

ANÁLISE DOS ESTUDOS SOBRE A OXIDAÇÃO DO METANO EM CAMADAS DE COBERTURA DE ATERROS SANITÁRIOS

Ana Carolina Czapla

Orientador: Prof. Dr. Armando Borges de Castilhos Júnior
Co-orientador: Eng. Kalil Graeff Salim

2011/1



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA SANITÁRIA E
AMBIENTAL**

**ANÁLISE DOS ESTUDOS SOBRE A OXIDAÇÃO DO METANO
EM CAMADAS DE COBERTURA DE ATERROS SANITÁRIOS**

Ana Carolina Czapla

**FLORIANÓPOLIS, (SC)
JULHO/2011**

Czapla, Ana Carolina

Análise dos estudos sobre a oxidação do metano em camadas de cobertura de aterros sanitários
Ana Carolina Czapla - Florianópolis, 2011.

36p.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação)-Universidade Federal de Santa Catarina. Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental. Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental.

Review of studies on methane oxidation in landfill cover soils

1. efeito estufa; 2. aterros sanitários; 3. camada de cobertura; 4. emissões fugitivas; 5. oxidação do metano

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA SANITÁRIA E
AMBIENTAL**

**ANÁLISE DOS ESTUDOS SOBRE A OXIDAÇÃO DO METANO
EM CAMADAS DE COBERTURA DE ATERROS SANITÁRIOS**

ANA CAROLINA CZAPLA

**Trabalho apresentado à Universidade Federal de Santa
Catarina para a Conclusão do Curso de Graduação em
Engenharia Sanitária e Ambiental.**

BANCA EXAMINADORA:



**Prof. Dr. Armando Borges de
Castilhos Jr.
(Orientador)**



**Eng. Kalil Graeff Salim
(Membro da Banca)**



**Msc. Eng. Elivete C. C. Prim
(Membro da Banca)**

**FLORIANÓPOLIS
JULHO/2011**

AGRADECIMENTOS

À minha FAMÍLIA, por todo o apoio e incentivo, ao longo desta jornada que se finda.

Ao meu querido Luis por todo seu carinho e companheirismo, principalmente nesta reta final dos estudos.

Aos colegas de curso, pela oportunidade de convívio e troca de experiência, em especial às amigas queridas Adriana, Priscila, Karina e Gabriela pela paciência e apoio ao longo deste curso.

Ao professor Armando, pela orientação, fundamental para a realização dessa pesquisa.

Ao engenheiro Kalil, pelo apoio e auxílio na execução deste trabalho.

À Monique pelo companheirismo durante a realização deste estudo.

E a todos os que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização desse trabalho.

Sou muito grata a todos.

RESUMO

CZAPLA, A. C. **Análise dos Estudos sobre a Oxidação do Metano em Camadas de Cobertura de Aterros Sanitários.** Florianópolis, 2011, 36 p. Trabalho de Conclusão de Curso - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC.

Cada vez mais vem crescendo a preocupação com o aquecimento global e o efeito estufa provocados pelo excesso de alguns gases liberados na atmosfera, sendo o metano (CH_4) um exemplo desses gases. Muitas pesquisas já foram realizadas em diversos países com o intuito de encontrar os melhores solos de cobertura para aterros sanitários e as suas respectivas características físicas para que, quando implementados, o metano possa ser oxidado de forma efetiva e prolongada. Este trabalho apresentou uma análise desses estudos através da composição de dois quadros-resumo com alguns dos principais autores e apontou opções de pesquisas que podem vir a ser feitas, de modo a encontrar as melhores condições para que o metano possa ser biologicamente oxidado antes de passar do aterro para a atmosfera.

PALAVRAS-CHAVE: efeito estufa; aterros sanitários; camada de cobertura; emissões fugitivas; oxidação do metano.

ABSTRACT

CZAPLA, A. C. **Review of Studies on Methane Oxidation in Landfill Cover Soils.** Florianópolis, 2011, 36 p. Trabalho de Conclusão de Curso - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC.

Increasingly are growing the concerns about global warming and the greenhouse effect caused by the excess of some gases released into the atmosphere, and methane (CH₄) is an example of these gases. Many searches have been conducted in several countries in order to find the best cover soils for landfills and their physical characteristics so that, when they are implemented, methane can be oxidized effectively and prolonged. This paper presents an analysis of these studies through the composition of two table summaries including some key authors and pointed to research options that may be made in order to find the best conditions so that methane can be biologically oxidized before passing from the landfill to the atmosphere.

KEYWORDS: greenhouse effect; landfills; cover layer; fugitive emissions; methane oxidation.

SIGLAS E ABREVIACÕES

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

EC – European Commission

IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change

LARESO – Laboratório de Pesquisa em Resíduos Sólidos

MBT – Mechanical Biological Treatment

NBR - Denominação de norma da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT)

NMP – Número Mais Provável

PAG – Potencial de Aquecimento Global

pH – Potencial Hidrogeniônico

PNAS – Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America

PVC – Polyvinyl chloride

RSU – Resíduos Sólidos Urbanos

UFSC – Universidade Federal de Santa Catarina

US EPA – United States Environmental Protection Agency

SUMÁRIO

ÍNDICE DE FIGURAS.....	I
ÍNDICE DE GRÁFICOS.....	II
ÍNDICE DE TABELAS.....	III
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. OBJETIVOS.....	3
2.1. Objetivo geral.....	3
2.2. Objetivos específicos.....	3
2.3. Finalidade.....	3
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
3.1. Metano e as mudanças climáticas.....	4
3.2. Aterros Sanitários.....	4
3.3. Drenagem de biogás em aterros sanitários.....	5
3.4. Emissões de metano por aterros.....	6
3.5. Oxidação biológica do metano e fatores de influência.....	7
3.5.1. Matéria Orgânica.....	7
3.5.2. Características físicas e mecânicas do solo.....	7
3.5.3. Temperatura.....	8
3.5.4. Teor de Umidade.....	8
3.5.5. pH.....	9
3.5.6. Pressão atmosférica.....	9
3.5.7. Metais e NH_4^+	9
3.6. Bactérias metanotróficas.....	9
3.7. Redução das emissões de metano.....	11
3.8. Coberturas de aterros sanitários.....	11
4. METODOLOGIA.....	13
4.1. Classificação da Pesquisa.....	14
5. ENSAIOS DE OXIDAÇÃO.....	15
5.1. Ensaios em coluna.....	15
5.2. Ensaios <i>in situ</i>	20
6. RESULTADOS EM QUADROS-RESUMO.....	24
6.1. Quadro-resumo dos ensaios <i>in situ</i>	24
6.2. Quadro-resumo dos ensaios em coluna.....	26
7. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	28
7.1. Discussão dos resultados dos ensaios <i>in situ</i>	28
7.2. Discussão dos resultados dos ensaios em coluna.....	30
8. SUGESTÕES DE PESQUISA.....	32
9. CONCLUSÃO.....	33
10. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	34
ANEXOS.....	39

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Esquema de um aterro sanitário. Fonte: LIXO, 2010.	5
Figura 2 - Sistema de drenagem e queima de biogás. Fonte: VALORSUL, 2011.	6
Figura 3 – Bactéria metanotrófica (<i>Methylosinus trichosporium</i> OB3b). Fonte: PNAS, 2011.	10
Figura 4 – Seções transversais de coberturas de aterros. Fonte: Engepol, 2011.	12
Figura 5 – Aterro sanitário recebendo recobrimento.	13
Figura 6 – Fluxograma da metodologia.	14
Figura 7 - Experimento de Kightley; Nedwell; Cooper (1995).	16
Figura 8 - Experimento de Humer; Lechner (1999).	17
Figura 9 - Experimentos de Stein et al. (2001) e Wilshusen et al. (2004).	18
Figura 10 - Experimento de Kettunen et al. (2006).	19
Figura 11 – Experimento de Gebert et al (2003).	20
Figura 12 – Experimento de Einola et al (2008).	21
Figura 13 - Seção lateral (A) e esquema dos tubos instalações (B) no experimento de JUGNIA et al. (2008).	22
Figura 14 - Experimento de Cabral et al (2010).	23
Figura 15 – Quadro-resumo dos ensaios in-situ.	25
Figura 16 – Quadro-resumo dos ensaios em coluna.	27

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Comparação da máxima oxidação do biogás entre diferentes autores de trabalhos realizados <i>in situ</i>	29
Gráfico 2 - Comparação da máxima oxidação do biogás entre diferentes autores de ensaios realizados em coluna.....	31

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Comparação da máxima oxidação do biogás entre diferentes autores de trabalhos realizados <i>in situ</i>	28
Tabela 2 - Comparação da máxima oxidação do biogás entre diferentes autores de ensaios realizados em coluna	30

1. INTRODUÇÃO

Cada vez mais vem crescendo a preocupação com o aquecimento global e o efeito estufa provocados pelo excesso de alguns gases liberados na atmosfera. O metano (CH_4) é um exemplo desses gases, e, segundo o IPCC (2007), é cerca de 21 vezes mais poluente que o CO_2 .

Com o aumento da industrialização cresce também a quantidade de lixo produzido pelos grandes centros urbanos, sendo que boa parte desta produção é enviada para os aterros sanitários, que por sua vez são responsáveis pela emissão de quase 20% do metano provocada pelo homem. Para se ter uma idéia, de acordo com a Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (2010), cerca de 135 milhões de toneladas de resíduos são enviados para aterros sanitários anualmente no país. Na União Européia, 1.3 bilhões de toneladas de resíduos são produzidos anualmente e o método de disposição de resíduos mais utilizado continua sendo o aterro (EC, 2005).

Nestes aterros, é comum ser realizada a queima do gás metano, que segue através de canalizações, antes que alcance a atmosfera. Mesmo assim, este procedimento não é suficiente para eliminar toda a emissão do metano por aterro, pois nem todo o gás é queimado, e as coberturas comumente colocadas nos aterros nem sempre dão conta do excedente de metano, formando as chamadas emissões fugitivas.

Surge então uma possível solução para evitar as emissões fugitivas do metano em aterros sanitários: a colocação de uma camada de cobertura de solo que otimize a oxidação do gás por meio de microorganismos específicos, as bactérias metanotróficas. Essas bactérias encontradas em diversos tipos de solos se utilizam do oxigênio para transformar o metano em gás carbônico e água.

Muitas pesquisas já foram realizadas em diversos países com o intuito de encontrar os melhores solos de cobertura e as suas respectivas características físicas para que, quando implementados, o metano possa ser oxidado de forma efetiva e prolongada. Os autores procuraram estudar os diferentes tipos de solos e suas propriedades físicas e mecânicas, as bactérias presentes e as melhores condições para que se proliferem neles, bem como a espessura da cobertura. Existem diferentes formas de se estudar a máxima oxidação do gás metano, podendo ser diretamente no aterro ou através de colunas montadas em laboratório.

No Brasil ainda existe pouca literatura a respeito do assunto. Em termos de doutorado, Juliana Ludgren Rose apresentou sua tese recentemente com o título de “Análise comparativa entre as reduções da e-

missão de metano em camadas oxidativas experimentais” para o Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil na Universidade Federal do Rio de Janeiro (ROSE, 2009). Um exemplo ainda em andamento é o caso do mestrando Kalil Graeff Salim do Laboratório de Pesquisas em Resíduos Sólidos (LARESO), no Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da UFSC. Orientado pelo Professor Armando Borges de Castilhos, Kalil está estudando a oxidação do metano em quatro tipos diferentes de solos possíveis de serem usados como cobertura de aterro sanitário. Neste mesmo laboratório, Camila Roncato apresentou seu Trabalho de Conclusão do Curso de Engenharia Sanitária e Ambiental em 2007 (RONCATO, 2007). Estes e outros são trabalhos que alavacam o Brasil em pesquisas na área de redução das emissões fugitivas do metano por aterros sanitários.

Ainda assim, os trabalhos encontrados hoje sobre a oxidação do metano em camadas de biorrecobrimento muitas vezes não englobam todos os parâmetros importantes para estimar o desenvolvimento das bactérias metanotróficas e a passagem dos gases através do solo. Tais parâmetros, como hidráulicos e geotécnicos, se bem ampliados, ajudam em um melhor entendimento dos resultados encontrados na literatura, visto que variam consideravelmente de autor para autor (RONCATO, 2007).

Nota-se que existe uma carência de trabalhos que envolvam pesquisas referenciais reunindo resultados e experiências de diversos autores no estudo da oxidação do metano em camada superior de aterros sanitários. Por isso, este trabalho de conclusão do curso de Engenharia Sanitária e Ambiental vai reunir descobertas e experimentos de diversos autores no mundo e apresentar os resultados com as maiores taxas de oxidação do metano encontradas para, a partir daí, serem sugeridos trabalhos de pesquisas que podem ser realizados no Brasil.

Otimizar a oxidação do metano em aterros pelas bactérias pode se apresentar como uma estratégia econômica de gerenciamento para minimizar as emissões do metano na atmosfera (JONES; NEDWELL, 1993). Serão, portanto, apresentadas ideias e até diretrizes para que venham despertar o interesse em futuros pesquisadores, a fim de ajustar as camadas de cobertura em antigos aterros para que se eliminem as emissões fugitivas de metano, e que possa servir de exemplo como medida de diminuição do aquecimento global.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo geral

O objetivo geral deste estudo será analisar o estado da arte da oxidação do metano em camadas de cobertura de aterros.

2.2. Objetivos específicos

- Comparar estudos e resultados de diferentes autores.
- Construir quadros-resumo com dados dos trabalhos estudados.
- Apresentar conexões nas diferenças dos resultados dos trabalhos analisados.
- Sugerir possíveis ensaios a serem realizados futuramente.

2.3. Finalidade

Conhecer, analisar e correlacionar as técnicas estudadas para a oxidação do metano, presente nas emissões fugitivas pela camada de cobertura dos aterros sanitários.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. Metano e as mudanças climáticas

O potencial de aquecimento global é uma ferramenta utilizada para contabilizar emissões e utilizar os dados na implementação de medidas mitigatórias. O gás metano possui um potencial de aquecimento global estimado em 25 vezes maior que o do gás carbônico (CO₂), e para um horizonte de 100 anos este valor chega a 72 vezes (IPCC, 2007).

O metano é um gás de efeito estufa emitido por fontes naturais ou antrópicas, e permanece na atmosfera de 9 a 15 anos. Além disso, o CH₄, num período de 100 anos, é 20 vezes mais efetivo que o gás carbônico na captura do calor atmosférico (US EPA, 2010).

Desde o início da industrialização, o teor de metano na atmosfera aumentou mais do que duas vezes, sendo que o seu atual aumento anual é de aproximadamente 1%. O gás proveniente de aterros apresenta elevados teores de metano e contribui significativamente para o efeito estufa (BAHR, 2006).

3.2. Aterros Sanitários

O Aterro Sanitário é uma técnica segura e de baixo custo projetado para receber o lixo produzido em um município por no mínimo 10 anos, evitando causar maiores impactos ao meio ambiente (BAHIA, 2010). Este tipo de aterro corresponde a uma destinação final de resíduos onde o terreno é preparado e a impermeabilização do solo é feita com mantas de PVC resistentes, evitando, assim, a contaminação do lençol freático pelo chorume (LIXO, 2010). Ainda assim, neste processo são liberados gases e líquidos poluentes, fazendo com que seja necessário um monitoramento durante anos após o fechamento do aterro (BAHIA, 2010).

A Política Nacional dos Resíduos Sólidos (BRASIL, 2010) define uma disposição final ambientalmente adequada como:

“Uma distribuição ordenada de rejeitos em aterros, observando normas operacionais específicas de modo a evitar danos ou riscos à saúde pública e à segurança e a minimizar os impactos ambientais adversos”.

A Figura 1 a seguir representa o esquema de um aterro sanitário, no qual é prevista a cobertura diária do lixo para evitar a proliferação de

vetores e mau cheiro (LIXO, 2010). A NBR-8419/84 prevê os mecanismos a serem executados antes de se depositar os RSU em um aterro sanitário, bem como o posterior recobrimento diário do lixo (GUEDES, 2007).

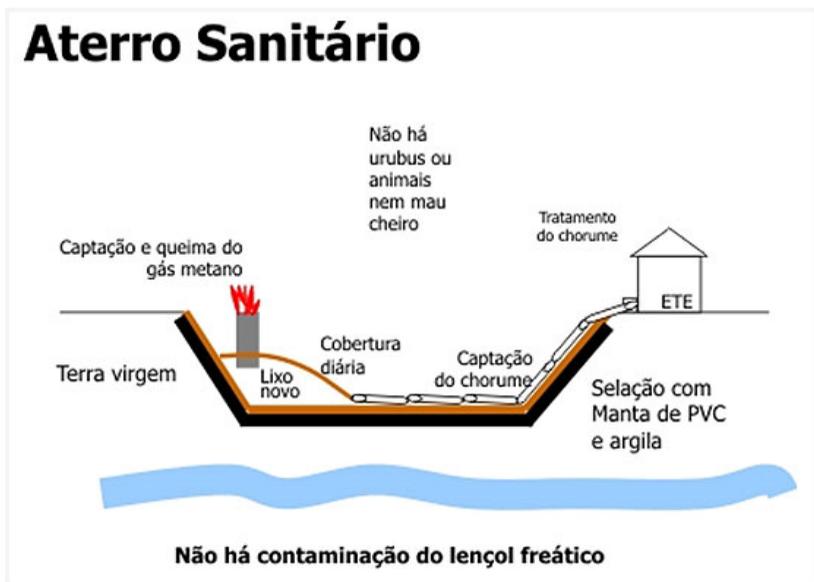


Figura 1 - Esquema de um aterro sanitário. Fonte: LIXO, 2010.

3.3. Drenagem de biogás em aterros sanitários

O sistema de drenagem do biogás produzido no interior do montante de resíduos (Figura 2), segundo Guedes (2007):

“É importante para o alívio de pressões internas do aterro, para sua posterior queima ou reaproveitamento”.

O objetivo deste sistema é, então, de remover o biogás produzido no interior do aterro no sentido de evitar explosões, combustão interna e instabilização do aterro (GUEDES, 2007).

“O sistema de drenagem e queima do biogás é composto por duas redes independentes, uma em cada célula de RSU, e por um queimador de biogás, ao qual as redes se encontram ligadas” (VALORSUL, 2011).

Este sistema inicia sempre sobre os drenos de chorume e conduz o biogás para o *flare*, que por sua vez corresponde em um mecanismo simples para ignição e queima do gás (no caso de aterros que não empreguem dispositivos para o aproveitamento do biogás como produção energética de combustível) (GUEDES, 2007).



Figura 2 - Sistema de drenagem e queima de biogás. Fonte: VALORSUL, 2011.

3.4. Emissões de metano por aterros

Os aterros de RSU de um modo geral apresentam perda de biogás, fato conhecido como “emissão fugitiva através da camada de solo na cobertura”. Este fenômeno ocorre devido à ineficiência ou inexistência do sistema de drenagem de biogás, podendo gerar uma pressão positiva no interior do aterro e o procedente vazamento de biogás por processos de difusão e advecção pelo solo usado como camada de cobertura (GUEDES, 2007).

Segundo Humer e Lechner (1999), o aterro é a maior fonte antropogênica de emissão de metano, sendo que aproximadamente 40 a 60 milhões de toneladas de metano por ano são geradas em aterros no mundo. O gás proveniente de aterros é gerado através da decomposição anaeróbica da matéria orgânica e contém cerca de 50% a 60% de metano (IPCC, 2007). Além disso, uma tonelada de resíduo sólido urbano disposto em aterro produz de 88 a 138 m³ de metano (HUMER; LECH-

NER, 1999). Em 1995 estas emissões ultrapassaram inclusive as do setor agrícola (IPCC, 2007).

Nos Estados Unidos, por exemplo, os aterros são as segundas maiores fontes de emissão de metano, e representaram cerca de 22% das emissões antropogênicas totais do gás em 2008 (US EPA, 2010).

3.5. Oxidação biológica do metano e fatores de influência

A oxidação do metano é o processo de conversão do mesmo em água, carbono e biomassa por meio de atividade microbiana, e depende de fatores como: a existência de microorganismos, a presença de oxigênio e nutrientes e as condições ambientais no substrato (HUMER; LECHNER, 1999). Esta oxidação é feita por um grupo aeróbico de bactérias, encontradas no solo, chamadas de metanotróficas. A diferença entre a oxidação biológica e oxidação química do metano é que a primeira tem como catalisadoras as enzimas e se utiliza de energia para produção de biomassa (CHANTON, 2009).

A oxidação microbiológica do metano muitas vezes apresenta vantagens econômicas na gestão dos resíduos. É o caso de onde uma coleta e um tratamento de gases não são aplicáveis, devido à baixa produção de gás no aterro ou se o mesmo se apresenta de baixa qualidade (BAHR, 2006).

Alguns fatores são de elevada importância no processo de oxidação do metano e merecem destaque em sua descrição.

3.5.1. Matéria Orgânica

A matéria orgânica presente no substrato que servirá de cobertura para o aterro serve como veículo para microorganismos e melhora as propriedades do solo e substrato, e também um fornecimento satisfatório de nutrientes é essencial para o acúmulo de biomassa metanotrófica (HUMER; LECHNER, 1999). Além disso, a composição do material orgânico presente no lixo pode aumentar a produção do biogás pois, por exemplo, alguns compostos ricos em carbono sofrem ação rápida dos microorganismos (GUEDES, 2007).

3.5.2. Características físicas e mecânicas do solo

Existem dois grandes processos envolvidos na migração dos gases através do substrato até a atmosfera: a difusão devido aos gradientes de concentração e a advecção devido à pressão gradiente. A migração dos gases depende de fatores como as propriedades do substrato, a con-

figuração do biofiltro, as reações, temperatura, umidade e fatores ambientais como vento e chuva (VENUGOPAL et al, 2010).

Cabral et al. (2008) afirmam a necessidade de se obter parâmetros de permeabilidade do solo, como o coeficiente de difusão de gás (D_s) e o de permeabilidade do gás (K_g), para cada substrato a ser estudado.

Kightley et al. (1995) provaram que um substrato poroso de areia grossa atingiu uma alta atividade metanotrófica no ensaio: 166 g de CH_4 /m²/dia. Gebert et al. (2010) sugeriram que a porosidade mínima para o solo ser usado como cobertura de aterro é de 14%, o que pode ser encontrado mais facilmente em solos arenosos.

Estudos ainda indicam que o uso de vegetação na cobertura aumenta a oxidação do metano pelo aumento da difusividade do gás proporcionado pelo sistema de raízes, além de auxiliar no transporte de oxigênio para profundidades mais altas (BOHN; JAGER, 2009; TANTHACHOON et al., 2007).

3.5.3. Temperatura

As metanotróficas preferem temperaturas entre 10°C e 35°C, por isso no verão a atividade biológica de oxidação aumenta com a maior geração de calor (VENUGOPAL et al., 2010). Para climas tropicais, a variação da temperatura atmosférica externa somente poderá afetar os 2,5 metros iniciais do aterro (JUCÁ et al, 1999 *apud* GUEDES, 2007).

Ainda assim, De Visscher et al. (2001) constataram em seu experimento que a temperatura só apresentou influência no consumo de metano em maiores concentrações do gás.

3.5.4. Teor de Umidade

Segundo Guedes (2007), a presença de fluidos no interior do aterro pode prejudicar ou ser fator importante na produção do biogás. Tanto o excesso quanto a insuficiência podem prejudicar as reações metanotróficas.

A precipitação afeta diretamente a distribuição de umidade no substrato. Além disso, o CO_2 produzido durante a atividade metanotrófica pode ser dissolvido na água da chuva e removido do sistema através da lixiviação, o que muda a composição de mistura do gás. Tal processo afeta também o fluxo do gás e o pH do sistema, que irá diminuir (VENUGOPAL et al., 2010).

Ao se utilizar solos arenosos o fator mais importante e efetivo a ser controlado é a umidade para gerenciar a oxidação do metano em aterros sanitários (PARK et al., 2005). Para Jones e Nedwell (1993), as

medições de metano no experimento variaram com as estações e sofreram influências do teor de umidade do solo.

3.5.5. pH

Os microorganismos metanotróficos possuem tolerância a um pH que vai de 4 a 9, embora o crescimento e atividade ótimos se encontrem na faixa de pH entre 5,5 e 8,5 (FIGUEROA, 1993 apud HUMER; LECHNER, 1999).

3.5.6. Pressão atmosférica

A pressão atmosférica influencia no transporte dos gases que passam pela camada de cobertura do aterro. A captura de gases reduz a pressão no próprio aterro fazendo com que a advecção seja reduzida, aumentando, assim, a importância da difusão no transporte de gases em direção à superfície (CHANTON, 2009).

3.5.7. Metais e NH_4^+

A presença de metais pesados (Cu, Zn, Ni e Cr) e ácidos em altas concentrações podem prejudicar a produção de metano (GUEDES, 2007).

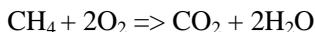
Segundo Humer e Lechner (1999), o íon NH_4^+ é chamado de inibidor competitivo na oxidação do metano. A adição de íons amônio (NH_4^+) fez atrasar a oxidação do metano nos experimentos de Park et al. (2005).

Já a adição de lodo nitrificado ou composto ao experimento de De Visscher et al. (2001) fez com que a oxidação do metano fosse aumentada dentro de poucos dias.

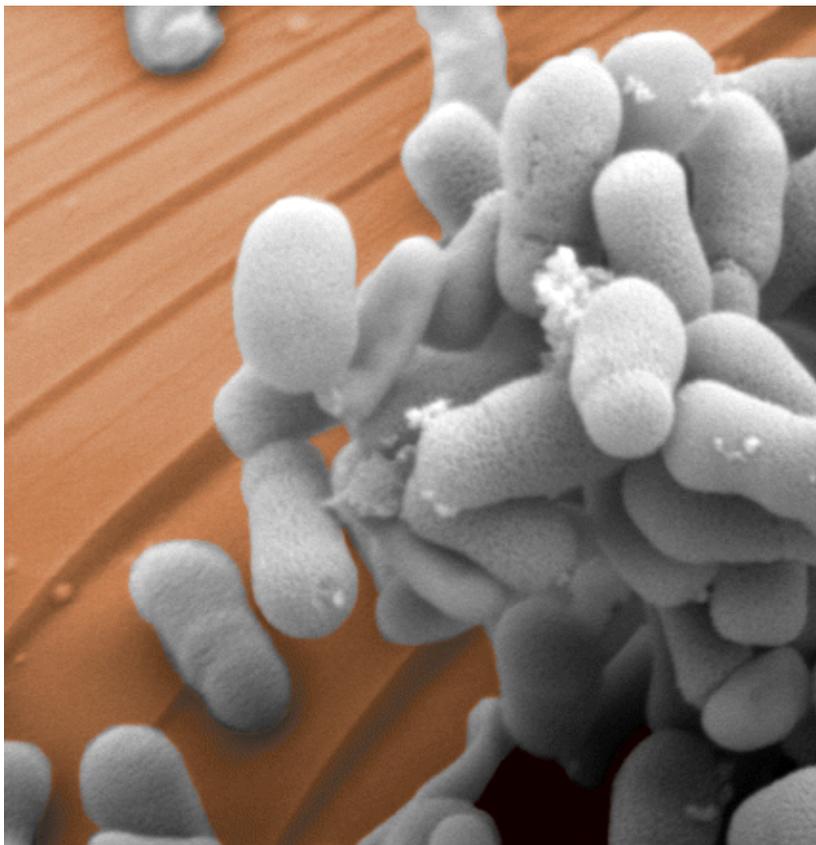
3.6. Bactérias metanotróficas

Os microorganismos capazes de oxidar o metano são chamados de bactérias metilotróficas obrigatórias (metanotróficas) e são encontradas em quase todos os locais terrestres, marinhos e limnológicos. A enzima monooxigenase está presente em todos os microorganismos metanotróficos possibilitando a oxidação do metano, onde ocorre a fixação das moléculas de oxigênio (HUMER; LECHNER, 1999).

As bactérias metanotróficas consomem o metano convertendo-o em água, dióxido de carbono e biomassa celular, conforme a seguinte equação:



Os microorganismos em questão podem ser divididos em dois grupos fisiológicos: tipo I (*Methylomonas*, *Methylocaldum*, *Methylophaera*, *Methylomicrobium* e *Methylobacter*) e tipo II (*Methylocystis* e *Methylosinus* – Figura 3) (TEIXEIRA, 2009).



**Figura 3 – Bactéria metanotrófica (*Methylosinus trichosporium* OB3b).
Fonte: PNAS, 2011.**

As quantidades de carbono, nitrogênio, fósforo e enxofre podem limitar o crescimento das bactérias metanotróficas, sendo que estas absorvem o nitrogênio na forma de nitrato ou amônia. Estes microorganismos são sensíveis a determinados fatores, como pH, temperatura e teor de umidade (BAHR, 2006).

Borjesson et al. (2004) estudaram as bactérias metanotróficas tipos I e II em 3 diferentes aterros na Suécia para diferentes temperaturas (de 5 a 10 °C). O consumo máximo de metano atingido através de incubação foi de 1,57 $\mu\text{mol/h}$ para uma temperatura de 20°C, sendo que o consumo aumentou com o acréscimo da temperatura. Além disso, constatou-se que as metanotróficas do tipo I são favorecidas pelas temperaturas mais baixas.

3.7. Redução das emissões de metano

A prevenção da geração de metano pode ser feita através do aproveitamento de componentes biodegradáveis e do pré-tratamento de resíduos, e a redução das emissões de metano pode ser resultante da sua oxidação térmica ou biológica (BAHR, 2006). De acordo com Hilger e Humer (2003), quando há a recuperação de energia do metano, a conversão reduz o Potencial de Aquecimento Global (PAG) de cada molécula de metano para o de uma molécula de gás carbônico em 87%, o que enfatiza a coleta e oxidação do CH_4 .

Uma biocobertura (ou biorrecobrimento) consiste basicamente em uma camada bastante porosa de distribuição de gases disposta em cima dos resíduos, que por sua vez são cobertos por uma camada de composto e por último uma de vegetação. Como os fluxos de metano normalmente apresentam uma alta variabilidade espacial ao passar pelo substrato, a camada de distribuição de gases resulta em fluxos mais uniformes para a camada de cobertura acima (BOGNER et al., 2005).

Na ausência de sistema de coleta de gases, a oxidação do metano por uma densa população de bactérias metanotróficas que cresce numa camada aeróbica de solo é muito importante para a redução de emissões de metano por aterros sanitários (KALLISTOVA, 2005). Os biofiltros de metano utilizam-se das bactérias metanotróficas vivendo no substrato poroso para oxidar o CH_4 em CO_2 . No entanto, o uso desta biofiltração para tratamento do metano é relativamente novo (VENUGOPAL et al., 2010). Neste sentido, faz-se importante o estudo de coberturas de aterros e suas condições físicas ótimas para que este processo se concretize de maneira rápida e efetiva.

3.8. Coberturas de aterros sanitários

No mundo atual, muitos aterros antigos já estão desativados ou necessitam ser fechados. Ainda hoje, vários deles não possuem um sistema de gerenciamento de gases que tende a ser economicamente dis-

pendioso por causa de suas dimensões reduzidas (ABICHOU, 2006). Tal fato faz com que este aterro seja uma fonte de gases de efeito estufa.

A cobertura de um aterro sanitário é constituída por um sistema de drenagem de águas pluviais, que não permita a infiltração de águas de chuva para o interior do aterro. No Brasil, usa-se normalmente uma camada de argila compactada. Os geossintéticos têm sido uma excelente alternativa de proteção ambiental em países da Europa e nos Estados Unidos, quando usado como cobertura final de aterros. Para substituir a camada de solo de baixa permeabilidade, que atua como barreira, usa-se uma geomembrana termoplástica, sendo a mais utilizada a de PE Linear – Polietileno Linear de Baixa Densidade, devido as suas características de flexibilidade e resistências mecânica e química (ENGEPOL, 2011). A Figura 4 a seguir representa estes dois tipos de coberturas.

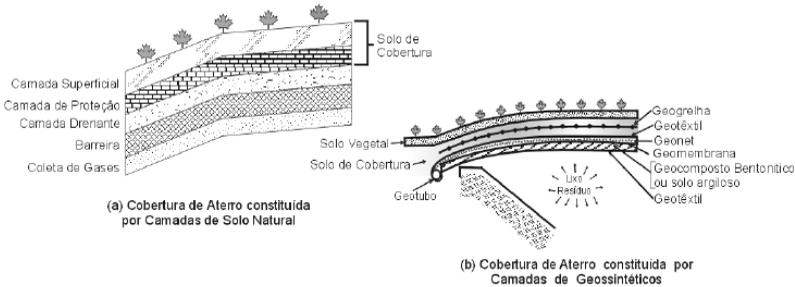


Figura 4 – Seções transversais de coberturas de aterros. Fonte: Engepol, 2011.

Os aterros sanitários recebem diariamente uma cobertura de solo normalmente encontrado no próprio terreno (Figura 5), como já mencionado anteriormente. Uma alternativa seria incorporar uma camada biológica na cobertura para oxidar o CH_4 que está deixando o aterro em direção à atmosfera (ABICHOU, 2006). Esta cobertura deve ser considerada como um biofiltro de grandes dimensões, e, para apresentar uma alta eficiência na oxidação do metano, a cobertura deve garantir condições ótimas para as bactérias metanotróficas. Ao se dimensionar a cobertura do aterro devem ser levados em consideração inúmeros fatores, tais como a profundidade de penetração do oxigênio e a vegetação (HUMER e LECHNER, 1999).



Figura 5 – Aterro sanitário recebendo recobrimento.

O ideal seria combinar custo e disponibilidade do solo que será usado como biorrecobrimento. Uma alternativa de baixo custo para o tratamento de emissões de metano em aterros é a implantação de camadas de filtros de oxidação, como o composto (produto resultante da compostagem) (BAHR, 2006; HILGER; HUMER, 2003) e produtos similares oriundos de tratamento mecânico-biológico de resíduos como material de filtro (BAHR, 2006). Uma cobertura feita de composto pode ser bastante efetiva quando combinada com um bom sistema de coleta de gases. Ao capturar o metano que foge pelo aterro, uma camada de cobertura estará contribuindo para a diminuição desse gás na atmosfera (HILGER; HUMER, 2003).

4. METODOLOGIA

Para o desenvolvimento do presente trabalho foram realizadas coletas de informações sobre os métodos mais utilizados para medir as taxas de oxidação de metano em camadas de cobertura de aterros sanitários. As fontes de informações foram: artigos acadêmicos nacionais e internacionais, material didático e pesquisadores da área.

A primeira parte deste trabalho consiste em uma revisão geral para situar a questão do gás metano como causador do efeito estufa, alguns autores e suas pesquisas e resultados bem como uma abordagem

das características mais importantes que definem uma alta taxa de oxidação biológica. Enquanto isso, a segunda parte apresentará quadros-resumos dos trabalhos pesquisados sobre ensaios *in situ* e em coluna e a discussão em torno dos métodos, autores e seus resultados. A partir dessa análise ainda serão sugeridos ensaios a serem realizados futuramente, visando uma otimização no processo de oxidação do metano no biorrecobrimento do aterro e seu substrato.

A Figura 6 apresenta um fluxograma de tarefas a serem seguidas neste trabalho, relacionadas à metodologia.

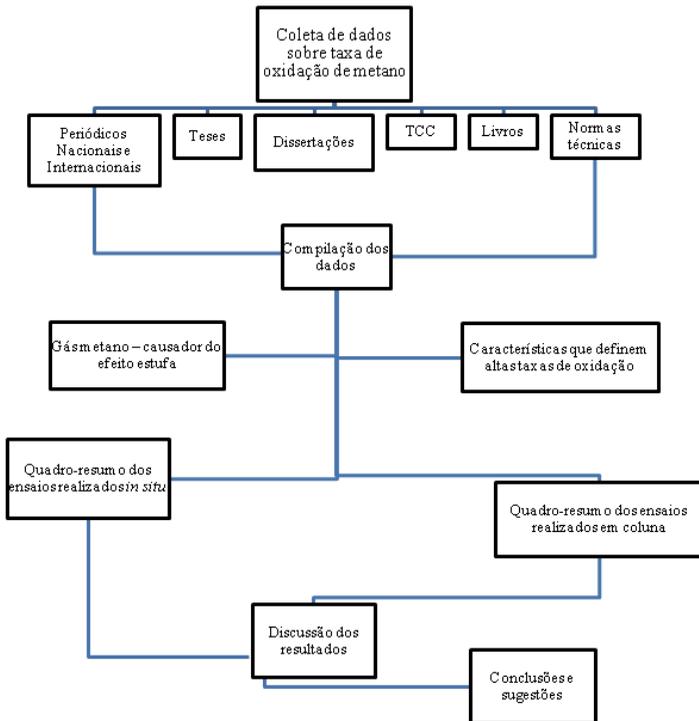


Figura 6 – Fluxograma da metodologia

4.1. Classificação da Pesquisa

De acordo com Gil (2009), este trabalho pode se caracterizar como sendo de natureza exploratória, pois envolve um levantamento bibliográfico, entrevistas com pessoas que tiveram (ou tem) experiências práticas com o problema pesquisado e análise de exemplos que estimulem a compreensão. Dessa forma, este tipo de estudo tem em vista pas-

sar maior informação para o pesquisador acerca do assunto, a fim de que esse possa formular problemas mais precisos ou criar hipóteses que possam ser pesquisadas por estudos posteriores.

Assim, o presente estudo foi realizado através da execução de pesquisa bibliográfica, visando atender os objetivos outrora propostos, que permitiu maior familiaridade com o assunto, além de apresentar os dados mais importantes obtidos anteriormente pelos pesquisadores, facilitando a análise dos mesmos.

5. ENSAIOS DE OXIDAÇÃO

5.1. Ensaio em coluna

Na literatura encontram-se vários trabalhos realizados com experimentos de oxidação de metano em colunas.

No Reino Unido, Kightley et al. (1995) utilizaram tubos de PVC de 100 cm de altura (Figura 7) e diâmetro de 15 cm para determinar as taxas de oxidação do metano em três diferentes substratos: solo de areia grossa, solo argiloso de cobertura de aterro e areia. No experimento, o gás metano foi inserido a 5 ml/min e ar atmosférico a 300 ml/min e a taxa de oxidação máxima encontrada foi de 166 g CH₄/m²/d para a areia grossa.

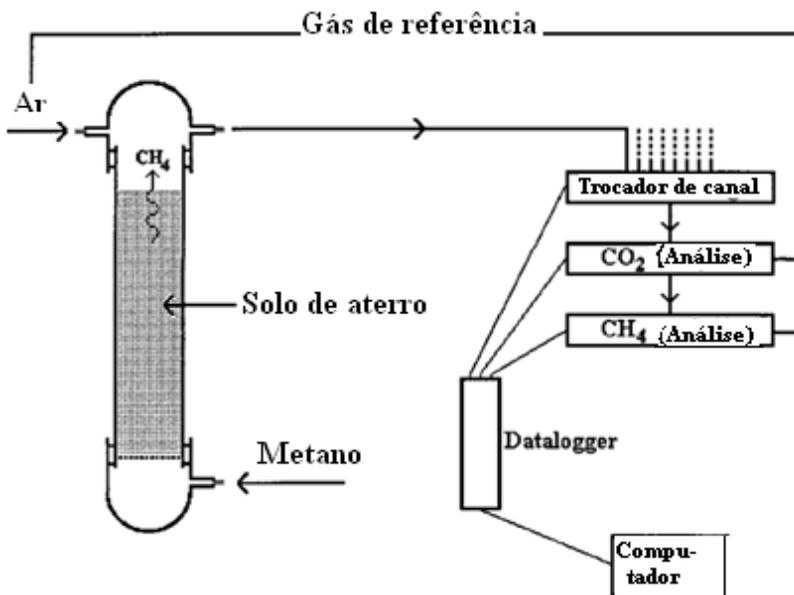


Figura 7 - Experimento de Kightley; Nedwell; Cooper (1995).

De Visscher et al. (1999) mediram as concentrações de metano a cada 10 cm em um tubo de 60 cm e diâmetro 14,1 cm, com um solo de agricultura e um solo de cobertura de aterro. Metano era inserido na parte inferior do tubo a 7 ml/min e ar atmosférico na parte superior a 1 ml/min. O trabalho, realizado na Bélgica, teve duração de 28 dias e a taxa de oxidação máxima encontrada foi de 290 g CH₄/m²/d, para o solo de cobertura.

Na Áustria, Humer e Lechner (1999) analisaram durante 50 dias quatro tipos de substratos diferentes, além do solo: composto de resíduo sólido municipal, composto de lodo de esgoto e misturas composto-areia e solo-composto. As colunas eram de acrílico e possuíam altura de 70 cm (Figura 8). O fluxo de metano inserido (gás de aterro) era de 200 a 250 l CH₄/m²/d. As medições do gás foram feitas em 10 cm, 30 cm e 50 cm. O pH ficava entre 7,0 e 8,0 e a temperatura era de 18°C. Os substratos de composto maduro de resíduo sólido e o composto de lodo de esgoto alcançaram rapidamente uma taxa de oxidação do metano de 100%.

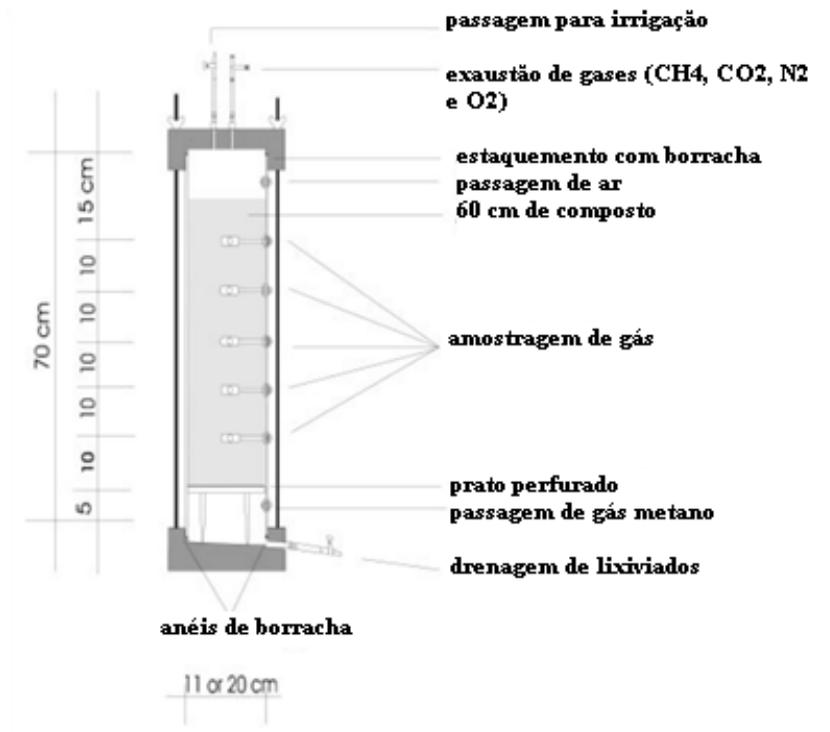


Figura 8 - Experimento de Humer; Lechner (1999).

Philopoulou et al. (2009) utilizaram como substratos um composto de jardinagem e uma mistura de areia, composto e perlite em duas colunas de aço de 182 cm e 55 cm de diâmetro, com o substrato até 125 cm. Ar foi adicionado, na parte superior, a 40 ml/min e metano a 134 g CH₄/m²/d, na parte inferior, e foi obtida uma oxidação de 100% em ambos os substratos.

No Canadá, Stein et al. (2001) utilizaram os princípios de Kightly et al. (1995) para construir a coluna para o estudo da oxidação do metano, que foi feita de plexiglass com 80 cm de altura. O metano (99%) era inserido a 320 g/m²/d e o ar atmosférico a 300 mL/min, e a oxidação máxima obtida foi de 25,7% para um solo de aterro.

Ainda no Canadá, Wilshusen et al. (2004) construíram seis colunas de acrílico de 1 metro de altura e 13,97 cm de diâmetro para estudar a oxidação do metano em quatro diferentes substratos: composto municipal de folhas, composto de lascas de madeira, composto de jardim e

composto de resíduos sólidos municipais. Metano (99%) foi inserido a 520 g/m²/d durante 220 dias, e o composto de folhas atingiu a máxima oxidação de 400 g/m²/d a 20 cm de profundidade. Eram conhecidos a densidade e o teor de matéria orgânica dos substratos.

A Figura 9 apresenta um diagrama para os experimentos em coluna de Stein et al. (2001) e Wilshusen et al. (2004).

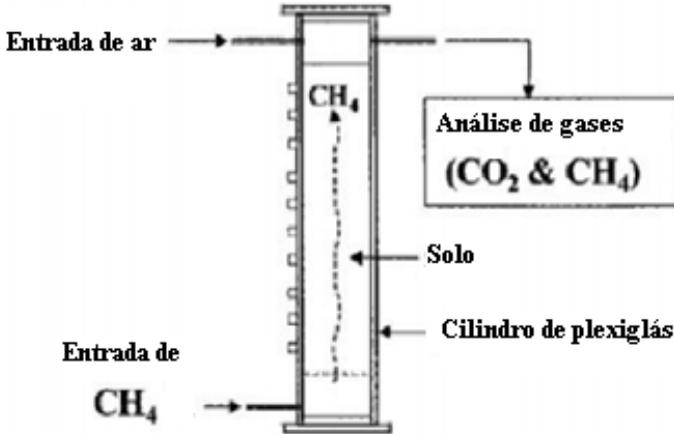


Figura 9 - Experimentos de Stein et al. (2001) e Wilshusen et al. (2004).

Na Finlândia, Kettunen et al. (2006) estudaram dois tipos de solos, sendo o primeiro deles a mistura de composto de lodo de esgoto, resíduos de tinta e areia (pH de 6,8), e o segundo a mistura de composto de lodo de esgoto, resíduos de tinta e lascas de madeira (pH de 6,5). Na ocasião, foram utilizados dois tubos de PVC com volume de 35 litros cada, e as medições eram feitas a cada 10 cm (Figura 10). Metano com concentração de 50% foi inserido a 5 ml/min e ar atmosférico a 37 ml/min, e o consumo máximo medido foi de 0,044 m³/m².d a 22 graus, para o primeiro solo.

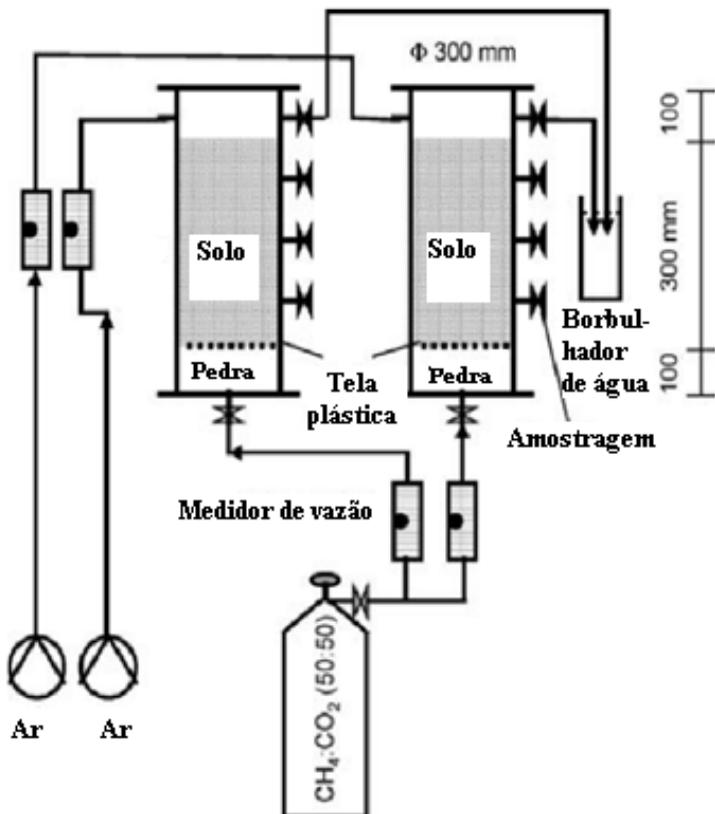


Figura 10 - Experimento de Kettunen et al. (2006).

Philopoulos et al (2009) utilizaram uma coluna de 1,82 m de altura e 55 cm de diâmetro para testar a oxidação do metano em dois diferentes substratos: composto de resíduos de jardim e composto de areia perlite. A base da coluna foi preenchida com uma camada de 32 cm de pedras. Metano foi adicionado a 134 g $\text{CH}_4/\text{m}^2/\text{d}$ na parte inferior da coluna e ar atmosférico a 400 mL/min na parte superior. O experimento durou um total de 218 dias a oxidação atingida em ambos os substratos foi de 100%.

Assim, através de uma análise dos estudos citado neste item, é possível sugerir que mais pesquisas sejam realizadas a fim de se encontrar o melhor substrato para determinados valores de parâmetros (como pH e temperatura), para que a oxidação do metano por camada de cobertura em aterros possa ser efetivada.

5.2. Ensaios *in situ*

Muitos autores também estudaram a oxidação do metano *in situ*, ou seja, em campo. Aqui serão apresentados alguns trabalhos importantes no assunto, que serão abordados neste trabalho.

Hilger e Humer (2003) testaram quatro coberturas de aterro de 25 m x 25 m, três delas com compostagem de solo de esgoto e lascas de madeira, e uma delas com compostagem de resíduos sólidos urbanos. Duas delas apresentaram pedras como base da cobertura, e uma delas, barro. O projeto, realizado na Áustria, teve duração de um ano e alcançou 100% de remoção de metano em todas as coberturas, sendo a taxa de emissão anterior aos testes de 800 L/m²/d.

Na Alemanha, Gebert et al. (2003) construíram um biofiltro *in situ* de 15m³ de polietileno, com 5 camadas, sendo uma argila entre duas de pedregulhos, uma de areia e por último o solo de cobertura, com uma cobertura de grama (Figura 11). As densidades do solo de cobertura e da argila eram de 1.57 g/cm³ e 0.35 g/cm³, respectivamente. O teor de umidade e temperatura ótimos foram de 18% e 22°C. O experimento, que durou dois anos, obteve taxas de remoção de metano de 35 a 109 g CH₄/h/m³.

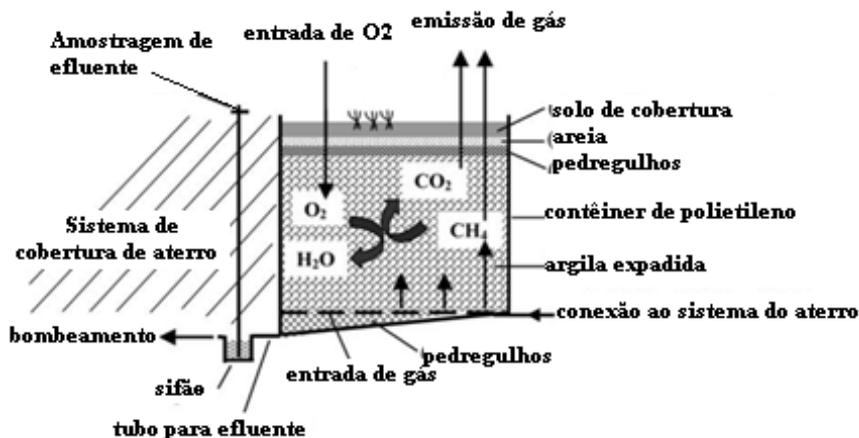


Figura 11 – Experimento de Gebert et al (2003).

Um experimento em campo foi realizado na Rússia em uma área de 40 m x 40 m de um aterro sanitário (KALLISTOVA et al, 2005). O solo de cobertura era composto por areia com argila e pequenas pedras. O gás produzido pelo aterro continha de 60% a 70% de metano e a taxa

de metano variou de 0,002 a 18 mol CH₄/m²/dia. Os autores obtiveram resultados diferentes para cada ponto experimental, sendo que a taxa de oxidação máxima de metano chegou a 166.2 μmol g solo/ADM/dia em uma profundidade de 20 cm a 40 cm. Nesta pesquisa foi também realizada a contagem do número de células de bactérias metanotróficas no substrato.

Stern et al (2006) construíram 6 células de 7,6 m x 7,6 m cada para estudar a oxidação do metano *in situ*, sendo que três das células eram de biorrecobrimento e três de controle. As células de biorrecobrimento levaram 10 cm de cacos de vidro e 50 cm de compostagem de folhas e as células de controle apresentavam somente o antigo solo de cobertura do aterro. A temperatura média durante os 13 meses de medições foi de 25,7°C, nos Estados Unidos, e a oxidação média do metano obtida pelas células de biorrecobrimento e de controle foram de 41% e 14%, respectivamente.

Um experimento *in situ* utilizando um evapotranspirômetro (lisímetro) foi realizado em um aterro boreal na Finlândia com resíduo mecânica e biologicamente tratado (MBT) (EINOLA et al, 2008). O lisímetro possuía um volume de 112 m³ e a camada de MBT cobria de 40 cm a 45 cm. Foram feitas cinco medições com espaçamentos de 15 cm entre si, em um período de nove meses, alcançando baixas temperaturas (até -29°C). O fluxo de metano encontrado variou de 1,58 a 22,8 L CH₄/m²/d. As medições foram feitas em número de cinco, a cada 15 cm de profundidade. A oxidação do metano ultrapassou os 96% e foi máxima na profundidade de 35 cm a 75 cm. A vista em planta do lisímetro está representada na Figura 12.

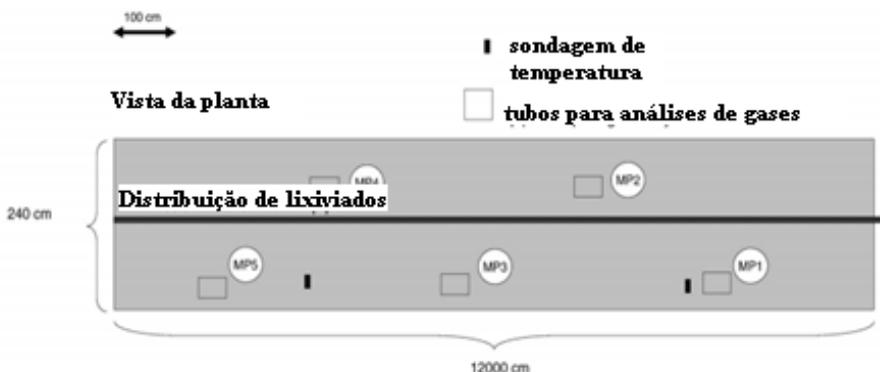


Figura 12 – Experimento de Einola et al (2008).

No Quebec, Canadá, Jugnia et al (2008) realizaram um experimento in situ, utilizando duas parcelas de 2,75m x 9,75m em um aterro sanitário (Figura 13). Cada parcela continha uma camada do substrato de composto e areia (5:1), sobre duas camadas de pedregulhos em diâmetros diferentes, a primeira de 10 cm e a segunda de 20 cm, para facilitar a passagem do gás. Uma estação meteorológica foi montada no local para medir a precipitação (de 0 mm a 1,12 mm) e o teor de umidade (de 51% a 64%) diários. O gás emitido pelo aterro passava com uma concentração de metano de 55%. Nos meses mais quentes (Julho e Agosto) a oxidação máxima chegou a praticamente 100%, em 20 cm a 30 cm de profundidade.

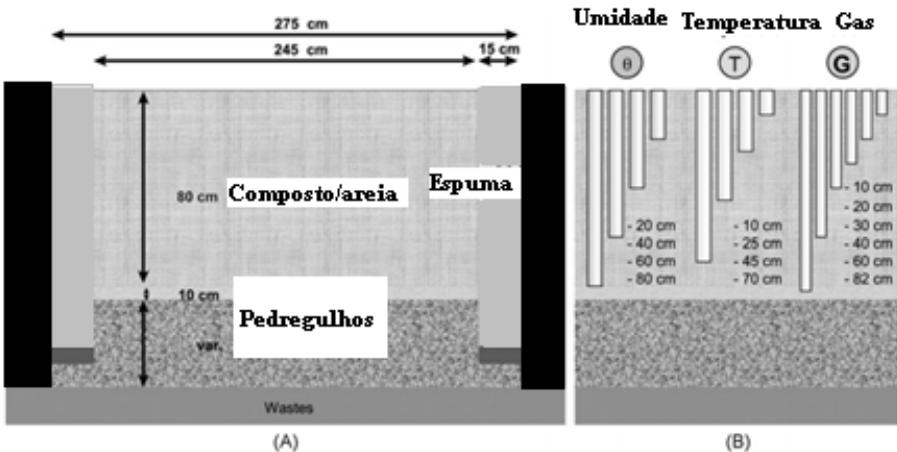


Figura 13 - Seção lateral (A) e esquema dos tubos instalações (B) no experimento de JUGNIA et al. (2008).

Teixeira et al (2009) fizeram a contagem do número mais provável (NMP) de bactérias metanotróficas em amostras de solos de três aterros no Brasil, um no estado de São Paulo e dois (um aterro e uma célula experimental) no Rio Grande do Sul. No experimento, foram inseridos 45 mL de metano e 1 mL de ar atmosférico em frascos de 50 mL que continham 4,5 mL do meio mineral amônia com 0,5 mL da amostra. O consumo de metano atingiu 90% nos aterros e 80% na célula experimental, e a contagem do NMP foi maior também nos aterros. Os parâmetros conhecidos dos substratos eram a granulometria, os limites

físicos e a densidade relativa dos grãos, o teor de umidade, o índice de vazios, o grau de saturação, o pH e o teor de sólidos totais voláteis.

Cabral et al. (2010) construíram uma barreira passiva para oxidação do gás metano *in situ* de 2,75 m x 9,75 m, com 0,80 m do substrato de composto madura e areia (5:1) sobreposto em 0,10 m de pedregulhos, para a distribuição do gás (Figura 14). O substrato possuía densidade de 8,4 KN/m³ e porosidade total de 0,63. O sistema era protegido do restante do aterro, mas mantinha as mesmas condições atmosféricas naturais. O metano inserido na parte inferior variou de 9,3 a 820 g CH₄/m²/d e a oxidação máxima alcançada foi de 100%, com uma taxa de remoção de 804 g/m²/d. Após este evento, o aterro teve de ser fechado para a chegada do inverno e a pesquisa não teve continuação. Os autores, portanto, afirmam que ainda não foi encontrado o valor máximo de oxidação do metano que poderia ter sido alcançado nesta pesquisa.

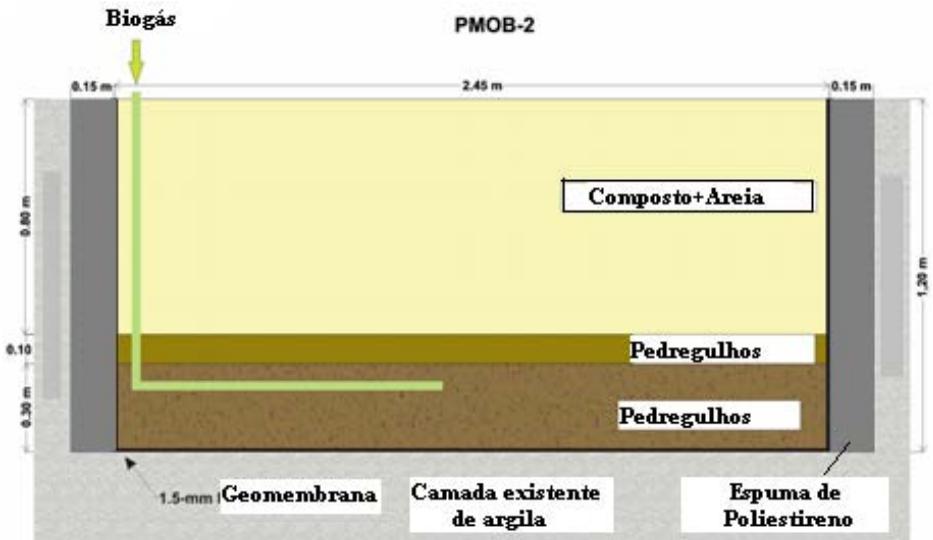


Figura 14 - Experimento de Cabral et al (2010).

6. RESULTADOS EM QUADROS-RESUMO

Aqui serão apresentados os quadros-resumo formulados a partir das referências já discorridas em itens anteriores para posterior discussão e análises dos mesmos. O primeiro quadro (Quadro 5.1) corresponde aos ensaios realizados *in situ* e o segundo (Quadro 5.2) aos ensaios feitos em colunas de laboratório.

6.1. Quadro-resumo dos ensaios *in situ*

O quadro-resumo apresentado neste item (Figura 15) traz informações colhidas de um total de oito trabalhos avaliados realizados em sete países diferentes, sendo dois deles no Canadá. Desses ensaios em escala de campo, foram levantadas as características dimensionais de cada sistema, tipo de substrato utilizado, modo de coleta de amostras, duração dos ensaios (tempo de monitoramento), parâmetros de monitoramento, observações específicas de cada experimento e finalmente a avaliação da oxidação máxima do metano.

Autor e ano	País	Ensaio <i>in situ</i>		Substratos	Coletas	Duração dos ensaios	pH	Temperatura	Porosidade	Umidade	Densidade	% CH ₄	Fluxo Biogás	Oxidação máxima			Observações
		Características	Altura											Substrato	CH ₄	Profundidade	
					cm			°C		%	g/cm ³		mol/m ² /d			cm	
EINOLA, 2008	Finlândia	Lisímetro	Altura = 3,9 m e Volume = 112 m ³	Resíduo MBT*	a cada 15	9 meses	-	de -29 a 28	-	-	-	-	1,02	-	> 96%	35 - 75	Janeiro/2006 apenas 0,48 - 0,68 L CH ₄ /m ² /d
HILGER e HUMER, 2003	Áustria	4 coberturas-teste de 25mx25m		Lodo de esgoto compostado com lascas de madeira e composto de RSU	Coberturas: 1) 0,4 m de substrato; 2) 0,3m sobre 0,3m de barro; 3) 0,9m sobre 0,3m de pedras e 4) 0,9m sobre 0,3m de pedras	1 ano	7,2	Verão e Inverno	-	-	-	50-70	35,71	3 e 4	100%	70-90	-
TEIXEIRA, 2009	Brasil	Câmara estática 10 cm x 60 cm acrílico		-	-	-	conhecido	-	-	-	-	-	-	90% em 2 de 3 aterros			Contagem do NMP de metanotróficas
STERN, 2006	EUA	3 células 7,6 m x 7,6 m no aterro		10 cm de cacos de vidro e 50 cm de compostagem de folhas	-	13 meses	-	25,7 ± 8,8	-	conhecida	-	-	13,62	Composto de folhas	100%	-	O solo antigo do aterro oxidou 14%
JUGNIA, 2008	Canadá	Parcelas de 2,75mx9,75m em um aterro sanitário		80cm de substrato composto areia (5/1) sobre 30cm de pedregulhos	4 pontos de coleta de substrato e 6 de coleta de gás	4 meses	7,0 a 7,3	de 2,3 a 22,7	-	de 51 a 64	-	55%	-	-	100%	20 - 30	Precipitação de 0 a 1,12 mm/dia
KALLISTOVA, 2005	Rússia	Área de 40 m x 40 m		De 30cm a 60cm Areia com argila e pequenas pedras	-	-	-	-	-	-	-	de 60% a 70%	de 0,002 a 18	-	166.2 µmol g solo/ADM/dia	20 - 40	Contagem de metanotróficas: 2.7E5 cel. g solo/ADM
GEBERT, 2003	Alemanha	Contêiner de 15m ³ , dividido em 2 câmaras de 6 e 9 m ³ , de polietileno, com 5 camadas		Camadas: pedregulhos, argila, pedregulho, areia e solo de cobertura	Entrada do gás de aterro a cada 20 cm	2 anos	-	30	-	18	solo de cobertura: 1,57 e argila: 0,35	-	-	-	35 a 109 g CH ₄ /h/m ³	-	Contagem de metanotróficas: máximo de 1.2E11 cel. g/dw
CABRAL, 2010	Canadá	Barreira passiva para oxidação do gás metano (PMOB) de 2,75 m x 9,75 m		80 cm de composto maduro e areia (5:1)	10 cm de pedregulho para distribuição dos gases	7 meses	-	Verão até o início do inverno	0,63	-	0,1	-	51,25	-	100%	60	Pesquisa interrompida com o início do inverno

(-): Dado inexistente ou não encontrado

Figura 15 - Quadro-resumo dos ensaios *in situ*

6.2. Quadro-resumo dos ensaios em coluna

O quadro-resumo apresentado a seguir (Figura 16) traz informações colhidas de sete pesquisas com ensaios desempenhados em laboratório, realizadas em cinco países diferentes – três delas no Canadá. Além dos itens também encontrados no Quadro-resumo dos ensaios *in situ*, a Figura 14 apresenta adicionalmente as características dos tubos utilizados nos ensaios, sendo elas: material, altura e diâmetro.

Autor e ano	País	Tubos			Substratos	Intervalo de medições	Duração dos ensaios	pH	Temperatura	Porosidade	Umidade	Densidade	% CH ₄	Fluxo Biogás	Fluxo ar	Oxidação máxima			Observações
		Material	Altura	Diâmetro												Substrato	CH ₄	Profundidade	
			m	cm		cm		°C	%	%	kg/m ³		mol/m ² /d	L/min		mol/m ² /d	cm		
KIGHTLEY, 1995	Reino Unido	PVC	1,00	15,00	Solo de areia grossa; solo argiloso superior; areia fina	a cada 10	6 meses	6,6; 6,4; 5,3	19±3	29; 19; 37	-	-	> 99	45,5	0,3	Areia grossa	10,4	-	-
DE VISSCHER, 1999	Bélgica	Plexiglass	0,60	14,10	Solo de agricultura; solo de cobertura de aterro	a cada 10	28 dias	6,2; 5,2	de 20 a 25	-	-	2521; 2532	50%	120,00	1	Aterro	18,1	20 - 30	-
PHILOPOULOS, 2009	Canadá	-	1,82	55,00	Composto de resíduos de jardim; Composto de areia <i>perlite</i>	a cada 20	218 dias	-	24,8 e 23,1	-	-	-	60%	22,30	0,4	-	100% ou 13,38	-	-
HUMER e LECHNER, 1999	Áustria	Acrílico	0,60	-	Composto de RSU, composto de lodo de esgoto, e misturas composto-areia e solo-composto	10, 30 e 50	50 dias	7,0 a 8,0	18	12,9 a 30	17,8 a 48,5	-	-	8,93 a 11,16	-	Composto de RSU, composto de lodo de esgoto	100%	-	-
WILSHUSEN, 2004	Canadá	Acrílico	1,00	13,97	Composto de folhas, de lascas de madeira, de jardim e de resíduos sólidos municipais	a cada 5	48 dias	-	-	-	-	conhecida	99%	32,50	-	Composto de folhas	25	20	O mesmo composto chegou a 31,25 mol/m ² .d depois de misturar, ao final de 530 dias
KETTUNEN, 2006	Finlândia	2 de PVC com Volume = 35 L			Solo 1: mistura de composto de lodo de esgoto, resíduos de tintas e areia; Solo 2: mistura de composto de lodo de esgoto, resíduo de tintas e lascas de madeira.	a cada 10 cm	65 dias	6,8 e 6,5	4 a 23	conhecida	conhecida	conhecida	100%	22,96	0,036 - 0,038	Solo 1	1,96	-	-
STEIN, 2001	Canadá	Plexiglass	0,80	-	Solo de aterro	a cada 10 cm	-	-	-	-	-	-	99%	20	0,3	-	25,70%	-	-

(-): Dados inexistentes ou não encontrados.

Figura 16 - Quadro-resumo dos ensaios em coluna

7. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Cada estudo abordado neste trabalho apresentou um método diferente, possuindo, portanto, características distintas um do outro, o que torna a comparação destes resultados uma tarefa desafiadora, já que o desenvolvimento de cada estudo não apresentou uma lógica de parâmetros linear, e sim dependentes de diversos fatores.

Aqui a discussão se dará separadamente, entre os resultados dos ensaios *in situ* (item 6.1.) e os resultados dos ensaios em coluna (item 6.2).

7.1. Discussão dos resultados dos ensaios *in situ*

A comparação dos ensaios praticados em campo é dificultada pelas diferenças dos parâmetros importantes para a tradução dos resultados, pois neste caso cada autor, em diferente local, praticou sua pesquisa em ambiente externo, exposta às variações de temperatura, umidade, correntes de ar e muitas vezes fluxo desconhecido de biogás (JUGNIA et al, 2008; GEBERT et al, 2003) proveniente da célula do aterro. Sendo assim, a partir do quadro-resumo apresentado no item 5.1, optou-se por priorizar os trabalhos de Einola et al (2008), Hilger e Humer (2003), Stern et al (2006) e Cabral et al (2010) por apresentarem um maior número de informações focando o fluxo de biogás e a oxidação do metano propriamente dita na camada de solo em estudo, e, assim, poder gerar a Tabela 1 e o Gráfico 1.

Tabela 1 - Comparação da máxima oxidação do biogás entre diferentes autores de trabalhos realizados *in situ*

<i>Comparação de resultados in situ entre diferentes autores</i>		
Autores	Fluxo biogás	Oxidação máxima
	(mol/m ² /d)	(mol/m ² /d)
Einola et al (2008)	1,02	0,98
Hilger e Humer (2003)	35,71	35,71
Stern et al (2006)	13,62	13,62
Cabral et al (2010)	51,25	51,25

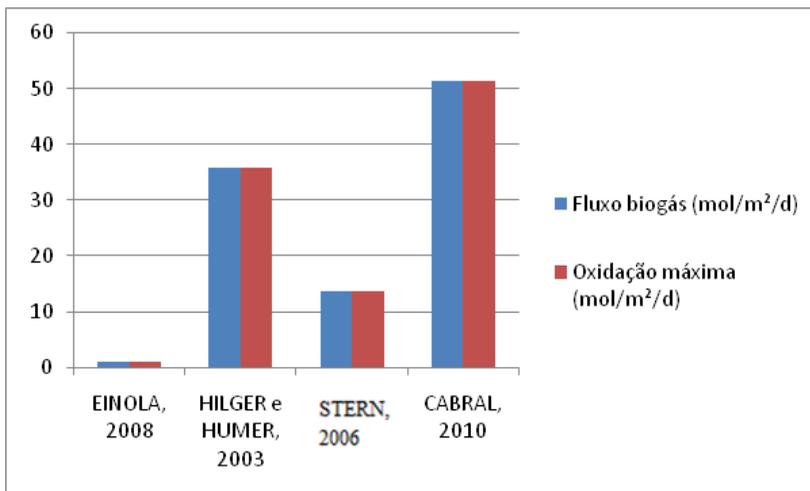


Gráfico 1 - Comparação da máxima oxidação do biogás entre diferentes autores de trabalhos realizados *in situ*

Os três últimos trabalhos alcançaram 100% de oxidação máxima, embora este resultado não signifique que não poderia ter sido de um nível ainda maior, e uma característica em comum dos três foi a utilização de uma camada-base para melhor distribuição do gás até chegar ao substrato. Uma forma de se alcançar uma taxa ainda maior de oxidação poderia ser o aumento do fluxo de entrada de biogás, que poderia se dar, por exemplo, em um aterro com uma maior porcentagem de resíduos orgânicos em seu interior, que é o caso dos aterros brasileiros.

Dentre os trabalhos citados acima, ganharam destaque em taxa máxima de oxidação os seguintes solos utilizados como substratos: composto maduro e areia, lodo de esgoto compostado com lascas de madeira e composto de RSU, composto de folhas e resíduo MBT.

É importante notar que Hilger e Humer (2003) obtiveram a máxima oxidação apenas em seus terceiro e quarto ensaios, onde foram adicionadas pedras como suporte da camada de substrato (composto de lodo de esgoto com lascas de madeira e composto de RSU), atuando como uma camada para acumular e distribuir o gás para o substrato. Seguindo a mesma linha, Stern (2006) utilizou como camada suporte 10 cm de cacos de vidro para um substrato de compostagem de folhas, e

Cabral et al (2010) utilizou 10 cm de pedras embaixo de uma camada de 80 cm de composto maduro e areia. O trabalho de Einola et al (2008) não contou com a camada suporte.

Também o trabalho de Hilger e Humer (2003) foi o que apresentou a máxima oxidação do metano em uma camada mais profunda que os demais. Tal profundidade é vantajosa, pois a oxidação pode ocorrer em condições mais estáveis de temperatura e umidade. O estudo ainda indicou que a área superficial e a profundidade do substrato sobre a célula do aterro ajudam a influenciar os efeitos da temperatura, teor de umidade e penetração do gás.

A vantagem dos trabalhos *in situ* em cima dos realizados em laboratório é contar com o ambiente físico natural, com suas verdadeiras variações, representando de forma mais autêntica o que aconteceria com o metano na camada superior de oxidação do aterro. No entanto, a interpretação desses resultados torna-se mais adversa, uma vez que está sujeita a essas variações.

7.2. Discussão dos resultados dos ensaios em coluna

Os resultados dos trabalhos com ensaios realizados em coluna apresentaram maior número de informações que foram proporcionadas de maneira mais controlada do que os ensaios realizados *in situ*. Dessa forma, a Tabela 2 e o Gráfico 2 proporcionam de forma generalizada uma comparação entre todos os estudos colocados no quadro-resumo do item 5.2.

Tabela 2 - Comparação da máxima oxidação do biogás entre diferentes autores de ensaios realizados em coluna

<i>Comparação de resultados em coluna entre diferentes autores</i>		
Autores	Fluxo biogás	Oxidação máxima
	(mol/m ² /d)	(mol/m ² /d)
Kightley et al (1995)	45,50	10,40
De Visscher et al (1999)	120,00	18,10
Philopoulos et al (2009)	22,30	22,30
Humer e Lechner (1999)	11,16	11,16
Wilshusen et al (2004)	32,50	25,00
Kettunen et al (2006)	22,96	1,96
Stein et al (2001)	20,00	5,14

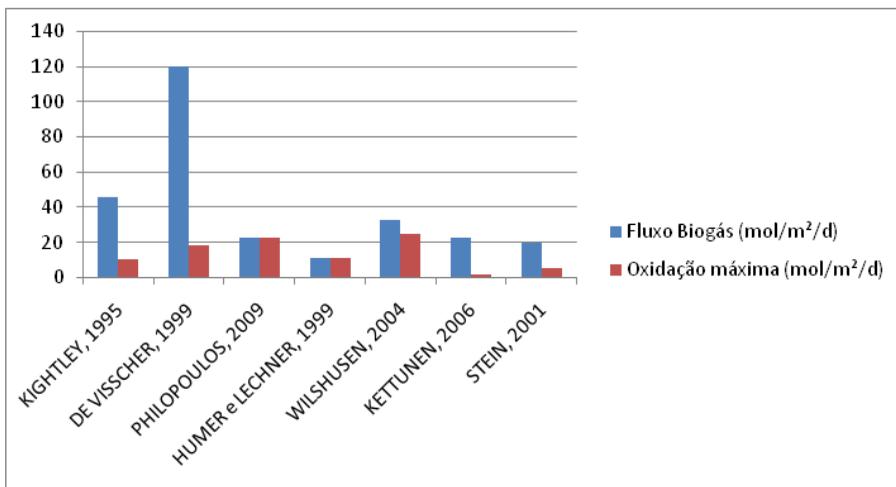


Gráfico 2 - Comparação da máxima oxidação do biogás entre diferentes autores de ensaios realizados em coluna

Tomando como base os dados expostos acima, é possível inferir que o trabalho de Wilshusen et al (2004) apresentou a máxima oxidação em questão, seguido pelos trabalhos de Philopoulos et al (2009) e de De Visscher et al (1999), respectivamente. No entanto, o trabalho de Philopoulos et al (2009) apresentou 100% de oxidação do fluxo de biogás inserido na coluna, o que indica que a sua oxidação máxima pode ser ainda maior, caso o fluxo de entrada seja aumentado. Vale ressaltar também que Wilshusen et al (2004) notaram que o mesmo composto de folhas que apresentou oxidação máxima de gás metano, após ser remediado, chegou a uma taxa máxima de 31,25 mol/m²/d ao final de 530 dias, com um aumento de 25% em relação à taxa anterior encontrada com apenas 48 dias de experimento.

Com relação aos solos de cobertura utilizados como matérias-primas nas pesquisas citadas acima, apresentaram melhores resultados, principalmente: o composto de folhas, o composto de resíduos de jardim e de areia *perlite* e o solo de cobertura de aterro.

É importante notar também que a maioria dos autores utilizou como substrato compostos de resíduos, bem como lascas de madeira e de tinta, o que representa uma reciclagem desses materiais caso seja comprovada a sua efetiva utilização como camada de oxidação biológica do metano. No caso dos trabalhos de Wilshusen et al (2004) e Philopoulos et al (2009), que apresentaram os resultados mais altos desta compa-

ração, foram utilizados substratos provenientes da compostagem, o que se eventualmente for trazido para uma escala maior como de um aterro sanitário apresentaria importância também no reaproveitamento de resíduos, os quais, ao invés de serem aterrados, seriam utilizados para a oxidação das emissões fugitivas de metano e consequentemente na diminuição dos gases causadores do efeito estufa.

8. SUGESTÕES DE PESQUISA

Como sugestão de trabalhos futuros, recomenda-se a aplicação dos métodos de um dos autores dos estudos *in situ* mencionados no item 6.1 em um aterro brasileiro, onde as condições meteorológicas bem como a composição dos RSU nos aterros diferem das dos países em que foram realizados os estudos (Finlândia, EUA, Canadá e Áustria).

No estudo *in situ* feito por Cabral et al (2010), os autores tiveram de interromper o trabalho no início do inverno canadense pois o aterro em questão ficaria fechado naquela estação, impossibilitando a continuidade da pesquisa. Neste caso, seria interessante dar continuidade ao trabalho de Cabral et al (2010) de modo a verificar qual de fato seria o fluxo máximo de biogás a ser oxidado nesta experiência *in situ*, utilizando o mesmo substrato em um período maior de tempo, onde incluísse o inverno canadense.

O trabalho de Philopoulos et al (2009) serve também de exemplo de recomendação de futuro trabalho, dado que, entre os ensaios em coluna aqui apresentados, este foi o único que alcançou a oxidação máxima de 100%, o que indica que esta poderá ser maior caso a experiência ganhe repetição com um fluxo de biogás aumentado.

Outra sugestão é aplicar o procedimento adotado por Wilshusen et al (2004) descrito no item 6.2, que aumentou em 25% a taxa máxima de oxidação em sua pesquisa, em outros trabalhos, como, por exemplo, nas pesquisas de Kightley et al (1995) e de De Visscher et al (1999), onde a oxidação máxima alcançada pode ser otimizada.

Além de estudos técnicos, seria interessante a aplicação desses em uma estimativa da viabilidade econômica, onde os custos referentes ao substrato escolhido e à sua implantação no aterro seriam avaliados.

9. CONCLUSÃO

Este trabalho trouxe uma reunião de estudos importantes no segmento de camada de cobertura de aterro para oxidação do metano, apresentou seus resultados e buscou discutir a respeito, para, finalmente, apresentar algumas sugestões de pesquisas que possam despertar o interesse de órgãos, instituições e pesquisadores na busca de um substrato ideal que venha a evitar o lançamento de emissões fugitivas de metano através de aterros sanitários.

Como substratos destacaram-se a partir deste trabalho os solos provenientes de compostagem, como o composto de folhas e de RSU, ou de resíduos de jardim, os quais podem apresentar um ambiente mais propício para a proliferação dos microorganismos metanotróficos.

Foi enfatizada também a importância da adição da camada suporte, podendo esta ser pedregulhos ou mesmo cacos de vidro, que vão auxiliar na acumulação e distribuição do biogás pelo substrato. Além disso, a configuração da cobertura, as propriedades do substrato e as condições meteorológicas locais devem ser consideradas na concepção de uma camada superior de aterro sanitário.

Ficou claro que estes estudos devem prosseguir, de maneira a formular projetos futuros para os aterros brasileiros, e, além de evitarem essas emissões fugitivas, consigam reaproveitar resíduos como RSU, lodo, folhagens, cacos de vidro e de madeira, entre outros materiais, na forma de substrato para biorrecobrimento de aterro, evitando assim a agravação do aquecimento global.

10. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABICHOU, T; CHANTON, J., POWELSON, D. (2006). Field Performance of Biocells, Biocovers, and Biofilters to Mitigate Greenhouse Gas Emissions from Landfills. **Florida Center for Solid and Hazardous Waste Management**. University of Florida. Março, 2006.

ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas). **Apresentação de projetos de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos - NBR 8419**. São Paulo: ABNT, 1984.

BAHIA. **Secretaria do Planejamento, Ciência e Tecnologia. Manual de Operação de Aterros Sanitários**. Disponível em: <http://www.conder.ba.gov.br/manual_aterro.pdf>. Acesso em: 6 nov. 2010.

BAHR, T.; FRICKE, K.; HILLEBRECHT, K.; KÖLSCH, F.; REINHARD, B. **Clean development mechanism - tratamento de resíduos sólidos e oxidação de gás metano para minimização de emissões**. Disponível em: <<http://www.resol.com.br/trabtec3.asp?id=1589>>. Acesso em: 15 set. 2010.

BOGNER, J.; SPOKA, K.; CHANTON, J.; POWELSON, D.; FLEIGER, J.; ABICHOU, T. (2005). Modeling Landfill Methane Emissions From Biocovers: A Combined Theoretical-Empirical. **Tenth International Waste Management and Landfill Symposium**. S. Margherita di Pula, Sardinia, Itália.

BOHN, S.; JAGER, J. (2009). Microbial Methane Oxidation in Landfill Top Covers – Process Study on an MBT Landfill. **Twelfth Intern. Waste Manag. And Landfill Symposium**. Cagliari, Itália.

BRASIL. **Política Nacional dos Resíduos Sólidos**. Lei N° 12.305, de 2 de agosto de 2010. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Brasília, DF, 2010. p. 3.

CABRAL, A. R., MOREIRA, J. F. V., JUGNIA, L.-B. (2010). “Biocover Performance of Landfill Methane Oxidation: Experimental Results”. **Journal of Env. Eng.**, v.136, n.8, p.785-793.

CABRAL, A. R.; MOREIRA, J. F.; ASKRI, M. A.; SANTOS, A. K.; JUGNIA, L. B. (2008). Engineering landfill covers for methane oxidation: lessons learned. **5th International Landfill Research Symposium**. Colorado, EUA.

CHANTON, J.P.; POWELSON, D.K.; GREEN, R.B. Methane Oxidation in Landfill Cover Soils, is a 10% default value reasonable? **Journal of Environmental Quality**, v. 38, p. 654-663, 2009.

EINOLA, J. K. M., KARHU, A. E. e RINTALA, J. A. (2008). “Mechanically-Biologically Treated Municipal Solid Waste as a Support Medium for Microbial Methane Oxidation to Mitigate Landfill Greenhouse Emissions”. **Waste Manag.**, v.28, p.97-111.

ENGEPO. Manual de Geossintéticos. 3^a ed. Disponível em: <<http://www.engepol.com/resources/pdf/geossintetico-cap2.pdf>>. Acesso em: 05 Jul. 2011.

EUROPEAN COMMUNITIES (2005). **Waste generated and treated in Europe**. Relatório. ISBN 92-894-9996-6. Disponível em: <<http://epp.eurostat.ec.europa.eu>>. Acesso em: 18 out. 2010.

GEBERT, J.; GROENGROEFT, A. e MIEHLICH, G. (2003). “Kinetics of Microbial Landfill Methane Oxidation in Biofilters”. **Waste Manag.**, v.23, p.609-619.

GEBERT, J.; RÖWER, I.U.; SCHARFF, H.; RONCATO, C.D.L.; CABRAL, A.R. (2010). “Can soil gas profiles be used to assess microbial CH₄ oxidation in landfill covers?”. **Waste Manag.** N. 29, Issue 6.

GIL, A.C. **Métodos e técnicas de pesquisa social**. São Paulo: Atlas, 1999.

GUEDES, V. P. (2007). **Estudo do Fluxo de Gases Através do Solo de Cobertura de Aterro de Resíduos Sólidos Urbanos**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Civil. Rio de Janeiro, 2007.

HILGER, H.; HUBER-HUMER, M. (2003). "Biotic landfill Cover Treatments for Mitigating Methane Emissions". **Environ. Monit. Assess.**, v.84, p.71-84.

HUBER-HUMER, M.; LECHNER, P. (1999). "Alternative Approach to the Elimination of Greenhouse Gases from Old Landfills". **Waste Manag. Res.**, v.17, p.443-452.

INTERGOVERNAMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change**. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.

JONES, H. A.; NEDWELL, D. B. (1993). Methane Emission and Methane Oxidation in land-fill cover soil. **FEMS Microbiology Letters**, v. 102, issues 3-4, p. 185-195.

JUGNIA, L.-B., CABRAL, A. R., GREER, C.W. (2008). "Biotic Methane Oxidation Within an Instrumented Experimental Landfill Cover". **Ecological Engineering**, v.33, p.102-109.

KALLISTOVA, A. Y. U., KEVBRIN, M. V., NEKRASOVA, V. K., GLGOLEV, M. V., SEREBRYANAYA, M. I. e NOZHEVNIKOVA, A. N. (2005). "Methane Oxidation in Landfill Cover Soil". **Microbiol. Rev.**, v.74, n.5, p.608-614.

KETTUNEN, R., EINOLA, J. K. M. e RINTALA, J. (2006). "Landfill Methane Oxidation in Engineered Soil Columns at Low Temperature". **Water Air Soil Pollution**, v.177, n.1-4, p.313-334.

KIGHTLEY, D., NEDWELL, D. B.; COOPER, M. (1995). "Capacity for Methane Oxidation in Landfill Cover Soils Measured in Laboratory-Scale Soil Microcosms". **App. Environ. Microbiol.**, v. 61, p.592-601.

LIXO. **Lixão x Aterro**. Disponível em:

<http://www.lixo.com.br/index.php?option=com_content&task=view&id=144&Itemid=251>. Acesso em: 6 nov. 2010.

PARK, J. K.; MOON, S.; AHN, Y. M.; KIM, J. Y; NAM, K. (2005). Determination of environmental factors influencing methane oxidation in a sandy landfill cover soil. **Environ. Technol.**, v. 26, p. 93-102.

PHILOPOULOS, A., RUCK, J., MCCARTNEY, D., FELSKÉ, C. (2009). "A Laboratory-Scale Comparison Of Compost And Sand--Compost--Perlite As Methane-Oxidizing Biofilter Media". **Waste Manag.**, v.27, p.138-146

RONCATO, C. D. L. (2007). **Taxas de oxidação de metano em colunas experimentais de solo simulando aterros sanitários**. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal de Santa Catarina, Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental. Florianópolis, 2007.

ROSE, J. L. (2009). **Análise comparativa entre as reduções da emissão de metano em camadas oxidativas experimentais**. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Civil. Rio de Janeiro, 2009.

STEIN, V. B. AND J. P. A. HETTIARATCHI. (2001). "Methane Oxidation in Three Alberta Soils: Influence Of Soil Parameters And Methane Flux Rates". **Environ. Technol.**, v.22, p.101-111.

STERN, J. C., CHANTON, J., ABICHOU, T., POWELSON, D., YUAN, L., ESCORIZA, S., BOGNER, J. (2006). "Use of a Biologically Active Cover To Reduce Landfill Methane Emissions And Enhance Methane Oxidation". **Waste Manag.**, v.27, p.1248-1258.

TANTHACHOON, N.; CHIEMCHAI SRI, C.; CHIEMCHAI SRI, W. (2007). Alternative Approach for Encouraging Methane Oxidation in Compost Based Landfill Cover Layer with Vegetation. Proc. of the Intern. **Conf. on Sustainable Solid Waste Manag.**, pp. 202-209. Chennai, Índia.

TEIXEIRA, C. E., TORVES, J. C., FINOTTI, A. R., FEDRIZZI, F., MARINHO, F. A. M., TEIXEIRA, P. F. (2009). "Estudos Sobre A Oxidação Aeróbia do Metano na Cobertura de Três Aterros Sanitários no Brasil". **Eng. Sanit. Amb.**, v.14, n.1, p.99-108.

US ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. Methane. Disponível em: <<http://www.epa.gov/outreach/index.html>>. Acesso em: 17 set. 2010.

VALORSUL (2011). **Sistema de drenagem e queima de biogás**. Disponível em: <<http://www.valorsul.com/pt/deposicao-em-aterro/asmc/sistema-drenagem-e-queima-biogas.aspx>>. Acesso em: 07 mai. 2011.

VENUGOPAL, S.; CHANDRAKANTHI, M.; HETTIARATCHI, P. **Treating Methane (CH₄) Emissions From Oil And Gas Industry**. Disponível em: <<http://www.coalinfo.net.cn/coalbed/meeting/2203/papers/naturalgas/NG023.pdf>>. Acesso em: 16 nov. 2010.

WILSHUSEN, J. H., HETTIARATCHI, J. P. A. e STEIN, V. B. (2004). “Long-term Behavior Of Passively Aerated Compost Methanotrophic Biofilter Columns”. **Waste Management**, v.24, n.7, p.643-653.

ANEXOS

ANEXO A

Equivalências:

- Fluxo de metano: $\text{Mol/m}^2/\text{d} \rightarrow \text{L/m}^2/\text{d} \rightarrow \text{g/m}^2/\text{d}$

$$1 \text{ mol CH}_4 \rightarrow 22,4 \text{ Litros} \rightarrow 16 \text{ g}$$

- $\text{Mol/min} \rightarrow \text{L/min}$

$$1 \text{ mol CH}_4 \rightarrow 22,4 \text{ L}$$

- $1 \text{ kg/m}^3 \rightarrow 0,001 \text{ g/cm}^3$