

DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE DE DIFUSÃO ATRAVÉS DE UM FLUXO UNIDIMENSIONAL EM UM SOLO NÃO SATURADO

FERNANDA RANGEL DE AZEVEDO DE PAULA

“Tese apresentada ao Centro de Ciências e Tecnologia, da Universidade Estadual do Norte Fluminense, como parte das exigências para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil”.

Orientador: Prof. Sérgio Tibana
Co-Orientador: Prof. Roberto Faria Júnior

Campos dos Goytacazes – RJ

Maio / 2006

DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE DE DIFUSÃO ATRAVÉS DE UM FLUXO UNIDIMENSIONAL EM UM SOLO NÃO SATURADO

FERNANDA RANGEL DE AZEVEDO DE PAULA

“Tese apresentada ao Centro de Ciências e Tecnologia, da Universidade Estadual do Norte Fluminense, como parte das exigências para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil”.

Aprovado em 31 de Maio de 2006.

Comissão Examinadora:

Prof. Sérgio Tibana

Prof. Roberto Faria Júnior

Prof. Cláudio Fernando Mahler

Prof. Jean Marie Desir

Prof. Marcelo Gomes da Silva

"Para que nasçam virtudes
é necessário semear recompensas."

AGRADECIMENTOS

A Deus que além da criação possibilita o aprimoramento.

À minha mãe América pelo incentivo e dedicação incessante em todos os momentos.

Ao meu pai José Carlos pelo apoio e acolhimento.

Às minhas irmãs Carline e Érica pelas horas de dedicação e alegria.

Ao meu marido Rodrigo pela compreensão, companheirismo e incentivo.

Aos filhos Maria Eduarda e João Pedro pelo eterno estímulo.

À minha avó Tea (*in memorian*) pelas orações e pelo carinho.

Ao Orientador e Prof. Sérgio Tibana pela orientação, pela experiência, pela amizade e pelo incentivo.

Ao Co-orientador e amigo Roberto Faria pelos momentos de aprendizado e descontração.

A todos os profissionais do LECIV (Laboratório de Engenharia Civil) (D. Olívia, Bianca, Milton, Vanuzia, André, Prof. Paulo Maia, Prof.^a Maria da Glória, entre outros) que se mostraram sempre tão atenciosos e dispostos.

Aos profissionais do LCFIS (Laboratório de Ciências Físicas) que me atenderam com muita boa vontade.

A todos os amigos conquistados nesta etapa (Maria Fátima, Aline, Vanessa, Rodrigo Alvarez, Isabel).

E a todos que de alguma maneira contribuíram para a realização deste trabalho.

ÍNDICE

RESUMO.....	vii
ABSTRACT.....	viii
LISTA DE SÍMBOLOS.....	ix
LISTA DE FIGURAS.....	xi
LISTA DE TABELAS.....	xii
CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO.....	1
CAPÍTULO 2 – TRANSPORTE DE POLUENTES.....	4
2.1 – Considerações Iniciais.....	4
2.2 – Mecanismos de transporte.....	4
2.2.1 – Mecanismo de Advecção.....	5
2.2.2 – Mecanismo de Dispersão Hidrodinâmica.....	5
2.2.2.1 – Mistura Mecânica.....	6
2.2.2.2 – Difusão Molecular.....	7
2.3 – Interações solo – poluente.....	8
2.4 – Fatores que influenciam o fluxo.....	9
2.5 – Considerações Finais.....	10
CAPÍTULO 3 – DIFUSÃO DE GASES EM MEIOS POROSOS.....	11
3.1 – Considerações Iniciais.....	11
3.2 – Fluxo difusivo de gases.....	12
3.3 – Lei de Fick.....	15
3.4 – Permeabilidade relativa.....	18
3.5 – Considerações Finais.....	19
CAPÍTULO 4 – METODOLOGIA PARA DETERMINAÇÃO DO COEF. DE DIFUSÃO	20
4.1 – Considerações Iniciais.....	20

4.2 – Revisão bibliográfica.....	20
4.3 – Técnica fotoacústica.....	21
4.4 – O efeito fotoacústico.....	22
4.5 – Determinação do Coeficiente de Difusão – URAS 14.....	23
4.6 – Considerações Finais.....	26
CAPÍTULO 5 – METODOLOGIA DE ENSAIO.....	27
5.1 – Considerações Iniciais.....	27
5.2 – Caracterização Geotécnica das Amostras.....	27
5.3 – Determinação dos Índices de vazios.....	29
5.3.1 – Índice de vazios máximo.....	29
5.3.2 – Índice de vazios mínimo.....	31
5.4 – Moldagem dos Corpos de Prova.....	34
5.5 – Os gases.....	37
5.6 – Determinação do coeficiente de difusão.....	39
5.7 – Determinação da permeabilidade relativa.....	40
5.8 – Considerações Finais.....	40
CAPÍTULO 6 – APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	41
6.1 – Considerações Iniciais.....	41
6.2 – Curvas concentração x tempo.....	41
CAPÍTULO 7 – CONCLUSÕES E SUGESTÕES.....	52
BIBLIOGRAFIA.....	54

RESUMO

A determinação do coeficiente de difusão de gases em solos é de fundamental importância nos estudos das áreas de geotecnia ambiental, engenharia de petróleo, entre outras. Tendo em vista o fluxo ocorrer na maioria dos casos em meios não saturados e, conseqüentemente, ser multifásico, este trabalho se propõe a um estudo das propriedades dos parâmetros de fluxo em meios porosos baseados em resultados de laboratório, utilizando a técnica fotoacústica para a detecção e medição do nível de concentração de gases (URAS 14).

Como resultado obteve-se o coeficiente de difusão dos gases oxigênio, dióxido de carbono e metano em meios porosos produzidos em condições de laboratório e o desenvolvimento de metodologias para determinação da permeabilidade com diferentes fases.

Este projeto faz parte de uma linha de pesquisa onde novas metodologias de ensaios têm sido levantadas para o melhor entendimento dos fatores que condicionam o fluxo e o transporte de poluentes em meios porosos.

ABSTRACT

The determination of gas diffusion coefficient in porous media plays an important role in research such as environmental geotechnic engineering, oil engineering, etc. As it is well-known that multi-phase flux occurs in the most of non saturated soils, this work intends to study the properties of flux parameters in porous media in laboratory essays. The adopted methodology is based on the photoacoustic technique, which is responsible to detect and measure the gas concentration, which pass through the porous media (URAS 14).

As results it was pointed out the diffusion coefficients for the oxygen, carbon dioxide and methane for specific soils as well as the development of an alternative methodology in order to determine the multi-phase permeability in porous media.

This project belongs to a more generic research whose main aim is to derive new methodologies for the best understanding of the flux and transport of pollutants in porous media.

LISTA DE SÍMBOLOS

D'	→ Coeficiente de dispersão hidrodinâmica
α'	→ Coeficiente de mistura mecânica ou dispersividade
v	→ Velocidade de percolação do fluido
D^*	→ Coeficiente de difusão do soluto no meio
J	→ Fluxo por unidade de área
D	→ Coeficiente de difusão
C	→ Concentração do gás
C_0	→ Concentração constante de gás na entrada do corpo de prova
$\partial C/\partial x$	→ Gradiente de concentração
α	→ Difusividade térmica
q	→ Velocidade de fluxo
V	→ Volume percolado de fluido
t	→ Tempo
μ	→ Viscosidade dinâmica do solo
ρ_w	→ Densidade da água
g	→ Aceleração da gravidade
k	→ Coeficiente de permeabilidade intrínseco
Δp	→ Diferença de pressão
Δx	→ Comprimento da coluna
ρ	→ Densidade do gás
A	→ Área da seção transversal
L	→ Comprimento de percolação
P_0	→ Pressão atmosférica
P_a	→ Pressão absoluta padrão
P_e	→ Pressão absoluta de entrada do gás

P_s	→ Pressão absoluta de saída do gás
ρ_0	→ Densidade do gás à pressão atmosférica
T	→ Temperatura absoluta
e	→ Índice de vazios
δ	→ Densidade real dos grãos
γ	→ Densidade calculada
D_r	→ Densidade relativa
e_n	→ Índice de vazios natural
$e_{m\acute{a}x}$	→ Índice de vazios máximo
$e_{m\acute{i}n}$	→ Índice de vazios mínimo

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO 2

Figura 2.1 – Mecanismo de advecção	5
Figura 2.2 – Efeito da dispersão	6
Figura 2.3 – Mecanismos de mistura mecânica em escala macroscópica	7
Figura 2.4 – Mecanismo de difusão	7

CAPÍTULO 3

Figura 3.1 – Balanço de massa em uma amostra de solo	16
--	----

CAPÍTULO 4

Figura 4.1 – Esquema de uma célula fotoacústica convencional.	22
Figura 4.2 – Esquema interno do Uras -14	24
Figura 4.3 – Equipamentos montados para ensaio	25
Figura 4.4 – Esq. montagem analisador p/ determ. do coef.difusão dos gases	26

CAPÍTULO 5

Figura 5.1 – Curvas granulométricas das amostras de areia	28
Figura 5.2 – Molde e funil utilizados nos ensaios de determinação de $e_{máx}$	30
Figura 5.3 – Esquema utilizado para a obtenção do $e_{mín}$ da amostra 3	33
Figura 5.4 – Esquema da coluna de vidro	35
Figura 5.5 – Esquema da coluna de PVC	36
Figura 5.6 – Colunas utilizadas nos ensaios	37
Figura 5.7 – Esquema de montagem do analisador	39
Figura 5.8 – Balão de gás e fluxômetro	40

CAPÍTULO 6

Figura 6.1 – Curva concentração x tempo do gás oxigênio – Amostra 1	42
Figura 6.2 – Curva concentração x tempo do dióxido de carbono – Amostra 1	43
Figura 6.3 – Curva concentração x tempo do oxigênio – Amostra 2	44
Figura 6.4 – Curva concentração x tempo do dióxido de carbono – Amostra 2	44
Figura 6.5 – Curva concentração x tempo do metano – Amostra 2	45
Figura 6.6 – Curva concentração x tempo do oxigênio – Amostra 3	46
Figura 6.7 – Curva concentração x tempo do dióxido de carbono – Amostra 3	46
Figura 6.8 – Curva concentração x tempo do metano – Amostra 3	47
Figura 6.9 – Curva concentração x tempo do fluxo multifásico da Amostra 2	50
Figura 6.10– Curva concentração x tempo do fluxo multifásico da Amostra 3	51

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO 5

Tabela 5.1 – Resumo das características do solo	28
Tabela 5.2 – Índices de vazios máximo	31
Tabela 5.3 – Índices de vazios mínimo	33
Tabela 5.4 – Propriedades das amostras 2 e 3 reconstituídas	34

CAPÍTULO 6

Tabela 6.1 – Resultados obtidos dos coeficientes de difusão	47
---	----

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

O estudo do fluxo multifásico de gases e os diferentes mecanismos de transporte têm despertado grande interesse nas áreas de engenharia, agronomia e ciências naturais. A determinação do coeficiente de difusão e da permeabilidade relativa em solos é de fundamental importância nos estudos das áreas de geotecnia ambiental, fluxo em meios porosos não saturados e na área de engenharia de petróleo, pois estes parâmetros podem auxiliar nos estudos de emissão de gases por aterros sanitários, remediação de áreas contaminadas por compostos voláteis, entre outros.

O fluxo na zona não saturada principalmente tem se tornado um dos tópicos mais importantes e de maior atividade na pesquisa em física dos solos, tanto em consequência de sua importância quanto de sua complexidade, isto porque na prática, problemas associados com o fluxo de fluidos em solos na condição não saturada são freqüentemente encontrados.

Contaminantes tais como produtos químicos perigosos algumas vezes são despejados ou vazam sobre a superfície do solo. A aplicação de herbicidas ou pesticidas também se torna fonte de contaminação dos solos, superficialmente. Além disso, resíduos perigosos que são dispostos no solo devem ser estocados de maneira a não permitir a sua migração para o subsolo, causando a contaminação do mesmo.

Gasolina e misturas combustíveis também são fontes de geração de gases, pois os hidrocarbonetos presentes nessas substâncias são em sua maioria voláteis, e liberam vapores para a região não saturada do solo quando se encontram no subsolo através de algum vazamento.

Em aterros sanitários, onde ocorre a produção de misturas de gases devido à decomposição do lixo, podemos encontrar um fluxo multifásico, já que os gases gerados são liberados dentro da célula. Os gases gerados em aterros formam o chamado biogás e são: metano (CH_4), dióxido de carbono (CO_2), monóxido de carbono (CO), oxigênio (O_2), ácido sulfídrico (H_2S), entre outros, porém os mais notáveis e prejudiciais são o metano e o dióxido de carbono que representam 60% e

35%, respectivamente, de todo o volume gerado e serão objetos deste estudo (MACIEL, 2003).

O gás metano é um dos principais componentes do biogás produzido por decomposição da matéria orgânica de aterros sanitários, seguido pelo dióxido de carbono.

Uma vez presentes na atmosfera gasosa do solo, os gases ou vapores serão transportados para longe da pluma de contaminação, por difusão no interior da fase gasosa do solo, ou por advecção dessa própria fase gasosa, tornando-se assim disponíveis para adsorção às partículas sólidas, ou dissolução na água do subsolo. Devido à movimentação de gases e vapores na região não saturada dos solos ser mais rápida que a de líquidos, a pluma de contaminação gasosa geralmente se adianta em relação à pluma líquida, podendo conduzir contaminantes em concentrações muito altas, que podem exceder os limites legais (Ignatius, 1999).

Para se descrever de forma acurada o fluxo de gases e de contaminantes na região não saturada, bem como avaliar o impacto causado ao meio ambiente, é preciso determinar as propriedades hidráulicas do meio poroso em relação a estes fluidos percolantes. Assim, faz-se necessário um maior entendimento dos fatores que condicionam o fluxo e o transporte de gases em meios porosos.

Dessa forma o solo, em qualquer uma dessas situações, é o único meio de interação dos gases no ambiente interno do solo com a atmosfera, sendo considerado este o principal meio para o controle da poluição do ar.

Este trabalho se propõe a um estudo e um entendimento dos parâmetros de fluxo em meios porosos baseado em resultados de laboratório, utilizando uma nova metodologia e a utilização da técnica fotoacústica para a detecção e monitoramento do nível de concentração de gases (URAS 14).

Portanto o principal objetivo desta pesquisa é a determinação do coeficiente de difusão de gases em meios porosos utilizando a técnica fotoacústica. Assim com este estudo uma nova metodologia poderá ser validada, auxiliando também na obtenção dos parâmetros necessários para o entendimento do fluxo multifásico (diferentes fases) em condições de laboratório.

O trabalho foi dividido em sete capítulos.

O capítulo 2 apresenta a revisão bibliográfica sobre os principais mecanismos de transporte de massa através de meios porosos, assim como os meios de interação entre o fluido e o solo.

O capítulo 3 trata do fluxo difusivo de gases. Neste capítulo é feita a abordagem de alguns parâmetros relacionados com este mecanismo de transporte, além da apresentação da lei de Fick, que é a base para a determinação do fluxo aqui considerado.

No capítulo 4 é descrita toda metodologia aqui utilizada para a determinação do coeficiente de difusão, além de uma abordagem da técnica fotoacústica empregada na determinação do mesmo.

As metodologias seguidas na investigação em laboratório, nesta pesquisa, para a determinação das características geotécnicas dos solos utilizados encontram-se descritas no capítulo 5.

Os resultados dos ensaios realizados e as curvas obtidas são apresentados no capítulo 6.

As conclusões da pesquisa, bem como as sugestões na continuidade deste estudo são apresentadas no capítulo 7.

CAPÍTULO 2

MECANISMOS DE TRANSPORTES DE MASSA

2.1 – Considerações Iniciais

A presença de poluentes em forma de gás ou vapor no solo se deve a vários fatores. A variedade de substâncias poluentes é enorme, o que resulta em inúmeras formas de interação destas com o solo.

Quando presentes no subsolo, os gases serão transportados para longe da pluma de contaminação, tornando-se disponíveis para serem adsorvidos às partículas do solo ou para dissolução na água do subsolo, aumentando assim o volume de água do subsolo em contato com o poluente (Ignatius, 1999), ou ainda serem liberados para a atmosfera, aumentando a concentração dos mesmos no local.

Dessa forma, faz-se necessário o conhecimento detalhado das condições do meio, da contaminação e do fluxo, além das propriedades dos poluentes e do solo, pois estes são fatores que têm grande influência no transporte de substâncias. Com estas informações é possível então estimar a área da região contaminada e prever o avanço da pluma de contaminação, de maneira que se possam elaborar métodos de tratamento e de despoluição (Borges, 1996).

Para estudar os processos de contaminação é importante conhecer os principais mecanismos envolvidos no transporte de contaminantes.

Existem dois tipos de mecanismos que são responsáveis pelo comportamento de um contaminante no meio poroso. O primeiro mecanismo é denominado mecanismo de transporte – processos físicos – e é responsável pela descrição do movimento dos contaminantes. O segundo é chamado interação solo-poluente – processos químicos – que é responsável pela redução da concentração dos componentes durante o transporte.

2.2 – Mecanismos de Transporte

Os mecanismos de transporte são responsáveis pelo movimento de poluentes e se classificam de natureza facilitadora quando auxiliam na percolação dos mesmos. Estes mecanismos são: mecanismo de advecção e dispersão hidrodinâmica.

2.2.1 – Mecanismo de Advecção

A advecção é o mecanismo de transporte que representa o movimento do poluente devido ao fluxo do fluido no qual está dissolvido (Figura 2.1), movendo-se na direção das linhas de fluxo.

Este mecanismo é resultante de gradientes de pressão existentes entre as diferentes regiões do ambiente interno do meio poroso e a atmosfera, além de estar relacionado com a velocidade de percolação no meio poroso.

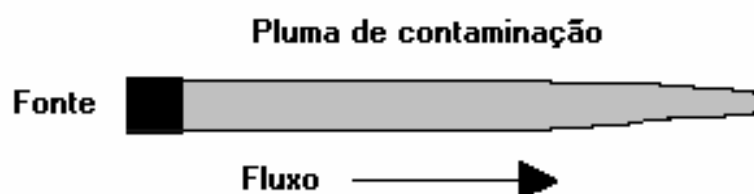


Figura 2.1 – Mecanismo de Advecção (Carvalho, 2001).

2.2.2 – Mecanismo de Dispersão Hidrodinâmica

A dispersão hidrodinâmica é o mecanismo responsável pelo espalhamento do poluente no meio poroso. Nele ocorre o transporte de íons e moléculas que se movem na direção das linhas de fluxo, se afastando da trajetória prevista, ocorrendo o espalhamento da solução e sua diluição, fazendo com que a contaminação avance mais rapidamente.

O efeito da dispersão pode ser representado em laboratório através do ensaio de coluna, que consiste no fluxo unidimensional através de uma amostra de solo saturado com água. Considerando o fluxo permanente, a partir do instante $t = 0$, uma solução, contendo substância numa determinada concentração inicial – C_0 , passa a ser introduzida continuamente no solo, por onde começa a permear expulsando, gradativamente a água dos vazios. No início, a interface que separa os dois fluidos é bem delineada e perceptível, porém com o passar do tempo, esta deixa de ser definida, e passa a ter uma faixa de transição entre a solução que avança e a água. A concentração do soluto nessa faixa de transição varia desde a sua concentração inicial na solução ($C = C_0$) até zero, que é sua concentração inicial na água dos poros (COSTA, 2002). Este efeito pode ser visualizado na figura 2.2, que representa um esquema do ensaio de coluna, com fluxo unidimensional em amostra de solo com água.

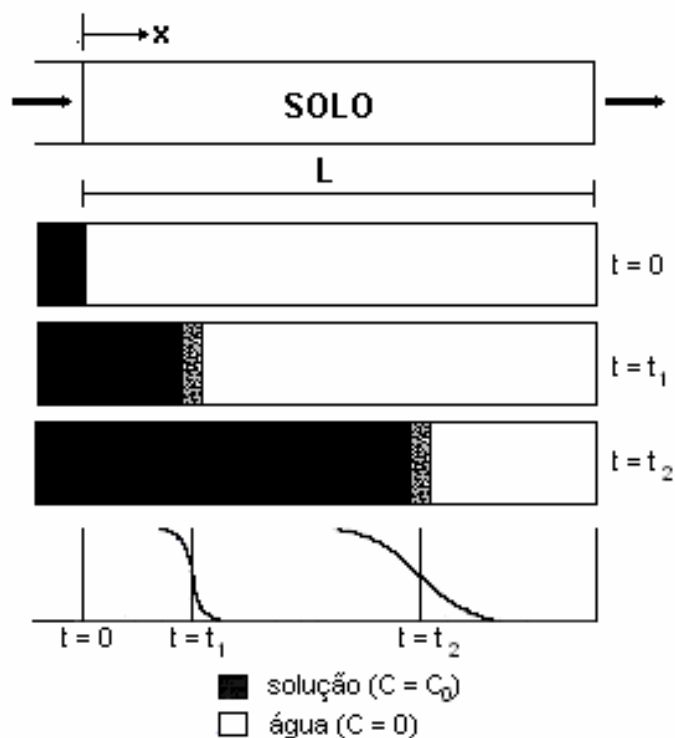


Figura 2.2 – Efeito da dispersão (Borges, 1996).

A dispersão hidrodinâmica tem duas componentes denominadas mistura mecânica e difusão molecular (Telles, 2001).

2.2.2.1 – Mistura Mecânica

A mistura mecânica é resultante das variações locais da velocidade de fluxo no meio poroso que ocorrem devido à heterogeneidade do meio (Telles, 2001).

O transporte de massa por dispersão mecânica ocorre devido à interação entre o gás que se move e as irregularidades e interferências existentes no interior dos poros do solo (Ignatius, 1999).

Esta componente da dispersão hidrodinâmica, quando numa escala microscópica, resulta de três mecanismos básicos (Figura 2.3). O primeiro consiste na variação da velocidade de fluxo devido à rugosidade das paredes dos canais formados pelas interligações dos poros do solo. O segundo mecanismo é consequência dos diferentes tamanhos dos poros ao longo da trajetória de fluxo, fazendo com que ocorram diferentes velocidades médias nos diferentes canais existentes. E o terceiro mecanismo de mistura corresponde às mudanças de direção

das partículas devido à tortuosidade dos canais de fluxo, que faz com que algumas partículas se movam mais rápido que outras.

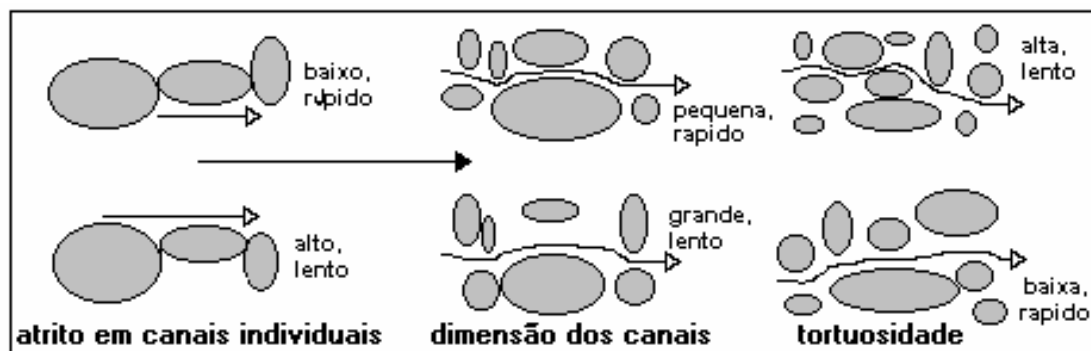


Figura 2.3 – Mecanismos de mistura mecânica em escala microscópica (Bedient, 1994).

A dispersão pode ocorrer tanto na direção do fluxo – dispersão longitudinal – como em direções perpendiculares a esse – dispersão transversal.

2.2.2.2 – Difusão Molecular

A segunda componente da dispersão hidrodinâmica, a difusão, consiste no movimento de solutos dissolvidos na água em decorrência de um gradiente químico. Os íons se movem de pontos de maior concentração para pontos de menor concentração, tendendo a estabilizar a concentração em todo o fluido. O deslocamento pode ocorrer mesmo em direções normais à do fluxo dominante e até mesmo sem haver gradiente hidráulico (Figura 2.4).

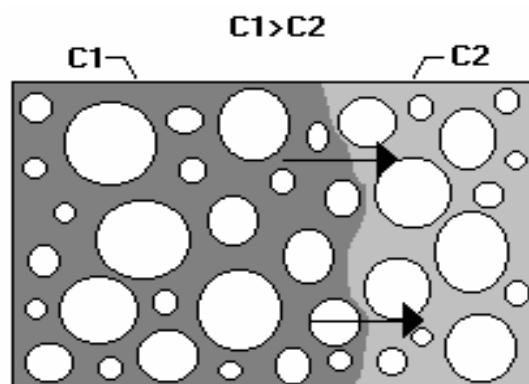


Figura 2.4 – Mecanismo de difusão (Costa, 2002).

A dispersão hidrodinâmica pode ser avaliada através do coeficiente de dispersão hidrodinâmica (D) definido como a soma das duas parcelas que compõem esse mecanismo, a dispersão mecânica (αv) e a difusão, conforme a equação abaixo:

$$D' = \alpha' v + D^* \quad (2.1)$$

onde,

$D' \rightarrow$ coeficiente de dispersão hidrodinâmica (L^2 / T);

$\alpha' \rightarrow$ coeficiente de mistura mecânica ou dispersividade (L);

$v \rightarrow$ velocidade de percolação do fluido (L / T);

$D^* \rightarrow$ coeficiente de difusão do soluto no meio (L^2 / T).

O parâmetro α é uma propriedade característica do meio poroso, enquanto D^* é propriedade da substância e do meio poroso (Freeze & Cherry, 1979; Fetter, 1993).

A difusão e a mistura mecânica têm seus efeitos combinados para compor o mecanismo da dispersão hidrodinâmica, porém podem ocorrer situações em que um desses processos pode predominar em relação ao outro, dependendo da velocidade de percolação do fluido no meio e do coeficiente de difusão do soluto.

2.3 – Interações solo – poluente

Conforme dito anteriormente, a migração de contaminantes em meios porosos é governada por diversos processos físicos e químicos. No item anterior foram descritos os processos físicos, que envolvem os mecanismos da advecção e da dispersão hidrodinâmica. No entanto, na maioria das vezes, esses processos sofrem a influência de reações químicas ou bioquímicas que podem alterar a concentração do poluente. Essas reações podem ocorrer inteiramente na fase líquida ou causar a transferência do poluente desta para a fase sólida do meio poroso, ou para a fase gasosa, no caso do meio não saturado (Oliveira, 2002), além de imobilizar o contaminante, podendo mudar a toxicidade e a natureza dos contaminantes e do próprio solo, e tudo isso depende da natureza dos reagentes e as condições ambientais locais.

Os processos químicos causam, de uma maneira geral, uma atenuação no fluxo da substância, modificando a sua mobilidade e ocasionando a alteração da concentração do fluido percolante, implicando em ganho ou perda de massa do poluente.

Estas interações se classificam como de natureza não facilitadora do fluxo.

Entre os processos que resultam na transferência do soluto para a fase sólida, com conseqüente retardamento da frente de contaminação, os considerados mais importantes são adsorção, sorção hidrofóbica e precipitação. Dentre os processos que causam a atenuação das substâncias no solo por perdas ou transformação em outras substâncias, destacam-se a biodegradação, degradação abiótica, volatilização e decaimento radioativo. Por fim, os principais processos que ocasionam o aumento da mobilidade do soluto são dissolução, formação de complexos, co-solvência e ionização.

2.4 – Fatores que influenciam o fluxo

À medida que ocorre o transporte de contaminantes no solo, diversos fatores relacionados ao fluido percolante, ao próprio solo e às condições ambientes influenciam o processo de migração e retenção. Dentre estes fatores pode-se destacar o tipo de solo, a mineralogia, a capacidade de troca catiônica, as espécies de cátions adsorvidos, a velocidade de percolação, o teor de matéria orgânica, a concentração do contaminante, a presença de outras substâncias na solução percolante, as condições hidrogeológicas, a temperatura e o pH do meio (Borges, 1996).

Os processos de interação entre o solo e o gás, que merecem maior atenção, são os que resultam na acumulação do gás no solo. Porém a capacidade do solo de reter substâncias é limitada, de maneira que quando a contaminação ocorre de forma contínua, a taxa de retenção tende a diminuir com o tempo, podendo chegar a zero.

A transferência da substância para a fase sólida durante o fluxo provoca redução da velocidade da frente de contaminação em relação à velocidade do fluido, resultando em um fenômeno denominado retardamento (Borges, 1996).

Porém se ocorre um aumento desta velocidade de fluxo o tempo disponível para que os processos de transferência ocorram é menor, resultando numa redução deste retardamento. Como estes processos não são instantâneos, se a velocidade for relativamente alta, o sistema não atinge o equilíbrio e a substância pode não ser retida, resultando em um avanço da frente de contaminação mais rápido que o previsto.

A variação da temperatura também tem grande influência no transporte, promovendo alteração da permeabilidade do solo, da velocidade dos processos de transferência, além de propiciar a ocorrência de reações que não se processam à temperatura ambiente.

2.5 – Considerações Finais

Neste capítulo vimos os mecanismos de transporte (fluxo) de substâncias através de um meio e suas interações com o mesmo.

No próximo capítulo trataremos do principal mecanismo de transporte quando se trata de fluxo de gases e as razões pelas quais ele ocorre.

CAPÍTULO 3

DIFUSÃO DE GASES EM MEIOS POROSOS

3.1 – Considerações Iniciais

As formas de transporte de gás em solos mais tradicionalmente levadas em conta são a advecção e a difusão por diferença de concentração, tendo sido esta última considerada como a mais importante, já que a primeira deve responder por menos de 10% do fluxo total de massa gasosa (Ignatius, 1999).

Para se avaliar a massa da substância que é transportada por estes processos, é necessário conhecer a concentração com que ela ocorre na fase gasosa do solo. Quando esta fase gasosa está em contato com a atmosfera, ocorrem perdas da substância a uma taxa que depende do movimento da mesma até a superfície do solo. Tal movimento é difusivo, decorrente do gradiente de concentração que aparece por causa da perda na superfície (gradiente de concentração) – devido a esta perda, a concentração na superfície do solo é sempre menor do que nos poros, e a volatilização é contínua – em conjunto com o fluxo advectivo da substância dissolvida no vapor d'água, que se desloca para a superfície como resultado da evaporação da água (Campos *et al.*, 1997).

Tais processos, por sua vez, variam conforme as propriedades físicas e químicas da substância em questão, da solução e do solo, além de aspectos climáticos (precipitação, evaporação, transpiração, temperatura).

Os potenciais impulsionadores de fluxo geralmente considerados são o de pressão e o de concentração, dando origem aos movimentos por advecção e difusão, respectivamente, traduzindo em fluxo de massa.

O transporte de massa possui três fatores principais: o meio poroso, a substância e as condições ambientais.

Neste trabalho, o meio poroso é o solo, as substâncias são os gases dióxido de carbono, metano e oxigênio, e a condição ambiental considerada é a de não saturação do solo (o solo não apresenta fase líquida).

Quando a substância é transportada devido ao fluxo do fluido no qual ela está dissolvida, movendo-se na direção das linhas de fluxo, diz-se que o mecanismo de transporte associado é a advecção (Costa, 2002). Este mecanismo é resultante de gradientes de pressão existentes entre as diferentes regiões do ambiente interno do

meio poroso e a atmosfera, e o sentido do fluxo apresenta-se das zonas de maior potencial para as de menor potencial.

No processo de advecção a frente de contaminação formada avança com a mesma velocidade do fluido percolante, sem alterar a sua concentração na solução. Na prática, no entanto, a substância tende a se espalhar, afastando-se da trajetória prevista pelo processo de advecção.

Quando no processo de transporte ocorre movimento natural de íons e/ou moléculas em solução, o mecanismo é difusão, ocorrendo a diminuição dos gradientes de concentração existentes. Nesta etapa ocorrem perdas da substância a uma taxa que depende do movimento da mesma.

Mitchell (1991) ressalta que geralmente a contribuição do transporte difusivo é bem menor que a parcela da advecção, no entanto em casos onde o gradiente de pressão é nulo ou ainda quando o solo apresenta coeficiente de permeabilidade inferior a 10^{-9} m/s, o transporte difusivo pode exceder o advectivo.

3.2 – Fluxo difusivo de gases

As substâncias volatilizadas podem se deslocar diretamente para a atmosfera ou seguir uma trajetória tortuosa, tal como as substâncias que se encontram no subsolo. Esta transferência depende da difusão através do meio poroso e de variáveis como a porosidade do solo e o teor de umidade (Campos *et al.*, 1997)

Essa difusão por diferença de concentração também é chamada de difusão ordinária, para distingui-la de outros processos de transporte, que não serão enfocados como a difusão térmica, provocada por gradientes de temperatura e da difusão forçada, provocada por gradientes de forças externas aplicadas, como, por exemplo, campos elétricos, (Ignatius, 1999).

A movimentação de gases e vapores em regiões não saturadas de solo é mais rápida que a de líquido, dessa forma a contaminação por gases acontece com mais rapidez quando comparada com a contaminação por líquido (Ignatius, 1999)

Em termos gerais, a difusão de qualquer substância na fase gasosa é muito mais significativa do que na fase líquida (o coeficiente de difusão na fase gasosa é aproximadamente 10^4 vezes o mesmo coeficiente na solução), portanto, a difusão na fase gasosa pode ser importante mesmo para substâncias que têm baixa pressão de vapor (Farmer *et al.* 1980).

Contudo, quando além da fase gasosa, existe a fase sólida (meio poroso) a difusão é mais lenta quando comparada com a que ocorre em solução livre devido às partículas de solo, principalmente quando se trata de solo argiloso, que pode ter característica de adsorção e matéria orgânica que complicam o processo difusivo (Campos *et al.*, 1997).

A diminuição da porosidade do solo evidentemente provoca diminuição na difusão, por causa da redução do volume de vazios do solo. Na situação limite em que a porosidade é nula, a difusão deixa de ocorrer (Ehlers *et al.*, 1969).

O aumento da temperatura acentua a difusão no solo, devido ao aumento dos coeficientes de difusão em ambas as fases líquida e gasosa, assim como a taxa de variação da densidade de vapor em função da concentração. Esse efeito na interação pode ser explicado pelo aumento da solubilidade causado pelo aumento da temperatura, facilitando a dessorção da substância (Ehlers *et al.*, 1969).

O baixo volume de poros aerados que começa a afetar significativamente a permeabilidade ao ar permite concluir que a passagem do gás por meio do solo não 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.

Para gradiente de pressão nulo, a difusão prevalece em relação à advecção, porém o fluxo difusivo será anulado quando a concentração do gás se tornar constante no meio (Maciel, 2003).

Neste estudo, pelo fluxo ter um valor considerado baixo, o fluxo é puramente difusivo.

Assim, o transporte de gás por difusão ocorre devido à interação molecular. Quando o gás está mais concentrado em uma região, existe migração natural deste para a região de menor concentração por difusão.

Em geral, a difusão está sempre associada ao fenômeno da dispersão mecânica do fluido, que seria a interferência entre o movimento do gás e as irregularidades internas da matriz do solo. Devido à dificuldade de distinção experimental, os dois fenômenos são combinados no chamado fluxo por dispersão hidrodinâmica, que seria a soma das parcelas de fluxo difusivo e dispersivo.

Este fluxo é dado pela seguinte expressão (Bear, 1972):

$$J_d = -\theta_a D \frac{\partial C}{\partial x} \quad 3.1$$

onde,

$J_d \rightarrow$ é o fluxo por dispersão hidrodinâmica ($M/L^2.T$)

$\theta_a \rightarrow$ é o conteúdo volumétrico de ar no solo

$D \rightarrow$ é o coeficiente de difusão efetivo ou coeficiente de dispersão hidrodinâmica do gás no solo (L^2/T)

$\partial C/\partial x \rightarrow$ é o gradiente de concentração no meio (M/L^4)

O coeficiente de difusão efetivo (D) está relacionado com o coeficiente de difusão livre e a tortuosidade do meio através da seguinte expressão (Kamon *et. al.*, 2002):

$$D = D_0 \tau' \quad 3.2$$

Onde,

$D_0 \rightarrow$ é o coeficiente de difusão do gás no ar ou coeficiente de difusão livre a uma dada temperatura (L^2/T)

$\tau' \rightarrow$ é a tortuosidade do meio

Ainda de acordo com o último autor, a tortuosidade do meio pode ser dada pela seguinte expressão:

$$\tau' = \frac{\theta_a^{7/3}}{\eta^2} \quad 3.3$$

Sabendo-se que o conteúdo volumétrico de ar no solo é:

$$\theta_a = \eta A = \frac{e(1-S)}{1+e} \quad 3.4$$

onde,

$\eta \rightarrow$ é porosidade do solo

$A \rightarrow$ é o grau de aeração do solo

$e \rightarrow$ é índice de vazios do solo

$S \rightarrow$ é o grau de saturação do solo à água

O coeficiente de difusão mede a facilidade/dificuldade do gás atravessar o solo por difusão, sendo uma grandeza proporcional ao fluxo de gás. Dessa forma podemos concluir que quanto maior a permeabilidade do solo, maior a capacidade dele permitir que um fluxo de massa ocorra pelo interior de seus poros; assim sendo o coeficiente de difusão desse solo será maior quanto maior for a sua permeabilidade.

Como a permeabilidade está diretamente relacionada como o conteúdo volumétrico de ar em um solo, quanto maior o conteúdo volumétrico de um solo, maior a permeabilidade deste solo.

O fluxo difusivo também é proporcional ao gradiente de concentração. Quanto maior o gradiente de concentração, maior será a parcela de difusão em um transporte de gás.

A espessura do solo também influencia na taxa de transporte através dele. Quanto maior a altura do solo, mais lenta é a percolação do gás e maior será possibilidade de o gás ficar retido, podendo ocorrer retenção física, química e/ou biológica.

Em solos não saturados os únicos obstáculos que o gás encontra ao percolar são as partículas do solo. Porém se ocorrer um acréscimo na umidade do solo, o volume de água nos poros vai aumentar, provocando uma diminuição na 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, se tornando menor quanto maior for a umidade do solo.

3.3 – Lei de Fick

Os processos que envolvem o transporte de contaminantes em meios porosos podem ser representados matematicamente através de equações diferenciais desenvolvidas com base na conservação da massa da substância percolante.

A análise da variação da concentração da substância é feita considerando-se o fluxo do soluto através de um volume elementar de solo e a equação do transporte é obtida, então, a partir do balanço de massa, onde J é o valor absoluto do fluxo.



Figura 3.1 – Balanço de massa em uma amostra de solo.

Qualquer estudo relativo à distribuição espacial e temporal de um constituinte em um meio fluido tem como ponto de partida uma lei de conservação.

O princípio da conservação da massa implica que o número de moléculas que entram em um volume de controle menos o número de moléculas que saem desse mesmo volume é igual a taxa de acumulação da espécie em questão. Assim:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = - \frac{\partial J}{\partial x} \quad 3.5$$

onde,

$C \rightarrow$ é a concentração (moléculas por volume) (M/L^3)

$J \rightarrow$ é o fluxo de moléculas por unidade de área (M/L^2) massa elementar (M)

Considerando-se o problema em três dimensões e empregando a notação vetorial, temos:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \text{div}(J) = 0 \quad 3.6$$

De acordo com Maciel (2003), o fluxo difusivo é definido pela primeira Lei de Fick como o transporte de fluidos (contaminantes – líquidos ou gasosos) de uma região de alta concentração para regiões de baixa concentração química.

A primeira Lei de Fick descreve o fluxo de um fluido sob condições permanentes. Este fluxo é proporcional ao gradiente de concentração e a fórmula é a seguinte:

$$J = -D \frac{\partial C}{\partial x} \quad 3.7$$

onde,

$J \rightarrow$ fluxo do fluido permanente (L^3/T);

$D \rightarrow$ coeficiente de difusão (L^2/T)

$C \rightarrow$ concentração (M/L^3)

$\partial C/\partial x \rightarrow$ é o gradiente de concentração no meio (M/L^4)

O sinal negativo indica que o movimento ocorre da região de alta para baixa concentração.

Assim, substituindo (3.7) em (3.5) e considerando D constante:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad 3.8$$

onde,

$t \rightarrow$ é o tempo de concentração (T);

$x \rightarrow$ é comprimento (altura) do solo (L);

$C \rightarrow$ concentração (M/L^3);

Esta é conhecida como a segunda Lei de Fick, que descreve a difusão como dependente do tempo, ou seja, não se considera o fluxo em condições permanentes como na primeira Lei.

Para avaliar a quantidade da substância que é transportada pelo processo difusivo é necessário conhecer a concentração com que ela ocorre.

A relação mais simples entre o coeficiente de difusão e a concentração do fluido assume uma dependência exponencial, dada pela fórmula abaixo (Neogi, 1996):

$$D = e^{\alpha C} \quad 3.9$$

onde

$\alpha \rightarrow$ difusividade térmica

$C \rightarrow$ concentração do gás (M/L^3).

A definição normal para difusão é o fenômeno onde um fluido se movimenta em outro fluido através de colisões entre moléculas dos dois tipos de fluidos. Entretanto, no caso de difusão em um meio poroso como o solo, as partículas de um dos fluidos podem não colidir somente com as partículas do outro fluido, mas também com as partículas relativamente grandes do solo.

Na fase gasosa do solo o fluxo difusivo é dominante, podendo ser o único mecanismo de controle do fluxo em muitos solos de granulometria fina, aumentando a sua importância à medida que diminui a umidade (Campos *et. al*, 1997).

Neste trabalho o mecanismo de transporte considerado é o de difusão por diferença de concentração.

3.4 – Permeabilidade Relativa

O transporte puramente difusivo dos elementos 1 e 2 presentes em uma mistura gasosa binária pode ser descrito pela primeira lei de Fick (Bird *et. al*, 1960, Mason e Malinauskas, 1983):

$$J_{f1} = -\theta_a D_{f12} \frac{dC_1}{dx} \quad 3.9$$

e

$$J_{f2} = -\theta_a D_{f21} \frac{dC_2}{dx} \quad 3.9$$

onde,

J_{f1} → densidade de fluxo de massa do gás 1 (M/L²T)

J_{f2} → densidade de fluxo de massa do gás 2 (M/L²T)

θ_a → é o conteúdo volumétrico de ar no solo

D_{f12} → é o coeficiente de difusão do gás 1 no gás 2 (L²/T)

D_{f21} → é o coeficiente de difusão do gás 2 no gás 1 (L²/T)

C_1 → é a concentração do gás 1 (M/L³)

C_2 → é a concentração do gás 2 (M/L³)

Se dois gases diferentes à mesma temperatura e pressão forem colocados em contato através de um tubo (ou meio poroso), as moléculas mais leves tendem a fluir mais rapidamente que as mais pesadas, de maneira que a pressão aumenta do lado do gás mais pesado, até que o fluxo induzido no sentido do gás mais pesado para o mais leve

A permeabilidade relativa do meio poroso é de grande utilidade na modelagem de problemas de fluxo em campos de petróleo, visto que nestes a retirada do óleo se dá em condições de fluxo multifásico.

Segundo Bear (1972), muitos pesquisadores concluíram através de experimentos que quando dois fluidos não-miscíveis escoam simultaneamente através de um meio poroso, cada fluido estabelece seus próprios caminhos

tortuosos, os quais formam canais estáveis. Eles assumem que este conjunto de canais corresponde ao grau de saturação com relação ao fluido que os ocupa. Considerando um fluido molhante (S_w) e um fluido não molhante (S_{nw}), quando S_{nw} é reduzido, os canais correspondentes ao fluido não molhante tendem a diminuir, formando regiões que irão compor a saturação residual de fluido não-molhante. Similarmente, se S_w decresce, os canais de fluido molhante tendem a diminuir, tornando-se descontínuos, compondo assim, a saturação irreduzível de fluido molhante. Deste modo, parece ser natural aplicar o conceito de permeabilidade estabelecido para a vazão de uma simples fase de fluido através de um meio poroso, modificando seu valor devido à presença de uma segunda fase.

3.5 – Considerações Finais

Neste capítulo vimos como o fluxo difusivo ocorre e como pode ser calculado. No próximo capítulo abordaremos a metodologia aqui utilizada para a obtenção dos coeficientes de difusão dos gases estudados.

CAPÍTULO 4

METODOLOGIA PARA DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE DE DIFUSÃO

4.1 – Considerações Iniciais

O objetivo deste capítulo é descrever a técnica fotoacústica utilizada para a determinação do coeficiente de difusão, além de abordar outras técnicas utilizadas por outros autores para a determinação dos parâmetros de fluxo em meios porosos.

4.2 – Revisão bibliográfica

Muitas são as técnicas utilizadas para a determinação de parâmetros de fluxo em meios porosos. Dentre as várias pesquisas, realizadas no Brasil, sobre o tema em questão destacam-se aqui os trabalhos de Ignatius (1999) e Maciel (2003).

IGNATIUS (1999) desenvolveu um estudo de fluxo de gases em solos compactados, utilizando técnicas experimentais de medida direta dos principais parâmetros envolvidos no fluxo. O trabalho se restringiu a técnicas experimentais de laboratório, e aos parâmetros envolvidos no transporte de massa de gás por advecção e por dispersão. Para a obtenção dos parâmetros (coeficiente de permeabilidade efetivo ao ar, coeficiente de difusão de Knudsen, coeficiente de atenuação e coeficiente de dispersão hidrodinâmica) foi utilizada a cromatografia a gás, ou em fase gasosa, que consiste em fazer passar uma amostra do gás a ser analisado através de uma coluna, chamada “coluna cromatográfica”.

Através de modificações no equipamento de ensaio possibilitou-se a utilização desta técnica para a medida direta dos coeficientes de dispersão hidrodinâmica e de atenuação do fluxo de metano através de corpos de prova de solo compactado.

MACIEL (2003) realizou uma pesquisa para avaliar o comportamento geotécnico da camada de cobertura do Aterro Muribeca/PE no que se refere à percolação e emissão do biogás por meio de investigações experimentais. O fluxo de gases foi obtido por meio de ensaios de campo utilizando placas de fluxo para prever a liberação total de gases por uma única célula de resíduos do aterro. A placa de fluxo utilizada foi do tipo estática, no qual os gases foram analisados sem diluição, retornando em seguida para a placa em um ciclo fechado.

Neste mesmo estudo foi medida também a permeabilidade do solo ao ar, utilizando um permeâmetro (Tri-Flex), que é um equipamento simples, rápido e que foi satisfatório para a obtenção dos parâmetros de permeabilidade.

Em ambos os trabalhos acima citados as técnicas utilizadas foram suficientes para a determinação do que foi proposto.

Neste trabalho o coeficiente de difusão de gases através de solos será determinado utilizando-se a técnica fotoacústica que será descrita a seguir.

4.3 – Técnica Fotoacústica

Ciência fototérmica é um nome cumulativo para uma classe de fenômenos que envolvem a geração de calor causada pela absorção de uma radiação modulada ou pulsada. Este fenômeno foi descoberto por Alexander G. Bell em suas experiências com o fotofone, por intermédio do qual podia transmitir a voz através de uma luz modulada, ao longo de uma distância de 213 m.

No início dos anos 70, o efeito fotoacústico foi redescoberto em particular, devido ao aparecimento do laser, e também com o desenvolvimento da eletrônica, como microfones e amplificadores.

Recentes desenvolvimentos de novos esquemas de detecção fototérmica têm tido um substancial impacto em várias áreas de aplicação, principalmente novos materiais e meio ambiente. Amostras em forma de pó, líquidos opacos ou transparentes e géis são de especial interesse porque são difíceis de serem obtidos ou analisados através de espectroscopia convencional de transmissão. Assim, técnicas fototérmicas podem ser consideradas como meios instrumentais para investigação das propriedades físicas e caracterização dos materiais.

Em geral a ciência fototérmica abrange uma vasta extensão de técnicas e fenômenos, baseados na conversão da energia de excitação em calor (LIMA, 2001).

De acordo com DIAS (2003) os métodos fototérmicos permitem que sejam estudados materiais no estado sólido, líquido e gasoso e, além disso, a sua aplicação é bem diferenciada, podendo ser utilizada nas áreas de: agricultura, ciências ambientais, medicina, biologia, tecnologia de alimentos e materiais em geral.

Neste estudo a permeabilidade será obtida a partir do coeficiente de difusão utilizando os analisadores de gases Uras-14 (HARREN e REUSS, 1997) e Magnos 16. O princípio da análise infravermelho do Uras é baseado na absorção de certos

comprimentos de onda da radiação infravermelha, típicos de alguns gases como o CO, CO₂, NO, SO₂, N₂O, CH₄, C₃H₈, C₂H₄. Para a medida da concentração do O₂, o equipamento utilizado é o Magnos 16, que é um analisador que tem seu princípio de medida baseado nas propriedades paramagnéticas do oxigênio.

Através destes equipamentos monitora-se a concentração dos gases no tempo, possibilitando, assim, determinar o coeficiente de difusão.

4.4 – O efeito fotoacústico

O efeito fotoacústico, primeiro da família de técnicas fototérmicas, consiste na geração de um sinal acústico num gás (geralmente o ar) dentro de uma célula fechada devido à absorção de radiação modulada (ou pulsada) por parte de uma amostra contida na célula (Figura 4.1). Ao absorver radiação, a amostra tem seus níveis internos de energia (eletrônicos e vibracionais) excitados, que ao decaírem na forma de relaxação térmica, causam um aquecimento periódico local. Esse aquecimento gera uma onda térmica que se propaga pela amostra até a interface amostra-gás. Como resultado, uma fina camada de gás se aquece e se expande de forma periódica, gerando a onda acústica no interior da célula que será detectada como um sinal eletrônico pelo microfone (Figura 4.1).

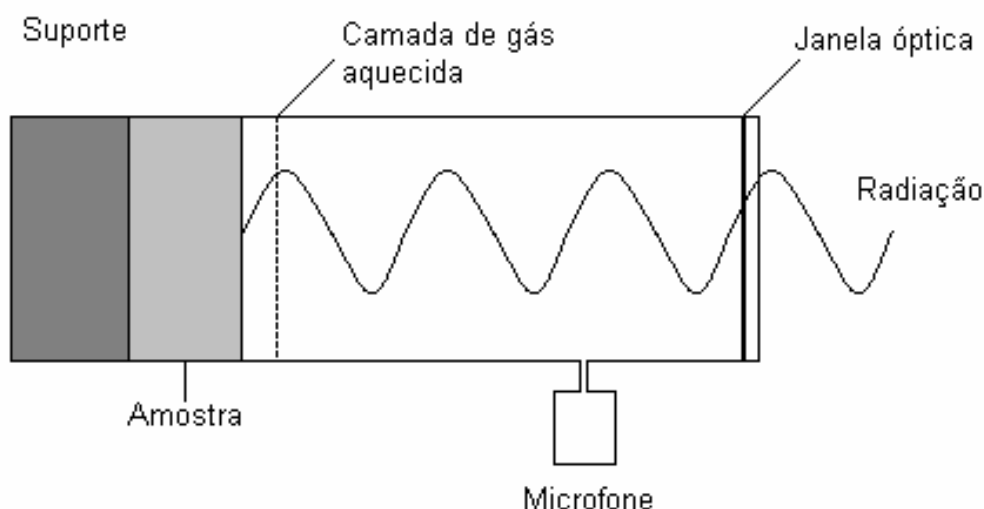


Figura 4.1 – Esquema de uma célula fotoacústica convencional.

O sinal fotoacústico resultante depende não somente da quantidade de calor gerado na amostra (isto é, do coeficiente de absorção óptica e também da eficiência da conversão de luz em calor), mas também de como o calor se difunde através da troca com o gás na célula.

Os fundamentos teóricos para a explicação do efeito fotoacústico em sólidos encontram-se no modelo de difusão térmica de Rosencwaig e Gersho (Rosencwaig e Gersho, 1976, Dias, 2003). Segundo este modelo, uma amostra iluminada uniformemente com luz modulada gera uma flutuação de pressão com a mesma frequência de modulação da luz no gás da célula fotoacústica. O modelo considera que o aquecimento periódico da amostra é transmitido a uma camada fronteira de gás. Assume-se também que o gás é transparente à radiação incidente e desprezam-se efeitos de convecção no interior da célula fotoacústica.

4.5 – Determinação do coeficiente de difusão

A determinação do coeficiente de difusão baseia-se nas leis de Fick. Em geral, métodos usados para determinar este coeficiente efetivo de espécies químicas recaem em duas categorias, permanente e transiente, correspondendo ao tipo de equação de transporte utilizada para determinação do mesmo.

Neste trabalho o coeficiente de difusão será determinado através de uma modificação da Lei de Fick, na se qual utiliza a diferença de concentração do gás em questão e o tempo no qual a concentração se torna constante.

Os equipamentos utilizados são Uras – 14 e Magnos 16 são do Laboratório de Ciências Físicas da UENF (Figura 4.2).

Estes equipamentos medem a concentração dos gases através de um analisador na faixa do infravermelho, que utiliza a técnica fotoacústica, acima abordada, para a detecção e medição do nível de concentração.

O fotômetro consiste de um emissor de luz branca, no qual as emissões alcançam a célula da amostra através de um dispositivo (chopper) que faz com que a luz branca passe a ser modulada. A célula da amostra é da forma de um tubo e é dividido em duas partes: o lado do gás de amostra e o lado do gás de referência (N_2).

Os efeitos produzidos pela luz branca nos gases são captados pela câmara de análise na qual contém uma membrana capacitiva que converte as emissões da luz branca em sinal elétrico por um amplificador. Uma segunda janela ótica serve

para garantir que nenhum resíduo de radiação possa alcançar a câmara de análise que é dividida em duas partes saturadas com o gás CO (gás certificado). Uma das partes sensível ao gás N₂ e a outra aos gases utilizados no experimento.

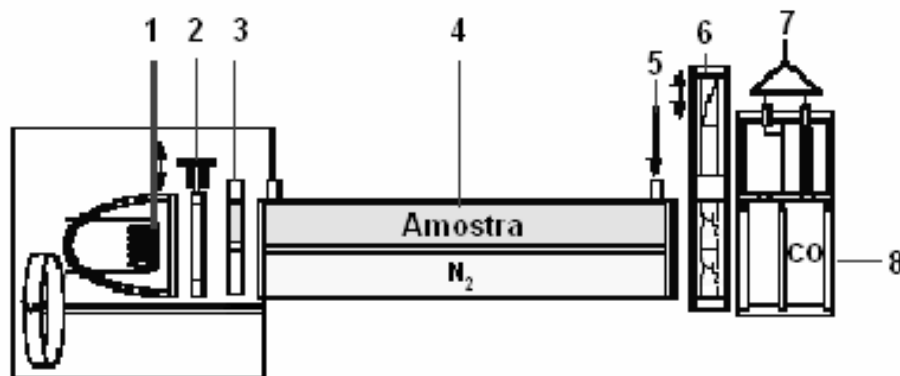


Figura 4.2 – Esquema interno do Uras -14.

- | | |
|-------------------------------|---|
| 1. Fonte térmica (luz branca) | 2. Janela ótica |
| 3. Chopper | 4. Câmara dos gases (amostra e N ₂) |
| 5. Entrada do gás de amostra | 6. Janela ótica |
| 7. Amplificador | 8. Câmara de análise |

O programa utilizado para a aquisição de dados gera uma curva Concentração x Tempo, onde se pode obter o tempo de saturação da amostra em relação ao gás em questão e a concentração do mesmo gás na amostra estudada.

De posse desses dados é realizado o cálculo do coeficiente de difusão através a fórmula abaixo:

$$C = C_0 \left(1 - e^{-t/\tau_D} \right) \quad (4.1)$$

onde,

$C \rightarrow$ é a concentração na câmara do analisador (M/L³)

$C_0 \rightarrow$ é a concentração de gás na saturação (M/L³)

$t \rightarrow$ é o tempo de duração do ensaio (T)

$\tau_D \rightarrow$ é o tempo característico de difusão o gás (T)

Uma variável importante para a determinação do coeficiente de difusão é o tempo de saturação (tempo característico) que representa o tempo necessário para que o processo de permeação atinja condições permanentes.

O tempo característico de difusão é dado por:

$$\tau_D = \frac{l_s^2}{2D} \quad (4.2)$$

onde,

$l_s \rightarrow$ é a espessura da amostra (L)

$D \rightarrow$ é o coeficiente de difusão (L^2/T)

O ensaio começa quando o gás a uma concentração inicial conhecida C_0 , é introduzido em um dos lados da amostra a uma vazão constante, via fluxômetro. A saída da amostra é conectada na entrada do analisador, que mede a concentração do gás em função do tempo (Figura 4.3).



Figura 4.3 – Equipamentos montados para ensaio.

A utilização da técnica fotoacústica permite trabalhar com a amostra sem destruí-la, disponibilizando a mesma para outras medições, além de se poder trabalhar com qualquer velocidade de fluxo, dependendo apenas das características das amostras.

Dessa forma para este estudo esta técnica se apresenta ideal, somando-se a isto a possibilidade de se trabalhar com um meio não saturado.

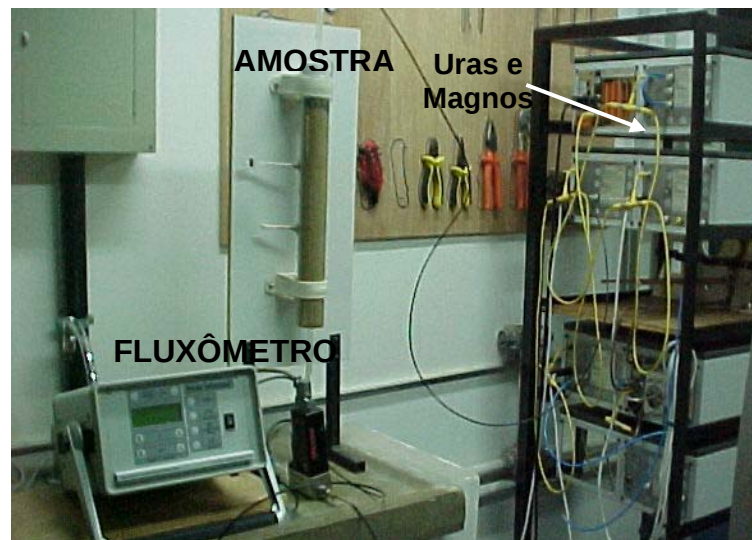


Figura 4.4 - Esquema de montagem do analisador para a determinação do coeficiente de difusão dos gases.

4.6 – Considerações Finais

A transferência de gases tem grande influência em inúmeros problemas ambientais. Isto inclui o movimento de gases em aterros sanitários, através de camadas de argila e através das laterais do depósito. Modelos de transferência de gases têm sido desenvolvidos para simular estes problemas. Entretanto, modelos desenvolvidos previamente não têm sido capazes de simular o movimento de gases quando há um número maior de espécies presentes. Esta técnica, entretanto é capaz de simular o movimento multifásico de gases, ou seja, mais de uma espécie presente no fluxo.

Neste capítulo vimos a metodologia utilizada para a determinação do coeficiente de difusão.

O capítulo seguinte aborda a metodologia utilizada para a caracterização do solo utilizado, assim como a descrição dos ensaios realizados.

CAPÍTULO 5

METODOLOGIA DE ENSAIO

5.1 – Considerações Iniciais

Este capítulo apresenta a metodologia de investigação laboratorial realizada para a caracterização geotécnica do solo aqui utilizado.

A escolha do solo foi feita visando a utilização de um material que representasse um meio poroso que não causasse muitas influências no fluxo do gás, já que este trabalho visa principalmente estudar o emprego da técnica fotoacústica na obtenção das propriedades de fluxos de gases em meios porosos. Dessa forma a areia foi o material mais indicado

São apresentados, então, os resultados dos ensaios com três amostras de solo.

A primeira amostra, denominada amostra 1, consiste em um solo arenoso. A segunda e a terceira amostras foram obtidas de um único material. Denominou-se de amostra 2 a fração que ficou retida na peneira 200, e amostra 3 a fração que passou pela peneira 200.

Como a amostra 1 foi utilizada apenas para a calibração do equipamento, alguns dos ensaios realizados não foram feitos com esta amostra.

5.2 – Caracterização Geotécnica das Amostras

Os parâmetros de caracterização física dos solos utilizados foram obtidos segundo metodologias da ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas).

As seguintes normas técnicas foram utilizadas:

- NBR – 7181/88: Análise granulométrica
- NBR – 6459/84: Limite de Liquidez (LL)
- NBR – 7180/88: Limite de Plasticidade (LP)
- NBR – 6508/84: Peso específico dos grãos
- NBR – 6457: Teor de umidade dos solos

De acordo com os ensaios para determinação da distribuição granulométrica, podemos constatar que a amostra 1 consiste num solo mal graduado com classificação SP no Sistema Unificado. A amostra 2 consiste de uma areia fina, não

plástica, classificada como SP e a amostra 3 consiste de um solo também de partículas finas não plásticas, classificada como SM pelo Sistema Unificado.

Os resultados desses ensaios são apresentados na tabela a seguir.

Tabela 5.1. Resumo das características do solo.

Amostra	Gs	h(%)	LL(%)	LP(%)	Distribuição granulométrica (%)					
					C	S	AF	AM	AC	G
1	2,70	-	-	-	-	1	3	68	26	2
2	2,74	0,00	NP	NP	-	84	16	-	-	-
3	2,64	0,07	NP	NP	5	81	14	-	-	-

h – Teor de umidade; LL – limite de liquidez; LP – limite de plasticidade;
Gs – densidade dos grãos (g/cm^3); C – argila; S – silte; AF – Areia fina; AM – Areia média;
AC – Areia grossa; G – pedregulho.

As curvas granulométricas obtidas por peneiramento são apresentadas na figura 5.1.

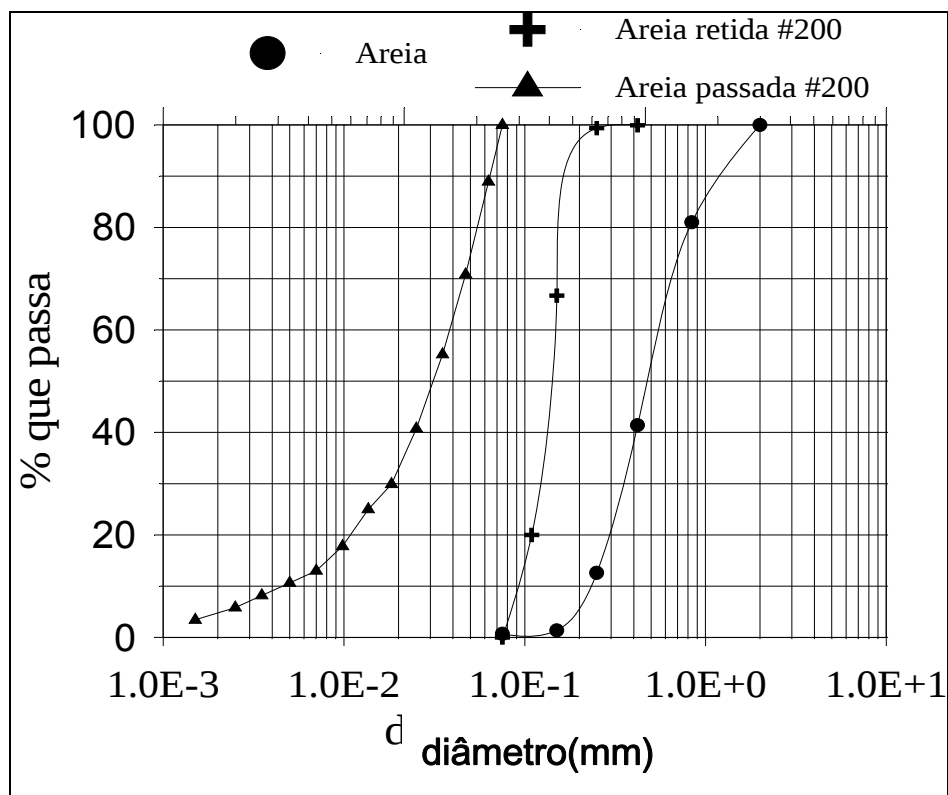


Figura 5.1 – Curvas granulométricas das amostras de areia.

5.3 – Determinação dos índices de vazios

O índice de vazios foi o parâmetro utilizado para a moldagem dos corpos de prova.

Tendo em vista a primeira fase de estudo ter sido realizada com a Amostra 1, em fase experimental, para calibração do equipamento, não foram executados ensaios para determinação de índices de vazios máximo e mínimo. Estes ensaios somente foram executados com as amostras denominadas de Amostra 2 e Amostra 3.

Os índices de vazios máximo e mínimo foram obtidos através da determinação das massas específicas aparentes secas, seguindo as normas da ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas:

- MB – 3324: Determinação do índice de vazios máximo de solos não coesivos
- MB – 3388: Determinação do índice de vazios mínimo de solos não coesivos

Os mesmos foram calculados utilizando a seguinte fórmula:

$$e = \frac{\delta}{\gamma_s} - 1 \quad (5.1)$$

onde,

$e \rightarrow$ índice de vazios;

$\delta \rightarrow$ massa específica real dos grãos (M/L^3);

$\gamma_s \rightarrow$ massa específica aparente seca (máxima e mínima) (M/L^3).

5.3.1 – Índice de vazios máximo – massa específica aparente mínima

Amostra 2

Material utilizado:

- Molde em forma de cilindro com 2 cm de altura e 5 cm de diâmetro;
- Funil;
- Placa de vidro;
- Régua;
- Balança com resolução de 1g.

Para a obtenção da massa específica aparente seca mínima da amostra 2, o seguinte procedimento foi realizado: apoiando-se o molde na placa de vidro, este foi preenchido com o solo com o auxílio de um funil, tomando-se o cuidado para não ocorrer segregação do material durante o enchimento. Após o preenchimento do molde, o conjunto foi pesado. Foram realizadas cinco leituras da massa do solo. Depois, através da fórmula abaixo, a massa específica aparente seca mínima desta amostra foi calculada.

$$\gamma_s = \frac{M_s}{V_s} \quad 5.2$$

onde,

$\gamma_s \rightarrow$ massa específica aparente seca (mínima) (M/L^3).

$M_s \rightarrow$ massa da amostra do solo (M)

$V_s \rightarrow$ volume da amostra do solo (L^3);

Amostra 3

Material utilizado:

- Molde em forma de cilindro com base de 12 cm de altura e tubo-guia com 5 cm de altura, ambos com 10 cm de diâmetro (Figura 5.2);
- Funil;
- Régua;
- Balança com resolução de 1g.

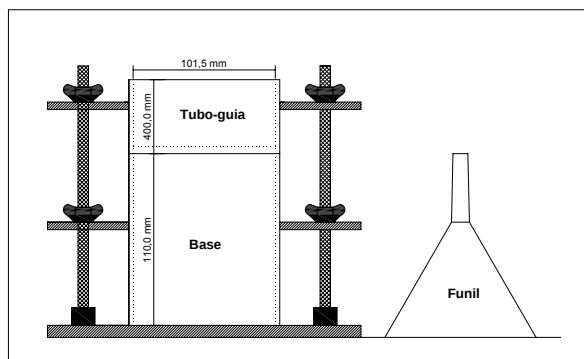


Figura 5.2 – Molde e funil utilizados nos ensaios de determinação de índice de vazios máximo.

Para a obtenção da massa específica aparente seca mínima da amostra 3, o seguinte procedimento foi realizado: o molde (base) foi preenchido como o solo, com o auxílio de um funil, evitando-se a segregação do material durante o enchimento do molde. Depois, utilizando a régua o solo foi rasado, e foram tomados cuidados para não sacudir a amostra nem vibrar, para evitar deformações, o que provocaria o rearranjo das partículas e recalques na amostra. O conjunto molde + solo foi então pesado e a massa anotada. Esta operação foi realizada 5 vezes, e depois de anotadas as massas, estas foram utilizadas no cálculo da massa específica aparente seca mínima, utilizando a fórmula 5.2.

Após o cálculo das massas específicas, estas foram utilizadas no cálculo dos índices de vazios de ambas as amostras através da fórmula 5.1.

Os valores encontrados são apresentados na tabela abaixo.

Tabela 5.2 – Índices de vazios máximo.

AMOSTRAS	Massa específica aparente seca mínima (média)	$e_{m\acute{a}x}$
AREIA - Retida na peneira #200	1,29	1,12
AREIA - Passada na peneira #200	1,07	1,47

5.3.2 – Índice de vazios mínimo – massa específica aparente máxima

Amostra 2

Material utilizado:

- Molde em forma de cilindro com 2 cm de altura e 5 cm de diâmetro;
- Funil;
- Placa de vidro;
- Régua;
- Balança com resolução de 1g;
- Sobrecarga de seção circular (peso = 1kg);

Para a obtenção da massa específica aparente mínima da amostra 2 foi necessário trabalhar com o solo a uma certa umidade devido à granulometria fina do material. Mantendo-se o solo na umidade natural, a quantidade de água acrescentada foi suficiente para que não se acumulasse água livre no recipiente e nem ocorresse exudação da água durante a compactação. O solo então, foi colocado no molde em camadas e após o acento de cada camada, a sobrecarga foi utilizada para a compactação do solo dentro do molde, sendo liberada a uma altura de aproximadamente 2 cm. Depois do preenchimento do molde, o conjunto foi pesado. Para obtenção do teor de umidade, após a pesagem, as amostras foram levadas à estufa. Após a secagem, as mesmas foram pesadas e as massas secas foram anotadas. Este ensaio foi realizado com cinco amostras, gerando cinco valores de massa seca. Depois, através da fórmula 5.2, a massa específica aparente seca mínima desta amostra foi calculada.

Amostra 3

Material utilizado:

- Molde em forma de cilindro com base de 12 cm de altura e tubo-guia com 5 cm de altura, ambos com 10 cm de diâmetro;
- Funil;
- Régua;
- Balança com resolução de 1g;
- Disco-base de sobrecarga (peso = 1kg);
- Sobrecarga de seção circular (peso = 1kg);
- Mesa vibratória, do tipo utilizado para realizar o peneiramento de amostras na análise granulométrica.

Com o auxílio de um funil o molde foi preenchido parcialmente com o solo, de forma a garantir 2 cm acima do topo quando submetido à vibração. Depois a parede externa do molde foi golpeada com uma barra de metal, para recalcar o material e assim facilitar o posicionamento da sobrecarga. O conjunto foi fixado à mesa vibratória (Figura 5.3). O disco base, juntamente com um papel de filtro foi colocado sobre a superfície da amostra do solo. A sobrecarga foi assentada sobre o disco-base e o conjunto foi vibrado até não ocorrer mais variação na altura da amostra. Depois o conjunto foi retirado da mesa vibratória, a sobrecarga, o disco-base e o tubo-guia foram retirados. O excesso da amostra do solo foi rasado com o auxílio da

régua. Com uma escova, o material que ficou depositado na base foi retirado. Assim, o conjunto foi levado à balança e pesado. Esta operação foi repetida 5 vezes. Com as massas obtidas foi calculada a massa específica aparente seca máxima, através da fórmula 5.2, para o cálculo do índice de vazios mínimo, que utilizou a fórmula 5.1.

Os valores obtidos nestes ensaios são mostrados na tabela abaixo.

Tabela 5.3 – Índices de vazios mínimo.

AMOSTRAS	Massa específica aparente seca máxima (média)	$e_{\min}$
AREIA - Retida na peneira #200	1,64	0,67
AREIA - Passada na peneira #200	1,41	0,87



Figura 5.3 – Esquema utilizado para a obtenção do índice de vazios mínimo da amostra 3.

5.4 – Moldagem dos Corpos de Prova

Para a realização deste projeto foi realizada a montagem de duas colunas, uma de vidro e outra de PVC. A primeira mede 40 cm de altura e 5 cm de diâmetro (Figura 5.4) e a segunda 10 cm de altura e 7,2 cm de diâmetro (Figura 5.5). A coluna de vidro foi utilizada para os ensaios com as amostras 1 e 2, porém como foram encontradas dificuldades no manuseio da coluna maior, uma nova coluna foi montada, utilizando-se PVC como material, sendo menor e garantindo um maior aproveitamento do conjunto, sendo utilizada apenas na amostra 3.

Com o valor dos índices de vazios obtidos pôde-se calcular o índice de vazios natural, utilizando um valor de 60% para a densidade relativa para a primeira amostra e 26% para a segunda amostra, aplicando-se a seguinte fórmula:

$$Dr = \frac{e_{\max} - e_n}{e_{\max} - e_{\min}} \quad (5.3)$$

onde,

$Dr \rightarrow$ Densidade relativa

$e_n \rightarrow$ Índice de vazios natural

$e_{\max} \rightarrow$ Índice de vazios máximo

$e_{\min} \rightarrow$ Índice de vazios mínimo.

Depois do cálculo dos pesos das amostras de solo, as colunas foram preenchidas com o solo para serem disponibilizadas para os ensaios.

Os índices de vazios máximo ($e_{\max}$) e mínimo ($e_{\min}$) das amostras 2 e 3, aqui estudadas, são apresentados na Tabela 5.4.

Tabela 5.4. Propriedades das amostras 2 e 3 reconstituídas.

Amostra	Parâmetros		Corpo de prova
	$e_{\max}$	$e_{\min}$	e_n
2	1,12	0,67	0,75
3	1,47	0,87	0,55

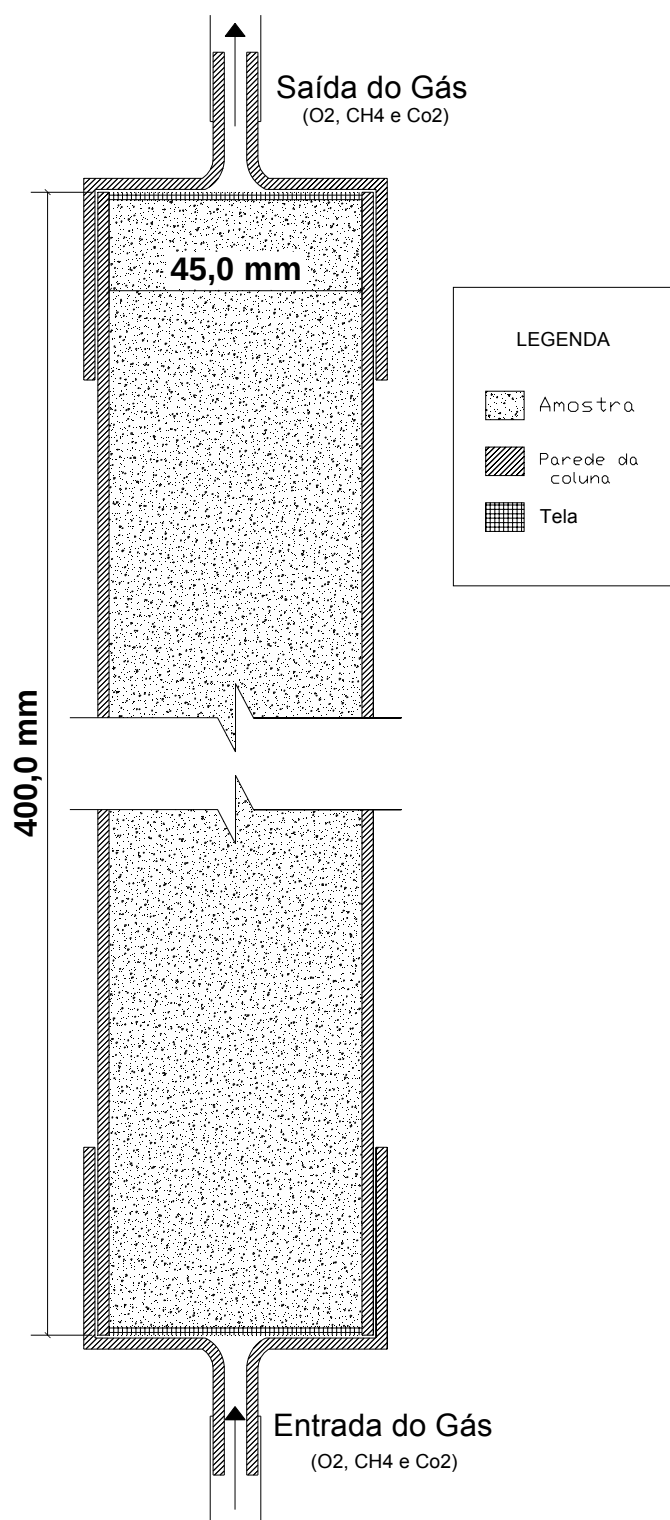


Figura 5.4 – Esquema da coluna de vidro.

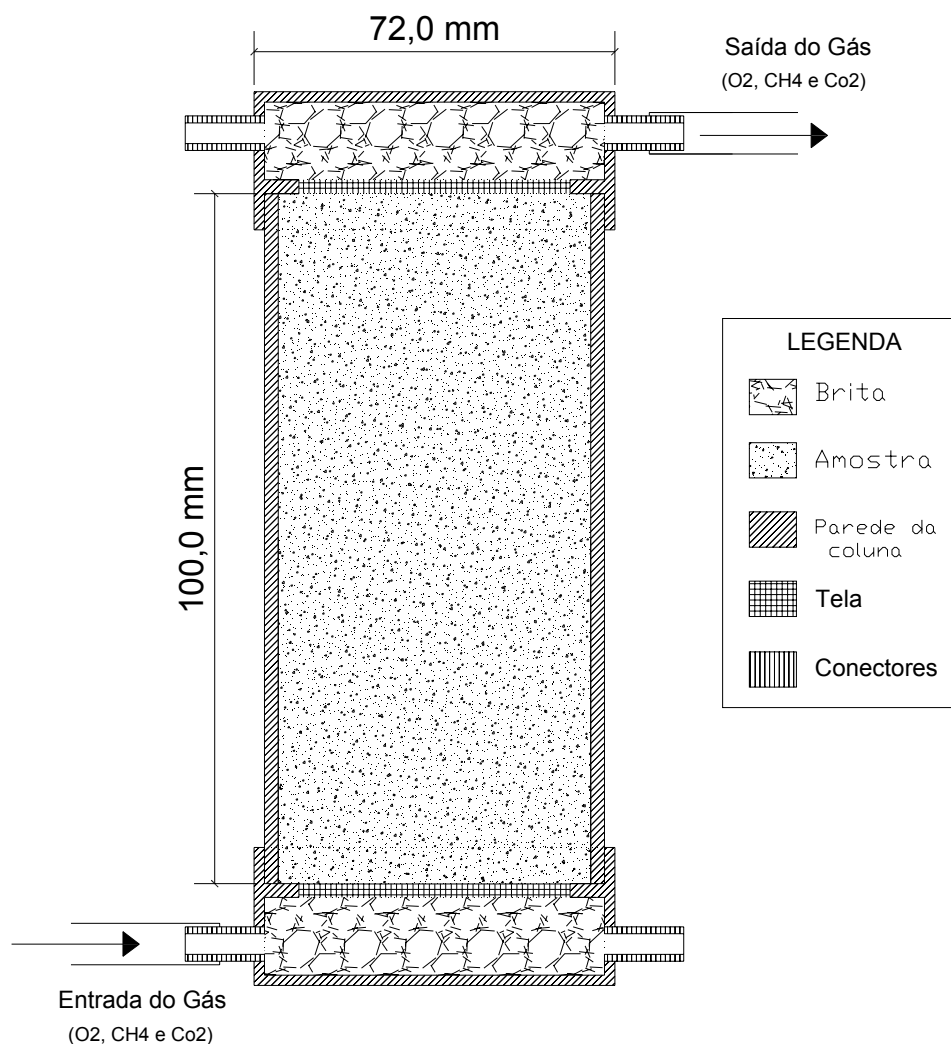


Figura 5.5 – Esquema da coluna de PVC.

A reconstituição dos corpos de prova nas colunas foi feita com amostras de areia secas ao ar.

Inicialmente desejava-se manter ambas as amostras com densidade relativa de 50%. Porém com o manuseio das amostras nas colunas foram encontradas algumas dificuldades. A primeira dificuldade foi em relação à amostra 2, que foi colocada em uma coluna de vidro presa em um suporte de madeira. Para a colocação do solo na coluna previa-se uma certa vibração para melhor adensamento do solo, porém da maneira como a coluna de vidro foi montada tornava impossível a sua fixação na mesa vibratória. Assim a vibração foi suspensa e o solo foi densificado com a utilização de um suporte de metal composto por uma haste de 40 cm de altura e base em forma de cilindro com 4 cm de diâmetro, atingindo a densidade relativa de 15%.

A amostra 3 foi assentada em uma coluna de PVC. A utilização da mesa vibratória nesta coluna foi possível, porém ao se utilizar a mesa vibratória ocorreu espalhamento do material, que era composto de partículas muito finas. Assim a frequência de vibração utilizada teve que ser menor do que a prevista. Toda essa dificuldade também estava relacionada com a necessidade de manter o solo não saturado, para manter as características do trabalho proposto. Dessa forma, a amostra 3 foi vibrada até se atingir uma densidade relativa de 26%.



Figura 5.6 – Colunas utilizadas nos ensaios.

5.5 – Os gases

Os gases estudados foram o oxigênio, o metano e o dióxido de carbono. Algumas das propriedades desses gases são relatadas a seguir.

Oxigênio

O oxigênio na sua forma molecular, O_2 é um gás que em condições normais de pressão e temperatura se encontra no estado gasoso, além de ser, incolor, insípido, inodoro, comburente, mas não combustível e pouco solúvel em água. O gás oxigênio é um dos principais componentes do ar atmosférico, representando aproximadamente 20% da composição da atmosfera terrestre.

Propriedades

- Massa atômica: 16 u
- Estrutura cristalina: cúbica
- Ponto de fusão: 50,35 K
- Ponto de ebulição: 90,18 K
- Densidade: 1,429 kg/m³.

Dióxido de carbono

O dióxido de carbono é o segundo principal componente do gás de aterros de resíduos sólidos. É um gás muito pesquisado por ser um gás poluente, globalmente monitorado.

Propriedades:

- Massa molecular: 44,0 um
- Ponto de fusão: 216 K
- Ponto de ebulição: 195 K
- Densidade: 1,98 kg/m³.

Metano

O gás metano é o principal constituinte do gás natural e um dos principais componentes do gás produzido na decomposição da matéria orgânica de aterros sanitários, o biogás.

A molécula deste gás é tetraédrica e apolar (CH₄), de pouca solubilidade na água. Quase todos os gases naturais o contém. Quando adicionado ao ar se transforma em mistura de alto teor explosivo. É o mais simples dos hidrocarbonetos.

Propriedades:

- Estrutura cristalina: tetraédrica
- Ponto de fusão: 96,6 K
- Ponto de ebulição: 111,55 K
- Densidade: 0,722 kg/m³.

5.6 – Determinação do Coeficiente de Difusão – URAS 14

O ensaio começa quando o gás é introduzido na base da amostra a uma vazão constante, via fluxômetro. A saída da amostra é conectada na entrada do analisador URAS 14, que mede a concentração do gás.

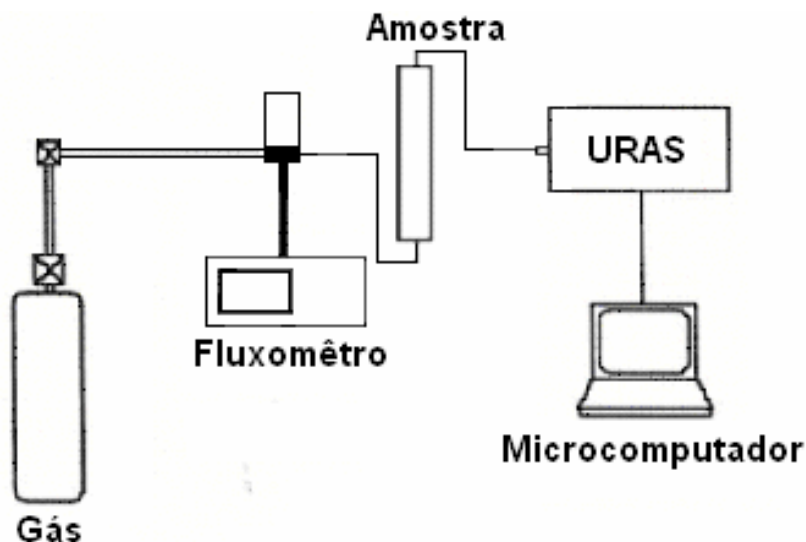


Figura 5.7 - Esquema de montagem do analisador URAS-14 para a determinação do coeficiente de difusão dos gases.

Com o decorrer do tempo, o computador, através de um determinado programa vai armazenando os dados de concentração do gás em função do tempo. Ao mesmo tempo, uma curva vai sendo gerada na tela do computador, servindo para uma análise do que está acontecendo com o fluxo no decorrer do ensaio, sendo que esses dados são atualizados a cada minuto. Quando a concentração na câmara do analisador URAS fica constante, a curva finaliza numa reta. A partir desse ponto o ensaio pode ser finalizado.



Figura 5.8 – Balão de gás e fluxômetro.

Através de outro programa, esses dados gerados, são trabalhados. Aplicando-se a fórmula 4.1 (Capítulo 4), o coeficiente de difusão é calculado.

As condições iniciais utilizadas foram o fluxo de 5 l/h com as amostras 1 e 2 e 0,5 l/h com a amostra 3, e as concentrações na base e no topo do corpo de prova iguais a zero.

5.7 – Determinação da Permeabilidade Relativa

Nesta etapa apenas foram geradas curvas de permeabilidade relativa.

Mantendo-se as características dos ensaios preliminares, foram executados os ensaios com fluxo de gases, mantendo o corpo de prova totalmente saturado com um gás, induzindo-se um outro gás.

A amostra 2 foi saturada com o gás oxigênio, e o gás metano foi induzido a uma vazão de 0,5 l/h.

A amostra 3 foi saturada também com o gás oxigênio e o gás metano foi induzido com a mesma vazão da amostra 2.

5.8 – Considerações Finais

Neste capítulo vimos os ensaios realizados até a obtenção dos coeficientes de difusão. No capítulo seguinte veremos os resultados obtidos e uma análise dos mesmos.

CAPÍTULO 6

APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

6.1 – Considerações Iniciais

Neste capítulo são apresentados os resultados dos ensaios, ou seja, as curvas obtidas e os coeficientes de difusão dos gases das amostras, além da análise dos resultados.

Para o cálculo dos coeficientes de difusão, foram consideradas as seguintes situações:

- Pressão: constante (URAS);
- Gradiente de pressão: nulo ($\Delta P = 0$);
- Velocidade de fluxo advectivo: nula ($v = 0$);
- Temperatura: constante (aproximadamente 23°C);
- Conteúdo volumétrico de ar do solo: $\theta_{a2} = 43\%$; $\theta_{a3} = 35\%$;
- Grau de Saturação das amostras: nulo ($S = 0\%$);
- Teor de matéria orgânica: nulo.

6.2 – Fluxo monofásico

Os resultados dos ensaios de difusão monofásica são apresentados nas figuras 6.1 a 6.10.

As curvas de variação de concentração com o tempo apresentam comportamento qualitativo semelhante em todos os ensaios. Observa-se primeiro uma variação máxima na concentração do gás com o tempo. Depois a concentração aumenta a taxas decrescentes e por fim ocorre a estabilização do crescimento, indicando assim, a máxima concentração do gás no interior do corpo de prova. Este tipo de comportamento mostra coerência com o verificado por diferentes pesquisadores (Maciel, 2003, Ignatius, 1999).

Este comportamento ocorre devido à queda constante do gradiente de concentração do gás entre a base da amostra e o topo da amostra (coluna do solo).

Observa-se nas curvas que as concentrações iniciais dos gases são muito pequenas, se não nula, sendo o gradiente de concentração máximo. Com o decorrer

do ensaio a concentração interna aumenta, o gradiente de concentração decresce e conseqüentemente, o fluxo de gás é reduzido segundo previsto pela lei de Fick.

Nas figuras 6.1 e 6.2 são apresentados os resultados dos ensaios realizados com a areia mais grossa (Amostra 1). Os coeficientes de difusão obtidos foram de $0,0477\text{cm}^2/\text{s}$ e $0,11\text{cm}^2/\text{s}$, para o O_2 e CO_2 , respectivamente. Estes foram os ensaios preliminares executados, tendo servido para a calibração da vazão, regulagem do fluxômetro, e observação do comportamento do sistema.

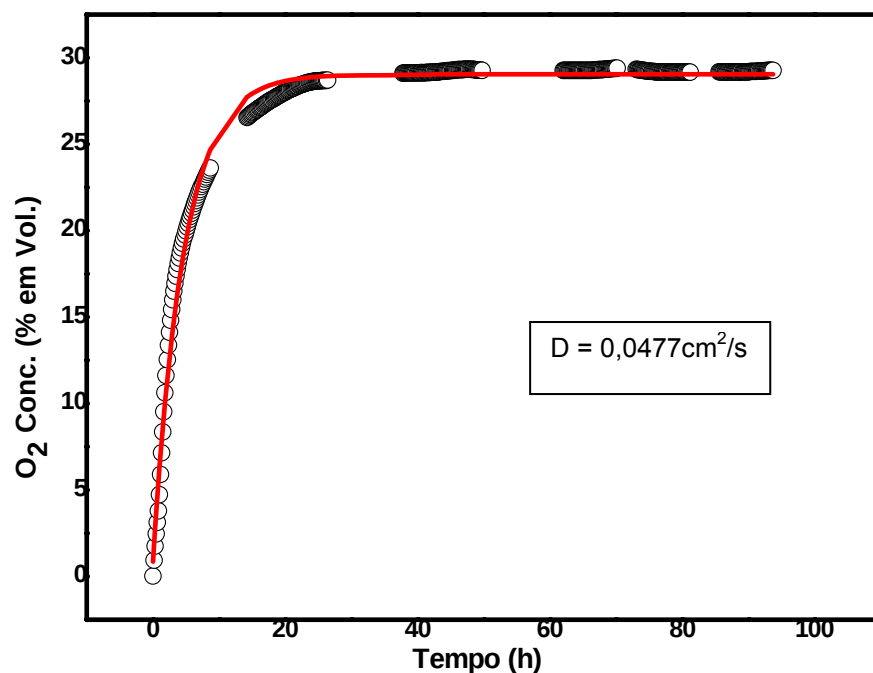


Figura 6.1 – Curva concentração x tempo do gás oxigênio – Amostra 1.

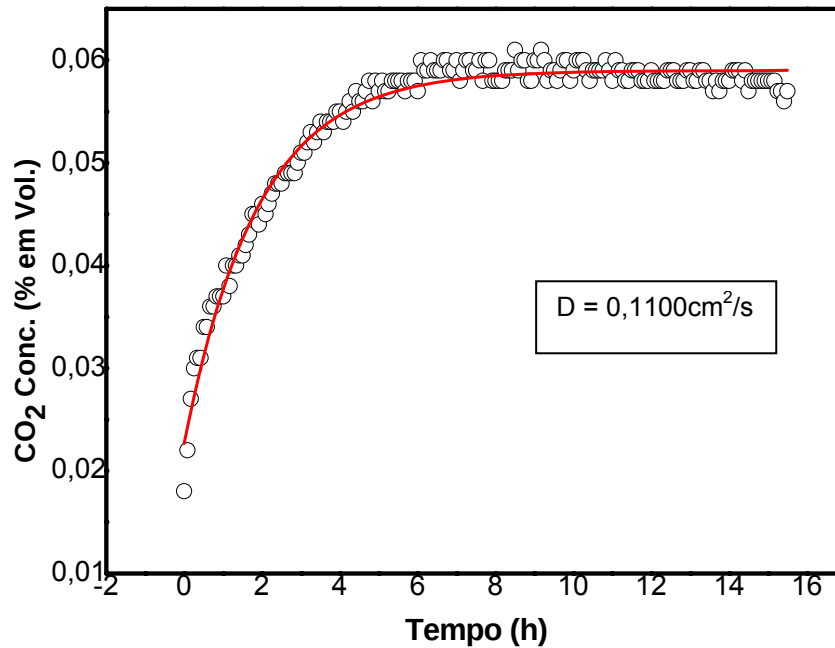


Figura 6.2 – Curva concentração x tempo do dióxido de carbono – Amostra 1.

Nas figuras 6.3, 6.4, 6.5 são apresentados os resultados dos ensaios de difusão com a fração da amostra de solo retido na peneira 200 (Amostra 2). Os valores obtidos foram de $0,042 \text{ cm}^2/\text{s}$ e $0,039 \text{ cm}^2/\text{s}$ para o O_2 e CO_2 , respectivamente.

Não foi possível a obtenção do coeficiente de difusão do CH_4 . Dois fatores contribuíram para isso: a curva gerada, que impossibilita obter um 'fit' adequado para a utilização do programa empregado e a possível adsorção do CH_4 às partículas de solo, que faz com que o valor do coeficiente de difusão não seja real. Se fosse possível determinar este valor, este não estaria considerando a real situação do fluxo do gás através do solo.

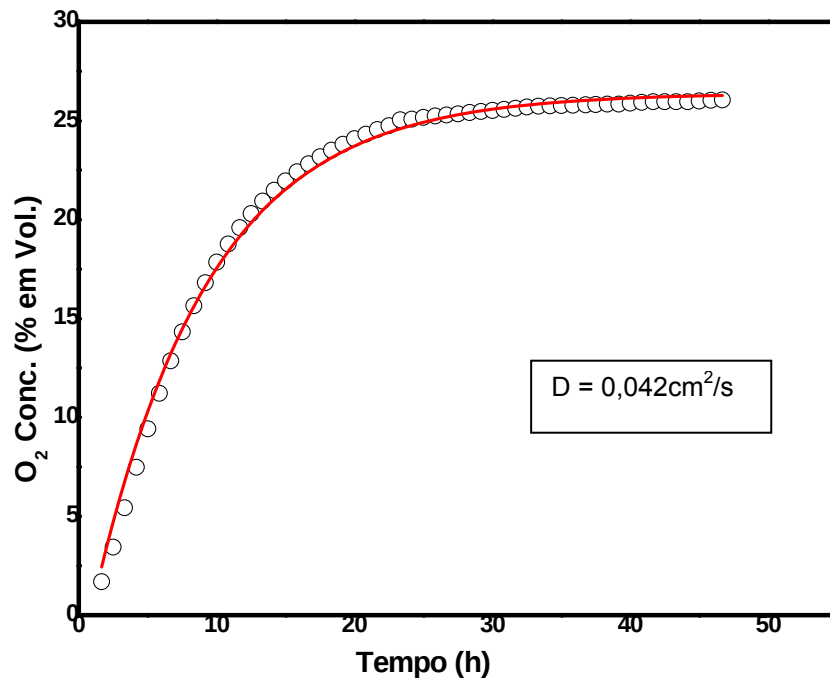


Figura 6.3 – Curva concentração x tempo do oxigênio – Amostra 2.

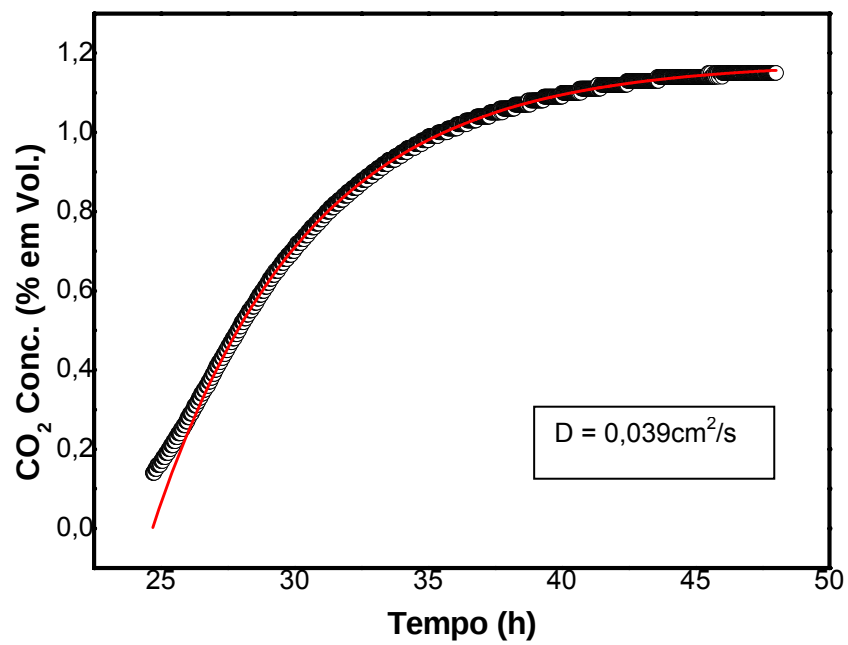


Figura 6.4 – Curva concentração x tempo do dióxido de carbono – Amostra 2.

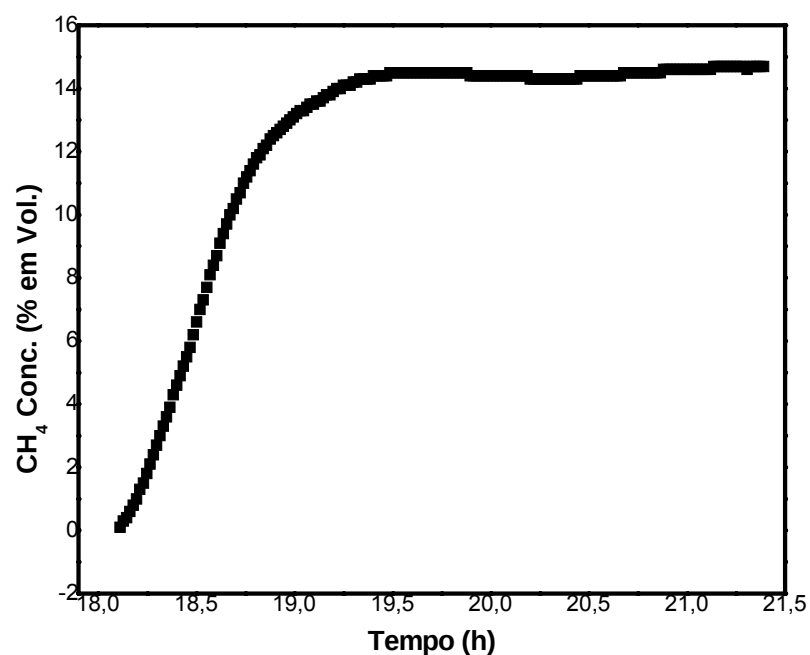


Figura 6.5 – Curva concentração x tempo do metano – Amostra 2.

Nas figuras 6.6, 6.7 e 6.8 são apresentados os resultados dos ensaios de difusão da Amostra 3 (fração de solo arenoso passado na peneira 200). Os ajustes da curva permitiram chegar a um coeficiente de difusão de $0,014\text{cm}^2/\text{s}$ e $0,018\text{cm}^2/\text{s}$ para o O_2 e CO_2 , respectivamente.

Em relação ao CH_4 a mesma observação feita para a amostra 2 pode ser considerada para a amostra 3.

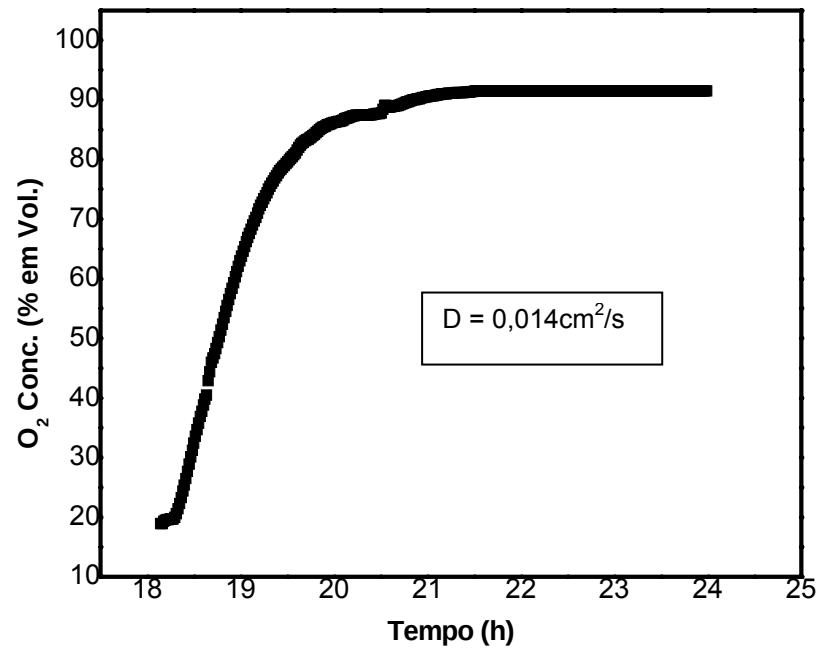


Figura 6.6 – Curva concentração x tempo do oxigênio – Amostra 3.

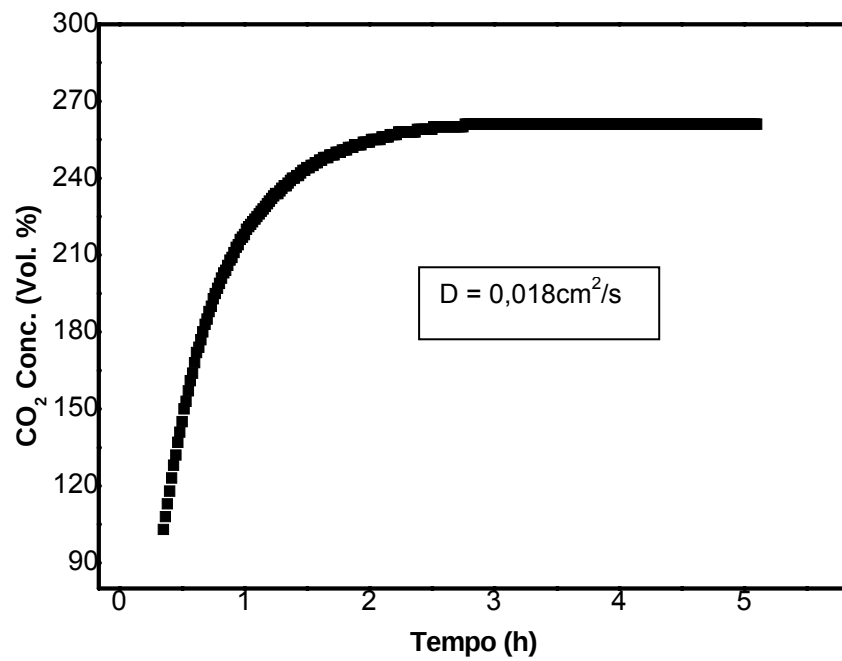


Figura 6.7 – Curva concentração x tempo do dióxido de carbono – Amostra 3

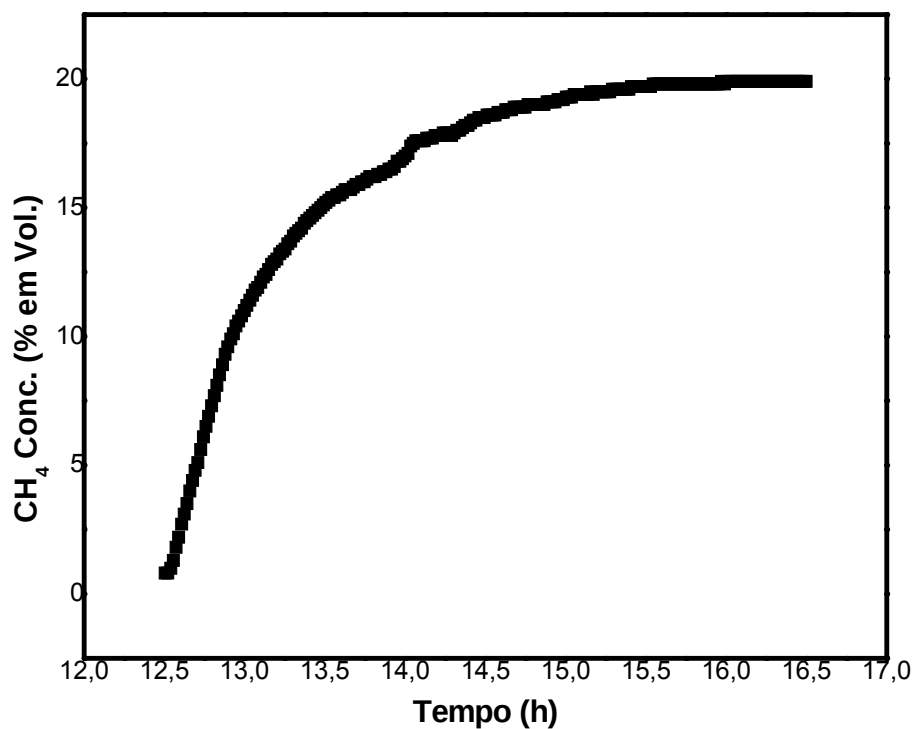


Figura 6.8– Curva concentração x tempo do metano – Amostra 3

As curvas de CO₂ e CH₄ obtidas nesta pesquisa estão de acordo com as que se encontram no trabalho de Maciel (2003).

Todos os resultados são apresentados de forma resumida na Tabela 6.1.

Tabela 6.1 – Resultados obtidos dos coeficientes de difusão.

Amostras	Parâmetros		D (cm ² /s)		V (L/h)
	e _n	θ _a	O ₂	CO ₂	
1	-	-	0,0477	0,1100	5
2	0,75	43%	0,0420	0,0390	0,5
3	0,55	35%	0,0141	0,0180	0,5

e_n – índice de vazios de ensaio; Dr – densidade relativa; θ_a – conteúdo volumétrico de ar; D – coeficiente de difusão; V – vazão do fluxômetro.

A amostra 2 apresenta índice de vazios maior do que a amostra 3. Levando este fato em consideração, podemos verificar que quanto maior o índice de vazios, maior o coeficiente de difusão de ambos os gases no solo.

A diminuição da porosidade do solo provoca diminuição na difusão, devido à redução do volume de vazios. Esta porosidade está diretamente relacionada com o grau de compactação do solo. Assim observa-se que quanto mais denso o solo for, menor a porosidade, e, conseqüentemente, menor o coeficiente de difusão.

A temperatura é um fator que pode afetar a densidade dos gases, desta forma, esta foi mantida constante durante os ensaios, não podendo se detectada alguma alteração em relação a este fator.

Como se trata de amostras de solo não saturado, o grau de saturação também não teve influência sobre os resultados, já que não ocorreu alteração do seu valor durante os ensaios, mantendo-se nulo.

O teor de matéria orgânica também foi considerado nulo para efeitos de ensaio. Porém um dos fatores que impossibilitou a determinação do coeficiente de difusão do metano foi uma possível adsorção do gás às partículas de solo. Esta adsorção pode ser uma reação química e/ou bioquímica. Se ocorrer uma reação bioquímica, a matéria orgânica até então considerada inexistente pode estar presente no solo, mesmo que em quantidades muito pequenas, mas suficientes para influenciar no transporte de massa de gases através do solo. Contudo se este fato ocorreu durante os ensaios, só poderia ocorrer com o metano, já que os gases O_2 e CO_2 são inertes. Não sendo inerte, o CH_4 está, conseqüentemente, sujeito a reações com o meio.

Quando se trata do conteúdo volumétrico de ar no solo, foi constatado que quanto maior este conteúdo maior o coeficiente de difusão, haja vista a amostra 2 ter como valor $\theta_a = 51\%$ e a amostra 3 $\theta_a = 31\%$, e o coeficiente de difusão da amostra 2 ser maior do que o da amostra 3.

Os valores determinados experimentalmente para fluxo de apenas um gás no solo estão de acordo com os encontrados na literatura corrente.

6.3 – Fluxo multifásico

Dando continuidade à análise, a partir de agora os fluxos multifásicos (bifásico) serão estudados.

As Figuras 6.9 e 6.10 mostram os resultados destes ensaios.

Em ambas as amostras o solo foi saturado com o O_2 e posteriormente percolado com o CH_4 .

Analisando-se as curvas das figuras 6.9 e 6.10, ambas apresentam comportamentos parecidos, porém sob uma análise mais detalhada, podemos verificar diferenças fundamentais para o entendimento do fluxo multifásico.

A figura 6.9 representa o fluxo através da amostra 2 e a figura 6.10 representa o fluxo através da amostra 3.

Na figura 6.9 identifica-se uma região da curva do metano, nos primeiros momentos do ensaio, no qual ocorreu uma constância do fluxo do CH_4 . Esta situação não era esperada. Para que a curva pudesse se apresentar de acordo com a literatura, deveríamos desconsiderar os valores obtidos, neste ensaio, antes do tempo 17h (na figura 6.9 a linha e as setas indicam a região que deveria ser considerada), porém se isso fosse feito, a saída do O_2 da amostra não estaria sendo bem representada.

Entretanto, mesmo considerando a região à direita da linha, a figura 6.9 ainda apresenta problemas em relação ao fluxo. A permeabilidade relativa aqui estudada trata-se do preenchimento de um volume de solo com um gás e posterior expulsão deste por outro gás que vai percolando pelo mesmo meio. Dessa forma era de se esperar uma proporção de uma curva em relação à outra, pois à medida que um gás vai saindo da amostra e o outro vai entrando, uma curva vai decrescendo até que a leitura da sua concentração alcance à concentração inicial do gás que está entrando, a outra curva vai crescendo até chegar próximo à concentração inicial do gás que saiu. Assim esta situação também ocorreu com a curva da amostra 3 (Figura 6.10)

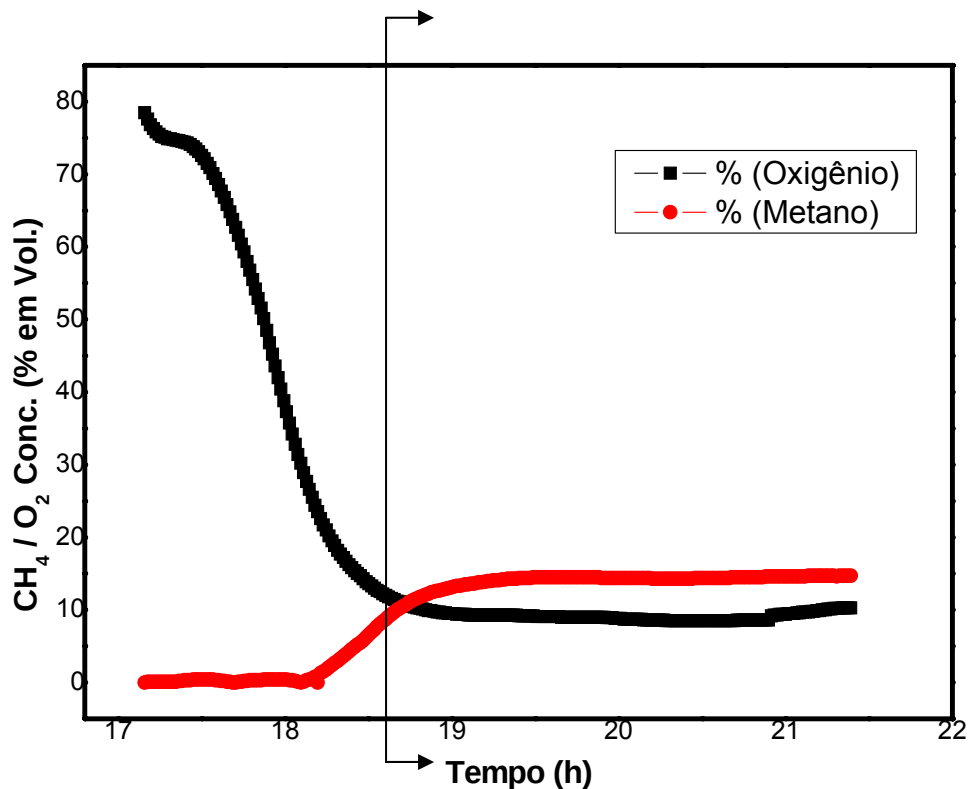


Figura 6.9– Curva concentração x tempo do fluxo multifásico da Amostra 2.

Na figura 6.10 a melhor maneira de se representar a curva de permeabilidade relativa seria considerar a região abaixo da linha e das setas, onde as curvas se mostram proporcionais. Contudo se assim fosse não estaríamos levando em consideração todos os pontos da curva de concentração decrescente do O_2 .

Esta desproporção ocorreu devido ao fato dos gases apresentarem diferentes porcentagens de saturação no aparelho.

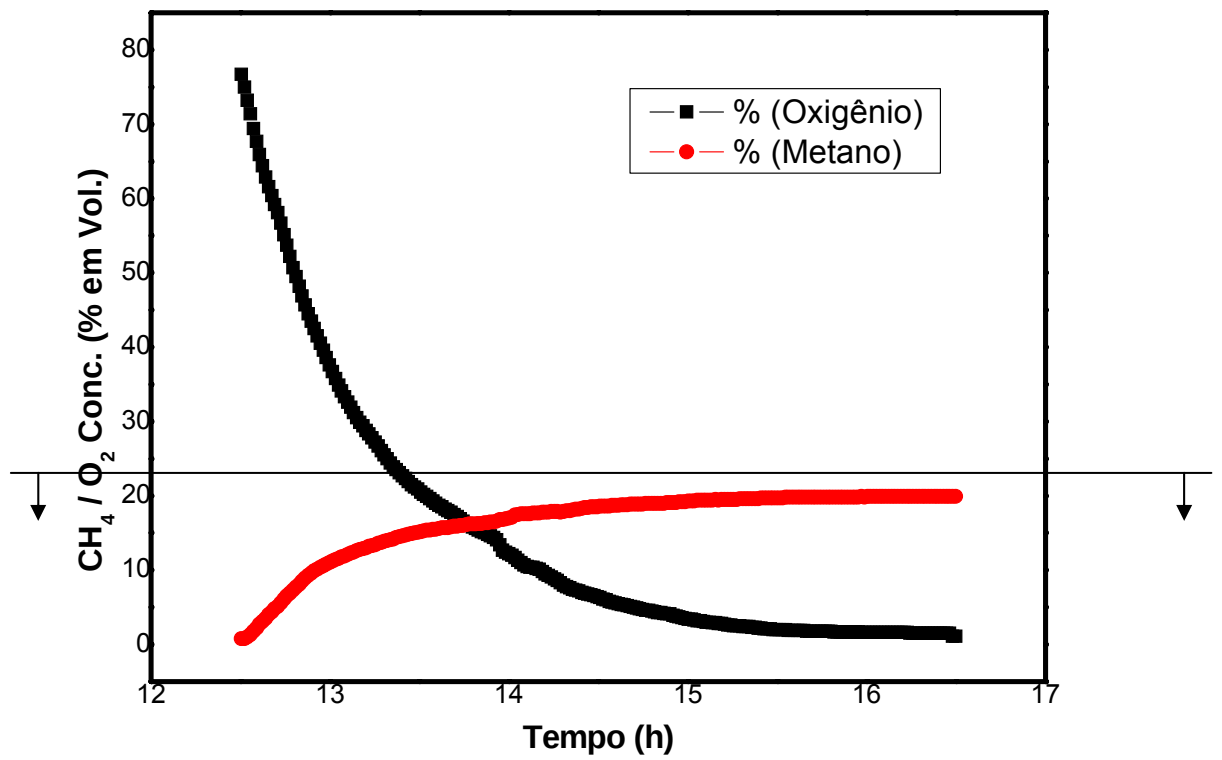


Figura 6.10. Curva concentração x tempo do fluxo multifásico da Amostra 3.

CAPÍTULO 7

CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS

CONCLUSOES

Neste capítulo são apresentadas as conclusões e sugestões para futuras pesquisas obtidas a partir dos estudos realizados.

Deve-se salientar que este trabalho é pioneiro na UENF em se tratando da utilização da técnica fotoacústica para a determinação do coeficiente de difusão de gases em solos. Devido a este fato as conclusões e sugestões se tornam grandes aliadas a trabalhos futuros, que venham a utilizar esta técnica.

Os experimentos de laboratório foram conduzidos para a determinação do coeficiente de difusão efetivo dos gases O_2 , CO_2 (passando por todas as amostras) e CH_4 (passando pelas amostras 2 e 3) em três amostras diferentes de areia, reconstituídas em colunas. Com a utilização da técnica fotoacústica, assim como o analisador URAS-14, as concentrações de todos os gases foram medidas em função do tempo satisfatoriamente. Tendo sido encontrados os seguintes valores para

Todas as variações externas, como pressão, temperatura, umidade e fluxo dos gases foram mantidos constantes durante todo o período de medição, para garantir uma comparação real entre os coeficientes de difusão de ambos os gases e amostras.

Os coeficientes de difusão obtidos se mostram coerentes com os aspectos considerados (índice de vazios, conteúdo volumétrico de ar), validando a metodologia aqui empregada.

Em se tratando do fluxo multifásico, observou-se uma configuração diferente da que era esperada. As curvas obtidas sugerem a necessidade de um estudo mais aprofundo para avaliação e determinação do fluxo de dois gases em amostras de solo

Utilizando a presente experiência, o objetivo foi alcançado. A técnica foi testada e as sugestões para futuros trabalhos são expostas a seguir.

SUGESTÕES

- Calibrar o aparelho URAS-14 antes da realização dos ensaios. Isto sendo feito poderá garantir que não haja nenhum resíduo de gás no solo. A calibração deve ser realizada com o gás nitrogênio, que é inerte e ao mesmo tempo em que calibra o aparelho, limpa a amostra.
- Realizar ensaios com amostras de solo moldadas com mesmas densidades relativas para se poder comparar os valores dos coeficientes de difusão obtidos.
- Tentar quantificar melhor o fluxo do CH_4 para se obter o coeficiente de difusão deste gás.
- Trabalhar com concentrações em escalas iguais, ou pelo menos proporcionais.
- Modificar a metodologia para a medição do fluxo multifásico: trabalhar com colunas que permitam, ao longo da altura do solo, verificar, através de medidores de concentração, a variação da concentração instantânea dos gases no fluxo multifásico.
- Inserir um medidor de vazão no topo da coluna para verificar se a vazão de saída é igual à vazão de entrada e poder quantificar e verificar se o volume de gás que entra é o mesmo volume de gás que sai da amostra.
- Efetuar ensaios com os três gases alternando a saturação da amostra com um e fazendo percolar os outros, gerando um maior número de curvas de permeabilidade relativa, para se calcular a difusão de um gás em relação ao outro.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bear, J. (1972)** - *Dynamics of Fluids in Porous Media*, American Elsevier Publishing Company, Inc., U.S.;
- Bedient, P. B., Rifai, H. S. & Newell, C. J. (1994)** – *Groundwater Contamination*, Englewood Cliffs, N. J., Prentice Hall.;
- Biessheuvel, P. M. (1999)**, *Design of ceramic membrane supports: permeability, tensile strength and stress*, J. M. Science 156;
- Bird, R. B., Stewartm W, E., Lightroot, E. N. (1960)**, *Transporte Phenomena*. John Wiley and Sons Inc. N. Y.;
- Bonet, E. J. e Gabrielli, M. L. (1989)**, *Propriedade das Rochas. SEDES (Serviço de Desenvolvimento de Recursos Humanos) Petrobrás*;
- Borges, A. F. (1996)**, *Avaliação dos Mecanismos de Transporte de Hexaclorociclohexano (HCH) no Solo da Cidade dos Meninos, Duque de Caxias, RJ – Pontifícia Universidade Católica – Departamento de Engenharia Civil da PUC – Rio – Dissertação de Mestrado*;
- Caetano, L. A. C. (2001)**, *Estudo experimental do processo de difusão em folhelhos usando fibra ótica – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro – Departamento de Engenharia Civil – Dissertação de Mestrado*;
- Campos, J. L. E. (1999)**, *Análise numérica do transporte de contaminantes em meios porosos com reações – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro – Departamento de Engenharia Civil – Tese de Doutorado*;
- 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*;
- Carvalho, A. C. M. G. (2001)**, *Desenvolvimento de um difusímetro para solos não saturados – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro – Departamento de Engenharia Civil – Tese de Doutorado*;
- Costa, P. O. S. (2002)**, *Avaliação em laboratório do transporte de contaminantes no solo do Aterro Sanitário de Sauípe/BA – Pontifícia Universidade Católica do*

Rio de Janeiro – Departamento de Engenharia Civil – Dissertação de Mestrado;

Delgado, C. W. C. (2000), *Desenvolvimento de um equipamento para o estudo da permeabilidade efetiva em meios multifásicos* – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro – Departamento de Engenharia Civil – Tese de Doutorado;

Dias, L. H. P. V. (2003), *Aplicação de técnicas fototérmicas ao estudo de propriedades físicas de polímeros biodegradáveis*. Universidade Estadual do Norte Fluminense (UENF) – Centro de Ciências e Tecnologia – CCT – Dissertação de Mestrado;

Ehlers, W., Letey, J., Spencer, W. E. & Farmer, W. J. 1969, *Lindane diffusion in soils: I. Theoretical considerations and mechanisms of movement..* Soil Sci. Soc. Amer. Proc.;

Eiger, S. (1991), Qualidade da água em rios e estuários. *In: Hidrologia Ambiental*. São Paulo. Edusp (Editora da Universidade de São Paulo). Volume 3.;

Ensinas, A. V. (2003), *Estudo da geração de biogás no aterro sanitário Delta em Campinas SP.* – Universidade Estadual de Campinas – Faculdade de Engenharia Mecânica – Dissertação de Mestrado;

Faria Jr., R. T, Tibana, S., Poley, L. H. Sthel, M. S. & Almeida, F. T. (2005), *Photoacoustic study of gas permeability and diffusion in soils*, Journal de Physique IV, 125,;

Farmer, W. J., Yang, M. S., Letey, J. & Spencer, W. F., 1980, *Hexachlorobenzene: Its vapor pressure and vapor phase diffusion in soil.* Soil Sci. Soc. Amer. Proc.;

Favre, F., Simondi, B., Vistoli, P. P., Adenot, F., Maubiel, G. (2004), *Measurement of Gas Permeability through Betumen*, Fuel 83;

Fetter, C. W. (1993), *Contaminant Hydrogeology* Macmillan Publishing Company, U. S.;

Fetter, C. W. (1994), *Applied Hydrogeology*. 3º. Edição. New Jersey. Prentice Hall.;

Fontoura, S. A. B. da, Campos, T. M. P. de, Nobre, M. M. M. (1987), *Migração de Poluentes através de meios porosos* – *In: Simpósio sobre Rejeitos e Disposição de Resíduos Industriais e de Mineração*. Rio de Janeiro;

Freeze, R. A. & Cherry, J. A. (1979), *Groundwater*. Prentice Hall, Inc. U. S.;

- Groot, T. T., (2005)**, *Trace gas exchange by rice, soil and pears. A study based on laser photacoustic detection*. PhD thesis. Catholic University Nijmegen.
- Harren, F. e Reuss, J. (1997)**, *ENC. Applied Physics*. Volume 19;
- Ignatius, Scandar Gasperazzo (1999)**, *Fluxo Unidirecional de Gás através de um Solo Compactado – Determinação Laboratorial dos Parâmetros* – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – Departamento de Engenharia de Estruturas e Fundações – Tese de Doutorado;
- Kamon, M., Inazumi, S., Katsumi, T. e Inui, T. (2002)**, *Evaluation of Gas Flow through landfill cover with sludge barrier*, Proceedings of the Second Japan-Korea Joint Seminar on Geoenvironmental Engineering;
- Lima, J. A. P. (2001)**, *Introdução ao Estudo das Propriedades Térmicas de gases, vapores e líquidos por Técnicas Fototérmicas* – Universidade Estadual do Norte Fluminense – Ciências de Engenharia – Projeto de Dissertação de Mestrado;
- Maciel, F. J. (2003)**, *Estudo da Geração, Percolação e Emissão de gases no Aterro de Resíduos Sólidos da Muribeca/PE* – Universidade Federal de Pernambuco – Centro de Tecnologia e Geociências – Departamento de Engenharia Civil – Dissertação de Mestrado;
- Maciel, F. J., Jucá, J. F. (2002)**, *Gases monitoring Methodology applied in Muribeca solid waste land fill* – Environmental Geotechnics – Editado por Luiz Guilherme de Mello & Márcio Almeida; Volume 1;
- Mason, E. A. e Malinauskas, A. P. (1983)**, *Gas transporte in poros media: The Dusty-gas model*. Elsevier Sc. Publ. Amsterdam, Holanda;
- Mitchell, J. k. (1991)**, *Conduction phenomena: from theory to geotechnical practice*, Geotechnique 41;
- Neogi, P. (1996)**, *Transport Phenomena in Polymer Membranes*. In: Neogi, P., *Diffusion in Polymers*. Nova York;
- Oliveira, S. H. (2002)**, *Avaliação do Uso de borra oleosa processada em sistemas de impermeabilização de aterros* – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro – Departamento de Engenharia Civil – Dissertação de Mestrado;
- Prevedello, C. L. (1996)**, *Física do Solo com problemas resolvidos*. Curitiba. SAEAFS (Sociedade Autônoma de Estudos Avançados em Física do Solo);
- Rahman, F., Bouazza, A., & Kodikara J. K. (2002)**, *Oxygen Diffusion through a needle punched geosynthetic clay liner*;

- Rosencwaig, A., Gersho, A. (1976)**, *Theory of the Photoacoustic Effect in Solids*.
Journal of Applied Physics;
- Telles, I. A. (2001)**, *Aplicação de métodos de análise numérica de transporte reativo de multicompostos em meios porosos* – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro – Departamento de Engenharia Civil – Dissertação de Mestrado;
- Thomas, H.R., Cleall, P.J. & Seetharam, S.C. (2002)**, *Multispecies chemical transport in unsaturated soil* – Environmental Geotechnics – Editado por Luiz Guilherme de Mello & Márcio Almeida; Volume 1;
- Zhou, Z., Cleall, P.J. & Thomas, H.R. (2002)**, *Coupled multigas, moisture and heat transfer in unsaturated soil* – Environmental Geotechnics – Editado por Luiz Guilherme de Mello & Márcio Almeida; Volume 1.