



MODELAGEM DE ESCOAMENTO DO CHORUME EM RESERVATÓRIO: UTILIZANDO A BIBLIOTECA DE CÓDIGO ABERTO OPENFOAM

Laura Beatriz de Carvalho Embiruçu, Centro Universitário SENAI CIMATEC,
laura.embirucu@gmail.com

Resumo

O líquido percolado, lixiviado ou chorume, como é popularmente conhecido, trata-se de um líquido escuro e turvo formado a partir da decomposição de rejeitos. Sua composição é variável, pois depende do material descartado que posteriormente virá a entrar em putrefação (podendo este ser orgânico ou inorgânico). Com relação ao aspecto químico, possui altas taxas de nitrogênio, carbono e metais pesados. A sua problemática central se deve a sua alta carga poluidora, pois devido ao seu poder de permeabilidade, quando encontra-se em contato direto com o solo possui a capacidade de permear para camadas mais profundas e desta forma poluir lençóis freáticos. Nesse sentido, o presente artigo busca por meio do programa OpenFOAM, utilizar a dinâmica de fluidos computacional (CFD), a fim de realizar uma modelagem que reproduza o processo de permeabilização do chorume no solo, podendo desse modo, estudar todos o funcionamento dessa impregnação e os fenômenos físicos associados a esse processo.

Palavras-chave: Lixiviado; Modelagem; Percolação; OpenFOAM; Chorume.

1. Introdução

O lixiviado é proveniente do processo de degradação (por ação de microorganismos) e solubilização de resíduos sólidos provenientes de lixões e aterros sanitários. “A umidade tem grande influência na formação do chorume já que um alto teor de umidade favorece a decomposição anaeróbia. A produção de chorume depende das condições peculiares de cada caso, principalmente da topografia, geologia, regime e intensidade das chuvas” (SEGATO, 2000).

Embora o líquido percolado seja estritamente referente ao material que foi descartado, existem substâncias que são geralmente encontradas na composição química deste, são algumas delas: nitritos, nitratos, amônia, alguns metais, halogênios inorgânicos, entre outros. Esses elementos conferem a alta toxicidade desse líquido, e com base no material que foi degradado pode-se encontrar diferentes íons, a tabela 1 informa materiais e seus respectivos íons produzidos durante o processo de decomposição.¹

Tabela 1: Íons e suas respectivas origens.

| Íons | Origem |
|--|---|
| Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} | Material orgânico, entulhos de construção, cascas de ovos. |
| PO_4^{-3} , NO_3^- , CO_3^{-2} | Material orgânico. |
| Cu^{+2} , Fe^{+2} , Sn^{+2} | Material eletrônico, latas, tampas de garrafas. |
| Hg^{+2} , Mn^{+2} | Pilhas comuns e alcalinas, lâmpadas fluorescentes. |
| Ni^{+2} , Cd^{+2} , Pb^{+2} | Baterias recarregáveis (celular, telefone sem fio, automóveis). |
| Al^{+3} | Latas descartáveis, utensílios domésticos, cosméticos, embalagens laminadas em geral. |
| Cl^- , Br^- , Ag^+ | Tubos de PVC, negativos de filmes de raio-x. |
| As^{+3} , Sb^{+3} , Cr^{+3} | Embalagens de tintas, vernizes, solventes orgânicos. |

Fonte: SEGATO (2000)

O projeto de Lei de nº 1516/19, aprovado pela Comissão de Meio Ambiente e Desenvolvimento da Câmara dos Deputados, tornou obrigatório o tratamento do chorume que for gerado por aterros sanitários. O autor, José Medeiros (Pode-MT), regulamenta que os aterros possuem o prazo de dois anos para se adequar a nova lei. Alguns dos métodos de tratamento existentes são: evaporador de chorume, recirculação do chorume no aterro, processos biológicos aeróbios, processo de separação com membranas, processos oxidativos, eletrocoagulação, wetlands, filtros biológicos, entre outros. ²

No Brasil existe uma Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), escrita na Lei nº 12.305/2010, que visa buscar soluções para o destino de resíduos sólidos. Segundo o Instituto Brasileiro de Pesquisa e Estatística (IBGE) em uma pesquisa realizada no ano de 2008, foi constatado que apenas 27,7% das cidades utilizam aterros sanitários, 22,5% possuem aterros controlados e 50,08% faziam uso de lixões. ³

Em 2010, por meio da Lei nº 12.305 foi proibida a existência de lixões, válido para todo território nacional, e todos os rejeitos deveriam possuir um destino final que fosse ambientalmente adequado, o prazo para execução da Lei eram de quatro anos e, em caso de não cumprimento das regulamentações sanções e multas deveriam ser aplicadas a Estados e Municípios. Todavia, devido a questões de trâmites legais e dificuldades na execução do projeto, como afirma Francisco Lopes, secretário executivo da Associação Nacional dos Serviços Municipais de Saneamento (ASSEMAE), "a maioria dos municípios brasileiros não teve condições técnicas e financeiras para cumprir o prazo estabelecido". A nova data limite para adequação às normas previstas passou a ser: capitais e regiões metropolitanas têm até 2 de agosto de 2021 para acabar com os lixões, cidades com mais de 100 mil habitantes têm até



agosto de 2022 como prazo final, cidades entre 50 e 100 mil habitantes têm até 2023 para eliminar o problema e municípios com menos de 50 mil habitantes têm até 2024. [5]

2. Fundamentação teórica

Para construção da modelagem, e pensando em torná-la mais próxima das expectativas de um solo real, buscou-se na literatura artigos que realizassem estudos com análise de solos de aterros sanitários. Depois de longa análise foi selecionado o artigo “Permeabilidade do solo em área de aterro sanitário” de autoria do: Willian Fernando de Borba ; José Luiz Silvério da Silva, Pedro Daniel da Cunha Kemerich, Éricklis Edson Boito de Souza e Gabriel D’Ávila Fernandes. Na construção do artigo deles a área de estudo é um aterro sanitário, localizado na região noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, e o tipo de solo característico é o latossolo vermelho distrófico, com altos teores de argila. A tabela 1 representa os dados que foram obtidos no artigo em questão e que serão o pilar para construção da modelagem. [5]

Tabela 2: Informações referentes aos índices físicos analisados em quadruplicata do Latossolo analisado.

| Horizontes | Profundidade (m) | Porosidade (%) | | | Densidade | CC | PMP |
|------------------------|------------------|----------------|--------------|--------------|-----------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|
| | | Total | Micro | Macro | ($\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$) | ($\text{mmH}_2\text{O}/\text{m}$) | ($\text{mmH}_2\text{O}/\text{m}$) |
| A | 0,40 | 51,04 | 50,53 | 0,51 | 1,30 | 161,29 | 101,81 |
| | | 57,22 | 52,73 | 4,49 | 1,13 | 167,63 | 101,81 |
| | | 56,83 | 54,16 | 2,67 | 1,14 | 151,85 | 101,81 |
| | | 56,07 | 54,30 | 1,78 | 1,16 | - | - |
| Média | | 55,29 | 52,93 | 2,36 | 1,18 | 160,25 | 101,81 |
| AB | 0,70 | 56,70 | 53,71 | 2,99 | 1,15 | 118,25 | 83,06 |
| | | 57,84 | 54,18 | 3,65 | 1,12 | 127,90 | 83,06 |
| | | 56,05 | 53,13 | 2,92 | 1,16 | 123,19 | 83,06 |
| | | 56,38 | 55,02 | 1,36 | 1,16 | - | - |
| Média | | 56,74 | 54,01 | 2,73 | 1,15 | 123,11 | 83,06 |
| B | 1,00 | 60,59 | 52,65 | 7,94 | 1,04 | 112,42 | 79,81 |
| | | 60,15 | 51,79 | 8,36 | 1,06 | 110,59 | 79,81 |
| | | 58,79 | 52,98 | 5,81 | 1,09 | 112,64 | 79,81 |
| | | 59,13 | 53,25 | 5,88 | 1,08 | - | - |
| Média | | 59,67 | 52,67 | 7,00 | 1,07 | 111,88 | 79,81 |
| BC | > 1,40 | 60,68 | 49,39 | 11,30 | 1,04 | 151,90 | 105,12 |
| | | 59,27 | 49,13 | 10,15 | 1,08 | 148,66 | 105,12 |
| | | 58,83 | 49,10 | 9,73 | 1,09 | 156,58 | 105,12 |
| | | 61,50 | 50,19 | 11,31 | 1,02 | - | - |
| Média | | 60,07 | 49,45 | 10,62 | 1,06 | 152,38 | 105,12 |
| Média no perfil | | 57,94 | 52,26 | 5,68 | 1,11 | 136,90 | 92,45 |

Fonte: BORBA, W. et al, 2020



IV SUSTENTARE & VII WIPIS
WORKSHOP INTERNACIONAL
Sustentabilidade, Indicadores e Gestão de Recursos Hídricos
 de 16 a 18 de novembro de 2022

EVENTO GRATUITO TOTALMENTE ONLINE

Realização: SUSTENTARE PLU-CAMBRÍAS

Apoio: Agência das Bacias PCJ, COMITÊ PCJ

3. Metodologia

O presente artigo caracteriza-se com base nos tipo de metodologia como sendo teórico de natureza básica, pois ele tem como finalidade a análise das variáveis referentes ao escoamento do chorume, bem como a observação dos fenômenos físicos atrelados a esse processo. A abordagem de construção foi tanto quantitativa como qualitativa, com utilização de equações matemáticas, fluidodinâmica computacional (propiciada pelo programa OpenFOAM) e interferências elencadas em um levantamento bibliográfico, tendo como principais referências: SEGATO (2000), MONTEIRO (2001), entre outros.

O OpenFOAM é um programa que possibilita o desenvolvimento de compilação de dados para a programação científica, é uma biblioteca de código aberto que possui um alto nível e um bom desempenho, a linguagem utilizada no software é o C ++. É possibilitada a escolha dos métodos de interpolação, discretização, solução de sistemas resultantes, quando há estudo das equações diferenciais parciais. O sistema se encarrega de utilizar o método de volumes infinitos, e para tal utiliza-se de malhas, sendo elas estruturadas ou não.

Nessa etapa ocorre a construção do modelo matemático do problema físico. Para realizar esse estudo são observados termos que são semelhantes gerando assim uma equação geral para posterior discretização. Alguns termos, ligados a física, são adotados no processo de discretização, sendo os principais: acúmulo (todo termo com derivada temporal), advectivo (transporte do transporte da propriedade com a velocidade do fluido, relacionado a derivada em relação ao espaço dependente do sistema de coordenadas), difusivo (o transporte é associado ao mecanismo molecular) e fonte. A solução numérica é a etapa que consiste na alteração das equações diferenciais por seu respectivo conjunto de equações algébricas. Essa construção é dividida em duas grandes etapas, sendo elas: a discretização do domínio e a discretização das equações.

4. Resultados

Nessa etapa ocorre a construção do modelo matemático do problema físico. Para realizar esse estudo são observados termos que são semelhantes gerando assim uma equação geral para posterior discretização. Alguns termos, ligados a física, são adotados no processo de discretização, sendo os principais: acúmulo (todo termo com derivada temporal), advectivo (transporte do transporte da propriedade com a velocidade do fluido, relacionado a derivada em relação ao espaço dependente do sistema de coordenadas), difusivo (o transporte é associado ao mecanismo molecular) e fonte. A solução numérica é a etapa que consiste na alteração das equações diferenciais por seu respectivo conjunto de equações algébricas. Essa construção é dividida em duas grandes etapas, sendo elas: a discretização do domínio e a discretização das equações.

Para construção da modelagem computacional devem ser seguidas as três etapas básicas: pré-processamento, processamento e pós-processamento. Na etapa inicial ocorre a análise do modelo matemático que deve ser escolhido para o problema físico em questão, e

IV SUSTENTARE & VII WIPIS
WORKSHOP INTERNACIONAL
Sustentabilidade, Indicadores e Gestão de Recursos Hídricos
 de 16 a 18 de novembro de 2022

EVENTO GRATUITO TOTALMENTE ONLINE

Realização: SUSTENTARE PUC-CAMPINAS, WIPIS UFRJ

Apoio: Agência das Bacias PCJ, COMITÊ PCJ

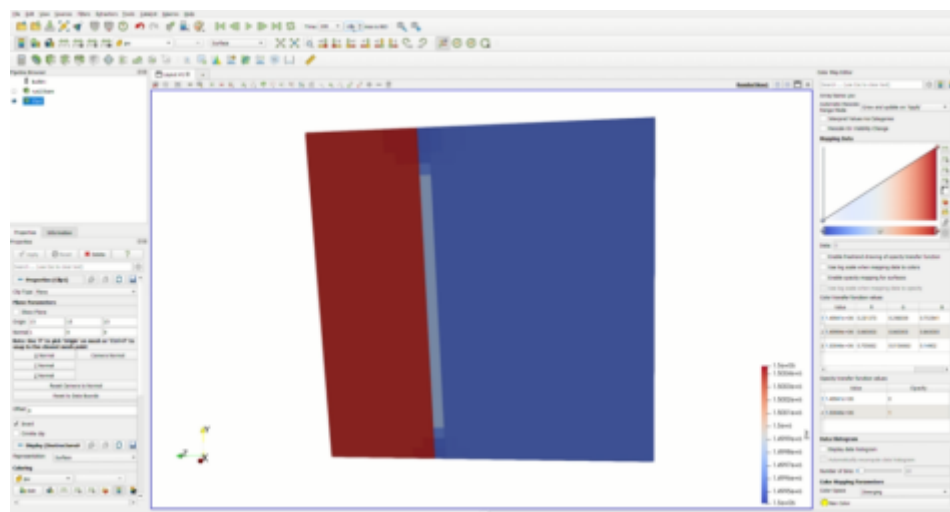
para tal deve-se avaliar: equações de conservação, equações constitutivas e propriedade do fluido, hipótese simplificadora e sua respectiva condição de inicial e de contorno. Outra análise que deve ser realizada nessa etapa de pré processamento e o estudo do modelo geométrico que irá ser selecionado, deve ser observado os fatores de: discretização do modelo (malha), discretização das equações diferenciais (método numérico), sequência e solução das equações das equações discretizadas (algoritmo) e os seus respectivos critérios de convergência.

A etapa de processamento consiste na solução do sistema algébrico que foi estudado e formado. Toda informação selecionada na etapa de pré-processamento é implementada para essa construção que vai ser realizada pelo solver, tendo como informação o resíduo inicial, o final e o número de iterações para cada variável que foi resolvida.

A última etapa na confecção da modelagem é o pós-processamento que é referente a análise dos resultados obtidos e é proposto uma revisão do modelo matemático inicial (para certificação se a modelagem atingiu o objetivo esperado) e rever a hipótese simplificadora.

O presente trabalho utilizou dos princípios demonstrados para elaborar um sistema de reservatório que conseguisse simular as camadas do solo, a fim de estudar como ocorre o processo de percolação do chorume entre as camadas do solo. Para representação do modelo de reservatório, utilizou-se as dimensões de um cubo, como demonstrado na figura 1

Figura 1: Modelagem do reservatório



IV SUSTENTARE & VII WIPIS
WORKSHOP INTERNACIONAL
Sustentabilidade, Indicadores e Gestão de Recursos Hídricos
 de 16 a 18 de novembro de 2022

EVENTO GRATUITO TOTALMENTE ONLINE

Realização: SUSTENTARE PLO-CAMPINAS WIPIS ESC-USP

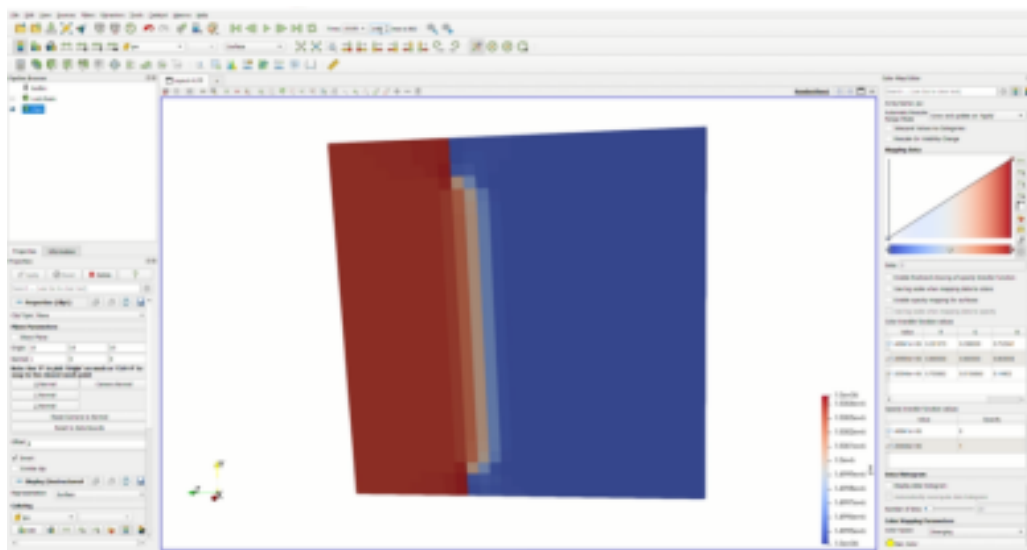
Apoio: Agência das Bacias PCJ COMITÊ PCJ



Fonte: Própria

A figura 2 demonstra o início do processo de escoamento, sendo simulado em uma camada do solo. Do ponto de vista ambiental, essa primeira etapa da modelagem já demonstra um grande problema de saúde pública, ela confirma a alta permeabilidade do chorume em contato com o solo. Toda a área que entrar em contato que essa substância já se encontra poluída. Como citado anteriormente, o chorume tem uma alta capacidade de permear, logo sua toxicidade irá atingir outras camadas do solo.

Figura 2: Início do processo de escoamento





IV SUSTENTARE & VII WIPIS

WORKSHOP INTERNACIONAL

Sustentabilidade, Indicadores e Gestão de Recursos Hídricos

de 16 a 18 de novembro de 2022

EVENTO GRATUITO TOTALMENTE ONLINE

Realização:

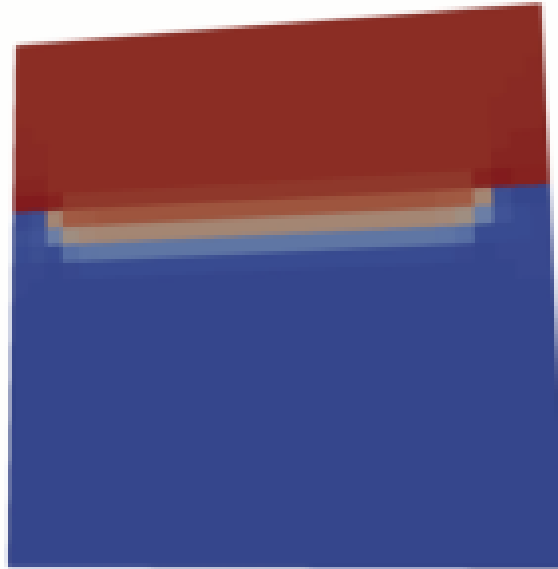




Apoio:







Fonte: Própria

O final do processo de escoamento é demonstrado na figura 3, onde todo o lixiviado já percola pela camada do solo e seguirá até o lençol freático (a depender da sua tendência a escoar). Em um aterro sanitário existem diversos materiais que se encontram em suspensão e/ou dissolvidos, ambos com carga toxicológica elevada. Quando a água percola, ela tende a arrastar essas substâncias. Do ponto de vista matemático, este é um parâmetro crucial para a estimativa da quantidade de chorume gerado por um aterro sanitário.

A figura 3 representa um esquema de componentes do balanço de água em um aterro, pode-se notar a principal fonte de água é a principal sobre a área. Uma parte da água vai escoar de maneira superficial e a outra retorna para a atmosfera, o que não segue esse sistema de evapotranspiração vai adicionar umidade nos resíduos que se encontram no aterro e posteriormente percolar pelo solo como chorume.



IV SUSTENTARE & VII WIPIS

WORKSHOP INTERNACIONAL

Sustentabilidade, Indicadores e Gestão de Recursos Hídricos

de 16 a 18 de novembro de 2022

EVENTO GRATUITO TOTALMENTE ONLINE

Realização:



SUSTENTARE RIO CAMBRINHAS



WIPIS

Apoio:

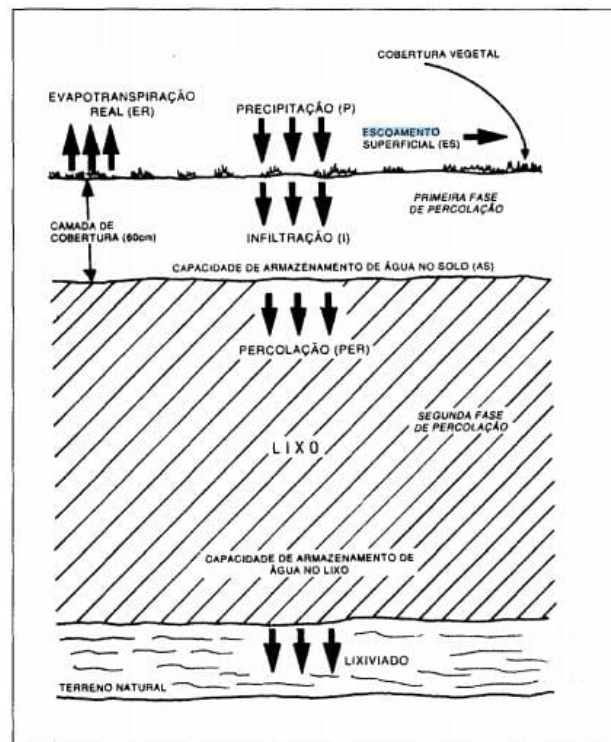


Agência das Bacias PCJ



COMITÊ PCJ

Figura 3: Esquema de componentes do balanço de água em um aterro



Fonte: Neto, PC et al, citados por ROCCA et al

5. Conclusões

O choro ainda é um grande desafio para o meio ambiente, como demonstrado pela modelagem, o seu poder de percolação é alto, e devido a sua taxa de toxicidade todas as camadas do solo que entram em contato com esse líquido percolado são afetadas negativamente. Há uma grande dificuldade em ofertar medidas de tratamento, pois sua composição é referente a heterogeneidade dos resíduos que foram dispostos e a idade do lixão em questão. Trazendo assim a necessidade de estudo de cada aterro como único, entendendo suas particularidades e propondo modelagens computacionais e estudos químicos para aplicar propostas de intervenção eficientes e eficazes.



6. Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio do CNPq, Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - Brasil.

Ao meu professor e orientador Ivan Cunha. A Alberto Luiz Filho por todo apoio e suporte que foram de extrema necessidade.

Agradeço Maria Eguinauria Menezes, Lourenço Santos Neto e Guilherme Pires.

E a Pedro Machado por todo apoio nessa caminhada.

7. Referências bibliográficas

¹ SEGATO, Luciana Maturana; SILVA, Celso Luiz. **Caracterização do chorume do aterro sanitário de Bauru**. In: XXVII CONGRESSO INTERAMERICANO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL. Anais. Porto Alegre, 2000. p.1-9.

² ALVES, Denise de Carvalho; TEIXEIRA, Renata Miranda. **ESTUDO COMPARATIVO DAS TÉCNICAS DE TRATAMENTO DO CHORUME UTILIZADAS EM ALGUNS ATERROS SANITÁRIOS**. 2004. Disponível em: <<https://www.ipen.br/biblioteca/cd/ictr/2004/ARQUIVOS%20PDF/12/12-019.pdf>>. Acesso em: 06 out. 2021.

⁴ MONTEIRO, José Henrique Penido et al. **Manual de Gerenciamento Integrado de Resíduos Sólidos**. Rio de Janeiro: IBAM, 2001

⁵ BORBA, Willian Fernando de, José Luiz Silvério da Silva, Pedro Daniel da Cunha Kemerich, Éricklis Edson Boito de Souza et Gabriel D'Ávila Fernandes **Permeabilidade do solo em área de aterro sanitário**. Caderno de Geografia 30, no 61 (abril 2020): 272. <http://dx.doi.org/10.5752/p.2318-2962.2020v30n61p272>

Ro⁶ cca, ACC, Iacovone, AMMB, Barroti, AJ et al **Resíduos sólidos industriais**. 2 ed. São Paulo: Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental - CETESB; 1993.