE_BRIGHT, capaz de resolver problemas termo-hidro-mecânico de maneira acoplada em meios porosos não saturados. Além deste é utilizada como ferramenta de pré-processamento o GMSH. Os resultados das simulações mostram-se compatíveis com os obtidos nas medições realizadas em um aterro experimental.

PALAVRAS-CHAVE: Simulação numérica de fluxo, Camada de Cobertura, Aterros de Resíduos.

1 INTRODUÇÃO

A diversidade dos materiais envolvidos nos aterros de resíduos sólidos, sua composição e alteração de propriedades com o tempo revelam a necessidade de pesquisas integrando problemas geotécnicos aos ambientais, ampliando a complexidade do tema, bem como, a necessidade de estudos multidisciplinares, envolvendo tanto investigação experimental de laboratório e de campo, como análises numéricas, para interpretação do comportamento destes materiais.

Os modelos matemáticos podem ser considerados ferramentas importantes no planejamento e análise de situações reais, de um determinado comportamento representando-o em equações matemáticas. Do mesmo modo, o uso de modelos matemáticos pode auxiliar na sistematização das informações, identificação dos fenômenos que podem estar envolvidos e ainda podem alertar sobre detalhes não considerados previamente, realizar análises de causa e efeito e ainda fazer previsões sobre comportamentos de um sistema real específico bem definido.

1.1 Camadas de cobertura

Em geral as camadas de cobertura final em aterros de resíduos sólidos urbanos utilizam solos de baixa permeabilidade, tendo em vista a necessidade de se minimizar a infiltração de água para o interior do aterro.

Existem basicamente dois tipos de camadas de cobertura final para aterros de resíduos sólidos urbanos, as camadas convencionais e as alternativas. As camadas de cobertura convencionais são aquelas confeccionadas com solo natural argiloso ou camadas intercaladas de solo natural argiloso e geossintéticos com vistas à impermeabilização de topo das células (Mariano, 2008).

No Brasil as camadas de cobertura de aterros sanitários são projetadas como uma barreira de solo, com espessura em geral de 0,60m construída com materiais de baixa permeabilidade hidráulica saturada, tipicamente 10^{-5} m/s ou menos (Catapreta, 2008).

Ainda segundo Catapreta (2008) a camada de cobertura possui desempenho favorável em

regiões de clima úmido.

Problemas causados por ressecamento de camada de argilas tem proporcionado desempenho inadequado em regiões de clima árido, devido aparecimento de fissuras.

As camadas de coberturas denominadas oxidativas incorporam o conceito de camadas bioreativas ou biocoberturas e estão sendo utilizadas como alternativa para redução de emissões dos gases produzidos em aterros sanitários.

As camadas metanotróficas ou oxidativas estão sendo utilizadas como alternativa de gerenciamento para emissão de gases produzidos em aterros sanitários, elas representam uma alternativa economicamente atraente para o tratamento de emissões fugitivas do metano. Essa camada tem como característica a utilização de materiais em sua maioria compostos orgânicos para criar condições adequadas para o desenvolvimento de micro-organismos que consomem CH_4 , sendo denominadas de biocoberturas (Huber-Humer et al., 2009).

1.2 Formulação numérica

Para as análises numéricas foi utilizado o programa computacional em elementos finitos CODE_BRIGHT (COupled DEformation of Brine Gas and Heat Transport) (Olivella et al., 1994, Guimarães et al., 2007), capaz de resolver problemas termo-hidro-mecânico de maneira acoplada em meios porosos não saturados.

Para utilização do CODE_BRIGHT, necessita-se de uma etapa de pré-processamento, que corresponde a definição das dimensões e geometria a ser analisada, juntamente com a definição dos materiais, condições de contorno e as condições iniciais do problema. Nessa etapa foi utilizado o GMESH, com ajuda de uma rotina em MATLAB para adaptação do formato de leitura do CODE_BRIGHT.

1.3 Fluxo de água em meio não saturado

Neste trabalho, considerando apenas fluxo de água na fase líquida, a equação de balanço de massa de água é dada por:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_w n S_w) + \text{div}(\rho_w q_w) = 0 \quad (1)$$

Onde ρ_w é densidade da água, n , a porosidade do meio, S_w o grau de saturação e q_w o fluxo de água, controlado pelo gradiente de carga hidráulica através da lei de Darcy,

$$q_w = K_w (\nabla p_w - \rho_w g) \quad (2)$$

Onde K_w é o tensor de permeabilidade da água, p_w , a pressão de água e g a aceleração da gravidade.

O coeficiente de permeabilidade, que para a condição saturada geralmente é admitido constante, é função não linear do índice de vazios e do grau de saturação. Pode-se encontrar na literatura várias expressões que relacionam a permeabilidade com o índice de vazios e o grau de saturação (Irmay, 1954; Gardner, 1958; Yoshimi&Osterberg, 1964; Lambe & Whitman, 1979).

No presente trabalho a permeabilidade é dada por

$$K_w = \frac{k k_{rw}}{\mu_w} \quad (3)$$

onde: k é tensor de permeabilidade intrínseca; μ_w = viscosidade da água e k_{rw} = permeabilidade relativa, que expressa a relação entre a permeabilidade para um determinado grau de saturação e a permeabilidade na condição saturada.

Da definição de permeabilidade relativa tem-se que o coeficiente de permeabilidade é influenciado pelo grau de saturação. O grau de saturação, por sua vez, é controlado pelo valor da sucção, $(p_a - p_w)$. A relação entre o grau de saturação e a sucção é representada através da curva de retenção.

Desta forma as propriedades hidráulicas do solo não saturado são descritas pela permeabilidade intrínseca, permeabilidade relativa e pela curva de retenção, que neste trabalho é modelada pela expressão proposta por Van Genuchten (1980),

$$S_e = \frac{S_w - S_{rl}}{S_{ls} - S_{rl}} = \left[1 + \left(\frac{p_a - p_w}{P_0} \right)^{\frac{1}{1-\lambda}} \right]^{-\lambda} \quad (4)$$

onde, P_0 e λ são parâmetros do modelo, S_{rl} é o saturação residual, S_{ls} , o grau de saturação máximo e S_e , o grau de saturação efetivo e P_a é a pressão atmosférica.

Algumas relações também têm sido apresentadas para a permeabilidade relativa, que neste trabalho é expressa em função do grau de saturação através da relação empírica proposta por Irmay (1954).

$$k_{rw} = S_e^\alpha \quad (5)$$

onde α é uma constante, neste trabalho foi considerada igual a 2.

2 SIMULAÇÕES REALIZADAS

As análises realizadas neste trabalho consideram duas situações distintas, a camada convencional, caracterizada por solo argiloso compactado, e a camada oxidativa, formada pela mistura de solo com composto orgânico na proporção 1:1.

As geometrias adotadas encontram-se ilustradas na figura 1. A camada convencional possui uma espessura de 0,60m e a camada oxidativa, 0,30m da mistura de solo com composto orgânico na proporção 1:1, seguida de uma camada de solo compactado de 0,30m.

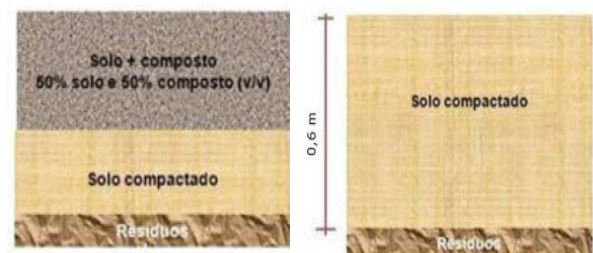


Figura 1- Geometria da camadas de coberturas analisadas

As malhas de elementos finitos geradas pelo GMESH são apresentadas na figura 2. Para a camada convencional a malha possui 705 nós e

1288 elementos, e para a camada de cobertura de oxidativa a malha é composta por 711 nós e 1300 elementos (triângulos lineares).

As propriedades de fluxo necessárias para as análises tais como permeabilidade a água e curva de retenção, foram obtidas a partir de ensaios realizados por Lopes (2011) e Santos (2015), as propriedades e parâmetros dos resíduos foram obtidas por Firmo (2013) através de ensaios experimentais. A partir dos dados da curva de retenção obtida por Santos (2015) foi realizado o ajuste através do modelo proposto por Van Genuchten (1980). A tabela 1 apresenta os valores das propriedades de fluxo e tabela 2 os parâmetros de Van Genuchten adotados nas análises.

Tabela 1 – Propriedades de fluxo

Material	$k[m^2]$	Porosidade	S_{rl}	S_{ls}
Convencional	$2,57 \times 10^{-15}$	0,38	0,23	1.0
Oxidativa	$2,76 \times 10^{-15}$	0,44	0,33	1.0
Resíduos	1×10^{-12}	0,53	0.1	0.9

Tabela 2 – parâmetros de Van Genuchten

Material	Parâmetros	
	P_0	λ
Convencional	1,8859	0,4043
Oxidativa	0,1294	0,1808
Resíduos	0,04	0,5

Como condição de contorno, foi imposta uma vazão constante no topo da camada de cobertura, correspondente às precipitações de 9 mm e 148 mm, respectivamente, por um período de tempo de 24 horas.

O grau de saturação inicial para as camadas de cobertura convencional, oxidativa e para o resíduos foi respectivamente, 81,7%, 75,14% e 25,85%.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para analisar os resultados da simulação foi confeccionado gráfico com grau de saturação ao longo da profundidade e selecionados pontos ao longo da secção das camadas para verificar a evolução da pressão de líquido ao longo do tempo.

A figura 3 representa a curva ajustada da curva de retenção segundo Van Genuchten (1980)

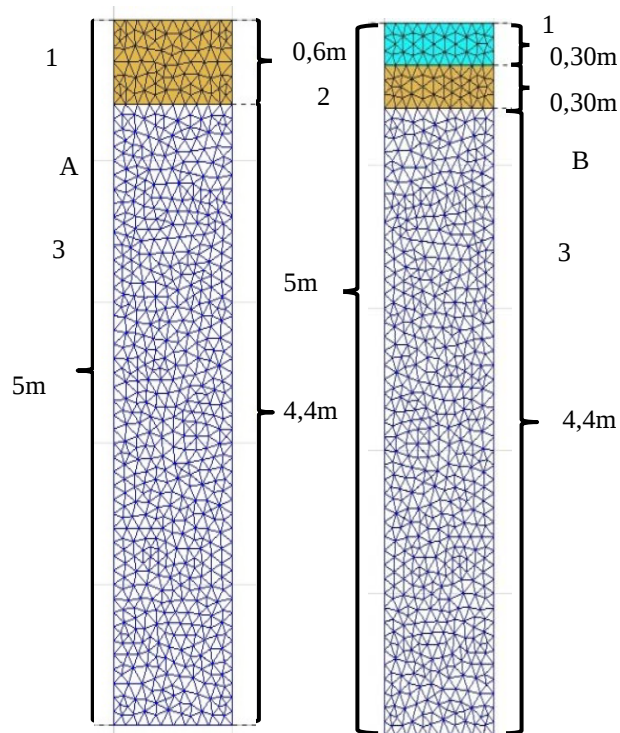


Figura 2– Malha de elementos finitos (A) Camada convencional (B) Camada Oxidativa. 1- solo compactado, 2-Oxidativa e 3 Resíduos sólidos.

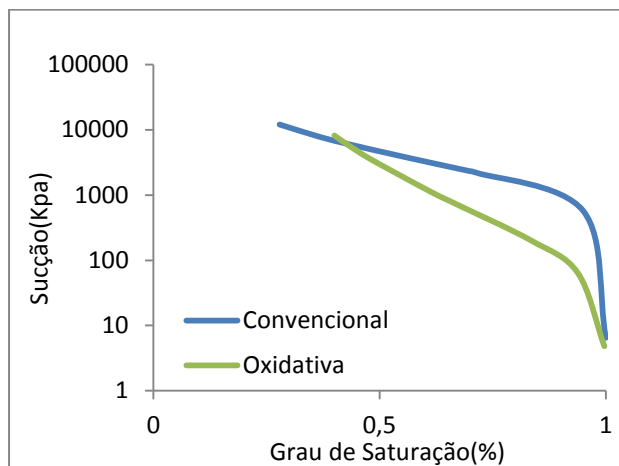


Figura 3 Curva de retenção modelada Van Genuthecn (1980)

A figura 4 mostra o comportamento da camada de cobertura com o fluxo de precipitação de 9mm, onde no tempo de 24 horas, até uma profundidade de 0,50m o grau de saturação varia de 100% a 99,71%. Na camada de resíduos o grau de saturação aumentou de 25,85% para 29,23%, mostrando que essa precipitação não foi suficiente para saturar o resíduo.

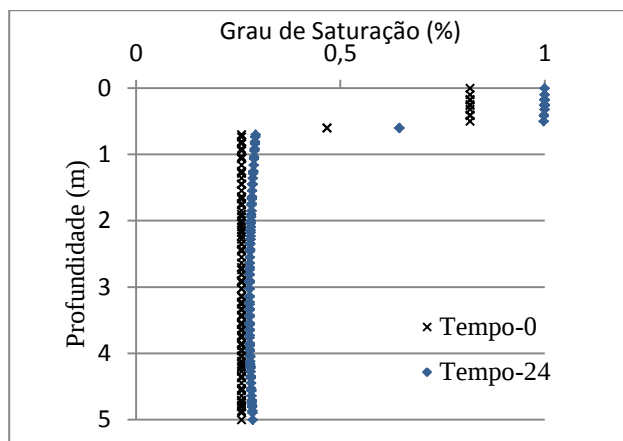


Figura 4 – Comportamento da camada convencional ao longo da profundidade, para a precipitação 9mm.

Na figura 5 pode se verificar a evolução temporal da pressão de líquido em pontos específicos situados ao longo da profundidade, onde C representa a pressão de líquido na camada de cobertura convencional.

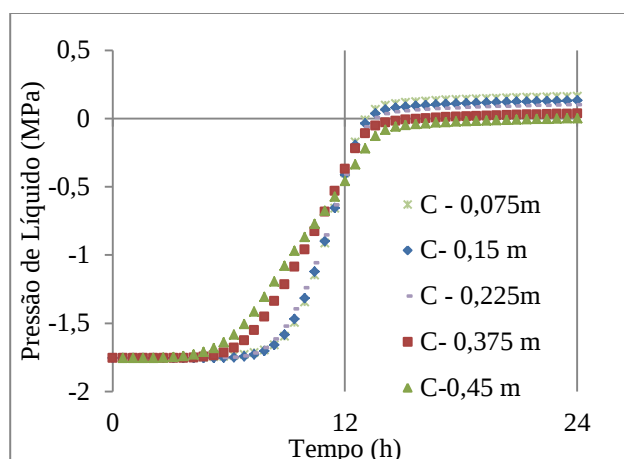


Figura 5 – Evolução temporal da pressão de líquido na Camada convencional, para a precipitação 9mm.

Verifica-se que no tempo de 13h06min na profundidade de 0,075m há mudança de sinal, onde a pressão de líquido se torna positiva, indicando a saturação foi alcançada, os demais pontos são apresentados na tabela 2.

Tabela 2 – Tempos de saturação ao longo da camada cobertura convencional, para precipitação de 9mm.

Pontos	Tempo
Ponto 1 – 0,075m	13h06min36s
Ponto 2 -0,15m	13h18min36s
Ponto 3 – 0,225m	13h31min01s
Ponto 4 – 0,375	15h58min42s
Ponto 5 – 0,45m	22h48min39s

Foi realizada mesma análise para a precipitação de 148 mm, e foi verificado que

essa precipitação saturou toda acamada de cobertura e aumentou consideravelmente o grau de saturação do resíduo alterando de 25,85% no tempo inicial para 90% no tempo de 24 horas. (Figura 6).

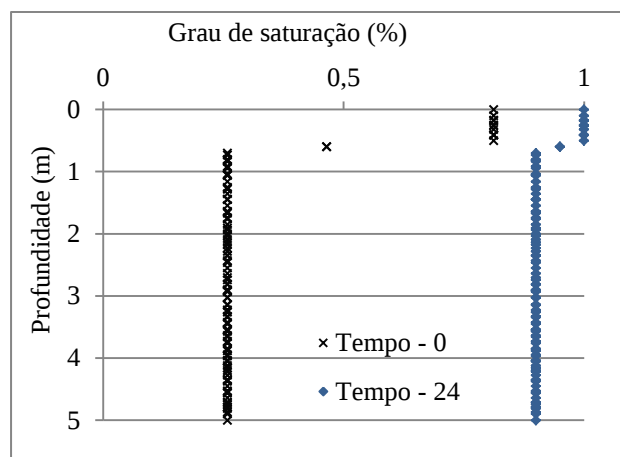


Figura 6 – Evolução do grau de saturação para camada convencional ao longo da profundidade, 148mm.

O tempo de saturação diminui para a profundidade de 0,075m que foi de 6h47min09s, assim como nos demais pontos, apresentado na Tabela 3.

Tabela 3-Tempo de saturação precipitação de 148 mm

Pontos	Tempo
Ponto 1 - 0,075m	06h47min09s
Ponto 2 -0,15 m	07h00min03s
Ponto 3 - 0,225m	07h05min35s
Ponto 4 -0,375 m	07h16min04s
Ponto 5 - 0,45 m	07h21min:42s
Ponto 6 - 0,525m	07h26min:40s
Ponto 7 - 0,75 m	09h31min18s
Ponto 8 - 1,2 m	10h24min23s
Ponto 9 - 1,8 m	11h08min07s
Ponto 10 - 2,8 m	12h18min09s
Ponto 11 - 3,8 m	13h21min53s

O comportamento da pressão de líquido ao longo do tempo é apresentado na figura 7.

Para a camada oxidativa, observa-se na figura 8, que há uma diferença de grau de saturação na profundidade de 0,30m a 0,60m, pois a condição de saturação da argila compactada é maior que a do composto. A saturação da camada de cobertura variou no tempo 24hrs de 100% a 99,65% onde ocorreu a saturação de 100% na faixa de profundidade até 0,18m, a saturação dos resíduos variou de 25,85% para 28,78%.

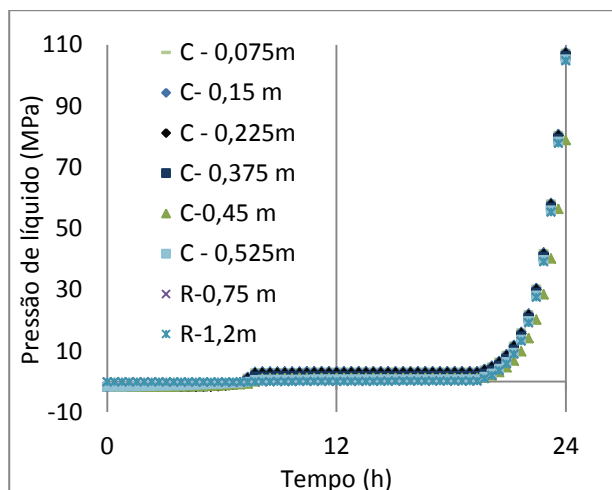


Figura 7 – Comportamento da camada convencional ao longo do tempo, precipitação 148mm.

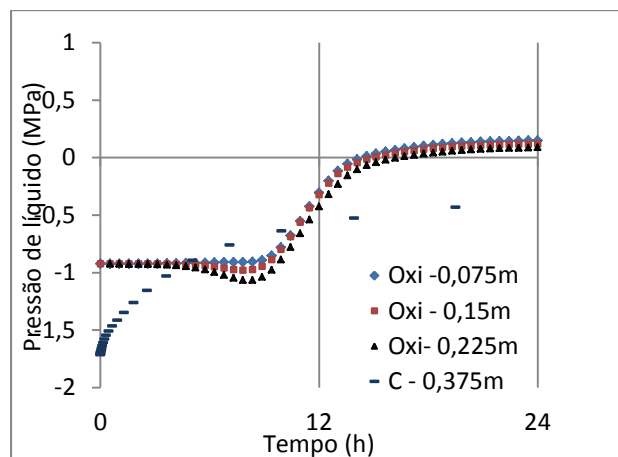


Figura 9- Evolução temporal da pressão de líquido na camada Oxidativa, para a precipitação 9mm.

Para a precipitação 148mm aconteceu o mesmo comportamento que a camada convencional toda a camada de cobertura fica acima de 95% de saturação, e os resíduos ficaram com 90% como mostrado na figura 10.

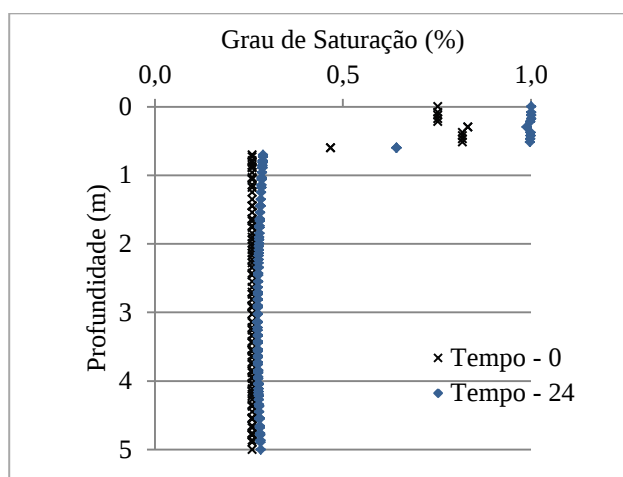


Figura 8 - Comportamento da camada oxidativa ao longo da profundidade, para a precipitação 9mm.

O tempo de saturação ao longo da profundidade da camada de cobertura é apresentado na tabela 4, lembrando que a camada oxidativa se encontra até a profundidade de 0,30m, em seguida tem-se a camada de argila compactada até a profundidade de 0,60m.

Tabela 4 – tempo saturação camada oxidativa precipitação 9 mm

Profundidade	Tempo
Ponto 1 - 0,075 m	14h20min33s
Ponto 2 - 0,15 m	14h55min11s
Ponto 3 - 0,225 m	15h13min11s
Ponto 4 - 0,375m	18h43min06s

A figura 9 demonstra o comportamento da pressão de líquido ao longo do tempo.

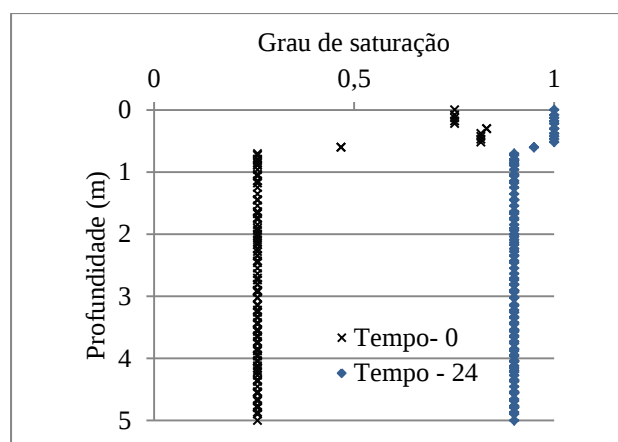


Figura 10 – comportamento da camada oxidativa, para a precipitação de 148mm.

O tempo de saturação diminui, o ponto 0,075m atinge a saturação em 5h36min, os demais pontos atingem a saturação no tempo indicado na tabela 5.

Tabela 5 – Tempo de Saturação camada de cobertura.

Profundidade	Tempo
Ponto 1 -0,075 m	05h36min42s
Ponto 2 - 0,15 m	06h04min11s
Ponto 3- 0,225 m	06h14min52s
Ponto 4 - 0,375m	06h24min58s
Ponto 5 - 0,45m	06h30min34s
Ponto 6 - 0,525m	07h15min59s
Ponto 7 - 0,75 m	08h30min33s
Ponto 8 - 1,2 m	12h34min07s
Ponto 9 - 1,8 m	13h11min08s
Ponto 10 - 2,8 m	14h09min47s
Ponto 11 - 3,8 m	15h03min05s

No tempo de 8h30min a água chega aos resíduos, no tempo de 24hrs a camada de cobertura se encontra em 100% de saturação e o resíduo em 90%.

O comportamento da pressão de líquido com a precipitação de 148mm é apresentado na figura 11.

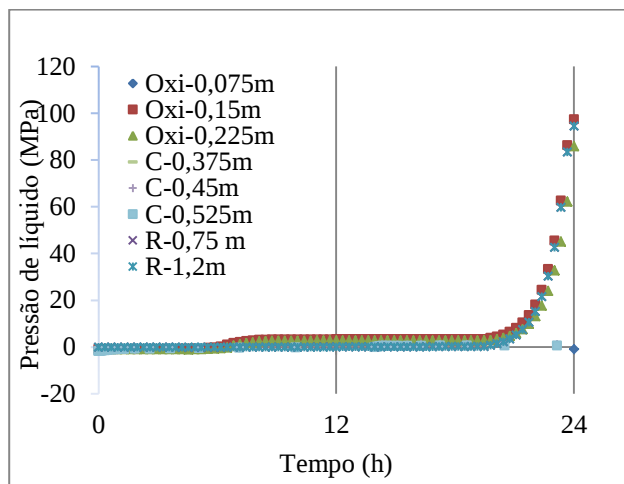


Figura 11 – comportamento da camada oxidativa ao longo do tempo, para a precipitação 148mm.

4 CONCLUSÕES

Segundo Lopes (2011) grau de saturação acima de 85% ocorre à diminuição rápida da permeabilidade ao ar tornando-se ocluso, Mariano (2008) mostra que essa porcentagem inicia em 75% nos solos tipos SC (areia argilosa) e CL (argilas arenosas).

Com a camada de cobertura oclusa, ocorre a diminuição da fuga de gases através da camada de cobertura direcionando o mesmo para os drenos de gás, quando considerando aterros energéticos irá aumentar sua produção de biogás e consequentemente energia, para aterros sanitários irá haver aumento de transformação de Metano em dióxido de carbono através da combustão nos drenos de gás.

Com os resultados obtidos com as simulações podemos estimar a quantidade de água necessária para saturar o aterro e verificar seu comportamento longo da profundidade, com isso ter uma ideia de produção de lixiviado e dimensionar os drenos de bases com a máxima pluviosidade medida, estimar a produção de lixiviado e dimensionar a estação de tratamento de lixiviado.

AGRADECIMENTOS

As equipes do GRS – Grupo de Resíduos Sólidos- UFPE, LMCG – Laboratório de Métodos Computacionais em Geomecânica – UFPE e a CAPES pelo incentivo e financiamento.

REFERÊNCIAS

- CATAPRETA, C. A. A. (2008) *Comportamento de um Aterro Sanitário Experimental: Avaliação da influência do projeto, construção e operação*. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Minas Gerais. 316 p.
- FIRMO, A. L. B. *Estudo Numérico e Experimental da Geração de Biogás a partir da Biodegradação de Resíduos Sólidos Urbanos*, 2013. Tese (doutor em Engenharia Civil)-Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2013.
- GARDNER, W. R., 1958, "Some steady state solutions of the unsaturated moisture flow equation with application to evaporation from a water table". *Soil Science* 85(4), pp.228-232.
- GUIMARÃES L. DO N., GENS, A., OLIVELLA, S. (2007). *Coupled Thermo-Hydro Mechanical and Chemical Analysis of Expansive Clay Subjected to Heating and Hydration*. *Transport in Porous Media*, v. 66, pp. 341-372.
- HUBER-HUMER, M.; RÖDER, S.; LECHNER, S.(2009) *Approaches to assess biocover performance on landfills*. *Waste Management* 29, pp. 2092–2104.
- IRMAY, S. *On the hydraulic conductivity of unsaturated soils*. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, v. 35, n. 3, p. 463-467, 1954.
- LAMBE, T. W. & WHITMAN, R. V., 1979, *Soil Mechanics*. New York: Wiley
- LOPES, R. L. *Infiltração de água e emissão de metano em camadas de cobertura de Aterros de Resíduos Sólidos*, 2011. Tese (doutor em Engenharia Civil)-Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2011.
- MARIANO, M. O. H. *Avaliação da Retenção de Gases em Camadas de Cobertura de Aterros de Resíduos Sólidos*, 2008. Tese (doutor em Engenharia Civil)-Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2008.
- OLIVELLA, S., CARRERA, J., GENS, A., ALONSO, E. E. (1994). *Nonisothermal multiphase flow of brine and gas through saline media*. *Transport in Porous Media*, 15, pp. 271-293.
- SANTOS, G M. *Comportamento hidromecânico de solo e das misturas Solo-composto utilizados em camadas de cobertura no Aterro experimental da Muribeca, Pernambuco*. 2015. 197 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Centro de Tecnologia e Geociência, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2013.
- YOSHIMI, Y. AND OSTERBERG, J. O., 1964, "Compression of partially saturated cohesive soils".

Journal of Soil Mechanics and Foundation Division,
ASCE, 89, SM4, pp. 1-24.