

FATORES QUE INFLUENCIAM NA PERMEABILIDADE AO GÁS DE UM SOLO ARGILOSO COMPACTADO NÃO SATURADO

Maristela da Silva Oliveira ¹; Amanda Rodrigues Silva ²; José Fernando Thomé Jucá ³

Resumo – Este trabalho apresenta um estudo dos principais fatores que afetam na permeabilidade ao gás dos solos compactados em condições não saturadas. É apresentada uma análise das propriedades das camadas de cobertura de aterros sanitários ressaltando as características desejáveis que facilitam a captação e retardam a emissão de gases para atmosfera. Os desafios para o aproveitamento do gás e a dificuldade em se ter uma camada que funcione de forma a evitar a saída de gases e ao mesmo tempo permitir a entrada de oxigênio e água torna imprescindível um maior entendimento dos fatores que influenciam no fluxo de gases em solos compactados. Para isso, foram feitas revisões teóricas e análise de resultados de ensaios realizados por Maciel (2003) na célula nº 8 da camada de cobertura de um aterro sanitário localizado no bairro da Muribeca na cidade do Recife. Constatou-se que os principais fatores determinantes no fluxo de gases nos solos compactados são grau de saturação que depende das condições de umidade e temperatura do ambiente externo, gradiente de concentração dos gases, viscosidade do gás, e as variáveis relacionadas ao solo como espessura da camada de cobertura e a umidade de compactação que define a estrutura do solo e distribuição dos vazios.

Abstract – This work presents a study about the main factors that affect the gas permeability of compacted soils under unsaturated conditions. An analysis of landfill cover layer properties is presented highlighting the desirable characteristics that facilitate the capture and reduction of the amount of gas emission to the atmosphere. The challenge for the energy use of gases and the difficulty to have a cover layer that prevents the gas from coming out and at the same time allows oxygen and water to get into the soil makes essential to have a better understanding of the factors that influence the flow of gases through compacted soils. For this, it was made a theoretical review of the literature and an analysis of experimental data from tests performed by Maciel (2003) in the cell nº 8 of the landfill cover layer in the district of Muribeca in the city of Recife. The main determining factors found that affect the gas flow in compact soils are saturation degree which depends on environmental factors as temperature and air moisture, gas concentration gradient, gas viscosity and soil related variables such as thickness of the cover layer and compaction moisture content that define soil structure and void distribution.

Palavras-Chave – Permeabilidade ao gás; solos compactados; fluxo de gases, aterros sanitários.

¹ Eng., Mestranda, Universidade Federal de Pernambuco, (81) 99914-9635, eng.maristelaoliveira@gmail.com

² Eng. Civil, Universidade de Pernambuco, (81) 99681-8112, amandars.engcivil@gmail.com

³ Eng., PhD., Universidade Federal de Pernambuco, (81) 99926-8469, jucah@ufpe.br

1. INTRODUÇÃO

O aquecimento global é uma das principais preocupações modernas e sua causa está relacionada ao aumento da concentração de gases de efeito estufa na atmosfera. Dentre os gases mais relevantes estão vapor de água (H₂O), dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄), e óxido nitroso (N₂O). De acordo com o World Resources Institute (2013), o lixo foi responsável por 2% da geração dos gases de efeito estufa no mundo. O Brasil está entre os 10 países com maior emissão de gases, responsável por cerca de 2,33% das emissões globais que equivale a 1017,9 Mt (megatoneladas) de CO₂, sendo o setor de resíduos responsável por cerca de 4,29% dessas emissões totais, cerca de 45 Mt de CO₂ (Friedrich et al, 2017). Segundo um relatório divulgado pela Abrelpe (Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais), em 2015 a geração de lixo no país aumentou em 29%, enquanto que a taxa de crescimento populacional foi de apenas 6%, ou seja, a geração de resíduos superou o crescimento da população em cerca de 5 vezes.

O aumento da população mundial e a concentração de maior parte da população vivendo nas cidades (cerca de 75%) demanda uma atenção especial para a disposição final adequada dos resíduos sólidos urbanos, assim como a minimização dos impactos provenientes de sua degradação. A PNRS (Política Nacional de Resíduos Sólidos) estabeleceu que os municípios substituíssem, até 2014, todos os lixões por aterros sanitários, porém o Brasil ainda tem cerca de 30 milhões de toneladas de lixo lançados sem destino adequado. A contaminação dos solos adjacentes e lençol freático e emissões de gases para atmosfera é um dos problemas mais importantes que estão relacionados a contaminação ambiental por aterros sanitários.

Os aterros sanitários, funcionam como reator biológico onde as entradas são água e os resíduos e as saídas são chorume (líquido resultante da biodegradação dos elementos constituintes dos resíduos) e gases. Dentre os principais gases resultantes da decomposição dos resíduos estão o metano (CH₄) e dióxido de carbono (CO₂), principais contribuintes do efeito estufa (MMA, 2018). O Ministério de Meio Ambiente (MMA) apoia e incentiva desde 2017 o desenvolvimento de um projeto que vise a destinação adequada do biogás, inclusive seu aproveitamento energético. Esses gases circulam nos solos onde ocorre a decomposição e percolam até superfície do terreno ou podem penetrar nas edificações próximas à área por meio das fundações, fissuras, aberturas e falhas na impermeabilização configurando danos a saúde, maus odores e até mesmo risco de explosões (EPA, 2008).

De acordo com a NBR 13.896 (1997), o aterro deve ser planejado de forma que minimize o lançamento de gases para atmosfera, conduzindo-o para o sistema de drenagem e permita o seu aproveitamento ou tratamento de forma adequada. A camada de cobertura final do aterro deve ser projetada de forma que minimize a infiltração de água na célula e impeça a saída do gás, possuindo um coeficiente de permeabilidade inferior ao do solo natural onde o aterro está implantado. Uma menor permeabilidade da camada de cobertura impede a infiltração de água precipitada e conseqüentemente diminui a quantidade de chorume e de gás produzido no aterro sanitário (Huse, 2007). Atualmente, a utilização de solos compactados com baixa permeabilidade hidráulica é o método mais empregado na cobertura final do aterro. As camadas de solo compactado tem potencial de absorver deformações e impedir que o gás seja lançado na atmosfera, mas apresentam a desvantagem de o solo poder ser facilmente carregado pelo vento e está susceptível a erosão e fissuras causadas pela contração do solo.

Muitos autores acreditam que os mecanismos de transporte de gases nos solos ainda não são totalmente compreendidos. A lei de Darcy não é totalmente aplicável para gases, tendo em vista a possibilidade de ocorrência de turbulência; o fluxo de gás em um solo pode ser significativamente diferente da escala macroscópica e efeitos como rarefação e interação da superfície-gás devem ser levadas em consideração; os gases pode ter mecanismos de transporte diferentes dependendo da presença ou não de percolação de água no solo. O mecanismo de fluxo envolve uma investigação de uma variedade de disciplinas e para entender os fatores e processos de fluxo de gases nos solos é necessário conhecer as propriedades do solo, o tipo de gás, e as condições de contorno. Resolver esse problema experimentalmente torna-se inconveniente e oneroso, logo é de grande interesse encontrar modelos independentes que

possam ser aplicados (Alzaydi, 1975). Neste trabalho serão abordados os fatores que influenciam na permeabilidade ao gás dos solos compactados com base em uma revisão bibliográfica e avaliação de dados de ensaios de laboratório e de campo da célula nº 8 do Aterro Sanitário da Muribeca localizado na cidade do Recife.

2. VARIÁVEIS RELACIONADAS ÀS PROPRIEDADES DO SOLO

A compactação muda as propriedades do solo e conseqüentemente o seu comportamento. As propriedades dos solos compactados dependem da combinação da umidade de compactação e do processo de compactação que resultam em diferentes pesos específicos seco. Um estudo feito por Ignatius & Pinto (1997) mostrou que a permeabilidade ao ar em solos compactados é maior para umidades menores e para maiores índices de vazios (o que pode ser melhor expresso pelo conteúdo volumétrico de ar), e que a permeabilidade horizontal e vertical são da mesma ordem de grandeza.

Nos solos, o caminho do fluxo é influenciado pelo índice de vazios, mas é importante ressaltar que para um mesmo índice de vazios, um solo pode apresentar uma permeabilidade maior ou menor dependendo da dificuldade do caminho que o gás vai percorrer, essa característica é definida pelo fator de tortuosidade (Alzaydi, 1975). De acordo com Masamune & Smith (1962) e Weissberg (1963) *apud* Alzaydi (1975) a tortuosidade diminui com o aumento da porosidade e se aproxima da unidade quando a porosidade se aproxima da unidade. Logo, quanto mais denso for o solo, maior será sua tortuosidade. Assim, os solos compactados, de forma geral, vão apresentar uma maior tortuosidade tendo em vista que apresentam um melhor empacotamento dos grãos e uma estrutura mais densa.

A variação do fator de tortuosidade ocorre não somente entre diferentes materiais, mas também no mesmo material sob diferentes umidades de compactação. Solos compactados no ramo seco irão apresentar uma estrutura floculada, onde o ar está todo intercomunicado e a água se concentra nos contatos entre as partículas. Com a umidade mais baixa, as partículas ficam arranjadas face-aresta e a energia de compactação não é suficiente para vencer essa atração físico-química. Assim, o aumento da energia de compactação para mesma umidade tende a orientar as partículas na horizontal. Enquanto que para umidades maiores a repulsão entre as partículas aumenta, a compactação orienta as partículas, posicionando-as paralelamente, resultando em uma estrutura dita dispersa. A modificação da estrutura do solo devido a compactação limita o transporte de gases no solo a medida que diminui o tamanho dos poros preenchidos por ar onde a difusão ocorre. ((Czyz, 2004) e (Fujikawa and Miyazaki, 2005) *apud* (Neira, 2015)).

O aumento do grau de saturação com índice de vazios constante causa uma redução da permeabilidade ao ar (Mitchel, 1993). Uma maior umidade do solo diminui o volume associado aos grandes poros. O mesmo efeito pode ser conseguido com o aumento da energia de compactação (Jucá, 1990). Nessa situação as bolhas de ar estão totalmente envolvidas pela água e pelas partículas, encontram-se oclusas e não se intercomunicam. A permeabilidade ao ar sofre uma brusca redução devido à falta de interligação entre essas bolhas de ar.

Compactação e saturação são as principais barreiras que impedem o transporte de gases. ((Papendick and Runkles, 1965); (Moldrup et al., 2000); (Neale et al., 2000) *apud* (Neira, 2015)). O baixo volume de poros aerados pode afetar significativamente a permeabilidade ao ar e permite-se concluir que a passagem do gás por meio do solo saturado tende a ser dirigida aos "canais" que apresentam continuidade da fase ar, mesmo quando estes representem baixo percentual em relação aos canais preenchidos por água. Em solos não saturados os únicos obstáculos que o gás encontra ao percolar são as partículas do solo. Se ocorrer um acréscimo na umidade do solo, o volume de água nos poros vai aumentar, provocando uma diminuição da permeabilidade do solo ao ar, tendo em vista que a quantidade e a continuidade dos poros aerados ficam reduzidos. Esse acréscimo na umidade vai alterar também o valor do coeficiente de difusão que diminui com aumento da umidade do solo (Paula, 2006).

A permeabilidade dos solos compactados ao gás também pode ser influenciada pela composição do solo, limites de consistência e composição granulométrica (Lambe, 1958). Argilas e argilas siltosas oferecem maior resistência à compactação, enquanto areias e solos grossos bem graduados recebem mais facilmente a compactação. Solos bem graduados conseguem maiores densidades comparadas às argilas. Logo, solos mais bem graduados, argilosos e solos com maior índice de plasticidade irão apresentar menor a permeabilidade (Benson *et al*, 1994). No entanto, precisa-se levar em conta o efeito da compressibilidade do solo, solos muito plásticos e com alta atividade não são desejáveis pois quando submetidos às condições de campo, com ciclos de umedecimento e secagem, podem contrair causando fissuras na camada de cobertura. Essas fissuras vão criando caminhos preferenciais de fluxo, alterando significativamente os parâmetros de permeabilidade.

3. VARIÁVEIS RELACIONADAS AS PROPRIEDADES DO FLUIDO PERCOLANTE

Os fluidos que sofrem pequena ou nenhuma variação de densidade quando submetidos a altas pressões são considerados “incompressíveis”. Pode-se considerar a água incompressível pois, em condições isotérmicas, tem massa específica constante e a compressibilidade é tão pequena que pode ser desprezada. Por outro lado, um fluido que não pode ser considerado incompressível em condições estáticas é dito “compressível”, como é o caso dos gases e vapor de água. No entanto, no escoamento de fluidos, a compressibilidade envolve mais considerações do que apenas a natureza do fluido.

Os fluidos chamados ‘reais’ são providos de viscosidade e atrito. A viscosidade é a resistência molecular ao cisalhamento quando em movimento, tendo o mesmo efeito do atrito nos sólidos e pode variar com a temperatura. Quando um fluido escoar através de uma superfície fixa, no caso através dos poros interconectados entre partículas do solo, a camada de fluido adjacente às partículas do solo permanece fixa e as camadas seguintes tem velocidades progressivas maiores. Concomitantemente, as camadas que se movem mais rapidamente, tendem a aumentar a velocidade das camadas adjacentes. A força de atrito, portanto, é proporcional a área de contato da superfície e ao gradiente de velocidade. Ou seja, solos com superfície específica maior (solos finos) terão uma maior resistência a passagem dos fluidos.

Os principais mecanismos impulsionadores de fluxo são os gradientes de pressão e concentração. Os gases são transportados por três mecanismos principais: difusão, dispersão mecânica e advecção. A importância de cada mecanismo vai depender das características do solo, tipo de gás e das condições externas de contorno (Alzaydi, 1975). Dentre os principais fatores relacionados ao fluido que influenciam na permeabilidade dos solos ao gás podemos citar peso molecular e temperatura interna dos gases, viscosidade e diferença de concentração dos gases no meio.

A difusão é um movimento aleatório devido à energia cinética, é a principal forma de transporte de gás nos solos. O movimento ocorre por conta do espalhamento do gás do meio mais concentrado para o menos concentrado ((Hillel, 2003) *apud* (Neira *et al*, 2015)). Os gases se movem nos poros de acordo com as leis da difusão. O principal parâmetro relacionado a difusão é o coeficiente de difusão (D_p) que depende das propriedades do meio como textura, estrutura, e distribuição, conectividade e tamanho dos poros ((Schjønning *et al.*, 1999); (Moldrup *et al.*, 2001) *apud* (Neira *et al* 2015)). O coeficiente de difusão pode ser determinado em laboratório, mas ainda não existe normalização para o procedimento. O fluxo de gás em regime estacionário pode ser calculado pela equação diferencial definida pela primeira lei de Fick:

$$J = \frac{Q}{At} = D_p \frac{\partial C}{\partial x} \quad (1)$$

onde, J corresponde ao fluxo de gás, D_p é o coeficiente de difusão, C é a concentração do gás, t é o tempo e x comprimento percorrido pelo gás. No entanto, o processo que ocorre no solo é bem mais complexo do que o considerado na primeira lei de Fick, uma vez que a concentração de gases varia ao longo do tempo e espaço, e o fluxo de gases não ocorre em regime estacionário e sim em condições transitórias que consideram também fontes de gases, efeito de adsorção e

sorção. A partir dessas considerações, foi formulada a segunda lei de Fick que pode ser expressa da seguinte forma:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D_p \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad (2)$$

O segundo mecanismo de transporte de gases é a dispersão mecânica, que caracteriza-se pela mistura devido a heterogeneidade do escoamento por conta das variações na velocidade do gás. Essa variação de velocidade é causada principalmente pela rugosidade, diferenças nos tamanhos de poros e tortuosidade. A diferença de velocidade ao atravessar o meio poroso faz com que o gás se disperse, como consequência ocorre um espalhamento maior do que se houvesse apenas advecção. O fluxo pela dispersão mecânica pode ser calculado pela seguinte fórmula:

$$J_M = -D_M n \frac{\partial C}{\partial x} \quad (3)$$

onde, J_M é o fluxo dispersivo mecânico, D_M é o coeficiente de dispersão mecânica, C é a concentração, n é a porosidade e x é o comprimento percorrido pelo gás.

O terceiro mecanismo é a advecção, que é o fluxo de massa de gás dissolvida em vapor d'água. Esse fluxo é ascendente, da fonte de gás no solo para superfície, podendo ocorrer lateralmente quando a água do solo percola se afastando da fonte contaminante ou quando na direção da superfície o solo está impermeabilizado, impedindo a saída do gás. A difusão é responsável pela maior parte do fluxo de gás, enquanto que a advecção é responsável por cerca de 10% do fluxo total (Ignatius, 1998); porém, se ocorrerem simultaneamente, o fluxo advectivo predominará sobre o difusivo (Army Corps of Engineers, 1995). A advecção é induzida pelos gradientes de pressão total no solo. O movimento até a superfície é difusivo, em conjunto com fluxo advectivo da substâncias dissolvidas no vapor de água como resultado da evaporação da água (Campos et al, 1997). O fluxo difusivo é capturado e carregado pelo fluxo advectivo e levado para atmosfera, ou para dentro das edificações próximas do local ou mesmo para solos adjacentes e aquíferos.

A lei de Darcy é sobre advecção, considera o fluxo laminar e a linearidade entre o gradiente de pressão e a velocidade. A lei de Darcy permanece válida para fluxo de gases desde que seja adaptada para considerar viscosidade, densidade e compressibilidade (Lambe & Whitman, 1969). Para gases essa proporcionalidade é válida para gradientes de pressão até 120 KPa, para pressões superiores a 200 kPa não há proporcionalidade entre variação de pressão e velocidade do fluxo, sendo recomendado utilizar a Lei de Fick (Jucá e Maciel, 1999). Além disso, nos gases a velocidade não é constante, ela aumenta à medida que se aproxima da extremidade de saída devido à expansão do gás ((Ignatius, 1999) *apud* (Mariano, 2008)). Segundo Moon et al (2007), a permeabilidade ao gás é de 2 a 3 vezes maior que permeabilidade à água. Então, a lei de Darcy pode ser expressa da seguinte forma: $V = Ki$ ou $Q = K i A$, onde:

$$k = \frac{k_i \times \rho \times g}{\mu} \quad (4)$$

sendo, ρ é a densidade do gás, g é a aceleração da gravidade, μ é viscosidade dinâmica e K_i é a permeabilidade intrínseca que é expressa pela seguinte fórmula:

$$k_i = \frac{2 \times \mu \times L \times P_s \times v}{(P_e^2 - P_s^2)} \quad (5)$$

onde, L é o comprimento de solo percorrido pelo gás, P_s é a pressão de saída, P_e é a pressão de entrada e v é a velocidade de saída do gás. A permeabilidade intrínseca é uma propriedade inerente ao solo e reflete a influência conjunta das propriedades relacionadas ao espaço poroso (Libardi, 2005). Dessa forma o fluxo de gás pode ser expresso pela seguinte fórmula:

$$Q = k_i \frac{\rho g}{\mu} \frac{dh}{dx} \quad (6)$$

onde, h é a diferença de altura e x é o comprimento percorrido pelo gás. A fluidez é dada por $(\rho \cdot g / \pi)$ que depende apenas das propriedades do fluido. Nota-se que a quantidade de fluxo é inversamente proporcional à viscosidade e diretamente proporcional ao gradiente de pressão.

4. VARIÁVEIS RELACIONADAS ÀS CONDIÇÕES DE CONTORNO

A intensidade do fluxo pode sofrer variações relacionadas ao ambiente externo e as condições ambientais. Essas alterações ocorrem devido a alguns fatores como flutuações de pressão atmosférica, rajadas de vento, acúmulo de água, retenção de umidade e variação de temperatura e umidade que definem a sucção.

A variação da pressão atmosférica devido a condições climáticas induz a entrada de ar no solo. Essa intrusão de ar pode afetar algumas características e o fluxo de gases na zona não saturada (Massmann & Farrier, 1992). As rajadas de vento ocasionam uma diminuição na pressão junto ao solo e o ar tende a sair do solo. Quando a rajada de vento cessa, o ar tende a entrar novamente.

O aumento da temperatura acentua a difusão no solo por aumentar a temperatura interna dos gases. Esse efeito pode ser explicado pelo aumento da solubilidade causada pelo aumento da temperatura, facilitando a dessorção das substâncias (Ehlers et al., 1969). Com a variação de temperatura, o ar se expande e se contrai ocasionando trocas com ar atmosférico, esse fenômeno ocorre para pequenas profundidades.

A sucção também influencia na retenção/perda da umidade na camada. A sucção do solo tem seu valor máximo para baixas umidades e/ou altas temperaturas, ou seja, depende de condicionantes ambientais. Então, pode-se dizer que a variação da quantidade de água no solo está atrelada a mudanças no valor da sucção.

Quando ocorre umedecimento das camadas superficiais do solo, a água penetra e ocupa o espaço anteriormente preenchido pelo ar formando uma camada que vai impedir a saída de gás; quando o solo secar, nova quantidade de gás sairá dele. A alternância entre períodos secos e chuvosos pode ocasionar o aparecimento de fissura devido à expansão e à contração do solo. No caso da compactação, ocorre uma alteração da geometria dos poros que também pode afetar suas fontes de água por mudar a configuração da superfície (Horton et al, 1994). Outros mecanismos retardadores do fluxo estão relacionados à atenuação microbiológica e o mecanismo de sorção. O crescimento de microrganismos pode diminuir a permeabilidade com o tempo ((Allison, 1947) apud (Olson & Daniel, 1981)).

Os mecanismos de difusão ocorrem em resposta ao gradientes de pressão parcial dos gases constituintes do ar no solo e tem origem no movimento térmico ao acaso das moléculas. Os gradientes de pressão horizontal também podem se desenvolver devido à heterogeneidade do solo e causar um fluxo horizontal (Massmann & Farrier, 1992).

5. RESULTADOS ESPERADOS

A determinação dos fatores que influenciam na permeabilidade ao gás dos solos compactados é importante para definir um modelo mais próximo da situação real, que expresse não apenas a permeabilidade do solo mas também a direção desse fluxo e os seus caminhos preferenciais. Foi feita uma avaliação quantitativa baseada em resultados de ensaios e dados climatológicos. O programa de ensaios dividiu-se em duas partes: ensaios de laboratório e ensaios de campo. Os ensaios de laboratório foram feitos com objetivo de determinar a permeabilidade do solo ao gás para diferentes graus de compactação e níveis de saturação. Também foram realizados outros ensaios para que se possa ter uma melhor caracterização do solo. Obteve-se como resultado uma argila silto-arenosa, um material bastante plástico, sendo classificado como solo de alta plasticidade (CH) na classificação unificada. O material possui peso específico dos grãos de $2,3 \text{ g/cm}^3$.

A figura 1(a) mostra o resultado da variação do coeficiente de permeabilidade ao ar com a umidade de compactação. A curva azul apresenta o resultado de ensaios em amostras com a umidade de ensaio (saturação) igual a umidade que o solo foi compactado. Observa-se que há uma diminuição gradual do coeficiente de permeabilidade ao ar até a umidade ótima, depois há uma redução brusca em seu valor. Essa avaliação corresponde às condições iniciais da camada de cobertura (curto prazo), levando em conta fatores como estrutura, tipo de solo e seu índice de vazios inicial. Para umidades menores que a ótima, a água está aderida às partículas e os canalículos de ar são contínuos; acima da umidade ótima, o fluxo deixa de ocorrer porque o ar apresenta-se em forma de bolhas oclusas pela água. A segunda curva (vermelha) mostra o resultado do ensaio em 10 amostras com umidades de ensaio de 12% para todas amostras (valores de saturação menor que 50% fornecem as permeabilidades máximas). Podemos observar que para um mesmo grau de saturação, os solos com estrutura floculada - compactados no ramo seco - apresentam maior coeficiente de permeabilidade ao ar do que os solos com estrutura dispersa. Pode-se inferir que a alteração da estrutura do solo causa uma suave redução na permeabilidade do solo ao ar.

Para avaliar a influência da saturação para condições de campo, foram realizados ensaios para uma sucção termodinâmica de 80MPa ($t=25^{\circ}\text{C}$ e $H=55\%$), os resultados estão expressos na figura 1 (b). Pode-se observar que para graus de saturação na ordem de 85-90%, o solo tem uma diminuição brusca no coeficiente de permeabilidade ao ar. E como foi observado na figura 1 (a), esse mesmo efeito de estanqueidade aos gases é alcançado para solos compactados com umidades ligeiramente acima da umidade ótima e que estejam submetidos a umidades de campo na mesma ordem, ou valores superiores. Nesse caso, a curva característica do solo pode ser utilizada para estimar quando ocorre GAE (entrada de ar generalizada) desde que se leve em conta também o efeito de contração do solo.

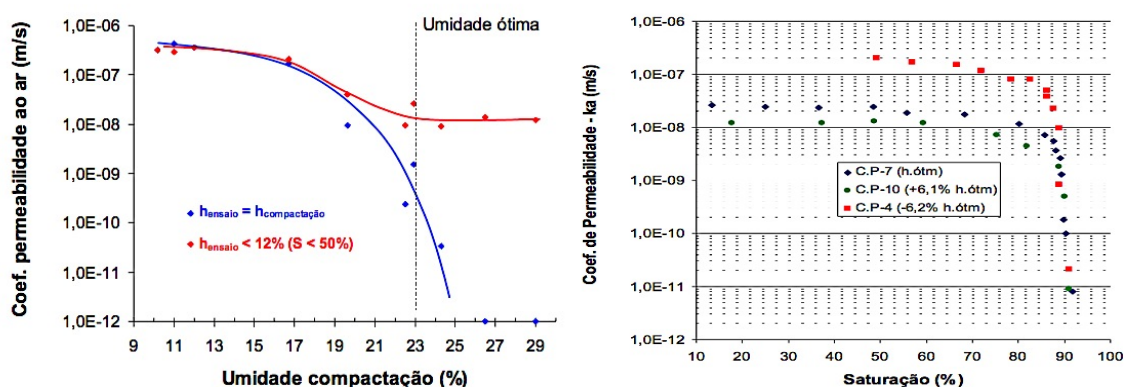


Figura 1. (a) Curva de variação do coeficiente de permeabilidade e umidade de compactação. (b) Curva de variação de coeficiente de permeabilidade e grau de Saturação. Fonte: Maciel (2003)

A figura 2 (a) mostra a influência do conteúdo volumétrico de ar na permeabilidade, para conteúdos volumétricos de ar na ordem de 5% o solo sofre um aumento brusco da permeabilidade ao ar, e esse aumento é mais significativo para os solos compactados no ramo seco, sendo a diferença de aproximadamente uma ordem de grandeza no coeficiente de permeabilidade para os solos compactados no ramo úmido. Na figura 2 (b) pode-se observar que a permeabilidade ao ar tem uma relação direta com o valor da sucção do solo e que ambas sofrem uma redução brusca para valores de saturação na ordem de 90%. A sucção foi medida pelo método do papel filtro, onde a água é sugada (por capilaridade ou em forma de vapor) de uma material com menor sucção (solo) para um material com maior sucção (papel filtro). Os procedimentos de ensaios estão descritos em Maciel (2003).

O ensaio de permeabilidade ao ar foi realizado com equipamento Tri-flex 2, permeâmetro de parede flexível com adaptações. As modificações feitas foram a inserção de um pré-saturador de gás e inclusão de um medidor de fluido na saída. O gás utilizado no ensaio foi o próprio ar por conta da dificuldade de se trabalhar com material explosivo. O ensaio foi realizado em amostras indeformadas da célula nº 8 da camada de cobertura do aterro sanitário.

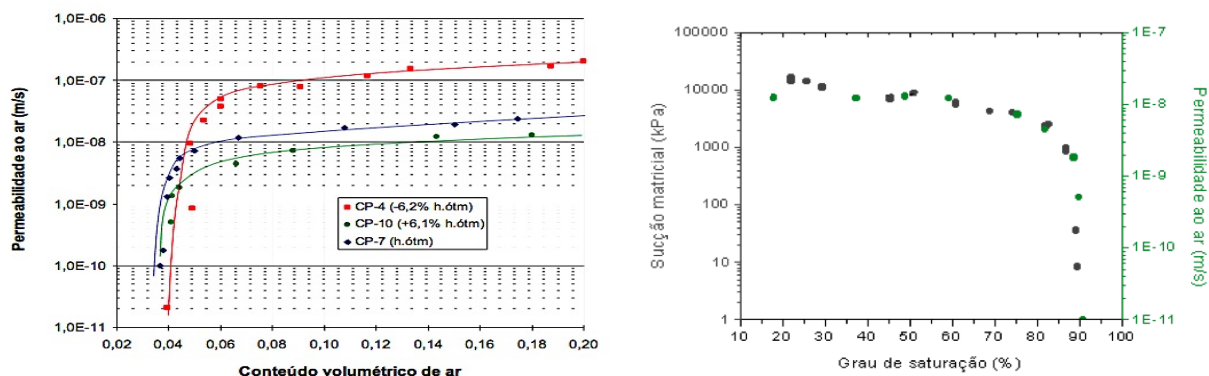


Figura 2. (a) Curva de variação do coeficiente de permeabilidade e conteúdo volumétrico de ar. (b) Curva do coeficiente de Permeabilidade ao ar e sucção em função do grau de Saturação. Fonte: Maciel (2003)

A análise de dados obtidos nos ensaios do tipo placas de fluxo e dispositivos DMPC serviu como base para avaliação dos parâmetros: gradiente de concentração, pressão interna dos gases e temperatura. A figura 3 (a) mostra o resultado do ensaio de placa de fluxo do ponto P3 na célula nº 8 do aterro da Muribeca (2003). A concentração inicial de CH₄ na placa é zero, depois aumenta até estabilizar quando a concentração na camada de cobertura iguala-se a concentração no interior do aterro. A figura 3 (b) mostra que a velocidade fluxo permanece proporcional ao aumento do gradiente de pressão, comprovando a aplicabilidade da lei de Darcy para os gases para nesse intervalo de gradiente de pressão.

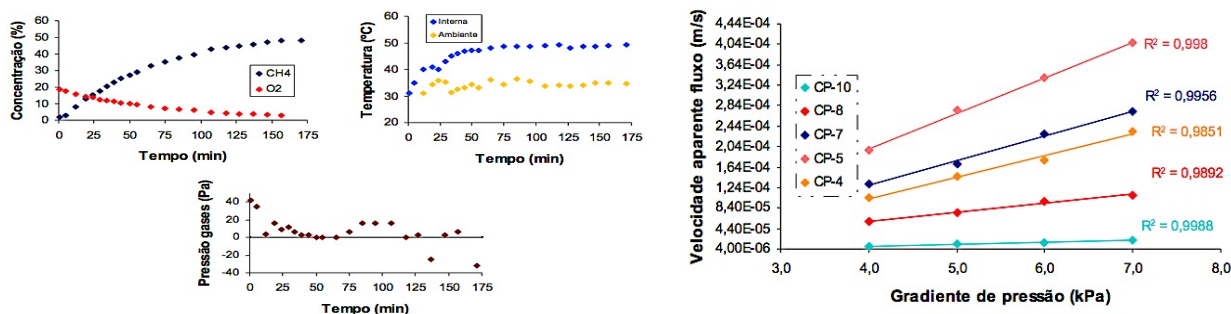


Figura 3. (a) Resultado do ensaio da placa de fluxo no ponto P3. (b) Velocidade aparente de fluxo e gradiente de pressão. Fonte: Maciel (2003)

A figura 4 mostra o monitoramento do fluxo de gás para seis situações distintas com diferentes gradientes de pressão e espessuras de camada. Verificou-se que a intensidade do fluxo é proporcional ao gradiente de concentração e inversamente proporcional à espessura de camada. Observou-se também que quanto menor a velocidade de fluxo, maior quantidade de gás que fica retido na camada.

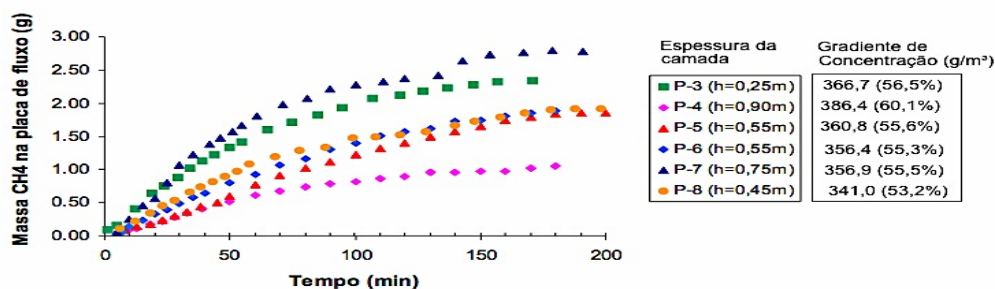


Figura 4. Massa de CH₄ retido na camada de cobertura. Fonte: Maciel (2003)

A figura 5 mostra com ocorre a variação de concentração de CO₂ e CH₄ na placa de fluxo. O fluxo de CO₂ é mais intenso devido à diferença de densidade dos gases - a densidade do CO₂ é 2,75 vezes a densidade do CH₄. Então, percebe-se que quanto mais denso e mais viscoso é o gás maior é a dificuldade que ele tem para atravessar uma camada de solo.

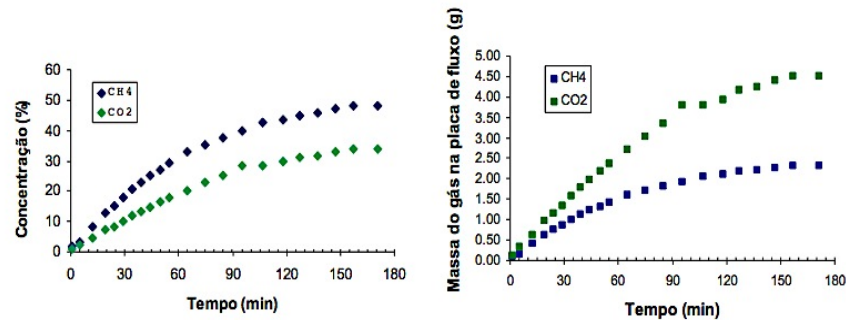


Figura 5. Variação da concentração de CO₂ e CH₄ com tempo. Fonte: Maciel (2003)

6. CONCLUSÕES

A compactação melhora várias propriedades que contribuem para diminuir a permeabilidade do solo aos gases. O solo fica mais denso com menor índice de vazios e com estrutura mais dispersa, tornando o caminho de fluxo do gás mais tortuoso (o gás terá uma dificuldade maior para atravessar a camada de solo), principalmente na direção vertical. Sobre as condições de saturação, o importante é definir o ponto de entrada de ar, pois para saturações menores (<70%), o coeficiente de permeabilidade é praticamente o mesmo; e para saturações maiores que 90% o solo torna-se praticamente impermeável ao ar. Tal coeficiente não depende somente do grau de saturação mas também de outros fatores como estrutura, densidade, distribuição dos vazios, que são expressos na permeabilidade intrínseca. As camadas de cobertura em geral estão em estado não saturado, assim, o acúmulo ou a penetração de água e/ou a variação da umidade de campo irão alterar significativamente o valor da permeabilidade ao ar. Conclui-se que solos compactados no ramo úmido tem menor permeabilidade aos gases e são mais indicados para a execução de camadas de cobertura. Porém, outros aspectos devem ser avaliados na definição dessa camada uma vez que as condições do ambiente também vão influenciar na permeabilidade, a saber variações de umidade e temperatura, flutuações de pressão atmosféricas, nível d'água e infiltração ou acúmulo de água na superfície.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a CAPES e CNPq pelo fomento à pesquisa e às bolsas de pesquisa, e à Universidade Federal de Pernambuco e ao PPGEC pelo suporte oferecido.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13896 (1997) "Aterros de resíduos não perigosos - Critérios para projeto, implantação e operação" Rio de Janeiro.

ALZAYDI, A. A. (1975) "Flow of Gases Through Porous Media" The Ohio State University, PhD, Civil Engineering.

BENSON, C., H.; ZHAI, X.; WANG. (1994) "Estimating the hydraulic conductivity of compacted clay liners" Journal of Geotechnical Engineering, ASCE 120: 366-387.

- CAMPOS, T. M. P. DE, CARVALHO, A.C. M. G & VARGAS JR., E. A. (1997) "*Determinação do coeficiente de difusão em solos não saturados: Proposta de uma metodologia experimental*" Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro – Departamento de Engenharia Civil.
- EPA (2008) "*Soil Vapor Intrusion – A Major Concern*" The 2008 Brownfields Technology Primer: Vapor Intrusion Considerations for Redevelopment, EPA 542-R-08-001.
- FRIEDRICH, J.; GE, M.; PICKENS, A. (2017) "*This Interactive Chart Explains World's Top 10 Emitters, and How They've Changed*" World Resources Institute. Disponível em: <http://www.wri.org/blog/2017/04/interactive-chart-explains-worlds-top-10-emitters-and-how-theyve-changed>. Acessado em junho de 2018.
- HORTON, R.; ANKENY, M. D.; AND ALLMARAS, R. R. (1994) "*Effects of Compaction on Soil Hydraulic Properties*" Agronomy Publications. 311. Disponível em: https://lib.dr.iastate.edu/agron_pubs/311. Acessado em junho de 2018.
- HUSE, K. (2007) "*Estudo da Influência da Adição de Bentonita em um Solo Areno-Siltoso para Uso como Cobertura de Aterros*" Rio de Janeiro. XII, 126 p. 29,7 cm (COPPE/UFRJ, M.Sc., Engenharia Civil. Dissertação - Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE.
- IGNATIUS, S. G. (1998) "*Fluxo unidirecional de gás através de um solo compactado – Determinação laboratorial dos parâmetros*" Exame de qualificação para doutorado.
- IGNATIUS, S. G.; PINTO, C. S. (1997) "*Air permeability of a compacted tropical soil*", International Society for Soil Mechanics and Foundation Engineering.
- Jucá, J.F.T. (1990) "*Comportamiento de suelos parcialmente saturados*" Tesis Doctoral, ETS Caminos, Canales y Puertos, Universidad Politécnica de Madrid, Espanha.
- JUCÁ, J.F.T., MACIEL, F.J. (1999) "*Permeabilidade ao gás de um solo compactado não saturado*" 4º Congresso Brasileiro de Geotecnia Ambiental – REGEO, Vol. 1, pp. 384-391, São José dos Campos – SP.
- LAMBE, T.W. (1958) "*The Structure of Compacted Clay*" Journal of the Soil Mechanical and Foundation Division ASCE, 84, 1-35.
- LAMBE, T.W. AND WHITMAN, R.V. (1969) "*Soil Mechanics*" John Wiley & Sons, New York.
- LIBARDI, P.L. (2005) "*Dinâmica da água no solo*" São Paulo: EDUSP.335p.
- MACIEL, F. J. (2003) "*Estudo da geração, percolação e emissão de gases no aterro de resíduos sólidos na Muribeca/PE*" 173f. Tese (Mestre em Ciências em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife.
- MARIANO, M.O.H. (2008) "*Avaliação da retenção de gases em camadas de cobertura de aterros de resíduos sólidos*" Tese (Doutorado) em Engenharia Civil, Universidade Federal do Pernambuco, Recife, Pernambuco, 225 p.
- MASSMANN, J., e FARRIER, D. F. (1992) "*Effects of atmospheric pressures on gas transport in the vadose zone*" Water Resour. Res., 28(3), 777–791, doi: 10.1029/91WR02766.
- MITCHELL, J.K. (1993) "*Fundamentals of Soil Behavior*" John Wiley & Sons, Inc., 2nd Edition, New York, Chichester, Brisbane, Toronto, Singapore, 437 p.
- MOON, S., JAE, N. K, KIM, Y. CHUNG, M. (2007) "*Effectiveness of compacted soil liner as a gas barrier layer in the landfill final cover system*" Waste Management, 28(10):1909-14
- NEIRA J, ORTIZ M, MORALES L, ACEVEDO, E. (2015) "*Oxygen diffusion in soils: Understanding the factors and processes needed for modeling*" Chilean J. Agric. Res. 75:35-44.
- OLSON, R.E., AND DANIEL, D.E., (1981) "*Measurement of the hydraulic conductivity of fine-grained soils*" In Zimmie, T.F., and Riggs, CO. (Eds.), Permeability and Groundwater Contaminant Transport. ASTM Spec. Tech. Publ., 746:18-64.
- PAULA, F. R. A. (2006) "*Determinação do coeficiente de difusão através de um fluxo unidimensional em um solo não saturado*" Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Universidade Estadual no Norte Fluminense, Rio de Janeiro. 59p.