

**PROPOSTA DE METODOLOGIA PARA A ELABORAÇÃO DE
PROJETOS DE ATERROS SANITÁRIOS CELULARES**

CLAYTON REZENDE NUNES

ORIENTADOR: PROF. DR. LUIZ MÁRIO QUEIROZ LIMA

Dissertação apresentada à Faculdade de
Engenharia Civil, da Universidade Estadual de
Campinas, para obtenção do título de Mestre
em Hidráulica e Saneamento

Atento que esta é a versão final

47/13/03/94

Campinas
Estado de São Paulo
Junho, 1994



À minha esposa
Cássia e aos meus
filhos Igor e Yuri

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Luiz Mário Queiroz Lima, pela orientação e pela amizade demonstrada.

Aos colegas de trabalho, Edmundo, Luiz Otávio, Sérgio, Mário e Ricardo, pela contribuição dada a este trabalho.

SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS.....	vi
LISTA DE QUADROS.....	vii
LISTA DE FIGURAS.....	viii
RESUMO.....	x
ABSTRACT.....	xi
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. OBJETIVOS.....	6
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	7
3.1. DEFINIÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS.....	7
3.2. EVOLUÇÃO DOS MODELOS DE TRATAMENTO DE RESÍDUOS.....	8
3.2.1. VISÃO TRADICIONAL.....	9
3.2.2. VISÃO "ECOLÓGICA".....	10
3.2.3. VISÃO INOVATIVA.....	10
3.3. PROCESSO DE GERAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS.....	11
3.3.1. FATORES QUE INFLUENCIAM A GERAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS.....	13
3.3.2. CARACTERIZAÇÃO DOS RESÍDUOS SÓLIDOS.....	14
3.3.2.1. AMOSTRAGEM.....	15
3.3.2.2. CARACTERIZAÇÃO.....	15
3.4. TÉCNICAS DE ATERRAMENTO DE RESÍDUOS SÓLIDOS.....	18
3.4.1. ATERRO CONTROLADO.....	18
3.4.2. ATERRO SANITÁRIO.....	20
3.4.3. ATERRO CELULAR.....	22
3.5 - DIGESTÃO ANAERÓBIA.....	24
3.5.1 - ORGANISMOS QUE ATUAM NO PROCESSO.....	32
3.5.2. VARIÁVEIS QUE INFLUEM NO PROCESSO.....	33
3.5.2.1. OXIGÊNIO.....	34
3.5.2.2. PH.....	35
3.5.2.3. ALCALINIDADE.....	36
3.5.2.4. ÁCIDOS VOLÁTEIS.....	36
3.5.2.5. POTENCIAL REDOX.....	37
3.5.2.6. TEMPERATURA.....	38
3.5.2.7. NUTRIENTES.....	39
3.5.2.8. SUBSTÂNCIAS INIBIDORAS.....	40
3.5.3. RECIRCULAÇÃO DO CHORUME COMO MECANISMO DE ACELERAÇÃO E INIBIÇÃO.....	42

3.5.4. PRODUÇÃO DE GÁS	43
3.5.5. PRODUÇÃO DE LÍQUIDOS	46
3.6. MECANISMOS DE ATENUAÇÃO	51
3.7. COMPACTAÇÃO	54
3.8. ESTABILIDADE DE TALUDES	55
3.9. DRENAGEM DE ÁGUAS PLUVIAIS	59
3.10. IMPERMEABILIZAÇÃO	61
3.11. IMPACTOS AMBIENTAIS	63
4. METODOLOGIA	70
5 - RESULTADOS	72
5.1 - ESTUDOS PRELIMINARES	72
5.1.1 - ELABORAÇÃO DO DIAGNÓSTICO DA SITUAÇÃO ATUAL	73
5.1.2 - ESCOLHA DE ÁREA	73
5.1.3 - MODELO TECNOLÓGICO	74
5.1.4 - LEVANTAMENTO TOPOGRÁFICO	79
5.1.5 - CARACTERIZAÇÃO HIDROGEOLÓGICA E GEOTÉCNICA	80
5.1.6 - CLIMATOLOGIA	80
5.1.7 - ESTUDOS DEMOGRÁFICOS	81
5.1.8 - CARACTERIZAÇÃO DOS RESÍDUOS	82
5.1.9 - ESTUDO PRELIMINAR DE IMPACTOS AMBIENTAIS	83
5.1.9.1 - ATIVIDADES POTENCIALMENTE CAUSADORAS DE IMPACTOS	83
5.1.9.1.1 - MEIO FÍSICO	84
a) ETAPA DE IMPLANTAÇÃO	84
b) ETAPA DE OPERAÇÃO	84
c) ETAPA DE DESATIVAÇÃO	84
5.1.9.1.2 - MEIO BIOLÓGICO	85
a) ETAPA DE IMPLANTAÇÃO	85
b) ETAPA DE OPERAÇÃO	85
c) ETAPA DE DESATIVAÇÃO	86
5.1.9.1.3 - MEIO ANTROPICO	86
a) ETAPA DE PLANEJAMENTO	86
b) ETAPA DE IMPLANTAÇÃO	86
c) ETAPA DE OPERAÇÃO	86
d) ETAPA DE DESATIVAÇÃO	87
5.1.9.2 - DESCRIÇÃO DOS IMPACTOS AMBIENTAIS	87
5.1.9.2.1 - PREPARO DO TERRENO	87
a) MEDIDAS MITIGADORAS	88
5.1.9.2.2 - MOVIMENTAÇÃO DE MÁQUINAS E VEÍCULOS	88
a) MEDIDAS MITIGADORAS	89
5.1.9.2.3 - MOVIMENTAÇÃO DE TERRA	89
a) MEDIDAS MITIGADORAS	89
5.1.9.2.4 - CONSTRUÇÃO E ASSENTAMENTO DAS ESTRUTURAS FIXAS	90
a) MEDIDAS MITIGADORAS	90
5.1.9.2.5 - EMISSÃO DE RUÍDOS	91
a) MEDIDAS MITIGADORAS	91
5.1.9.2.6 - ATERRAMENTO DE RESÍDUOS	91
a) MEDIDAS MITIGADORAS	92
5.1.9.2.7 - COLETA E TRATAMENTO DOS LÍQUIDOS PERCOLADOS	92
5.1.9.2.8 - DESCARTE DE EFLUENTES TRATADOS	93
a) MEDIDAS MITIGADORAS	93

5.1.9.2.9 - EMISSÃO DE GASES	93
a) MEDIDAS MITIGADORAS	94
5.2 - PROJETO BÁSICO	94
5.2.1 - MOVIMENTAÇÃO DE TERRA	95
5.2.3 - TRATAMENTO PRIMÁRIO	96
5.2.3.1 - TRATAMENTO PRIMÁRIO DE SÓLIDOS	96
5.2.3.2 - TRATAMENTO PRIMÁRIO DOS LÍQUIDOS	98
5.2.3.3 - TRATAMENTO PRIMÁRIO DE GASES	100
5.2.4 - TRATAMENTO SECUNDÁRIO	102
5.2.4.1 - TRATAMENTO SECUNDÁRIO DE SÓLIDOS	102
5.2.4.2 - TRATAMENTO SECUNDÁRIO DE LÍQUIDOS	104
5.2.4.3 - TRATAMENTO SECUNDÁRIO DE GASES	105
5.2.5 - TRATAMENTO TERCÍARIO	105
5.2.5.1 - TRATAMENTO TERCÍARIO DOS SÓLIDOS	108
5.2.5.2 - TRATAMENTO TERCÍARIO DOS LÍQUIDOS	108
5.2.5.3 - TRATAMENTO TERCÍARIO DOS GASES	108
5.2.4 - DRENAGEM DE ÁGUAS PLUVIAIS	109
5.2.5 - ESTABILIDADE DE TALUDES	111
5.3 - PROJETO EXECUTIVO	115
5.3.1 - ESPECIFICAÇÕES DE MATERIAIS, SERVIÇOS E MÃO- DE-OBRA	115
5.3.2 - MANUAL DE OPERAÇÃO	115
5.3.3 - PLANO DE MONITORAMENTO	116
5.3.3.1 - MONITORAMENTO DOS RECURSOS NATURAIS	116
5.3.3.2 - MONITORAMENTO DO PROCESSO DE OPERAÇÃO	117
5.3.3.3 - METODOLOGIA	117
5.3.4 - MEMÓRIA DE CÁLCULO	117
5.3.5 - ORÇAMENTO	118
6 - DISCUSSÃO	119
6.1 - ESTUDOS PRELIMINARES	119
6.2 - PROJETO BÁSICO	121
6.3 - PROJETO EXECUTIVO	123
7 - CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	124
8 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	126

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - GRUPOS FISIOLÓGICOS DE MICRORGANISMOS ENVOLVIDOS NOS PROCESSOS DE DEGRADAÇÃO ANAERÓBIA EM ATERROS SANITÁRIOS.....	33
TABELA 2 - TEMPERATURAS NA BIODIGESTÃO.....	39
TABELA 3 - EFEITOS DOS METAIS PESADOS NA DIGESTÃO ANAERÓBIA	41
TABELA 4 - CLASSIFICAÇÃO QUANTO À BIODEGRADABILIDADE E O TEMPO DE DEGRADAÇÃO	44
TABELA 5 - PRINCIPAIS MECANISMOS DE ESTABILIZAÇÃO DE CONSTITUINTES DO CHORUME.....	53
TABELA 6 - RESUMO DE PARÂMETROS DE RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO.....	57
TABELA 7 - PLANILHA DE CÁLCULO DO VOLUME DO MOVIMENTO DE TERRA.....	95
TABELA 8 - PLANILHA DE CÁLCULO DA TAXA DE PRODUÇÃO DE METANO PARA O RESÍDUOS FACILMENTE DEGRADÁVEIS	101

LISTA DE QUADROS

QUADRO 1 - PROPRIEDADES GEOMECÂNICAS DA CAMADA DE REVESTIMENTO DE FUNDO	62
QUADRO 2 - SÍNTESE E COMPARAÇÃO DOS PRINCIPAIS TIPO DE MÉTODOS DE AVALIAÇÃO DE IMPACTO AMBIENTAL (AIA)	65
QUADRO 3 - CLASSIFICAÇÃO DOS RESÍDUOS DOS SERVIÇOS DE SAÚDE	75
QUADRO 4 - CUSTOS DE UM ATERRO SANITÁRIO CELULAR	118

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - ESQUEMA DO SISTEMA INTEGRADO DO GERENCIAMENTO DE RESÍDUOS SÓLIDOS.....	3
FIGURA 2 - ESTÁGIOS DE TRANSIÇÃO PARA O GERENCIAMENTO DE RESÍDUOS SÓLIDOS - DO PRESENTE PARA O FUTURO	4
FIGURA 3 - MODELO DE PRODUÇÃO E CONSUMO.....	12
FIGURA 4 - ROTAS DE TRANSFORMAÇÃO DE BIOMASSA.....	24
FIGURA 5 - FASE DE ESTABILIZAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS DISPOSTOS EM ATERROS, SEGUNDO POHLAND E HARPER	26
FIGURA 6 - FASES DE ESTABILIZAÇÃO, SEGUNDO REES.....	28
FIGURA 7 - SUBSTRATOS E GRUPOS DE BACTÉRIAS ENVOLVIDOS NO ECOSSISTEMA DE GERAÇÃO DO METANO	29
FIGURA 8 - DESENVOLVIMENTO NA COMPOSIÇÃO DE GÁS E CHORUME EM UMA CÉLULA DE ATERRO (BASEADO EM FARQUHAR E ROVERS, 1973).....	30
FIGURA 9 - ESQUEMA GERAL PARA AS REAÇÕES DO CARBONO E SULFATO EM UM ATERRO SANITÁRIO	32
FIGURA 10 - PRINCIPAIS FATORES ABIÓTICOS QUE AFETAM O ECOSSISTEMA DE GERAÇÃO DO METANO	35
FIGURA 11 - COMPORTAMENTO DO <i>BACILLUS SUBTILIS</i> EM FUNÇÃO DO POTENCIAL REDOX	38
FIGURA 12 - COMPORTAMENTO DO <i>CLOSTRIDIUM PARAPUTRIFICUM</i> EM FUNÇÃO DO POTENCIAL DE OXIDAÇÃO-REDUÇÃO	39
FIGURA 13 - DISTRIBUIÇÃO DOS FATORES DE PRODUÇÃO DE GÁS	45
FIGURA 14 - MODELO DE PERCOLAÇÃO DE LÍQUIDOS EM UM ATERRO DE RESÍDUOS	48
FIGURA 15 - ESQUEMA DO BALANÇO HIDROLÓGICO GERAL EM UM ATERRO SANITÁRIO COM SISTEMA DE DRENAGEM	50
FIGURA 16 - CURVA DE UMIDADE X COMPACTAÇÃO - SEGUNDO BUIVID	55
FIGURA 17 - MODELO PROPOSTO - SEM SEGREGAÇÃO NA ORIGEM.....	78
FIGURA 18 - MODELO PROPOSTO - COM SEGREGAÇÃO NA ORIGEM	79
FIGURA 19 - TRATAMENTO PRIMÁRIO - SEÇÃO TÍPICA DA CÉLULA DE ATERRAMENTO.....	98
FIGURA 20 - MODELO PARA O CÁLCULO DO VOLUME DE LÍQUIDOS	100
FIGURA 21 - TRATAMENTO SECUNDÁRIO	104
FIGURA 22 - TRATAMENTO TERCIÁRIO - PRIMEIRO ESTÁGIO	107

FIGURA 23 - TRATAMENTO TERCIÁRIO - SEGUNDO ESTÁGIO	108
FIGURA 24 - ESQUEMA DA SUPERFÍCIE DE RUPTURA CIRCULAR EM UM ATERRO SANITÁRIO	114
FIGURA 25 - MODELO DA CÁLCULO PARA A ESTABILIDADE DE TALUDES.....	115

RESUMO

Este trabalho consiste em uma revisão da técnica de aterramento de resíduos sólidos, como parte de um sistema integrado de tratamento de resíduos sólidos.

Dentro desta nova concepção, este trabalho propõe uma metodologia para a elaboração de projetos de aterros sanitários celulares, ou seja, método de tratamento de resíduos com possibilidade de perenização do espaço físico.

A estrutura básica deste trabalho consiste na análise crítica das normas técnicas referentes a resíduos sólidos e à apresentação de proposta de projetos de aterros, da revisão bibliográfica, destacando o processo de degradação anaeróbia de resíduos e os elementos que compõem um projeto de aterro.

A metodologia proposta procura aprimorar os procedimentos adotados atualmente, principalmente, no sentido de não permitir que o aterro sanitário seja enfocado como uma técnica de confinamento de resíduos. São recomendadas modificações na forma concepção do projeto e, também, são destacados, temas que merecem uma maior atenção nas pesquisas relativas ao tratamento de resíduos.

ABSTRACT

This text consists in a review of the solid waste cellular landfill techniques, as a part of an integrated solid waste treatment system.

Within this new conception, it suggests new ways for the development of cellular landfill projects, i. e., new methods for treating wastes along with the possibility of the perennial use of the site.

This work consists, basically, in the critical analysis of the standards related to solid waste management and to the development of cellular landfill projects, the bibliographic revision, detailing the process of the anaerobic waste degradation as well as the elements that take part in the project.

The objectives of the proposed methodology are to make the procedures which are better used nowadays, so that the landfill cannot be considered a waste isolation technique. According to this text, modifications are recommended to topics related to these procedures and to the research related to the landfilling of solid wastes.

1. INTRODUÇÃO

A questão dos resíduos sólidos é, atualmente, um dos maiores problemas que os centros urbanos têm enfrentado, devido à quantidade gerada sempre crescente, à escassez de áreas para o seu tratamento e, principalmente, aos efeitos ambientais, sociais e na saúde pública, provocados pela forma inadequada com que resíduos são manejados.

Entre as várias técnicas aplicadas para o tratamento e disposição final, o aterramento do lixo é uma das mais antigas, pois a sua utilização está diretamente ligada ao surgimento dos primeiros núcleos urbanos. As primeiras cidades tinham como objetivo básico o afastamento do lixo das áreas habitadas e o seu confinamento, ou seja, o seu recobrimento com terra, minimizando assim, alguns dos efeitos adversos, como o odor e a atração de vetores.

A técnica de aterramento de lixo ainda é bastante utilizada atualmente, sendo que, foram acrescentadas medidas para evitar a contaminação do lençol freático, para controlar a compactação dos resíduos, entre outras. Mas, a concepção dada a esta técnica, de acordo com as definições da ABNT e órgãos de controle ambiental é a mesma, ou seja, confinamento de resíduos.

Devido à sua heterogeneidade, os resíduos sólidos são um problema cuja solução, dificilmente, poderá ser através de uma única técnica de tratamento. Em função desta característica, surgiram correntes de

pensamento, que formulam modelos, que visam à solução deste problema. LIMA (49), descreve como três, as principais correntes de pensamento, que procuram formular modelos para a questão dos resíduos: a tradicional, que enfoca a coleta e destinação final dos resíduos como solução, sem se preocupar com o processo de geração; a "ecológica", que tem uma preocupação intensa com os processos de reciclagem dos resíduos, não considerando tratamento e disposição; e, finalmente, a inovativa, que une as duas anteriores, mas de forma mais evoluída, pois se preocupa com o tratamento e recuperação de áreas degradadas por resíduos, e quanto aos processos de geração preconizam uma "sistematização" dos mesmos, de forma a reduzir a frequência da coleta e possibilitar que esta ocorra de forma diferenciada. Dentro desta última corrente de pensamento estão incluídos os sistemas integrados.

COSSU (35) afirma que os países industrializados têm enfrentado o problema com uma estratégia, onde prevalece a redução dos impactos ambientais, a recuperação da matéria prima através da reciclagem e a redução da quantidade dos resíduos gerados. Esta estratégia de ação é denominada de Sistema Integrado de Gerenciamento de Resíduos Sólidos, conforme é mostrado na figura 1. Conforme o mesmo autor, o aterro sanitário permanece como uma das técnicas deste sistema e, apresenta na figura 2, os estágios de evolução do gerenciamento de resíduos.

LOUWMAN (52) diz que não pode existir nenhum sistema integrado de tratamento sem um sistema correto de aterros.

LIMA (51) define o sistema integrado de tratamento de resíduos como um dispositivo tecnológico concebido com a finalidade de tratar os resíduos de forma sistêmica, onde as trocas de energia e matéria com o meio ambiente sejam processadas de forma harmônica e em níveis que não comprometam as características e propriedades naturais do solo, ar e recursos hídricos.

BAETZ e ONYSKO (13) comentam que os aterros sanitários têm sido utilizados como locais de disposição final de resíduos sólidos, gerados em setores residenciais, comerciais e industriais. Na última década, entretanto, o seu potencial como bioreator para o tratamento e estabilização dos resíduos sólidos tem sido reconhecida.

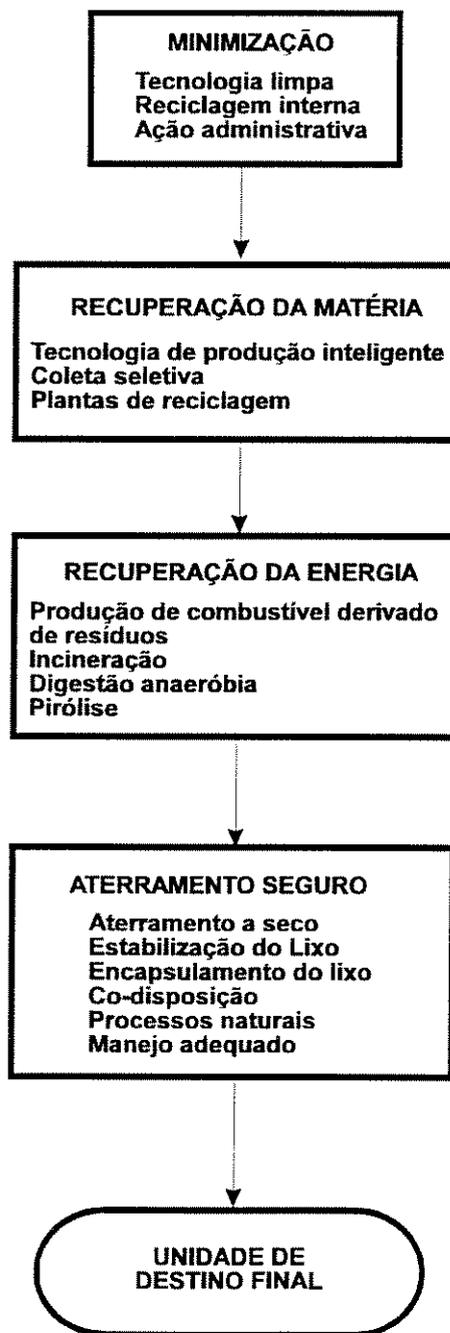


Figura 1. Esquema do Sistema Integrado do Gerenciamento de Resíduos Sólidos. Fonte: COSSU (35)

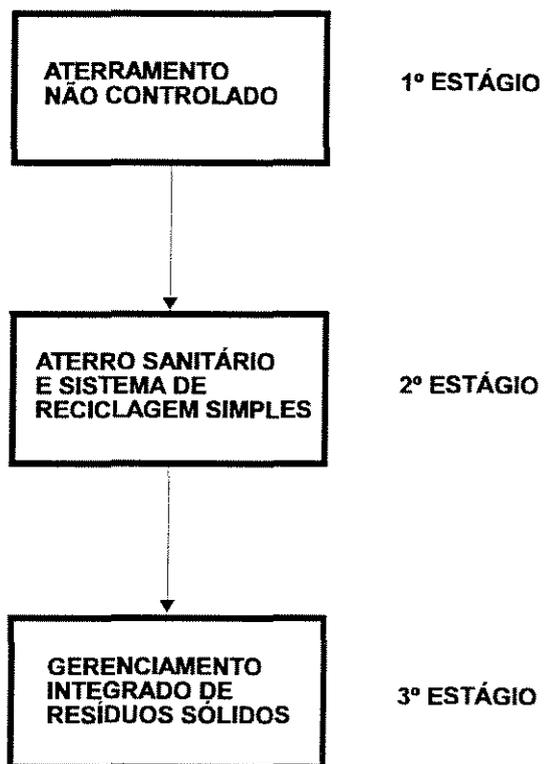


Figura 2 - Estágios de transição para o gerenciamento de resíduos sólidos do presente para o futuro. Fonte: COSSU(35)

Considerando o aterro sanitário como uma unidade que compõe o sistema integrado de tratamento de resíduos sólidos, este trabalho propõe uma revisão no estado-da-arte desta técnica, de forma a compatibilizá-la, com este novo enfoque.

Desta forma, a intenção é a modificação no conceito básico, quanto ao objetivo de um aterro, ou seja, esta unidade deixa de ser considerada como local de confinamento de resíduos e passa a unidade tratamento

2. OBJETIVOS

Analisar de forma crítica os procedimentos atuais adotados para elaboração de projetos de aterros sanitários.

Propor uma metodologia para a elaboração de projetos de aterros sanitários celulares.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

De forma a fundamentar este trabalho, a revisão bibliográfica aborda os tópicos que possibilitam a visualização da técnica de aterramento de resíduos, inserida no sistema integrado de tratamento de resíduos. É dado destaque ao processo de degradação dos resíduos e aos elementos que compõem um projeto de aterro sanitário.

3.1. DEFINIÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS

Resíduo sólido urbano, ou lixo urbano, é "todo e qualquer resíduo que resulte das atividades diárias do homem na sociedade. Estes resíduos compõem-se basicamente de sobras de alimentos, papéis, papelões, plásticos, poeiras, trapos, couros, madeiras, latas, vidros, lamas, gases, vapores, sabões, detergentes e outras substâncias descartadas pelo homem no meio ambiente." LIMA (47)

A ABNT (4) define resíduo sólido como sendo os "resíduos nos estados sólidos e semi-sólidos, que resultam da comunidade de origem: industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e varrição. Ficam incluídos nesta definição os lodos provenientes de sistema de tratamento de água, aqueles gerados em equipamentos e instalações de controle de poluição, bem como determinados líquidos cujas particularidades

tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou corpos d'água, ou exijam para isso soluções técnicas e economicamente inviáveis em face à melhor tecnologia disponível.”

TEIXEIRA, NUNES e OLIVEIRA (68) consideram a definição de resíduos sólidos da ABNT muito ampla e, ao incluir resíduos no estado líquido, comete um equívoco, pois fisicamente não se pode definir líquido como sólido. E, se a intenção é indicar o mesmo tratamento para o resíduo no estado líquido, isto deveria ser especificado fora da definição.

Os problemas que podem ser gerados a partir da definição da ABNT, refletem no armazenamento, transporte, tratamento e/ou disposição final dos resíduos sólidos. No caso de aterros sanitários, os resíduos com elevado teor de umidade dificultam a compactação, a cobertura diária e final do lixo e, podem representar uma sobrecarga para o sistema de drenagem de líquidos.

Segundo a ABNT (4), os resíduos radioativos não são abordados nesta norma por serem da competência exclusiva do Conselho Nacional de Energia Nuclear - CNEN.

3.2. EVOLUÇÃO DOS MODELOS DE TRATAMENTO DE RESÍDUOS.

Como resultado da evolução dos processos de produção e consumo, a geração de resíduos sofreu modificações, tanto a nível qualitativo como quantitativo.

Este fato, implica em uma necessidade cada vez maior de unidades para o tratamento e disposição destes resíduos e, cada vez mais os problemas gerados por soluções, em geral, inadequadas, são sentidos. Conseqüentemente, esta questão passa a ser alvo da preocupação de autoridades e técnicos.

Dentro deste contexto, surgiram diversas tecnologias e modelos que têm como objetivo a solução deste problema.

De acordo com LIMA (49), existem três correntes de pensamento que formulam modelos para a solução dos problemas gerados pelos resíduos sólidos. Estas, surgiram a partir da década de 1950 e são denominadas:

- Visão Tradicional
- Visão "Ecológica"
- Visão Inovativa

3.2.1. VISÃO TRADICIONAL

Conforme LIMA (49), o modelo tradicional apresenta uma concepção que tem no destino final dos resíduos, a solução básica para o problema, não sendo considerados os processos de geração. E, as principais tecnologias utilizadas são o aterro sanitário, usinas de reciclagem e compostagem e a incineração.

O aterro sanitário é definido como um local de confinamento de resíduos e não como uma unidade de tratamento. São adotadas medidas de controle dos líquidos percolados, sendo executada a impermeabilização do terreno e implantados sistemas de drenagem. Os líquidos drenados, em geral, são tratados através de lagoas, utilizando o "Sistema Australiano" (uma lagoa anaeróbia seguida de uma facultativa). Quando o aterro tem a sua área esgotada, o local é abandonado e procura-se um novo sítio para a disposição do lixo.

As usinas de reciclagem e compostagem, considerado o processo de geração, ou seja a heterogeneidade do lixo, apresentam diversos problemas operacionais, devido ao fato, do lixo estar todo misturado, dificultando a sua separação, principalmente em decorrência do teor de matéria orgânica. A consequência imediata é a produção de um composto de baixa qualidade e um material reciclável que, devido a seu grau de contaminação, não tem boa aceitação no mercado.

A incineração do lixo, neste modelo é proposto como um processo de geração de energia. Sendo que, não se considera a umidade elevada do lixo e que os materiais efetivamente termodegradáveis, representam apenas

40% do total de acordo com LIMA (47), particularmente nos países em desenvolvimento, onde o teor de matéria orgânica é elevado.

Segundo LIMA (49), na corrente tradicional não existe um enfoque para a recuperação de áreas degradadas por resíduos sólidos e, as tecnologias são adotadas de forma isolada, não havendo uma concepção de sistema integrado de tratamento.

3.2.2. VISÃO "ECOLÓGICA"

De acordo com LIMA (49), a visão denominada "ecológica", por ser defendida, principalmente, por grupos ambientalistas, privilegia a geração. Tem como principais pontos de apoio, a coleta seletiva e a compostagem, no entanto, não se preocupa com a destinação final, ou seja, disposição de resíduos que, efetivamente não têm como ser reciclados, sendo estes os descartáveis e inertes. Esta postura fica evidenciada, na posição contrária aos aterros.

O posicionamento radicalmente contra a incineração é uma de suas principais características. A justificativa para tal postura, é a possível emissão compostos químicos para a atmosfera, entre eles destacando-se as dioxinas.

Segundo LIMA (49), também na corrente "ecológica", não existe um enfoque para a recuperação de áreas degradadas por resíduos sólidos e, as tecnologias são adotadas de forma isolada, não havendo uma concepção de sistema integrado de tratamento.

3.2.3. VISÃO INOVATIVA

Conforme LIMA (49) a visão inovativa consiste na adoção das técnicas de tratamento e disposição final apresentadas no modelo tradicional e a preocupação com o processo de geração da visão "ecológica". No entanto, a

mudança fundamental, é a adoção de uma concepção de sistema para tratamento de resíduos, onde existe uma integração entre as diversas fases e tecnologias empregadas.

Neste modelo são considerados os processos de geração e de sistematização na origem, de forma prática e objetiva, ou seja, a separação dos resíduos ocorre em apenas três categorias: biodegradáveis, recicláveis e descartáveis. Juntamente com a sistematização dos resíduos na origem, existe uma preocupação com a minimização da geração.

As soluções para o tratamento dos resíduos, respeitam as suas características, de forma que são adotadas a compostagem, a segregação, o aterramento celular, a incineração, entre outras, que funcionam de forma integrada.

A remediação de áreas degradadas e sua transformação em centrais de tratamento de resíduos, no sentido de evitar a degradação de outros locais é uma das principais características desta visão.

A incineração é uma técnica que pode ser adotada de acordo com tipo de resíduo (mais indicada para os resíduos classificados como perigosos), ou nos casos em seja necessária a redução mássica.

3.3. PROCESSO DE GERAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS

O processo de geração de resíduos sólidos e seu comportamento ao longo do tempo é um dado de fundamental importância para a concepção de um sistema integrado de tratamento.

A caracterização de resíduos sólidos é o estudo que permite a obtenção dos parâmetros físicos, químicos e biológicos do lixo.

De acordo com LIMA (47) a geração de resíduos para ser compreendida depende de dois conceitos, a heterogeneidade e anisotropia. O primeiro, está ligado à composição do lixo, na qual, aparecem diferentes

materiais. O segundo, é o resultado das diferentes características de cada material que compõe o lixo urbano.

Para a análise da geração de resíduos pode ser considerado o modelo apresentado por CLEMENTE E JUCHEM (34), mostrado na figura 3.

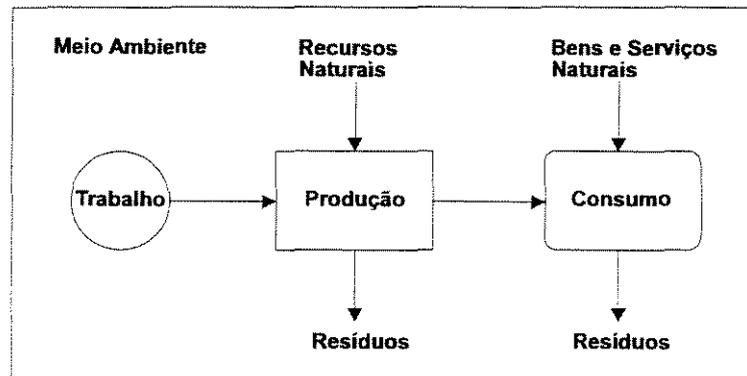


Figura 3 - MODELO DE PRODUÇÃO E CONSUMO.
Fonte: CLEMENTE e JUCHEM (34)

Para o entendimento deste modelo, deve-se considerar a Primeira Lei da Termodinâmica ou Lei da Conservação da Matéria, de acordo com a qual, as atividades de produção e consumo transformam a matéria, no entanto, a sua quantidade se mantém constante. Conforme CLEMENTE E JUCHEM (34), este princípio estabelece também, a impossibilidade de criação ou destruição para a energia, ou seja, a quantidade que entra nos processo de produção e de consumo é igual à quantidade liberada.

De acordo com CLEMENTE E JUCHEM (34) e BÔA NOVA (19), o Segundo Princípio da Termodinâmica complementa o Princípio da Conservação, pois segundo este, todos os processo físicos e químicos resultam em transformações de outras formas de energia em calor, com a conseqüente perda de capacidade de realizar trabalho, ou seja, a quantidade de energia se mantém, decai a sua qualidade. A este processo é dado o nome de Lei da Entropia Crescente.

Segundo BÔA NOVA (19), entropia é o conceito criado para quantificar a “degradação” da energia. Desta forma, existe no mundo um processo espontâneo e irreversível que apresenta uma entropia cada vez mais

elevada. Este processo, indica um fluxo de energia não circular, mas evolutivo. Ou seja, ao longo do tempo as modificações sofridas, não mais retornarão ao estado normal.

Através da análise dos princípios da termodinâmica, é possível compreender o conceito da irreversibilidade aplicado à geração dos resíduos, conforme proposto por LIMA (47).

3.3.1. FATORES QUE INFLUENCIAM A GERAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS

A geração de resíduos sólidos é influenciada por diversos fatores, de ordem social, econômica, cultural e técnica, conforme será descrito neste item.

De acordo com PINTO (60), existe uma tendência de alteração na composição de resíduos sólidos, em função da grande aceitação de alimentos industrialmente preparados e do desenvolvimento de novas embalagens: o teor de matéria orgânica tem-se reduzido e os teores de plásticos, papéis e papelões têm aumentado. As principais consequências deste fato, são o aumento de volume e a redução do peso específico.

A geração de resíduos é influenciada por diversos fatores, conforme será exposto mais adiante, mas de acordo com LIMA (47), dois deles são preponderantes, o aumento populacional e a intensidade da industrialização, por influírem diretamente nos valores absolutos de geração como na sua taxa per capita.

Segundo o mesmo autor, a identificação de todos os fatores que influem na geração do lixo, é uma tarefa complexa e que, implica em um intenso estudo, por um longo período, de forma a obter-se dados suficientes. Dentre todos os fatores que influem na geração do lixo, podem ser destacados os seguintes:

- número de habitantes;
- área relativa de produção;
- variações sazonais;

- condições climáticas;
- hábitos e costumes da população;
- nível educacional;
- poder aquisitivo;
- tempo de coleta;
- tipo de equipamento de coleta;
- disciplina e controle dos pontos produtores;
- leis e regulamentações específicas.

Destaca ainda este autor, que o período econômico em que a comunidade vive é fator importante e imediatamente perceptível na composição dos resíduos.

De acordo com PEREIRA NETO (58), o lixo é um resultado natural da atividade humana e apresentará taxas "per capita" crescentes em função do crescimento populacional e urbanístico.

Segundo CADARSO e MUÑOZ (24), a produção de resíduos apresenta uma tendência de aumento, devido em parte, ao crescimento populacional, e em parte, pelo aumento do nível de vida.

Ainda, de acordo com o mesmo autor o aumento do nível de vida provoca uma mudança substancial na composição dos resíduos sólidos urbanos, diminuindo o teor de matéria orgânica e aumentando de outros materiais como: papel, papelão, vidro, plásticos e de alguns resíduos tóxicos e perigosos (pilha, produtos de limpeza, pinturas e "sprays").

3.3.2. CARACTERIZAÇÃO DOS RESÍDUOS SÓLIDOS

A caracterização dos resíduos sólidos consiste na determinação das suas características físicas, químicas e biológicas, mas com tantos fatores influenciando a produção e composição dos resíduos urbanos, este processo é dificultado.

3.3.2.1. AMOSTRAGEM

Para a caracterização do lixo urbano, deve ser feita de forma criteriosa, a coleta de uma amostra representativa. A ABNT (1) fixa as condições para amostragem, preservação e estocagem das amostras e, define como amostra representativa a "parcela do resíduo a ser estudado, que é obtida através de um processo de amostragem, e que, quando analisada, apresenta as mesmas características e propriedades da massa total do resíduo."

Ainda de acordo com a ABNT (1) a amostragem de resíduos sólidos heterogêneos deve ser precedida de uma inspeção visual, onde devem ser considerados os seguintes fatores:

- os diferentes tipos de materiais que compõem os resíduos;
- a triagem e separação dos materiais mais volumosos, que apresentem maior massa ou sejam exemplares únicos;
- pesagem dos materiais triados;
- pesagem dos materiais restantes.

O método do quarteamento é a forma adotada pela ABNT (1), para a homogeneização do resíduo para a obtenção de uma amostra representativa.

TEIXEIRA, NUNES e OLIVEIRA (69), questionam a pesagem dos materiais, pois deve-se considerar o universo amostrado, ou seja, nos casos de grandes áreas de disposição (lixões por exemplo), este procedimento não seria viável, sendo portanto, necessária a limitação, subdivisão ou, ainda, a escolha de amostras representativas antes de se proceder a pesagem.

3.3.2.2. CARACTERIZAÇÃO

Vários autores desenvolveram formas de caracterização de resíduos, de acordo com os objetivos do trabalho desenvolvido ou da metodologia de tratamento a ser empregada.

BRITTON (21) considera que, “tradicionalmente a composição é estimada através da separação manual de porções do resíduo em um número de categorias físicas e calculando as percentagens de resíduo em cada categoria”

O trabalho de KIROV (42) procura determinar a composição quantitativa e qualitativa dos resíduos, a proporção entre: papéis, plásticos, metais, vidros, panos, matéria orgânica, matéria inerte e outros. Ainda, teores de: carbono, oxigênio, nitrogênio e outros; umidade, peso específico, poder calorífico, material volátil, etc.

GOMES et alli (38) classificam os resíduos em dez categorias: papel e papelão, trapos, madeiras, plásticos, couro e borracha, metais ferrosos, metais não ferrosos, vidros, inertes (pedras, porcelana e ossos), matéria orgânica grosseira (tamanho das partículas superior a 50 mm), matéria orgânica fina (tamanho das partículas inferior a 50 mm).

Segundo TCHOBANOGLIOUS (66) os componentes do lixo podem ser selecionados por serem facilmente identificáveis, por serem consistentes com as categorias citadas em literatura e por serem adequados à caracterização dos resíduos sólidos para a maioria das aplicações: papel, papelão, plástico, têxteis, borracha, couro, resíduos de jardim, madeira, vidro, latas, metais ferrosos, metais não ferrosos, e, terra, cinza, ladrilhos, etc.

Outra classificação, segundo a origem ou local de produção é apresentada por OLIVEIRA (57): residencial, comercial, público, contaminado (salas de cirurgia de hospital, p. ex.), e, radioativo. Para a composição qualitativa, sugere ainda: restos de alimentos, papéis, trapos, metais, vidros, plásticos, cinza, excrementos de animais, animais mortos, resíduos industriais, resíduos sépticos, restos de varrição e capinação de vias e logradouros públicos, restos de podas de árvores e arbustos, restos de materiais de construção ou demolição de prédios, veículos abandonados.

Agora, considere-se as categorias escolhidas por PINTO (60) e LIMA (45), para analisar o comportamento dos resíduos sólidos em um aterro energético, visando a produção de metano:

- facilmente degradáveis (FD): consiste de matéria orgânica, como restos de alimentos, folhas, etc.
- moderadamente degradáveis (MD): consiste de papel e papelão e outros produtos celulósicos;
- dificilmente degradáveis (DD): consiste de trapo, couro, borracha, etc;
- não degradáveis (ND): consiste de inertes, como pedras, terra, vidro, metal, etc.

LIMA (47), classifica o lixo de duas formas:

- quanto à sua natureza e estado físico: sólido, líquido, gasoso e pastoso;
- quanto ao critério de origem e produção: residencial, comercial, industrial (inclui lixo proveniente de construções), hospitalar, especial (aqueles de produção transiente: podas de jardins, animais mortos, veículos abandonados, mobiliário, etc.) e outros (aqueles não classificáveis anteriormente e varreduras de ruas, limpeza de galerias e bocas de lobo).

Diante de uma gama tão extensa de opções, torna-se difícil a definição por um deles como padrão. Assim, em função da aplicação que se espera dos resultados, são escolhidos as categorias de interesse. Se por um lado este critério facilita, em termos, o trabalho a ser executado, por outro lado complica e até impossibilita, às vezes, a comparação entre diferentes metodologias.

A geração de resíduos, conforme mostrado anteriormente, é um processo irreversível, mas no entanto, é possível minimizar a geração, ou seja, é possível reduzir as quantidades produzidas, seja através da sistematização na origem e o conseqüente aumento nas taxas de reciclagem, ou através da mudança de hábitos quanto à utilização de determinados produtos. Esta questão é uma das prioridades do sistema integrado de tratamento de resíduos sólidos.

3.4. TÉCNICAS DE ATERRAMENTO DE RESÍDUOS SÓLIDOS

3.4.1. ATERRO CONTROLADO

Conforme definição da ABNT (2), o aterro controlado de resíduos sólidos urbanos é a "técnica de disposição de resíduos sólidos urbanos no solo, sem causar danos ou riscos à saúde pública e à sua segurança, minimizando os impactos ambientais, método este que utiliza princípios de engenharia para confinar resíduos sólidos, cobrindo-os com uma camada de material inerte na conclusão de cada jornada de trabalho."

De acordo com a ABNT (2) o aterro controlado, a critério do órgão de controle ambiental, pode substituir o aterro sanitário, quando em função das condições específicas do sítio proposto e de outras opções na localidade em questão, ou implantação de um aterro sanitário se mostrar onerosa em demasia.

A ABNT (2) também define os critérios básicos para a seleção de um local destinado ao aterro controlado.

- características ambientais;
- zoneamento urbano;
- acessos;
- vizinhança;
- titulação da área escolhida;
- localização de jazidas para materiais de cobertura;
- bacia e sub-bacia hidrográfica onde o aterro se localizará.

A ABNT (2) indica a elaboração dos seguintes estudos:

- localização e caracterização topográfica;
- caracterização geológica e geotécnica
- caracterização de uso de água e solo;
- concepção e justificativa do projeto;
- descrição e especificações dos elementos de projeto;
- sistema de drenagem superficial.

Analisando a referida norma técnica verifica-se que, não existe para este tipo de "aterro" a exigência da implantação de:

- tratamento de sólidos;
- drenagem e tratamento de líquidos;
- drenagem e tratamento de gases;
- controle de compactação;
- implantação de poços de monitoramento.
- impermeabilização

Na realidade, esta norma tenta dar embasamento técnico a um lixão, pois é o que se constrói neste caso. Mesmo considerando a questão de pequenos municípios cuja capacidade técnica e financeira é limitada, não se justifica o nivelamento por baixo das condições de disposição de resíduos sólidos e, de forma alguma, deve ser admissível que o "aterro controlado" substitua o aterro sanitário como unidade de tratamento de resíduos sólidos.

Quando se define a técnica de "aterro controlado", comete-se equívocos ao se dizer que esta não deverá causar danos à saúde pública à segurança, pois a não existência da drenagem de líquidos e gases, pode comprometer os dois aspectos. No caso dos gases, estes irão acumular na massa de lixo e migrar por toda a cobertura. E, BALDERRAMA (15), citando Schalch, diz que o metano não é tóxico, mas atua sobre o organismo humano diluindo o oxigênio e, conseqüentemente pode causar a morte por asfixia. Deve ser considerado também que, concentrações de metano da ordem de 10 a 15%, podem provocar a sua combustão espontânea, quando em contato com o ar.

Em função da concepção equivocada do método, as outras exigências de projeto se prestam apenas a "maquiar" o lixão, ou seja, os problemas advindos desta técnica, permite afirmar que o "aterro controlado", não passa de uma disposição descontrolada de resíduos no solo.

3.4.2. ATERRO SANITÁRIO

Segundo a ABNT (3), aterro sanitário é uma “técnica de disposição de resíduos sólidos urbanos no solo, sem causar danos à saúde pública e à sua segurança, minimizando os impactos ambientais, método este que utiliza princípios de engenharia para confinar os resíduos sólidos na menor área possível e reduzi-los ao menor volume permissível, cobrindo-os com uma camada de terra na conclusão de cada jornada de trabalho, ou a intervalos menores se for necessário.”

A CETESB (30), define o aterro sanitário como um processo para disposição de resíduos sólidos no solo, em especial lixo domiciliar, seguindo princípios de engenharia e procedimentos operacionais, que permitem o confinamento com segurança, de forma a evitar a poluição ambiental.

A ABNT (3) também define os critérios básicos para a seleção de um local destinado ao aterro sanitário:

- zoneamento ambiental;
- zoneamento urbano;
- acessos;
- vizinhança;
- economia de transporte;
- titulação da área escolhida;
- economia operacional do aterro sanitário (jazida, etc);
- infraestrutura urbana;
- bacia e sub-bacia hidrográfica onde o aterro sanitário se localizará.

A ABNT (3) indica que os projetos devem conter, obrigatoriamente, as seguintes partes

- memorial descritivo;
- memorial técnico;
- cronograma de execução e estimativa de custos;
- desenhos;
- eventuais anexos.

O memorial descritivo previsto na referida norma deve conter os seguintes estudos:

- informações cadastrais (responsáveis pelo aterro);
- informações sobre os resíduos a serem dispostos
- caracterização do local do aterro;
- localização e caracterização topográfica;
- caracterização geológica e geotécnica;
- caracterização climatológica;
- caracterização e uso da água e solo;
- concepção e justificativa do projeto;
- descrição e especificações dos elementos de projeto;
- sistema de drenagem superficial;
- sistema de drenagem e remoção de percolato;
- sistema de tratamento do percolato;
- impermeabilização inferior e ou superior;
- sistema de drenagem de gás.

O memorial técnico consiste nos cálculos dos elementos de projeto e estudos citados anteriormente.

A concepção básica do aterro sanitário conforme previsto na referida norma é de uma unidade de confinamento, na qual os resíduos são dispostos, compactados e, abandonada após o encerramento da sua vida útil.

Vários autores destacam a importância do aterro sanitário como unidade de disposição final de resíduos.

De acordo com CARRA e COSSU, citado por COSSU (35), países como Canadá, Dinamarca, Finlândia, França, Alemanha Ocidental, Itália, Japão, Holanda, Polônia, África do Sul, Suécia, Suíça, Reino Unido e Estados Unidos, dispõem 68,8% dos seus resíduos em aterros sanitários.

STEGMANN (64) apresenta algumas ações que visam otimizar o processo de degradação em um aterro:

- execução da primeira camada do aterro com resíduos sólidos urbanos bioestabilizados (composto), de forma que o chorume produzido nas camadas superiores seja anaerobiamente pré-tratado.
- drenagem do chorume e sua recirculação de forma controlada (de acordo com as condições climáticas).
- não utilizar materiais de cobertura de baixa permeabilidade.
- alta compactação do lixo em camadas.
- obter uma boa desagregação e mistura dos resíduos com a compactação.
- extração de gás.

Das ações apresentadas por STEGMANN (64), a primeira é questionável, pois além de ocupar espaço na célula de aterramento, reduzindo com isso a vida útil da mesma, o pré-tratamento preconizado não elimina o tratamento de líquidos fora das células. Quanto à recirculação do chorume, este autor a considera como um elemento a ser utilizado, esporadicamente, para aumentar a umidade da massa de lixo, e não como uma forma de aceleração do processo

De acordo com LIMA (46), o aterro sanitário assume o comportamento de um biodigestor ou reator biológico, havendo um processo de digestão da matéria orgânica, promovendo a conversão da biomassa em materiais ou substâncias mais estáveis às ações de organismos decompositores.

Os aterros sanitários têm um importante papel no sistema integrado e resíduos sólidos. Conforme LOUWMAN (52), o aterro sanitário é o método final de tratamento de resíduos, quando já foram utilizados os demais métodos possíveis.

3.4.3. ATERRO CELULAR

O aterro celular, conforme LIMA (51) é uma técnica de tratamento primário de resíduos sólidos, sendo uma variável da técnica de aterro sanitário, tendo como princípio a derivação da área da bacia contribuinte, o

controle do processo de decomposição, o controle do tempo de aterramento, tempo de retenção celular e tempo de retenção hidráulico. Estas ações permitem a reabertura da célula após a bioestabilização da matéria orgânica, possibilitando assim, a utilização do espaço novamente, para o tratamento e disposição de resíduos, sendo possível a ampliação da vida útil do sistema.

De acordo com LIMA (51) o tratamento dos resíduos em um aterro celular pode ser dividido em três etapas:

- Tratamento Primário: todos os processos físicos que não alteram o estado físico e características químicas e biológicas dos resíduos e de seus contaminantes.
- Tratamento Secundário: todos os processos biológicos por ação microbiana, que alteram as características físicas, químicas e biológicas dos resíduos e de seus contaminantes.
- Tratamento Terciário: os processos físicos e químicos que alteram as características físicas, químicas e biológicas dos resíduos e de seus contaminantes.

O processo de seleção de áreas para a implantação de aterros celulares consiste em uma série de estudos, que permitam a definição de um local que apresente as condições ambientais capazes de suportar este empreendimento.

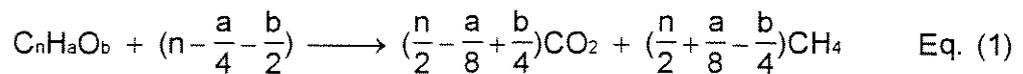
Pode-se considerar que o processo de seleção de áreas e caracterização física do sítio escolhido é parte integrante de estudo preliminar, no qual, devem ser consideradas as exigências da ABNT (3), quanto aos seguintes itens:

- localização e caracterização topográfica;
- caracterização geológica e geotécnica;
- caracterização climatológica;
- caracterização e uso da água e solo;
- concepção e justificativa do projeto.

3.5 - DIGESTÃO ANAERÓBIA

O processo de digestão anaeróbia que ocorre nos aterros sanitários é motivo de estudo por parte de vários autores, devido à importância que o conhecimento da cinética das reações que ocorrem na massa de lixo em decomposição tem para a operação adequada destas unidades.

Segundo BUSWELL e MUELLER (23), a reação de oxi-redução típica envolvendo água, que pode representar o processo de digestão anaeróbia, é demonstrada na equação empírica Eq. (1).



A complexidade deste processo, no entanto, é maior e, envolve diversas fases. McCARTY (53) apresenta a divisão do processo em duas fases, ou seja, uma fase ácida e outra metânica, e as rotas de transformação da matéria orgânica durante o processo, conforme pode ser visto na figura 4.

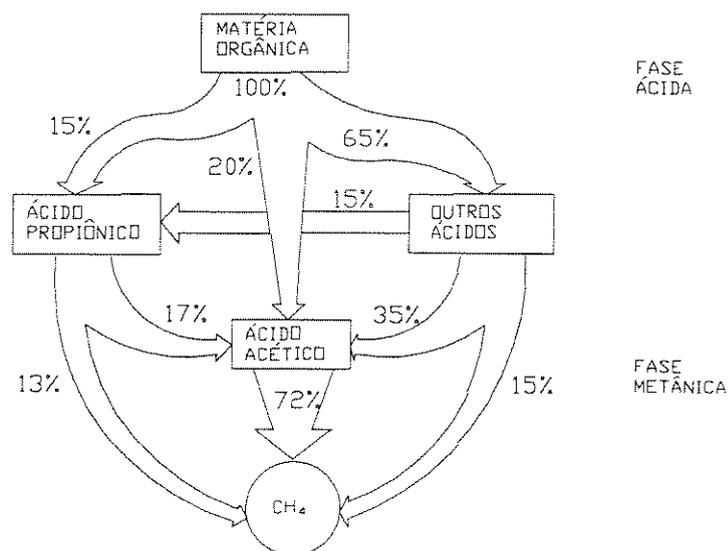


Figura 4 - Rotas de transformação de biomassa. Fonte: McCarty (53)

De acordo com McINERNEY e BRYANT (54), a degradação da matéria orgânica é diretamente proporcional a produção de metano e vice-versa.

Segundo GUJER e ZEHNDER (39) a digestão anaeróbia apresenta seis processos distintos:

- 1- hidrólise dos biopolímeros
 - a) proteínas
 - b) carboidratos
 - c) lipídeos
- 2- fermentação de aminoácidos e açúcares
- 3- oxidação anaeróbia de ácidos graxos e álcoois
- 4- oxidação anaeróbia de produtos intermediários como ácidos voláteis (exceto acetato)
- 5- conversão do acetato em metano
- 6- conversão de hidrogênio em metano.

Pohland et alli citado por LIMA (46) e POHLAND e GOULD (61) apresentam um modelo, no qual, são descritos os processo de estabilização em aterros, como pode ser visto na figura 5. Este modelo é dividido em cinco fases que podem ser descritas da seguinte forma:

- Fase I - Ajuste Inicial: caracteriza-se pela disposição dos resíduos, havendo acumulação de água que irá estimular a reação de decomposição, iniciando a produção de gás e chorume.

- Fase II - Fase de Transição: quando a capacidade de campo é atingida e ocorre um acréscimo na produção de gás e chorume, isto reflete a transição das condições aeróbias para anaeróbias. Pode ser notada ainda a depleção total do oxigênio e o surgimento de ácidos voláteis no chorume.

- Fase III - Fase de Formação de Ácidos: caracteriza-se pela predominância de ácidos orgânicos voláteis no chorume e a queda do pH. O chorume apresenta elevada DQO, alta mobilidade entre os íons e o surgimento de hidrogênio.

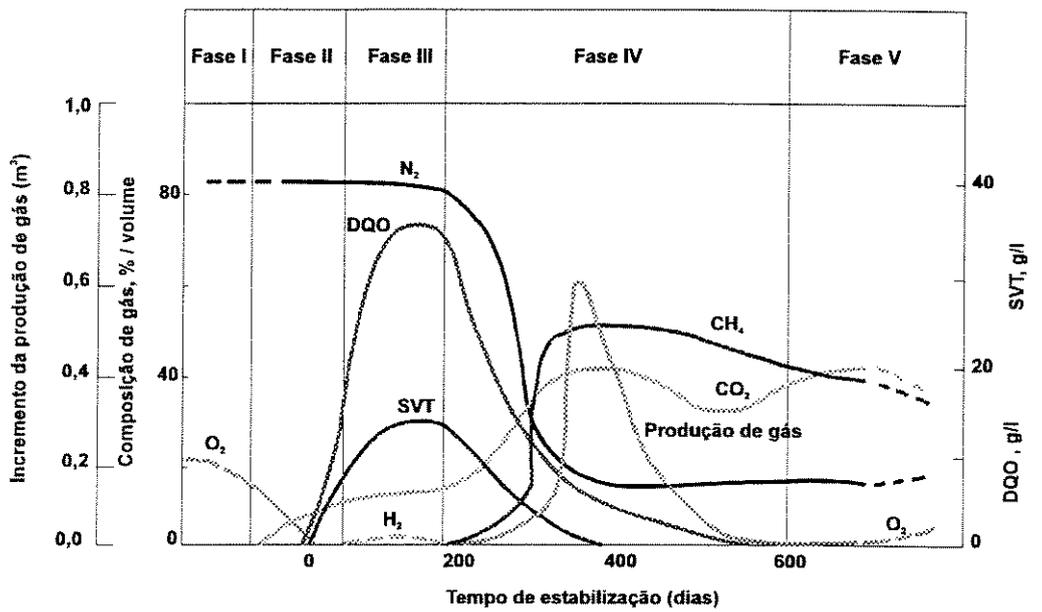


Figura 5 - Fases da estabilização de resíduos sólidos em aterros, segundo Pohland e Harper. Fonte: POHLAND e GOULD (61)

- Fase IV - Fase de Fermentação do Metano: promove a conversão de produtos intermediários em metano e aumenta o teor de dióxido de carbono, reduz a concentração do chorume, ocorre a elevação do pH, baixo potencial de oxi-redução e acelerada troca e redução de íons.

- Fase V - Fase de Maturação: quando os nutrientes chegam no limite, ou seja, uma menor quantidade substratos, decai a produção de gás, e os componentes orgânicos e inorgânicos do chorume são característicos das condições de pós-estabilização.

O modelo de Rees, citado por LIMA (46), apresenta o modelo de produção de gás de Farquhar e Rovers modificado, acrescentado uma quinta fase, denominada de regressiva, como pode ser visto na figura 6.

De acordo com CHRISTENSEN e KJELDSEN (33), a degradação anaeróbia é dividida em três estágios, como ilustra a figura 7. No primeiro estágio a matéria orgânica complexa sofre o processo de hidrólise e fermentação, formando ácidos graxos voláteis, álcoois, hidrogênio e dióxido de carbono. No segundo estágio, as bactérias acetogênicas convertem os produtos do estágio anterior acetato, hidrogênio e dióxido de carbono. No último estágio, as bactérias metanogênicas, convertem o ácido acético em metano e dióxido de carbono ou bactérias hidrogenofílicas convertem o hidrogênio e o dióxido de carbono em metano

CHRISTENSEN e KJELDSEN (33), baseados nos estudos de Farquhar e Rovers e nos estudos de Ehrig, apresentam uma seqüência da degradação dos resíduos sólidos em aterros, dividido em cinco fases distintas conforme é descrito a seguir e ilustrado na figura 8.

- Fase I - Aeróbia: tem curta duração, ocorre imediatamente após o aterramento. A matéria orgânica facilmente degradável sofre um processo aeróbio de decomposição e gera dióxido de carbono.

- Fase II - Anaeróbia Intermediária - 1º estágio: desenvolve-se imediatamente após a fase aeróbia. Devido à ação de bactérias acetogênicas e da atividade fermentativa ocorre uma geração acentuada de ácidos graxos voláteis, dióxido de carbono e algum hidrogênio. O chorume com características ácidas pode conter altas concentrações de ácidos graxos,

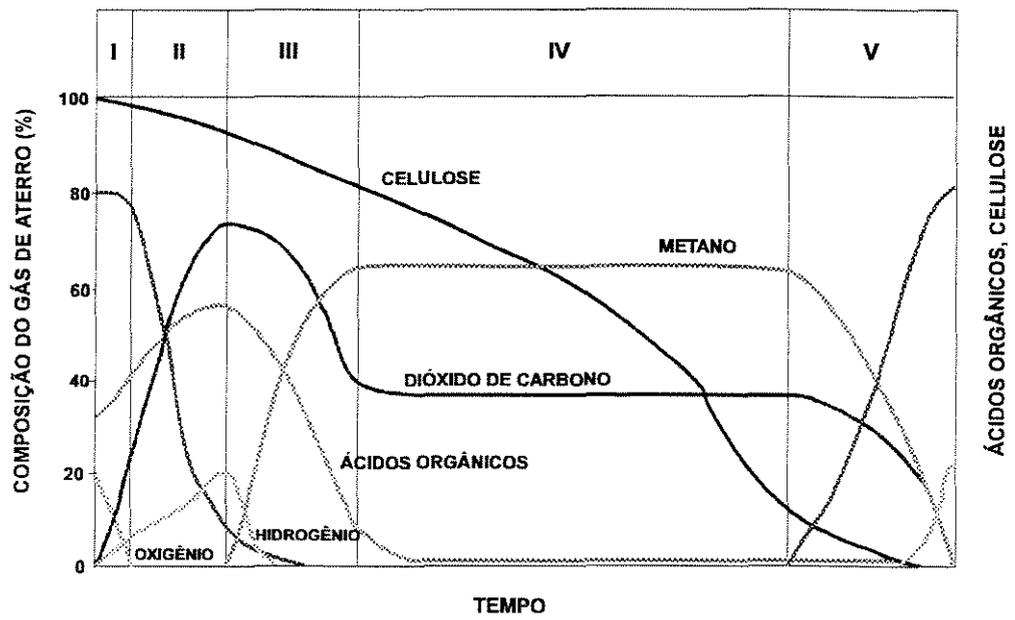


Figura 6 - Fases de estabilização, segundo Rees. Fonte: LIMA (46)

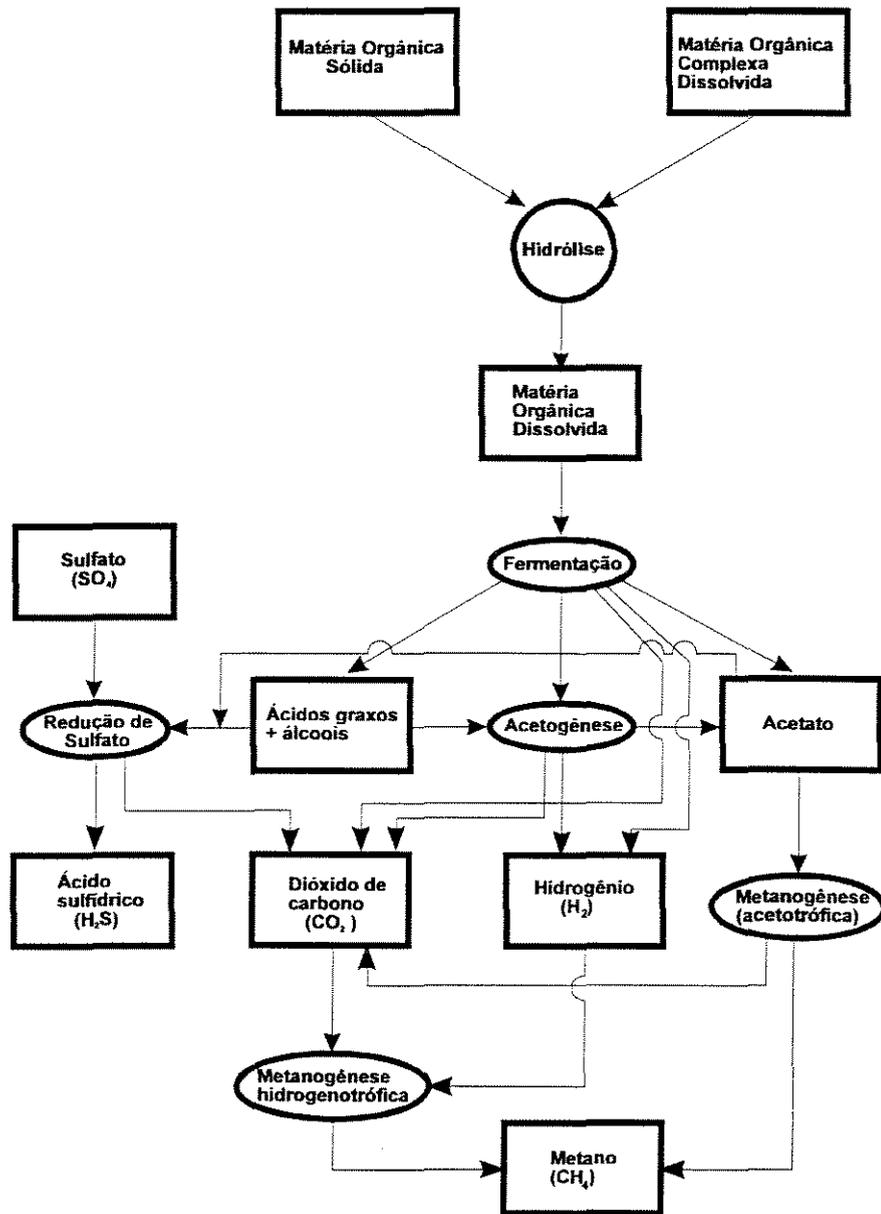


Figura 7 - Substratos e grupos de bactérias envolvidos no ecossistema de geração de metano. Fonte: CHRISTENSEN e KJELDEN (33)

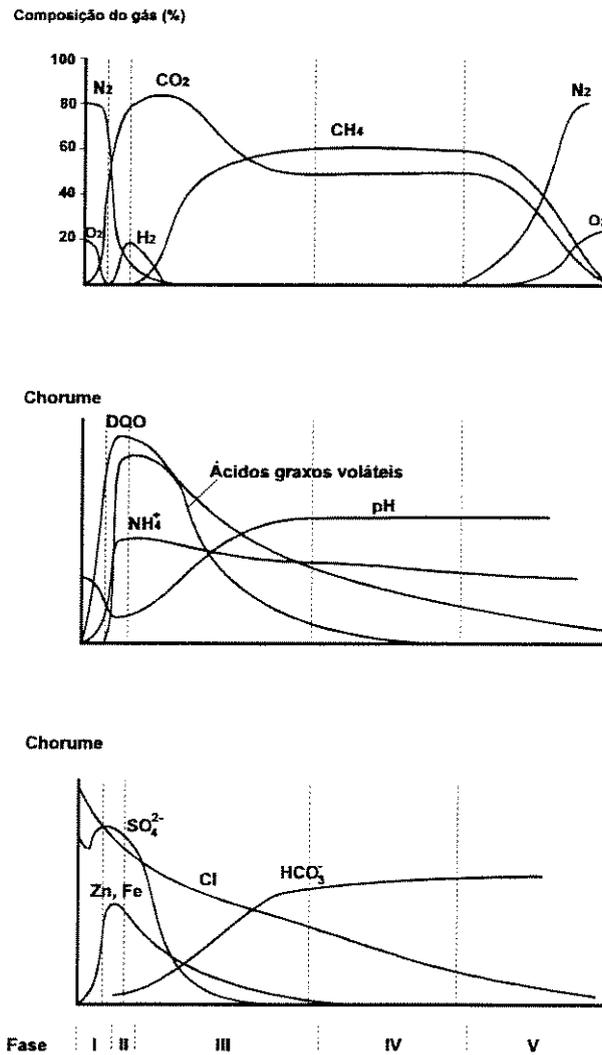


Figura 8 - Desenvolvimento na composição de gás e chorume
 (Baseado em Farquhar e Rovers). Fonte: CHRISTENSEN e KJELDSEN (33)

cálcio, ferro, metais pesados e amônia. O teor de nitrogênio no gás se reduz rapidamente. A concentração de sulfatos, que no início da fase, encontra-se no ponto máximo, apresenta uma tendência de queda.

- Fase III - Anaeróbia Intermediária - 2º estágio: o início desta fase pode ser indicado por um pequeno crescimento das bactérias metanogênicas. Nos gases, o metano apresenta um aumento na sua concentração, enquanto que, o dióxido de carbono tem uma tendência de queda e o hidrogênio, simplesmente desaparece. A redução de sulfatos torna-se mais acentuada, tendendo a zero. A redução de ácidos voláteis, que nesta fase, tende a zero, resulta em um aumento do pH e alcalinidade, com isso ocorre a redução na solubilidade do cálcio, ferro, manganês e metais pesados. A amônia apresenta uma conversão lenta em ambiente anaeróbio.

- Fase IV - Metânica: caracteriza-se pela manutenção da alta taxa de produção de metano. A concentração de ácidos voláteis é mantida baixa.

- Fase V - Final: a matéria orgânica mais resistente à ação dos microrganismos decompositores permanece no aterro. A produção de metano decai, e a concentração de nitrogênio aumenta, sendo liberado para a atmosfera. O oxigênio reaparece chegando a 20%.

De acordo com estes autores, este modelo foi idealizado para volumes homogêneos de resíduos, sendo que, em aterros, nos quais as células apresentam idades diferentes e uma composição também variada, as curvas apresentadas não seguem perfeitamente o que foi descrito.

LIMA (46) conclui que não é apresentada uma explicação para o surgimento de nitrogênio e oxigênio, o que leva supor que se trata de exercício teórico visando fechar o balanço de massa. Mas, estes resultados, conforme o mesmo autor, podem ser interpretados, como sendo consequência da progressiva intrusão de ar atmosférico, na massa de lixo à medida que o metano e o dióxido de carbono são exauridos.

O modelo modificado de CHRISTENSEN e KJELDSEN (33), apresentado na figura 8, também mostra este comportamento do oxigênio na quinta fase, sem no entanto, ser feita uma exposição do que ocasionou tal fato.

3.5.1 - ORGANISMOS QUE ATUAM NO PROCESSO

SLEAT et alli (62) apresenta um esquema geral para as reações que ocorrem em um aterro sanitário e o fluxo dos compostos de carbono, como pode ser visto na figura 9. As reações dominantes são a fermentação anaeróbica da lignocelulose, onde o dióxido de carbono e o sulfato são os principais aceptores de elétrons.

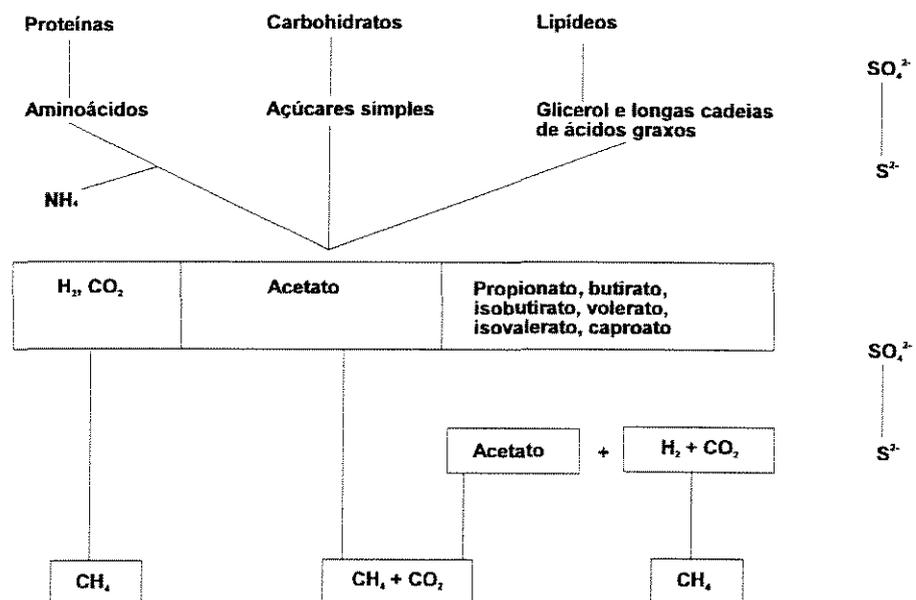


Figura 9 - Esquema geral para as reações do carbono e sulfato em um aterro sanitário.
Fonte: SLEAT et alli (62)

De acordo com CHRISTENSEN e KJELDSEN (33), a hidrólise é um importante processo que ocorre em um aterro sanitário, pois possibilita que a fração orgânica do resíduo seja solubilizada antes de ser convertida em compostos mais simples através da ação de microrganismos. A hidrólise é provocada por enzimas extracelulares, produzidas pelas bactérias fermentativas.

Conforme estes autores, as bactérias acetogênicas formam um grande e heterogêneo grupo. Estas bactérias produzem ácido acético, hidrogênio e dióxido de carbono, embora na conversão dos ácidos graxos voláteis, sejam abrangidos, apenas um número ímpar de átomos de carbono.

Podem converter também, compostos aromáticos que contenham oxigênio (fenois, ácido benzóico), enquanto que hidrocarbonetos aromáticos (benzeno e tolueno), aparentemente não são degradados. As bactérias metanogênicas podem ser divididas em dois grupos, grupo hidrogenofílico converte hidrogênio e dióxido de carbono em metano, enquanto outro grupo, acetofílico, converte ácido acético em metano e dióxido de carbono. As bactérias sulfo-redutoras podem converter hidrogênio, ácido acético e grandes ácidos graxos voláteis durante a redução do sulfato. Este processo é ilustrado pela figura 7.

SLEAT et alli (62) apresenta na tabela 1, os sete principais grupos fisiológicos de microrganismos, que estão envolvidos nos processo de degradação anaeróbia em aterros sanitários.

Tabela 1 - Grupos fisiológicos de microrganismos envolvidos nos processos de degradação anaeróbia em aterros sanitários

Grupos de Microrganismos	Substratos químicos
Bactérias aminolíticas	Amido
Bactérias proteolíticas	Proteínas
Bactérias celulolíticas	Celulose
Bactérias hemicelulolíticas	Hemicelulose
Bactérias metanogênicas hidrogenotrófica	Hidrogênio
Bactérias metanogênicas acetotrófica	Ácido acético
Bactérias sulfo-redutoras	Sulfato
Fonte: SLEAT et alli (62)	

3.5.2. VARIÁVEIS QUE INFLUEM NO PROCESSO

O processo de decomposição anaeróbia do lixo em um aterro sanitário é afetado por diversas variáveis. Diversos autores apresentam classificações para estas variáveis.

TEIXEIRA (70) citando Stanforth et alli, apresenta como variáveis que afetam o processo a: quantidade água introduzida, a composição dos resíduos, as variações sazonais da temperatura, a forma de operação do

aterro entre outras. São citadas ainda as interferências de micro-ambientes atuando em diferentes fases simultaneamente, como o alto teor de ácidos voláteis, baixo pH e a metanogênese ocorrendo ao mesmo tempo.

CHRISTENSEN e KJELDSEN (33) citam como principais fatores bióticos que afetam na formação do metano em um aterro sanitário: oxigênio, hidrogênio, pH/alcalinidade, sulfato, nutrientes, inibidores, temperatura e teor de água. A figura 10 apresenta um esquema da forma como estes fatores afetam a metanogênese.

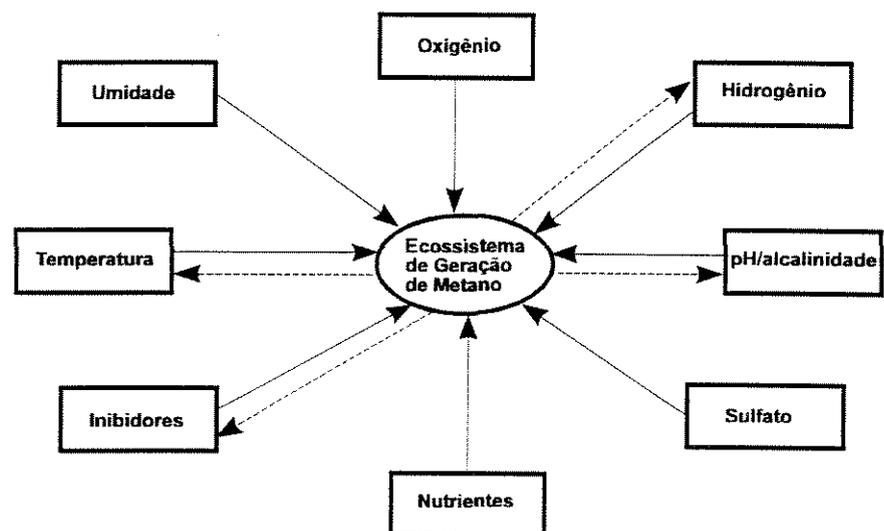


Figura 10 - Principais fatores abióticos que afetam o ecossistema de geração do metano. Fonte: CHRISTENSEN e KJELDSEN (33)

A seguir serão citados, de forma sucinta, alguns dos fatores que interferem na digestão anaeróbia em aterros.

3.5.2.1. OXIGÊNIO

Segundo TEIXEIRA (70) o processo de decomposição em aterro é, basicamente, anaeróbio, sendo que as bactérias metanogênicas são anaeróbias estritas. Desta forma, conclui a autora, a ausência de oxigênio livre seria uma imposição.

CHRISTENSEN e KJELDEN (33) consideram que existe uma difusão do oxigênio da atmosfera para dentro do aterro, sendo este consumido pelas bactérias aeróbias concentradas no topo do aterro. No entanto, alertam para que sejam tomados cuidados com a exaustão forçada dos gases, que poderá aumentar a profundidade da zona aeróbia no aterro e, comprometer a formação do metano.

TEIXEIRA (70), citando Novaes e CHRISTENSEN e KJELDEN (33) concluem que o efeito do oxigênio para as bactérias metanogênicas é apenas inibidor, e não letal, como considerado pela maioria da literatura.

3.5.2.2. PH

O símbolo [pH] representa o potencial hidrogeniônico, que tem uma grande importância na digestão de resíduos sólidos. De acordo com LIMA (46) as suas variações podem acelerar ou inibir o processo, concluindo que o seu acompanhamento pode permitir maior controle do processo, contribuindo para o aumento da sua eficiência.

A escala de pH foi desenvolvida por Sørensen, citado por LIMA (46), em 1909, na expectativa de expressar de forma conveniente a concentração do íon hidrogênio. Os estudos de Sørensen são condensados na Eq. (2) :

$$\text{pH} = -\log [\text{H}^+] = \log 1/[\text{H}^+] \quad \text{Eq. (2)}$$

Como pode ser observado na equação, a escala de pH é uma escala invertida com relação às concentrações do íon hidrogênio, ou seja, quanto maior a concentração do íon hidrogênio, menor o correspondente pH.

McINERNEY e BRYANT (54) consideram que o pH ótimo para o processo de degradação anaeróbia está entre 6,7 e 7,4 e, que abaixo de 6,0 e acima de 8,0 são muito restritivos.

De acordo com CHRISTENSEN e KJELDEN (33) as bactérias metanogênicas somente operam dentro da faixa de pH entre 6,0 e 8,0. As

bactérias fermentativas e acetogênicas, estão em uma faixa mais ampla que as metanogênicas. Outro grupo de bactérias, as sulfo-redutoras, operam na faixa de pH entre 5,0 e 9,0.

3.5.2.3. ALCALINIDADE

De acordo com POVINELLI (59), a alcalinidade causa a neutralização da acidez, conseqüentemente, provoca o aumento do pH e a tendência de precipitação dos metais fora da solução. Desta forma a alcalinidade age como um elemento de equilíbrio à ação inibitória dos metais pesados. Por outro lado, elevados níveis de pH, podem agir como agente inibidor e, neste caso, a acidez agiria como elemento regulador do meio.

De acordo com LIMA (46), "os metais alcalinos e alcalino-terrosos, não apresentam toxicidade ao processo anaeróbio quando em baixas concentrações. Na verdade, a presença destes sais no meio é importante no controle da acidez, particularmente na fase metanogênica, pois atuam como estimuladores do processo."

3.5.2.4. ÁCIDOS VOLÁTEIS

Segundo TEIXEIRA (70), os ácidos voláteis, juntamente com o pH e a alcalinidade, são os fatores responsáveis pelo equilíbrio químico do processo de degradação anaeróbia, em função deste equilíbrio, o ambiente torna-se favorável ao desenvolvimento dos microrganismos decompositores.

CHRISTENSEN e KJELDSEN (33) afirmam que "em um aterro sanitário, dificilmente são atingidos níveis de concentração de ácidos voláteis, que causem efeitos inibitórios na produção de metano." TEIXEIRA (70), no entanto, observa que "condições adversas criadas por manejo inadequado dos aterros podem permitir que sejam encontradas concentrações muito elevadas de ácidos voláteis, que podem apresentar efeitos inibitórios sinérgicos, paralisando o processo de degradação.

3.5.2.5. POTENCIAL REDOX

O potencial de oxidação-redução ou simplesmente potencial redox é definido como a tendência de um meio de cultura microbiano de aceitar ou ceder elétrons.

Segundo TEIXEIRA (70), "o potencial redox é um parâmetro de controle que caracteriza o estágio de degradação em que o aterro sanitário se encontra, sendo ponto-chave no entendimento do equilíbrio entre as bactérias presentes".

De forma genérica, conforme LIMA (46), pode-se afirmar que no processo de degradação de resíduos nas células de um aterro, existe uma tendência de redução do Eh, atingindo valores negativos.

De acordo com o mesmo autor, é possível explicar este fenômeno através da análise do comportamento de alguns microrganismos isoladamente. Tomando como exemplo a bactéria aeróbia, freqüentemente encontrada em aterros, o *Bacillus subtilis*, como pode ser visto na figura 11, nota-se que a fase logarítmica de crescimento coincide com a queda do valor do Eh, sugerindo que este fator é decisivo na atividade microbiana.

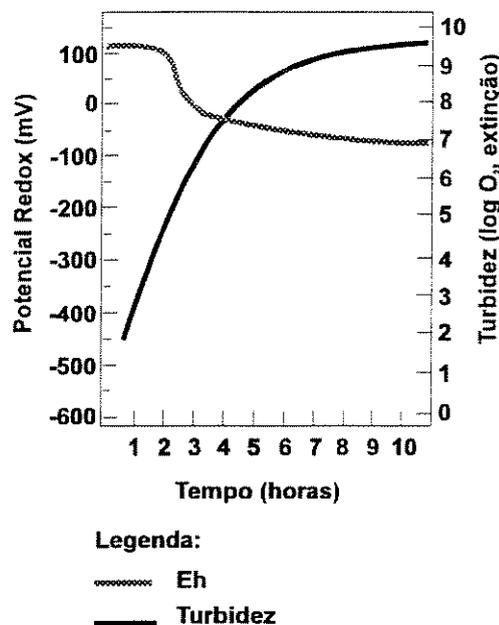


Figura 11 - Comportamento do *Bacillus subtilis* em função do potencial redox. Fonte: LIMA (46)

Tomando outro exemplo, citado por LIMA (46), um microrganismo anaeróbio estrito, o *Clostridium paraputrificum*, como pode ser visto na figura 12, observa-se que a que fase logarítmica de crescimento também é influenciada pela escala de valores do Eh. Sendo que, neste caso, a atividade microbiana atinge seu crescimento máximo quando o Eh encontra-se na faixa de -500 a -600 mV. Conclui o autor que, conforme observado nestes exemplos, de uma forma genérica, outros microrganismos decompositores seguem de perto o mesmo comportamento.

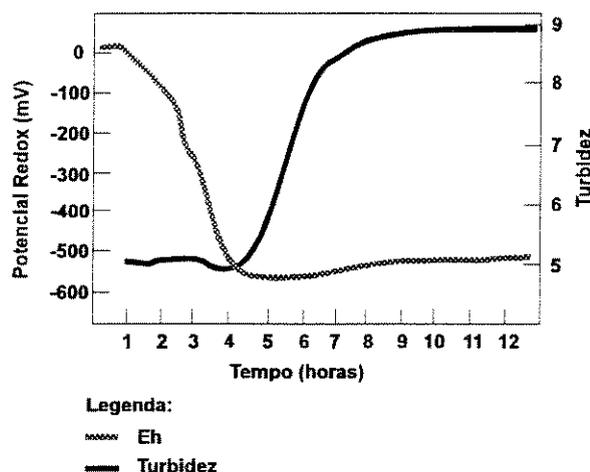


Figura 12 - Comportamento do *Clostridium paraputrificum* em função do potencial de oxidação-redução. Fonte: LIMA (46)

Os estudos de LIMA (46), indicam que a fase metânica estável ocorre dentro da faixa de Eh entre -300 a -600 mV, comprovando que as bactérias metanogênicas requerem meios com potencial redox muito baixos. CHRISTENSEN e KJELDSEN (33), concordam com esta afirmação, mas consideram que as bactérias metanogênicas só produzem metano com Eh inferior a 330 mV.

3.5.2.6. TEMPERATURA

De acordo com CHRISTENSEN e KJELDSEN (33), a temperatura influi no processo de digestão anaeróbia dos resíduos, como em qualquer processo microbiológico, afetando a taxa de degradação.

Existe uma grande variação de valores de temperatura na digestão anaeróbia, entre diferentes autores. TEIXEIRA (67) fez uma compilação de alguns desses dados, que são apresentados na tabela 2.

Tabela 2 - Temperaturas na biodigestão

AUTOR (ES)	LIMITES EXTREMOS	FAIXA MESOFÍLICA	FAIXA TERMOFÍLICA	FAIXA USUAL
KOTZÉ et alli		20 - 45		37@
LAPP et alli				33 - 38*
DOUGLAS	0 - 55			55 - 58*
MEYNELL		5 - 40	40 - 55	30 - 35
TAIGANIDES	20 - 60			35
NAT. RESERCH INST.				33 - 38
BIOMASS ENERGY INST.	0 - 60	20 - 40	> 40	25 - 35
HESS	15 - 60			
VAN VELSEN e LETTINGA	20 - 65	20 - 40	40 - 65	31 - 35
HAWES		5 - 45	45 - 60	30 - 35
CRAVEIRO	15 - 65	30 - 40	50 - 60	
McINERNEY et alli		20 - 40	45 - 70	
ELLSWORTH E ABELES		18 - 41	41 - 71	
SANTIAGO E CRESTANA	5 - 65			
SEIXAS et alli				35@
SILVA (Normando A.)		10 - 45	> 45	36@
BATISTA		20 - 45	> 45	35 e 54@
VIEIRA E SOUZA		10 - 42	> 42	35 e 60@
IPT		25 - 40	50 - 65	37 e 60@
SGANZERLA				28 - 35*
CARVALHO	0 - 65			35@
SOUZA		15 - 45	50 - 63	30 - 40@ 35 - 37
* faixa ideal				
@ temperatura ótima				
Fonte: TEIXEIRA (67)				

3.5.2.7. NUTRIENTES

Segundo McINERNEY e BRYANT (54), a fermentação e o crescimento microbiano depende de um ótimo suprimento de nutrientes. Os mesmos autores citam ainda que os minerais inorgânicos são apenas nutrientes necessários, enquanto que, os substratos orgânicos são utilizados como fontes de energia.

Segundo CHRISTENSEN e KJELDSEN (33), o ecossistema anaeróbio necessita, além da matéria orgânica, de nutrientes como o nitrogênio e, de micronutrientes como o enxofre, cálcio, magnésio, potássio, ferro, zinco, prata, cobalto, molibdênio e selênio. De forma geral, de acordo com estes autores, nos aterros não existe deficiência destes nutrientes, mas pode ocorrer a sua limitação devido à falta de homogeneização dos resíduos.

De acordo com TEIXEIRA (70), normalmente, os nutrientes não são encontrados em concentrações inibidoras, mas por outro lado, a sua ausência pode, teoricamente, representar um fator limitante do crescimento das bactérias decompositoras.

3.5.2.8. SUBSTÂNCIAS INIBIDORAS

Diversos fatores ou substância podem provocar a inibição do processo de decomposição anaeróbia em um aterro sanitário, sendo que a fase metanogênica pode ser considerada como a mais sensível.

Conceituando inibição, de acordo com BUARQUE DE HOLANDA (22) é "o ato ou efeito de inibir". Em biologia seria a paralisação ou a redução de um processo ou reação, que envolvesse microrganismos.

Em biologia, o elemento causador da inibição de um processo pode ser a toxicidade, que de acordo com BUARQUE DE HOLANDA (22), é o "caráter do que é tóxico".

De acordo com POVINELLI (59), a questão do que é tóxico, deve ser analisada com muita atenção, pois a toxicidade de uma substância pode variar não apenas com a natureza química própria e do substrato sobre o qual atua, mas também nas suas concentrações.

POVINELLI (59) citando Mingone, apresenta alguns fundamentos essenciais sobre a toxicidade:

- "um composto será biologicamente tóxico somente se ele se apresentar na forma solúvel ou se solubilizar durante o processo

de digestão. Caso contrário, isto é, uma substância que não se apresente solubilizada não terá condições de atravessar a parede celular e assim afetar as bactérias;

- a toxicidade é relativa, uma substância pode ser tóxica, dependendo da concentração e do tempo de exposição. No entanto, dependendo da concentração, podem ser até estimulantes aos crescimento bacteriano;
- os microrganismos podem se adaptar (aclimatarem) a materiais potencialmente tóxicos no qual são introduzidos a uma mais baixa concentração, e em seguida, aumenta-la vagarosamente. Nesta forma os microrganismos podem rearranjar seus recursos metabólicos, e assim superar o bloqueio metabólico efetuado pelo material tóxico. Sob situações de cargas de choque não há tempo suficiente para que ocorra este rearranjo no metabolismo do microrganismo;
- efeitos antagônicos, nos quais o efeito tóxico de uma substância é reduzido pela presença de uma outra ou sinergismo, quando o efeito tóxico de uma substância é aumentado pela presença de uma outra substância, devem ser levados em consideração."

CHRISTENSEN e KJELDSEN (33), destacam como elementos inibidores a concentração de substrato, o dióxido de carbono, sais, sulfetos, metais pesados e compostos orgânicos. Acrescentam ainda, os ácidos graxos voláteis.

A tabela 3, elaborada por Mosey e Hughes citada por LIMA (51) mostra os efeitos dos metais na digestão anaeróbia.

Tabela 3 - Efeitos dos metais pesados na digestão anaeróbia

CÁTIONS	CONCENTRAÇÃO INIBITÓRIA(mg/l)
Fe ⁺⁺	1 - 10
Zn ⁺⁺	4 - 10
Cd ⁺⁺	7 - 10
Cu ⁺	10 - 12
Cu ⁺⁺	10 - 16
Fonte: LIMA (51)	

3.5.3. RECIRCULAÇÃO DO CHORUME COMO MECANISMO DE ACELERAÇÃO E INIBIÇÃO

Os estudos de LIMA (46) demonstraram que a recirculação do chorume tratado em reatores biológicos anaeróbios, permite a aceleração da metanogênese.

A recirculação do chorume crú causa inibição no processo de decomposição anaeróbia, em particular, à metanogênese, como comprovam os estudos de LIMA (46) e TEIXEIRA (70). LIMA (46) explica que o excesso de ácidos provoca o desbalanceamento entre as taxas de produção e consumo, causando efeitos inibitórios.

Segundo LIMA (46), a inoculação do chorume tratado em reatores de fluxo misto, apresenta melhores resultados, agindo no processo de metanogênese, provocando a sua aceleração, ou seja, age na cinética do processo, aumentando a velocidade das reações.

LIMA (46) conclui que a recirculação de chorume tratado na razão de 6%, em peso, da massa de lixo, não excede a capacidade de campo, não comprometendo, desta forma a estabilidade do aterro ou provocando a percolação excessiva de líquidos.

Considerando a recirculação do chorume tratado biologicamente e, com características das fases ácida ou metânica, conforme proposto por LIMA (48), é possível controlar o desenvolvimento do processo dentro da célula, quanto à fase em que este se encontra como provocar uma aceleração na cinética das reações. Visando bioestabilizar a matéria orgânica são adotadas as seguintes ações:

- inoculação
- lixiviação
- controle de pH e Eh
- aumento de nutrientes

Lima e Lacava, citados por LIMA (48), afirmam que a recirculação tem como objetivo acelerar o processo de decomposição, especialmente, a metanogênese, uma vez que os líquidos percolados pela massa de resíduos aterrados permite a lixiviação de enzimas celulíticas, lipolíticas e proteolíticas.

A recirculação permite que os líquidos injetados no topo da célula percolem até o sistema de drenagem, sendo que a continuidade deste processo provoca o arraste da carga orgânica que resulta dos processo de hidrólise e acetogênese. Juntamente, são carreados nutrientes e a umidade que são necessários à atividade biológica, conforme descrito por LIMA (48).

3.5.4. PRODUÇÃO DE GÁS

A estimativa da quantidade gás que é produzido em um aterro, é objeto de estudo vários autores, o que implica na existência de diversos parâmetros e métodos de cálculo.

A ABNT (3) prevê que o projeto de um aterro sanitário deve ter um sistema para a drenagem dos gases, podendo este ser integrado ao sistema de drenagem de líquido percolado. No entanto, não é feita qualquer menção quanto ao critério de dimensionamento, ou seja, o cálculo da produção de gases e dimensão dos drenos.

LIMA (45) desenvolveu um método de cálculo para a obtenção do volume de gás gerado para o aterro sanitário do Parque Santa Bárbara, que considera as características de biodegradabilidade dos resíduos, dividindo-os em quatro categorias de acordo com o tempo de degradação, como pode ser visto na tabela 4.

Tabela 4 - Classificação Quanto à Biodegradabilidade e o Tempo de Degradação

CATEGORIA	TEMPO PARA DEGRADAÇÃO DE 50% DA MATÉRIA - ($T_{0,5}$)	TEMPO PARA A DEGRADAÇÃO DE 100% DA MATÉRIA - (T_1)
Facilmente degradável (FD)	2	4
Moderadamente degradável (MD)	5	10
Difícilmente degradável (DD)	20	100
Não degradável (ND)	-	∞

Tempo em anos
 Fonte: LIMA (45)

O ensaio teórico proposto por LIMA (45) considera o fator de produção por um período de 10 anos, tendo obtido o valor de 50 Nm³/tonelada de lixo aterrado, para as parcelas classificadas como facilmente e moderadamente degradáveis. A distribuição dos fatores de produção de gás ao longo do tempo pode ser visto na figura 13.

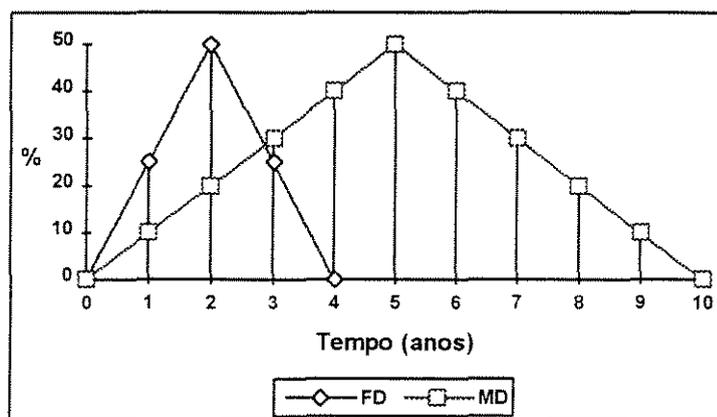


Figura 13 - Distribuição dos fatores de produção de gás
 Fonte: LIMA (45)

A taxa de produção de gás depende da composição física do lixo, com o qual concordam LIMA (45) e LAQUIDARA, LEUSCHNER e WISE (43). Este últimos autores apresentam a composição do lixo fresco dos Estados Unidos como sendo a seguinte:

- água - 25%
- inorgânicos - 25%
- orgânicos - 50%

Segundo LAQUIDARA, LEUSCHNER e WISE (43) os sólidos voláteis são divididos em duas frações:

- biodegradáveis - porção dos sólidos voláteis totais que está sujeita ao ataque de microrganismos decompositores e, são convertidos em metano e dióxido de carbono.
- refratários - são os materiais orgânicos como plásticos, lignina, etc., que não sofrem a ação dos microrganismos decompositores.

O modelo proposto por estes autores considera que é possível fazer uma previsão do volume potencial de gás, a partir da estimativa dos sólidos voláteis totais remanescente, considerando um tempo de 20 anos, para a duração do processo. Deste estudo resulta uma taxa de 0,35 l CH₄/g de matéria orgânica degradada, que multiplicada pela quantidade de matéria degradada em um certo período de tempo, corresponde à quantidade de metano produzido neste período de tempo.

A principal diferença entre os métodos citados é que, o primeiro foi desenvolvido a partir de uma situação estática, onde considera-se o aterro existente e o potencial de gás que pode ser produzido. No segundo caso, considera-se uma situação dinâmica, onde existe uma evolução na produção de gás de acordo com o aterramento e, principalmente possibilita o ajuste dos fatores de produção de acordo com as variações na composição do lixo.

O método de LIMA (45), no entanto, considerando o processo de aceleração da metanogênese através da recirculação do chorume e o aterramento celular, deve ser ajustado para um período de decomposição da matéria orgânica mais curto.

De acordo com LIMA (45), no processo de degradação lixo em aterros sanitários a quantidade gás produzida é de 10% do total de matéria orgânica putrescível aterrada.

FINDIKAKIS et alli (37) concluem que não existem modelos analíticos que descrevam a taxa de geração e a composição de gases em aterros sanitários.

3.5.5. PRODUÇÃO DE LÍQUIDOS

A ABNT (3) indica que seja estimada a quantidade de líquido percolado a ser drenado e/ou tratado, mas no entanto, não especifica nenhum método de dimensionamento.

Segundo BLIGHT, BALL e BLIGHT (17) o balanço de água para um aterro é baseado no princípio de conservação de massa.

De acordo com a CETESB (28) o modelo de percolação pode ser demonstrado de acordo com a figura 14, e sugere como “o método mais preciso e obrigatoriamente utilizado nas obras de maior responsabilidade” o Balanço das Águas.

Como este modelo, é apresentado para aterros de resíduos industriais, não é considerada a água liberada partir do processo de hidrólise, que ocorre na decomposição do lixo. Este método foi desenvolvido para representar a percolação em um maciço homogêneo que tenha na sua constituição um material poroso e, no caso de aterros para resíduos domésticos, esta situação ocorre apenas na camada de cobertura do lixo.

O método do Balanço das Águas, proposto pela CETESB (28), pode ser expresso de forma simplificada pela Eq. (3)

$$PER = P - ES - \Delta AS - ER \quad \text{Eq. (3)}$$

onde:

PER = altura mensal percolada (mm)

P = médias mensais de precipitação (mm)

ES = escoamento superficial, obtido aplicando-se o coeficiente de escoamento superficial às médias mensais de precipitação

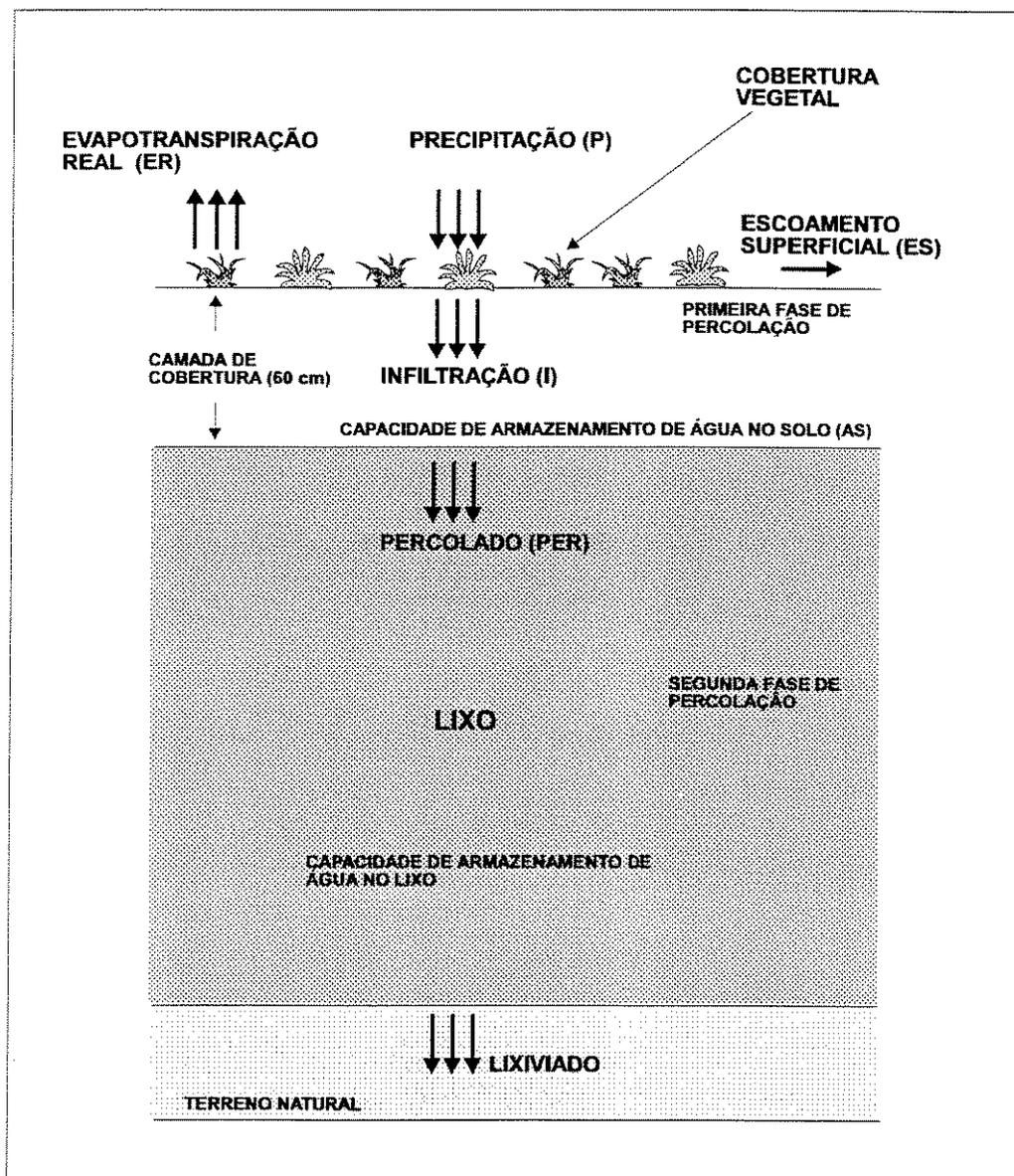


Figura 14 - Modelo de percolação de líquidos em um aterro de resíduos.
 Fonte: CETESB (28)

- ΔAS = troca de armazenamento de água no solo, representa a variação da quantidade de água armazenada no solo, mês a mês
- ER = Evapotranspiração real, representa a quantidade real de perda de água durante um dado mês

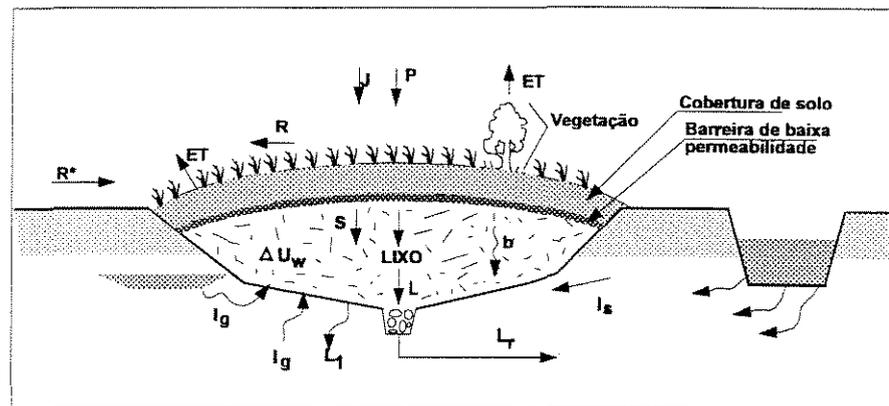
De acordo com HARRINGTON e MARIS (41) o volume de chorume produzido é afetado pela capacidade de absorção do resíduo, sendo função do grau de compactação e da natureza do resíduo. No Reino Unido, é geralmente aceito que 1 m³ de resíduo pode gerar 125 litros de chorume. Sendo que as condições climáticas locais são importantes, incluindo nesta análise as taxas de pluviosidade, umidade e evapotranspiração. Sendo também relevantes aspectos físicos como a hidrogeologia, fluxo de água subterrânea, permeabilidade do solo e escoamento superficial.

De acordo com Lu et alli, citado por CANZIANI e COSSU (26), os principais fatores que influem na formação do chorume são:

- água disponível - água de chuva, água superficial, umidade do lodo, recirculação do chorume ou irrigação da cobertura final;
- características da cobertura final - tipo de solo e vegetação, presença de material de cobertura impermeável, declividade ou outras características topográficas;
- características dos resíduos - densidade, método de aterramento, umidade do resíduo quando aterrado.
- método de impermeabilização - do sítio e/ou características do solo do local

De acordo CANZIANI e COSSU (26), em trabalho realizado na Alemanha, a chuva representa a maior contribuição para a produção de chorume. E, o pico no volume produzido, ocorre no final do inverno e na primavera principalmente, pois a evapotranspiração reduz a produção de chorume no verão. A figura 15 representa de forma genérica, o balanço hidrológico em um aterro sanitário, que pode ser expresso também pelas Eqs. (4), (5), (6) e (7).

$$P_i = P + J + R^* - R - ET \pm \Delta U_s \quad \text{Eq. (4)}$$



- P = precipitação
- J = irrigação ou recirculação de chorume
- R = escoamento superficial nas células
- R* = escoamento superficial em áreas externas às células
- ET = evapotranspiração atual
- S = água adicionada pela disposição de lodos
- b = água produzida ou consumida pela degradação biológica da matéria orgânica
- U_w = umidade do lixo
- L = produção total de chorume
- I_g e I_s = água dos aquíferos naturais
- L_i = infiltração de chorume no solo
- L_r = volume de chorume coletado pelos drenos

Figura 15 - Esquema do balanço hidrológico geral em um aterro sanitário com sistema de drenagem. Fonte: CANZIANI e COSSU (26)

onde:

- Pi = infiltração na camada de cobertura
- P = precipitação
- J = irrigação ou recirculação de chorume
- R = escoamento superficial nas células
- R* = escoamento superficial em áreas externas às células
- ET = evapotranspiração atual
- Us = umidade do solo

$$P1 = Pi + S + Is + Ig \quad \text{Eq. (5)}$$

onde:

- P1 = infiltração através das camadas de lixo
- S = água adicionada pela disposição de lodos
- Is, Ig = água dos aquíferos naturais

$$L = P1 \pm \Delta U_w + b \quad \text{Eq. (6)}$$

onde:

- L = produção total de chorume
- Uw = umidade do lixo
- b = água produzida ou consumida pela degradação biológica da matéria orgânica

$$LR = L - Li \quad \text{Eq. (7)}$$

onde:

- LR = volume chorume coletado pelos drenos
- Li = infiltração de chorume no solo

Conforme apresentado neste modelo e na figura 15, a contribuição I_g = água do aquífero natural, para dentro da célula de aterramento. Esta contribuição é indesejável por representar um acréscimo no volume de chorume que percola para o tratamento líquidos e, principalmente, por que a

impermeabilização da célula permite o fluxo neste sentido, evidentemente também permite no sentido contrário, o que significa a contaminação do lençol freático.

Outro ponto questionável, é a adição de água de chuva proveniente de áreas externas às células, que poderia ser evitada com um sistema de drenagem de águas pluviais adequado.

Stegmann citado por CANZIANI e COSSU (26), afirma que a capacidade de campo do lixo pulverizado não é significativamente, diferente do resíduo não pulverizado.

STEGMANN e SPENDLIN (65) concluem que a recirculação controlada do chorume, sem tratamento pode ser feita com o objetivo de aumentar a umidade da massa de lixo, mas somente quando a precipitação anual é menor que 750 a 800 mm/ano. Esta recirculação, no entanto, pode provocar a inibição do processo de decomposição anaeróbia, conforme provado por LIMA (46) e TEIXEIRA (70)

De acordo com MONZÓN et alli (55) os principais mecanismos de transferência entre os resíduos aterrados e a água que infiltra são:

- a passagem de partículas desde o resíduo
- a dissolução de sais solúveis do resíduo
- a estabilização do resíduo, que é a conversão da matéria orgânica degradável para as formas solúveis e gasosas.

3.6. MECANISMOS DE ATENUAÇÃO

De acordo com BAGCHI (14) a estabilização natural no solo, compreende os processos que reduzem a concentração de elementos químicos no chorume até o nível aceitável, por processos naturais.

Conforme o mesmo autor, são identificados os seguintes mecanismos:



- **adsorção:** processo no qual, as moléculas aderem a uma superfície ou partícula de argila;
- **degradação biológica:** mecanismo no qual, os microrganismos são responsáveis redução ou absorção dos constituintes do chorume;
- **reação de troca catiônica:** pode ser definida como a troca de um tipo de íons por outro sem alteração da estrutura mineral;
- **diluição:** processo no qual ocorre a redução da concentração do chorume através da difusão ou dispersão no solo;
- **filtração:** processo físico que ocorre com o chorume, quando parte de seus constituintes ficam retidos nos poros do solo;
- **precipitação química:** processo que envolve a mudança de fase, na qual elementos químicos dissolvidos são cristalizados e depositados em uma solução porque a concentração total excede o limite de solubilidade.

O autor descreve os processos de atenuação considerando o comportamento do chorume no solo, e não, no interior da massa de lixo aterrada. Este enfoque é questionável, pois a área de disposição de resíduos deve ser impermeabilizada e provida de um sistema de drenagem e tratamento de líquidos, que têm a função de evitar a percolação de líquidos para o solo.

A diluição, conforme descrita pelo autor, possibilita a redução da carga orgânica através da distribuição dos poluentes no meio, reduzindo assim, a sua concentração. Desta forma, a diluição não pode ser considerada como um processo de tratamento, pois a quantidade de inicial do resíduo continua a mesma.

O processo de filtração, de acordo com a descrição do autor, reduz a concentração de poluentes no líquido percolado, mas transfere esta carga de poluentes para os poros do solo, não constituindo assim um tratamento.

Os principais mecanismos de atenuação dos elementos constituintes do chorume são apresentados por BAGCHI (14) na tabela 5.

Tabela 5 - Principais mecanismos de estabilização de constituintes do chorume

ELEMENTO CONSTITUINTE	PRINCIPAIS MECANISMOS DE ESTABILIZAÇÃO	MOBILIDADE EM MEIO ARGILOSO
1 - Alumínio	Precipitação	Baixa
2 - Amônia	Troca catiônica e degradação biológica	Moderada
3 - Arsênio	Precipitação, adsorção	Moderada
4 - Bário	Adsorção, troca catiônica e precipitação	Baixa
5 - Berílio	Precipitação e troca catiônica	Baixa
6 - Boro	Adsorção, precipitação	Alta
7 - Cádmio	Precipitação, adsorção	Moderada
8 - Cálcio	Precipitação, troca catiônica	Alta
9 - Demanda Química de Oxigênio	Degradação biológica, filtração	Moderada
10 - Cloreto	Diluição	Alta
11 - Cromo	Precipitação, troca catiônica e adsorção	Cr ⁺³ - Baixa Cr ⁺⁶ - Alta
12 - Prata	Adsorção, troca catiônica e precipitação	Baixa
13 - Cianeto	Adsorção	Alta
14 - Fluoreto	Troca catiônica	Alta
15 - Ferro	Precipitação, troca catiônica e adsorção	Moderada
16 - Chumbo	Adsorção, troca catiônica e precipitação	Baixa
17 - Magnésio	Troca catiônica, precipitação	Moderada
18 - Manganês	Precipitação, troca catiônica	Alta
19 - Mercúrio	Adsorção, precipitação	Alta
20 - Níquel	Adsorção, precipitação	Moderada
21 - Nitrato	Degradação biológica, diluição	Alta
22 - Potássio	Adsorção, troca catiônica	Moderada
23 - Selênio	Adsorção, troca catiônica	Moderada
24 - Sílica	Precipitação	Moderada
25 - Sódio	Troca catiônica	Baixa / Alta
26 - Sulfato	Troca catiônica, diluição	Alta
27 - Zinco	Troca catiônica, adsorção e precipitação	Baixa
28 - Vírus	Não conhecida	Baixa
29 - Compostos orgânicos voláteis	Degradação biológica, diluição	Moderada

Fonte: BAGCHI (14)

3.7. COMPACTAÇÃO

O controle da compactação dos resíduos nos aterros sanitários é um dos principais fatores operacionais, pois dele dependem a quantidade de lixo que pode ser aterrada em um determinado espaço e o controle de recalques e do próprio processo de decomposição. Os estudos de Buivid, citados por LIMA (46), comprovam a técnica da forte compactação, conforme pode ser vista na figura 16, onde é mostrada a curva de umidade versus compactação.

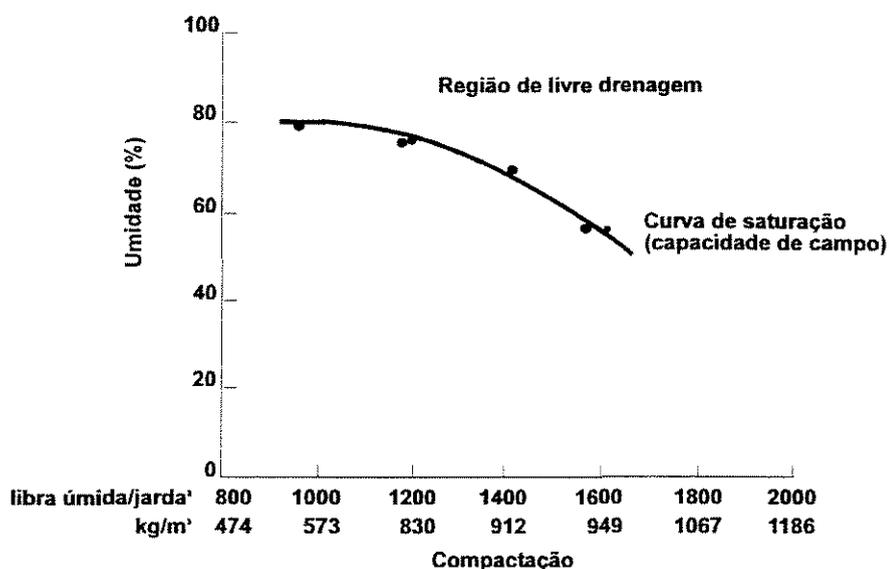


Figura 16 - Curva de umidade x compactação, segundo Buivid.
Fonte: LIMA (46)

A análise da curva feita por LIMA (46), indica que quanto maior for a compactação menor será a produção de chorume e a livre drenagem. Ainda de acordo com este estudo, foram feitas sugestões visando modificar a forma de compactação do lixo nas células, ou seja, escolhendo-se a inclinação 1:3 (vertical : horizontal), como rampa ideal para a frente de serviço de disposição do lixo, de forma a obter-se um grau de compactação em torno de 594 a 713 kg/m³. A compactação deve ser feita no sentido ascendente, em pequenas camadas, e de forma que o equipamento passe de 3 a 5 vezes sobre o material.

3.8. ESTABILIDADE DE TALUDES

A ABNT (3) indica que devem ser apresentadas as hipóteses, os parâmetros e as fórmulas utilizadas para o cálculo de estabilidade de taludes, bermas de equilíbrio e recalques diferenciais, para os maciços de terra e dos resíduos sólidos.

No caso dos maciços de terra, deverão ser utilizados os métodos da mecânica dos solos, mas no caso dos resíduos sólidos, estes métodos devem ser utilizados com algumas restrições.

De acordo com CANCELLI (25), a estabilidade de um aterro sanitário é influenciada por alguns fatores, que interagem entre si, sendo os mais importantes:

- propriedades geotécnicas dos resíduos *in situ*, (dependendo da composição inicial, dos métodos de disposição e compactação, das condições físico-químicas da estabilização dos resíduos, período de utilização do aterro);
- propriedades geotécnicas das camadas de cobertura intermediária e final;
- inclinação e altura do talude;
- presença de gás no aterro;
- presença de água infiltrando no aterro e o regime de escoamento sob pressão em meios porosos.

Este autor considera que quando conceitos teóricos e procedimentos experimentais da mecânica dos solos clássica são estendidos aos resíduos, as seguintes diferenças são importantes:

- componentes minerais do solo natural têm sido submetidos ao processo de intemperização por longos períodos, de milhões de anos, indicando que estas modificações ocorrem lentamente em tempo geológico;

- em contraste, muitos materiais que compõem o lixo, são química e biologicamente ativos e, podem mudar a sua natureza e propriedades em curto espaço de tempo (da ordem de décadas ou menos).

De acordo com CANCELLI (25), outros fatores devem ser considerados, como a heterogeneidade, natureza e dimensões dos vários componentes do lixo urbano.

CANCELLI (25) apresenta ainda os seguintes parâmetros para os resíduos sólidos urbanos:

- densidade 150 a 350 kg/m³ - resíduo não compactado
350 a 550 kg/m³ - compactação leve
800 a 1000 kg/m³ - forte compactação
- ângulo de atrito ϕ = 25 a 26°
- coesão máxima = 30 kpa

De acordo com BENVENUTO, CRUZ e MIRANDA (16), os parâmetros mecânicos do lixo, como compressibilidade, resistência ao cisalhamento e permeabilidade, podem variar em cada célula em função da variação nas proporções de chorume, gases e matéria sólida, o que dificulta a formulação de modelos de análise do seu comportamento.

Conforme estes autores a densidade do lixo é extremamente variável, registrando densidades muito baixas (0,2 a 0,5 t/m³) a valores próximos à densidade da água (0,90 a 1,20 t/m³). Sendo que para os aterros AS-1 e AS-2, próximos à cidade de São Paulo, a densidade estimada é de 1,10 t/m³ (para o lixo não submerso) e 1,30 t/m³ (para o lixo submerso).

Neste caso podem ser feitas as seguintes considerações:

- a densidade de 0,2 a 0,5 t/m³ referem-se, possivelmente, ao lixo sem compactação;
- os valores mais elevados, referem-se ao lixo compactado e, possivelmente ao lixo velho, pois valores próximos a 1,10 - 1,20 t/m³ foram encontrados por LIMA (51) no lixo velho no aterro de Canabrava em Salvador.

A tabela 6 apresentada por BENVENUTO, CRUZ e MIRANDA (16), mostra a variações citadas anteriormente.

Tabela 6 - Resumo de parâmetros de resistência ao cisalhamento

TIPO DE ATERRO	DENSIDADE t/m ³	RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO	
		c' (kpa)	φ' (°)
Lixo municipal sólido não compactado	0,24 - 0,40		
pouco compactado	0,30		
bem compactado	0,60 - 0,90		
Lixo municipal sólido Recente	0,40 - 1,00	30 - 50	38 a 40
Decomposto	0,80 - 1,20	5 -30	17 a 27
Aterro Sanitário AS-1	1,00 - 1,30	13,5	22
Lixo-Lixo	0,50	16	21
Lixo-Lixo	0,70	24	22
HDPE - geomembrana - lixo		0	17
Areia com pedregulho - lixo		15	38
HDPE - geomembrana - argila		8	26
HDPE - geomembrana - geotextil		0	14
φ' = ângulo de atrito c' = coesão			

Fonte: BENVENUTO, CRUZ e MIRANDA (16)

BENVENUTO, CRUZ e MIRANDA (16) concluem em seu estudo que:

- os estudos de estabilidade de taludes em aterros sanitários de lixo doméstico, configuram situações complexas, sendo que, estes não poderão ser analisados como taludes homogêneos;

- a adoção de parâmetros bibliográficos de resistência deve ser feita com muito critério e, considerar como foram obtidos;
- apesar de indicações de que as rupturas superficiais sejam mais prováveis de ocorrer, do que rupturas profundas, não se pode considerar que estas sejam conclusivas, de forma que este assunto deve ser mais estudado;
- devido ao material em decomposição contido nos aterros sanitários é fundamental que seja feita uma previsão dos parâmetros de resistência em função do tempo e se reavalie as condições de estabilidade. Dados apresentados sugerem uma redução de resistência com o tempo.
- a implantação de sistemas de drenagem de líquidos e de queima de gases, são indispensáveis ao bom desempenho dos aterros.

Estas conclusões demonstram a complexidade que envolve a questão e, seria importante incorporar mais algumas considerações:

- a altura dos aterros, ou seja, o número de camadas de lixo, deverá a nível de projeto ser limitado, de forma a colaborar com a segurança dos mesmos;
- o controle de compactação dos resíduos é de fundamental importância para a estabilidade do aterro;
- a drenagem dos líquidos e gases deve ser operada e mantida constantemente e, no caso de gases considerar a exaustão forçada;
- a cobertura final com espessura de 1,0 m, com compactação que permita o selamento da célula, deve ser considerada como um elemento de contenção da massa de lixo aterrada e de proteção à infiltração de águas pluviais, que podem comprometer a estabilidade da estrutura;
- implantar um sistema de drenagem de águas pluviais que permita o rápido escoamento das águas de chuvas, evitando a infiltração e erosão dos taludes.

3.9. DRENAGEM DE ÁGUAS PLUVIAIS

De acordo com a ABNT (3), deve ser previsto um sistema de drenagem de águas pluviais que estejam direcionadas para a área do aterro sanitário, assim como as águas que precipitem sobre essa área.

A ABNT (3) indica ainda que, para descrição do sistema devem ser apresentados pelo menos:

- indicação da vazão de dimensionamento do sistema;
- disposição dos canais em planta, em escala não inferior a 1:1000;
- indicação das seções transversais e declividade do fundo dos canais em todos os trechos;
- indicação do tipo de revestimento (quando existente) dos canais, com especificação quanto ao material utilizado;
- indicação dos locais de descarga da água coletada pelos canais;
- detalhes de todas as singularidades existentes, tais como alargamentos ou estrangulamentos de seção, curvas, degraus, obras de dissipação de energia e outros.

A drenagem de águas pluviais em um aterro sanitário visa:

- evitar a erosão de taludes e bermas;
- reduzir a quantidade de água que infiltra para dentro das células e, conseqüentemente, reduzir a geração de chorume;
- evitar danos ao sistema viário.

De acordo com a CETESB (28), nos aterros, as estruturas drenantes mais econômicas são canais escavados no solo, com seção constante e escoamento à superfície livre.

A CETESB (29), indica para o cálculo da vazão de projeto em áreas de até 1 km², a utilização do método racional, que pode ser definido pela Eq. (8)

$$Q = \frac{1000}{6} \times C.I.A = 166,67 \times C.I.A \quad \text{Eq. (8)}$$

onde:

- Q = deflúvio superficial direto máximo em l/s
- C = o coeficiente de escoamento superficial
- I = intensidade média da chuva em mm/min
- A = área da bacia em hectares (ha)

De acordo com a CETESB (29) o coeficiente de escoamento superficial é a relação entre o deflúvio superficial direto máximo em mm/min e a intensidade média da chuva também em mm/min. Para esta intensidade média considera-se uma duração de chuva igual ao tempo de concentração da bacia em estudo. Sendo que o tempo de concentração pode ser definido como o tempo requerido pela água para escoar desde o ponto mais distante da bacia até o local de interesse.

No caso do aterro sanitário celular, deve-se considerar duas análises, a macro e microdrenagem. A microdrenagem consiste no dimensionamento dos canais e tubulações, que irão escoar as águas pluviais que caem sobre as células, de forma a evitar que esta contribuição venha aumentar o volume de chorume. A macrodrenagem consiste na análise da bacia de drenagem formada pela área total do aterro, considerando os valores descritos anteriormente.

Como limitação do método racional, a CETESB (29) cita que este, normalmente, apresenta apenas um ponto do hidrograma. E, ainda quando a bacia de drenagem torna-se complexa, ou seja, com várias sub-bacias, este método tende a superestimar as descargas, o que pode resultar em obras de drenagem superdimensionadas.

Em geral, no caso de aterros sanitários as áreas permitem a utilização do método racional, mas em casos específicos, ou seja, quando a área é superior ao limite de 100 ha ou a bacia de drenagem é complexa, é necessário o cálculo da chuva efetiva e a determinação do hidrograma unitário das bacias ou bacias que compõem a área.

3.10. IMPERMEABILIZAÇÃO

A impermeabilização das células é a principal barreira para a migração de chorume e gases para o ambiente. Esta pode ser executada com materiais sintéticos ou solo argiloso compactado.

De acordo com WORKMAN E KEEBLE (71), o projeto da impermeabilização deve considerar:

- eficiência;
- resistência aos esforços mecânicos;
- durabilidade;
- disponibilidade dos materiais.

A CETESB (28) quando do uso de argilas compactadas exige as seguintes condições:

- apresentar uma porcentagem de argila de 30%, que passe na peneira # 200;
- limite de liquidez $\geq 30\%$;
- índice de plasticidade $\geq 15\%$;
- $\text{pH} \geq 7$;
- condutividade hidráulica ou coeficiente de permeabilidade na condição saturada, inferior a 10^{-7} cm/s, quando compactado.

Segundo DE MELLO e DO VAL (36), da camada de impermeabilização com argila, são necessárias as seguintes propriedades:

- minimizar, de acordo com o material escolhido, a sua espessura e critério de compactação, o fluxo e a difusão molecular através dela;
- resistência à erosão e a penetração de água;
- alta capacidade de adsorção, devido aos argilo-minerais;
- pequena deformabilidade e boa capacidade de auto-cicatrização, devido à sua plasticidade;
- resistência à percolação de água, que depende do teor de minerais expansivos na argila;

- conhecimento prévio da possibilidade de ocorrência de inchamento devido à sucção por capilaridade de água do subsolo.

DE MELLO e DO VAL (36) citam alguns parâmetros mínimos para certas propriedades geomecânicas para a camada de revestimento de fundo, como pode ser visto no quadro 1.

Quadro 1 - Propriedades geomecânicas da camada de revestimento de fundo

Shackelford e de Mello (camada argilosa)	condutividade hidráulica $< 10^{-7}$ cm/s,
	índice de plasticidade $12\% < IP < 20\%$
	porcentagem de material fino, passante na peneira # 200 $> 30\%$
	espessura mínima de selo argiloso compactado = 1,0 metro
	Obs: Em alguns países existem regras mais rígidas, como é o caso da Alemanha, que preconizam condutividade hidráulica $< 10^{-8}$ cm/s e espessura mínima de 1,5 metros.
EPA, Richardson e Koerner (membrana flexível sintética)	prevenção total de fluxo de fluidos e de gases através dela
	estabilidade química por longo prazo
	minimização do processo de difusão molecular
	resistência à problemas gerados pelo recalques absolutos e diferenciais
	resistência à perfuração e boa soldagem

Fonte: DE MELLO e DO VAL (36)

DE MELLO e DO VAL (36) concluem que apesar do aparente rigor das normas e recomendações internacionais e nacionais, quanto à impermeabilização de áreas de disposição de resíduos, esta atitude é justificada pelo atual grau de desconhecimento da fenomenologia envolvida, aliado ao elevadíssimo custo dos reparos necessários em caso de insucesso.

3.11. IMPACTOS AMBIENTAIS

A implantação e operação de um aterro sanitário consiste, evidentemente, em um dos empreendimentos, potencialmente, mais impactantes do meio ambiente. Em função desta característica, o aterro sanitário é uma das unidades que a Resolução CONAMA n° 001, de 23 de Janeiro de 1986, lista em seu artigo 2°, inciso X.

Segundo LEE (44) os estudos de impactos ambientais são necessários para se prever e relatar seus efeitos e identificar as medidas mitigadoras apropriadas e conclui que a previsão de impactos pode ser feita de três formas:

- avaliação qualitativa - a comparação com os impactos conhecidos de projetos similares
- avaliação quantitativa - baseia-se num balanço de massa e nos cálculos de diluição ambiental
- avaliação quantitativa baseada em modelos matemáticos e múltiplos fatores ambientais.

Conforme BISSET (18), várias alternativas que um EIA apresenta (entre elas a de não execução do projeto), são obtidas a partir de algumas atividades principais:

- identificação do impacto
- previsão e quantificação do impacto
- interpretação e avaliação
- identificação das necessidades de monitoramento e medidas mitigadoras
- comunicação destas informações para os usuários, ou seja, os dirigentes e membros da comunidade.

De acordo com ANDREOTTOLA, COSSU e SERRA (11) impacto ambiental é o termo que define a alteração ambiental provocada por atividades relacionadas à implementação de um programa.

- compreender como respondem os sistemas às interferências humanas;
- usar modelos;
- reconhecer limitações técnicas;
- implementar programas de monitoração."

De forma a sintetizar os principais métodos de avaliação de impactos ambientais (AIA), o quadro 2 apresenta uma comparação entre eles, considerando os prós e contras de sua utilização.

Quadro 2 - Síntese e comparação dos principais tipo de métodos de avaliação de impacto ambiental (AIA)

TIPO DE MÉTODO	BREVE DESCRIÇÃO	APLICAÇÃO	VANTAGENS	DESVANTAGENS
Métodos <i>Ad Hoc</i>	Reunião de especialistas; criação de grupos de trabalho com profissionais de diversas disciplinas.	Avaliações em tempo curto e quando há carência de dados. A legislação vigente no país não permite sua utilização como método de AIA.	Rapidez Baixo custo	Não promovem análise sistemática dos impactos. Resultados com alto grau de subjetividade e fundamento técnico-científico deficiente.
Listagens de Controle Simples	Listas de fatores ambientais, às vezes associados a , parâmetros, e de ações de projeto	Diagnóstico ambiental da área de influência	Ajudam a lembrar de todos os fatores ambientais que podem ser afetados, evitando omissões de impactos ambientais relevantes.	Não identificam impactos diretos ou indiretos Não consideram características temporais dos impactos, nem espaciais
Descritivas	Listas mais orientação para análise dos impactos (fontes de dados), técnicas de previsão, questionários.	Diagnóstico ambiental da área de influência; análise de impactos		Não analisam as interações dos fatores ou dos impactos ambientais Não consideram dinâmica dos sistemas ambientais

continuação

TIPO DE MÉTODO	BREVE DESCRIÇÃO	APLICAÇÃO	VANTAGENS	DESVANTAGENS
Escalares	Listas mais escalas de valores para fatores e impactos ambientais	Diagnóstico ambiental; comparação de alternativas		Quase nunca indicam a magnitude dos impactos substituindo-a por símbolos.
Escalares Ponderadas	Como as escalares, incorporando o grau de importância dos impactos.	Diagnóstico ambiental; valoração dos impactos; comparação de alternativas.		Resultados subjetivos
Matrizes de Interação	Listagens de controle bidimensionais dispostas nas linhas os fatores ambientais e nas colunas as ações do projeto; cada célula de interseção representa a relação de causa e efeito geradora do impacto.	Identificação dos impactos ambientais diretos.	Boa disposição visual do conjunto de impactos diretos. Simplicidade de elaboração. Baixo Custo	Não identificam impactos diretos. Não consideram características espaciais dos impactos. Subjetividade na atribuição da magnitude, usando valores simbólicos para expressá-la. Não atendem às demais etapas do EIA. Não consideram a dinâmica dos sistemas ambientais.

(continuação)

TIPO DE MÉTODO	BREVE DESCRIÇÃO	APLICAÇÃO	VANTAGENS	DESVANTAGENS
Redes de Interação	Gráfico ou diagrama representando cadeias de impactos gerados pelas ações do projeto.	Identificação dos impactos ambientais diretos e indiretos (secundários, terciários, etc.)	Abordagem integrada na análise dos impactos e interações. Facilidade de troca de informações entre disciplinas.	Não destacam importância relativa dos impactos. Não consideram aspectos temporais e espaciais dos impactos. Não atendem às demais etapas do EIA. Não consideram a dinâmica dos sistemas ambientais.
Superposição de Cartas	Preparação de cartas temáticas em transparência, síntese das interações dos fatores ambientais por superposição das cartas ou processamento no computador.	Projetos lineares - escolha de alternativas de menor impacto. Diagnósticos ambientais	Boa disposição visual; dados mapeáveis	Subjetividade dos resultados. Não quantifica a magnitude dos impactos. Não admite fatores ambientais, não mapeáveis; difícil integração de impactos sócio-econômicos. Não atende às demais etapas do EIA. Não considera a dinâmica dos sistemas ambientais.

(continuação)

TIPO DE MÉTODO	BREVE DESCRIÇÃO	APLICAÇÃO	VANTAGENS	DESVANTAGENS
Modelos de Simulação	Modelos matemáticos computadorizados que representam o funcionamento dos sistemas ambientais	Diagnósticos e prognósticos da qualidade ambiental da área de influência. Comparação de alternativas - cenários. Projetos de grande porte.	Considera a dinâmica dos sistemas ambientais, interação entre fatores e impactos, variável temporal. Promovem troca de informações e interações das disciplinas. Tratamento organizado de grande número de variáveis qualitativas e quantitativas.	Representação imperfeita qualidade. Custo elevado. Uso de computadores.

Fonte: MOREIRA (56)

De acordo com ANDREOLI et alli (9), os aterros sanitários estão sujeitos à avaliação de impactos ambientais (AIA), sempre que a quantidade de resíduos a ser disposta seja igual ou superior a 50 toneladas diárias.

Analisando os vários métodos de avaliação de impacto ambiental (AIA), conclui-se que não existe uma metodologia indicada, mas várias, que têm prós e contras, conforme é mostrado no quadro 2. Em função deste fato, verifica-se que cada metodologia é adotada de acordo com os mais variados critérios como:

- a complexidade do empreendimento;
- a disponibilidade de recursos;
- os objetivos do trabalho;
- capacidade da equipe técnica;
- tempo disponível para a execução do trabalho.

A elaboração de Estudos de Impactos Ambientais (EIA), para aterros sanitários, como já foi exposto é uma exigência legal, mas o enfoque dado a este tipo de unidade é o de confinamento de resíduos e não de tratamento,

sendo que na literatura consultada não se encontra referência à avaliação dos impactos da bioestabilização dos resíduos aterrados e da perenização dos locais de tratamento.

Como o aterramento de resíduos é uma atividade que provoca impactos ambientais, a avaliação destes impactos, é um ponto importante para o desenvolvimento, implantação e operação de um projeto de aterro sanitário celular.

A elaboração de um projeto de aterro sanitário necessita de um Estudo Preliminar de Impacto Ambiental, o qual tem como objetivo, apresentar uma listagem de controle dos impactos mais comuns, neste tipo de empreendimento e indicar as medidas mitigadoras, que deverão se implementadas nas fases implantação e operação.

4. METODOLOGIA

A metodologia adotada para a elaboração deste trabalho consistiu, inicialmente, da análise crítica das normas técnicas relativas a resíduos sólidos e elaboração de projetos de aterros. Desta forma, foi possível estabelecer o cenário atual, quanto às exigências dos órgãos de controle ambiental e, conseqüentemente, avaliar o nível de detalhamento dos projetos atuais.

Nesta análise foram consideradas as seguintes normas:

- NBR 10004 - Classificação de resíduos sólidos.
- NBR 10005 - Lixiviação de resíduos.
- NBR 10006 - Solubilização de resíduos.
- NBR 10007 - Amostragem de resíduos.
- NBR 8419 - Apresentação de projetos de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos
- NBR 8849 - Apresentação de Projetos de Aterros Controlados de Resíduos Sólidos Urbanos
- Norma para apresentação de projetos de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos - CETESB.
- Construção de poços de monitoramento de aquífero freático - CETESB.

Na seqüência, foi feita uma revisão bibliográfica, de forma a avaliar o estado-da-arte e fundamentar os procedimentos que foram propostos neste trabalho.

Em função, da revisão bibliográfica, da experiência na elaboração de projetos de aterros sanitários celulares e os resultados obtidos nestes projetos, foi definida a seqüência da metodologia proposta.

5 - RESULTADOS

O resultado deste trabalho é a proposta de metodologia para elaboração de projeto de aterros celulares, ou seja, método de tratamento de resíduos com possibilidade de perenização do espaço físico, que será apresentada na seqüência.

Nesta proposta, o projeto de um aterro celular é dividido basicamente em:

- Estudos Preliminares
- Projeto Básico
- Projeto Executivo

5.1 - ESTUDOS PRELIMINARES

Esta fase, consiste nos trabalhos de coleta e análise de dados, que permitam a elaboração dos seguintes tópicos:

- elaboração de um diagnóstico da situação atual;
- escolha da área adequada para a implantação do aterro, caso esta não tenha sido escolhida em um estudo próprio;
- formulação do modelo tecnológico;
- projeções de crescimento populacional e nas taxas de geração de resíduos;

- a caracterização dos resíduos;
- descrição dos aspectos físicos, biológicos e sociais da área (clima, vegetação, hidrografia, uso do solo, etc.);
- estudo preliminar de impactos ambientais.

5.1.1 - ELABORAÇÃO DO DIAGNÓSTICO DA SITUAÇÃO ATUAL

Este estudo consiste na análise crítica da situação de coleta, transporte e disposição dos resíduos sólidos. Desta forma as possíveis falhas que ocorram nas etapas de coleta e transporte podem ser detectadas e corrigidas, pois é importante que se tenha uma previsão real da quantidade de resíduos a ser destinados à unidade de tratamento.

5.1.2 - ESCOLHA DE ÁREA

A escolha de áreas para a implantação de um aterro celular, conforme foi citado na revisão bibliográfica, deve seguir as exigências da ABNT (3):

- zoneamento ambiental;
- zoneamento urbano;
- acessos;
- vizinhança;
- economia de transporte;
- titulação da área escolhida;
- economia operacional do aterro sanitário (jazida, etc);
- infraestrutura urbana;
- bacia e sub-bacia hidrográfica onde o aterro sanitário se localizará.

Além destas exigências, devem ser acrescentados os seguintes estudos:

- levantamentos topográficos e/ou aerofotogramétrico das áreas;

- levantamentos geológicos;
- estudo de viabilidade;
- estudo preliminar de impactos ambientais;
- tendência de ocupação da área;
- estado atual.

A partir do cumprimento destas exigências e realização dos estudos indicados, ter-se-á condições de escolher a área mais adequada, para a implantação de um aterro sanitário celular.

5.1.3 - MODELO TECNOLÓGICO

O modelo tecnológico, consiste na apresentação do sistema que permitirá organizar, partir da origem, o fluxo de resíduos. A definição deste modelo é fundamental para a concepção do projeto, pois, é a partir desta que será possível elaborar o fluxo mássico de resíduos, que é o ponto de partida para a obtenção da capacidade e do tempo de utilização de cada célula.

O princípio básico é a coleta diferenciada dos principais tipos de resíduos, a saber:

- domiciliar;
- resíduos de podas e limpeza de jardins;
- entulhos
- resíduos de unidades que compõem o sistema de saúde (comumente denominado de hospitalar);
- industriais.

Esta estratégia permite que cada tipo de resíduos receba o tratamento adequado de acordo com as suas características. É importante destacar que cada tipo de resíduo, deve ser classificado de acordo com a ABNT (4) em:

- Classe I - perigosos
- Classe II - Não inertes
- Classe III - Inertes.

Os considerados resíduos perigosos, de acordo com a ABNT (4) devem receber tratamentos específicos, de acordo com as suas características, destacando entre os principais métodos a incineração, tratamento físico-químico e o aterramento. Este tipo de resíduo não será abordado neste trabalho.

Os resíduos considerados inertes (classe III), de acordo com a ABNT (4), podem ser encaminhados para aterros de inertes, que podem ou não estar localizados na mesma área do aterro sanitário celular, sendo no entanto, uma unidade complementar deste.

Os resíduos considerados não inertes (classe II), de acordo com a ABNT (4), podem ser co-dispostos com os resíduos domésticos.

Os resíduos de serviços de saúde, em geral denominados de hospitalares, são aqueles gerados nas unidades que compõem o sistema de saúde, ou seja, hospitais, clínicas médicas e veterinárias, consultórios médicos e odontológicos, farmácias, postos de saúde, etc. De acordo com a ABNT (4), a parcela destes resíduos que apresentarem patogenicidade, são classificados como Classe I - Perigosos.

A ABNT (6), também classifica estes resíduos quanto aos seus riscos potenciais ao meio ambiente e à saúde pública como pode ser visto no quadro 3.

Quadro 3 - Classificação dos Resíduos dos Serviços de Saúde

CLASSE	TIPO
A - Resíduos Infectantes	A1 - Biológico
	A2 - Sangue e hemoderivados
	A3 - Cirúrgico, anatomopatológico e exsudato
	A4 - Perfurante ou cortante
	A5 - Animal contaminado
	A6 - Assistência ao paciente
B - Resíduo Especial	B1 - Rejeito radioativo
	B2 - Resíduo farmacêutico
	B3 - Resíduo químico perigoso
C - Resíduo Comum	

Fonte: ABNT (6)

Estes resíduos devem ser segregados na origem, de forma que os materiais que não apresentarem características que os definam como resíduos Classe I - perigosos, sejam encaminhados à coleta regular, os demais deverão sofrer uma coleta e tratamento especial, de acordo com as suas características.

O maior enfoque será dado aos resíduos de origem domiciliar, que terão como tratamento o aterro sanitário celular. No entanto, ter-se-á o cuidado, de não se considerar, esta unidade como um tratamento isolado, mas como parte de um sistema integrado de tratamento de resíduos sólidos.

Dentro desta concepção, compreende-se que a área utilizada para um aterro sanitário celular, deve ser considerada como uma central de tratamento de resíduos, que pode reunir várias outras unidades de tratamento como: central de podas e compostagem, central de entulhos, etc., que funcionam de forma integrada.

Desta forma, o modelo tecnológico deve contemplar o fluxo de massa para cada unidade componente do sistema, possibilitando o seu dimensionamento. Para que isso seja possível, deve-se trabalhar com cenários anuais ou mensais, de acordo com a situação, possibilitando, inclusive, que o sistema seja modulado, favorecendo a sua implantação.

De forma a apresentar uma estrutura básica para a formulação de modelos, foram consideradas duas situações principais: com a segregação do lixo domiciliar na origem ou não, como pode ser visto nas figuras 17 e 18.

O processo com segregação origem, considera além da separação e coleta diferenciada dos principais tipos de resíduos: entulhos, podas, domiciliar e hospitalar; a separação do lixo domiciliar e seu acondicionamento em "containers" próprios, com apenas três divisões: biodegradáveis, recicláveis, descartáveis.

De acordo com LIMA (47), os biodegradáveis são os resíduos sujeitos à ação de organismos decompositores, transformando-os em um material biogênico mais estável. Este resíduos representam em média 50% do total gerado, no caso brasileiro.

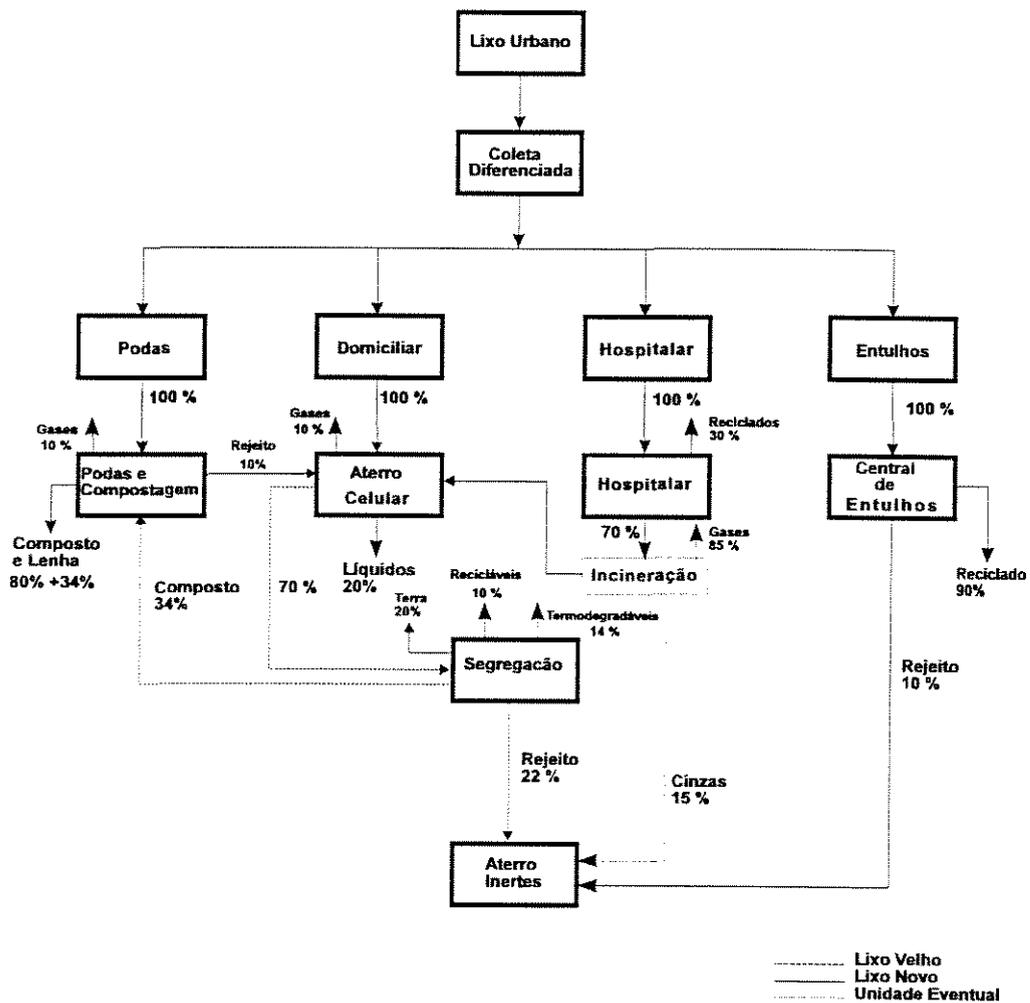


Figura 17 - Modelo proposto - sem segregação na origem.
 Fonte: LIMA (51)

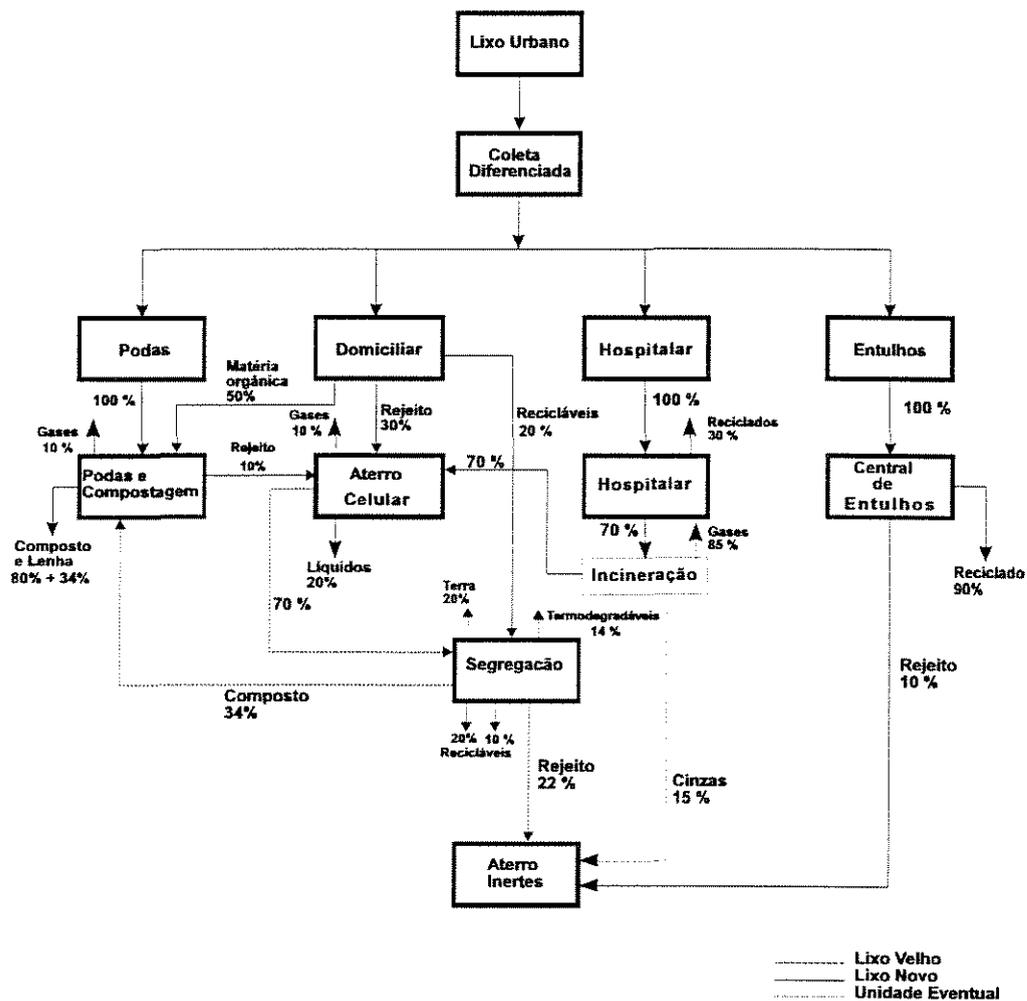


Figura 18 - Modelo proposto - com segregação na origem.
 Fonte: LIMA (51)

Os resíduos recicláveis, são aqueles que, potencialmente, podem ser recuperados e inseridos novamente no ciclo produtivo. Estes, segundo estudos de LIMA (51) no aterro de Canabrava em Salvador, representam, em média, 20% do total gerado.

Os resíduos descartáveis, são aqueles que, não apresentam a possibilidade de reciclagem, e mesmo que tenham componentes orgânicos, apresentam contaminantes para o processo de compostagem. Conforme LIMA (51), estes são, em média, 30% do total gerado.

Os modelos apresentados nas figuras 17 e 18, indicam que, havendo a segregação na origem, a quantidade de resíduos que seriam destinados ao aterro sanitário celular é reduzida em, aproximadamente, 70%, sendo um fator de ampliação da vida útil desta unidade, de acordo com os estudos realizados por LIMA (51) no aterro de Canabrava em Salvador.

Este processo de segregação na origem, no entanto, para ser implantado depende de mudanças nos hábitos da população, no sentido de proceder a separação e, principalmente na adaptação do sistema de coleta a esta realidade. Evidentemente, o custo da coleta seria reduzido devido a redução na frequência do serviço.

5.1.4 - LEVANTAMENTO TOPOGRÁFICO

O levantamento topográfico, é o instrumento que permite a visualização em planta, da área escolhida para a implantação da central de tratamento de resíduos e, principalmente para a definição da planta geral, no qual serão locadas as unidades constantes do sistema.

O levantamento topográfico também irá definir a locação dos pontos de sondagem, para o levantamento geotécnico.

No caso do aterro sanitário celular, é importante que este seja localizado nas áreas de cota mais elevada, de forma a evitar as áreas baixas, que além de estarem mais próximas do lençol freático, são em geral, ambientalmente mais frágeis.

O levantamento topográfico é essencial para a definição do movimento de terra, de forma a obter-se um balanço de corte/aterro, que permita o armazenamento de material para cobertura, construção de acessos e manutenção do sistema durante a sua vida útil.

5.1.5 - CARACTERIZAÇÃO HIDROGEOLÓGICA E GEOTÉCNICA

Esta caracterização tem como principais objetivos, de acordo com ACQUAJET (8):

- a definição de unidades rochosas aflorantes nas vizinhanças da área em questão;
- reconhecimento em subsuperfície desta unidades;
- relações litoestratigráficas e estruturais;
- informações da posição do nível d'água;
- estimativas de parâmetros de resistência do substrato;
- obtenção da permeabilidade do substrato;
- definição do comportamento e tendência de fluxo do lençol freático.

Estes dados serão de grande importância para o posicionamento dos poços de monitoramento, do nível de impermeabilização do fundo das células.

Os poços de monitoramento, de acordo com a CETESB (31), devem ser locados da seguinte maneira, 1 poço à montante do empreendimento (branco) e no mínimo 3 poços à jusante da área em questão.

5.1.6 - CLIMATOLOGIA

Neste estudo, são levantados os dados climáticos que podem interferir na operação do aterro sanitário celular.

Os principais parâmetros que devem ser levantados são:

- temperatura: é um fator que, juntamente com a umidade relativa do ar, influi na evaporação, pois em locais cujas temperaturas são mais altas, existe a tendência que os valores de evaporação sejam mais elevados.
- umidade relativa do ar: a umidade relativa do ar influi na evaporação e conseqüentemente no balanço hídrico do sistema e, devido à umidade muito baixa pode ocorrer uma redução na velocidade do processo de decomposição.
- precipitação: é um dado importante para a elaboração do balanço hídrico do sistema e do dimensionamento da rede de drenagem de águas pluviais.
- evaporação: é usado na elaboração do balanço hídrico do sistema.
- insolação: é utilizado apenas quando o cálculo do balanço hídrico é através do método de Thorntwaite.
- direção e intensidade dos ventos: este dado é importante para o estudo preliminar de impacto ambiental, possibilitando adotar medidas mitigadoras para evitar problemas com poeiras, partículas e odores.

5.1.7 - ESTUDOS DEMOGRÁFICOS

Neste estudos são levantados os dados populacionais do local, referentes aos censos passados, taxas de crescimento verificadas e, possíveis projeções.

Desta forma, é possível fazer uma estimativa confiável da população, considerando ainda, os aspectos sócio-econômicos da região, que influem de

forma decisiva no comportamento da dinâmica populacional. Em geral, estas projeções têm um horizonte de 20 anos, sendo que, para períodos maiores, a margem de erro tende a aumentar.

Para o projeto de sistema integrado de tratamento de resíduos, no qual se insere o aterro sanitário celular, este dado é de fundamental importância, pois associado às taxas de geração de resíduos, permite a elaboração dos cenários anuais de geração, tratamento e destinação. A partir destes cenários são estabelecidas as capacidades nominais das unidades do sistema.

No caso do aterro celular, a indicação da sua capacidade nominal dentro do horizonte de projeto, em geral 20 anos, é o dado básico para que se possa dimensionar a área necessária para as células de aterramento.

5.1.8 - CARACTERIZAÇÃO DOS RESÍDUOS

A caracterização dos resíduos consiste no levantamento dos dados referentes à composição física, caracterização físico-química, características de tratabilidade dos resíduos produzidos em uma localidade.

Para esta caracterização são seguidos os procedimentos da ABNT (1, 4, 5, 7) e métodos estatísticos para a avaliação dos resultados.

De acordo com a ABNT (1) as amostras devem ser obtidas através de quarteamentos sucessivos, até uma amostra de 20 Kg a qual deve ser dividida em duas, sendo que uma parte será encaminhada para o laboratório para execução dos ensaios previstos pela ABNT (5, 7). A outra parte será utilizada para obtenção da composição física do lixo.

A partir da composição física do lixo, tem-se as características de tratabilidade dos resíduos, ou seja a seguinte classificação:

- biodegradáveis - matéria orgânica putrescível
- recicláveis - metais, vidros, papéis, papelões, plásticos
- descartáveis - aqueles que não oferecem condições de serem reciclados.

5.1.9 - ESTUDO PRELIMINAR DE IMPACTOS AMBIENTAIS

O Estudo Preliminar de Impactos Ambientais tem como principal objetivo listar, os impactos básicos que ocorrem em empreendimento desta natureza. A partir desta listagem, deverão ser propostas medidas mitigadoras.

Não se pretende com isso, se contrapor com Estudo de Impacto Ambiental previsto na Resolução CONAMA n° 001 de 23 de janeiro de 1986, mas apenas dar diretrizes para a elaboração do projeto básico e executivo, de forma que, as medidas mitigadoras básicas sejam incorporadas aos procedimentos normais de implantação e operação.

Desta forma será apresentada uma listagem e descrição dos principais impactos no meio físico, biológico e antrópico e as respectivas medidas mitigadoras. De acordo com as características da área escolhida é possível que ocorram variações a esta listagem.

5.1.9.1 - ATIVIDADES POTENCIALMENTE CAUSADORAS DE IMPACTOS

Neste item, serão listadas as principais atividades potencialmente causadoras de impactos, no meio físico, biológico e antrópico, de acordo com a etapa que se encontre o empreendimento, implantação, operação e desativação.

5.1.9.1.1 - MEIO FÍSICO

a) Etapa de Implantação

A etapa de implantação apresenta as seguintes atividades, potencialmente causadoras de impactos ambientais, sobre o meio físico:

- preparo do terreno;
- movimento de terra;
- movimentação de máquinas e veículos pesados;
- assentamento de estruturas fixas;
- emissão de ruídos;

b) Etapa de Operação

As atividades apresentadas a seguir, são potencialmente causadoras de impactos ambientais sobre o meio físico, na etapa de operação do aterro celular:

- aterramento de resíduos;
- revolvimento de terra;
- movimentação de máquinas e veículos pesados;
- emissão de ruídos;
- emissão de gases à atmosfera;
- drenagem e tratamento de líquidos

c) Etapa de Desativação

Esta etapa depende da vida útil do sistema integrado de tratamento de resíduos, pois a concepção do aterro celular visa, fundamentalmente a perenização da área de tratamento de resíduos, podendo causar o seguinte impacto na paisagem:

- configuração final das células de aterramento

5.1.9.1.2 - MEIO BIOLÓGICO

a) Etapa de Implantação

As atividades listadas a seguir, podem provocar impactos ambientais sobre o meio biológico, na etapa de implantação:

- movimento de terra;
- movimentação de máquinas e veículos pesados;
- intensa presença e atividade humana;
- emissão de ruídos;
- supressão da vegetação
- recuperação/adequação do sistema viário;
- manutenção total da mata remanescente e fauna associada;
- execução do "cinturão verde".

b) Etapa de Operação

A etapa de operação apresenta as seguintes atividades, potencialmente causadoras de impactos ambientais, sobre o meio biológico:

- movimentação de máquinas e veículos pesados;
- revolvimento de terra;
- emissão de ruídos;
- armazenamento e disposição dos resíduos sólidos;
- emissão de gases provenientes
- manutenção total da mata remanescente e fauna associada;
- reflorestamento de parcelas da área.
- drenagem e tratamento de líquidos

c) Etapa de Desativação

Conforme descrito anteriormente, dependendo da vida útil do sistema a etapa de desativação, apresenta a seguinte atividade como potencialmente causadora de impactos:

- cobertura final das células de aterramento

5.1.9.1.3 - MEIO ANTRÓPICO

a) Etapa de Planejamento

Durante a etapa de planejamento, a seguinte atividade pode causar impactos sobre o meio antrópico:

- seleção e conhecimento da área destinada à implantação do empreendimento;

b) Etapa de Implantação

As atividades listadas a seguir, são potencialmente causadoras de impactos ambientais sobre o meio antrópico:

- preparo do terreno;
- movimentação de terra;
- modificação da paisagem atual de forma irreversível;
- execução do "cinturão verde".

c) Etapa de Operação

As seguintes atividades, são potencialmente causadoras de impactos ambientais sobre o meio antrópico:

- emissão de ruídos;
- emissão de gases;
- revolvimento de terra;
- início do programa de reflorestamento na área;
- preservação da vegetação remanescente e fauna associada;

d) Etapa de Desativação

Na etapa de desativação, apresenta as seguintes atividades como causadoras de impactos ambientais sobre o meio antrópico:

- diminuição no número de máquinas e veículos pesados;
- configuração paisagística final das células de aterramento.

5.1.9.2 - DESCRIÇÃO DOS IMPACTOS AMBIENTAIS

Neste item são descritos os principais impactos provocados pelas atividades listadas anteriormente.

5.1.9.2.1 - PREPARO DO TERRENO

Trata-se dos trabalhos iniciais para a implantação, envolvendo trabalhos de demarcação, limpeza, remoção de entulhos, supressão da vegetação, abertura de acessos viários e instalação do canteiro de obras (alojamentos, depósitos, oficinas, etc.). Todos estes trabalhos e atividades, iniciarão as modificações que darão uma nova configuração estética, paisagística e ambiental à área, de forma irreversível, como pode ser visto a seguir:

- retirada da vegetação espontânea e cultivada
- fuga da fauna associada às vegetações suprimidas
- nova configuração estética e paisagística
- ruídos;

- aumento de poeira nas áreas próximas aos acessos;
- aumento do tráfego de veículos pesados;
- aumento da emissão de poluentes no ar.

a) Medidas mitigadoras

A seguir são relacionadas as medidas mitigadoras, para os impactos citados neste item:

- captura de indivíduos da fauna associada às vegetações suprimidas;
- implantação do cinturão verde para minimizar o nível de ruídos, impactos visuais e emissão de particulados;
- manutenção das vias de acesso ao empreendimento;
- umedecimento das vias de acesso internas, nos períodos de seca, para evitar a emissão particulados.

5.1.9.2.2 - MOVIMENTAÇÃO DE MÁQUINAS E VEÍCULOS

O número de máquinas e veículos, e a intensidade de sua movimentação dependerá do cronograma que for estabelecido às atividades de implantação do aterro. Quando houver uma definição quanto ao número e tipo destes, deverá ser feita uma avaliação da emissão de ruídos, a qual deverá conter as medidas necessárias à sua minimização em termos qualitativos (impactos) e quantitativos, visando proteger os funcionários. Outro ponto importante deste aumento, será a necessidade de incrementar os serviços de manutenção das vias de acesso ao local. Os principais impactos estão listados a seguir:

- ruídos;
- aumento de poeira nas áreas próximas aos acessos;
- aumento do tráfego de veículos pesados;
- aumento da emissão de poluentes no ar.

a) Medidas mitigadoras:

A seguir são apresentadas as medidas mitigadoras para os impactos citados anteriormente:

- implantação do cinturão verde para minimizar o nível de ruídos, impactos visuais e emissão de particulados;
- manutenção das vias de acesso ao empreendimento;
- umedecimento das vias de acesso internas nos períodos de seca, para evitar a emissão de particulados.

5.1.9.2.3 - MOVIMENTAÇÃO DE TERRA

Execução dos cortes e aterros necessários, para a implantação das unidades de tratamento, além do início das fundações estruturais das edificações e instalações previstas. Estas atividades consolidarão a nova configuração da área, gerando novas relações ambientais.

- retirada de vegetação
- fuga de fauna associada à vegetação suprimida
- material particulado
- transporte de sedimentos e potencial assoreamento de cursos d'água
- ruído
- alteração da drenagem superficial
- alteração da paisagem
- ruptura de taludes
- aterramento de várzeas

a) Medidas mitigadoras:

A seguir são apresentadas as medidas mitigadoras para os impactos citados anteriormente:

- executar curvas de nível que evitem o carreamento do solo exposto, pela ação da chuva, para o leito dos cursos d'água;
- Considerar a orientação das fraturas e foliação da rocha que possam determinar planos de fraqueza, evitando cortes nestes sentidos ou adotando medidas de contenção;
- implantação do cinturão verde para minimizar o nível de ruídos, impactos visuais e emissão de particulados;
- manutenção das vias de acesso ao empreendimento;
- umedecimento das vias de acesso internas nos períodos de seca, para evitar a emissão de particulados;
- captura de indivíduos da fauna associada às vegetações suprimidas.
- drenagem superficial

5.1.9.2.4 - CONSTRUÇÃO E ASSENTAMENTO DAS ESTRUTURAS FIXAS

Consiste nos trabalhos de construção civil e montagem das edificações previstas, no projeto, devendo consolidar a nova paisagem local do ponto de vista da estética. Em termos ambientais, deverão ser tomados cuidados especiais para minimizar perturbações aos recursos hídricos e à vegetação preservada.

- alteração da paisagem
- ruídos
- escavações para as fundações

a) Medidas mitigadoras:

Para os impactos descritos no item anterior, são apresentadas as seguintes medidas mitigadoras:

- implantação do cinturão verde para minimizar o nível de ruídos, impactos visuais e emissão de particulados

- considerar a orientação das fraturas e foliação do substrato que podem determinar planos de fraqueza, evitando cortes nestes sentidos ou adotando medidas de contenção;

5.1.9.2.5 - EMISSÃO DE RUÍDOS

Será ocasionada pelas máquinas, veículos e equipamentos utilizados nesta etapa, cujos índices só poderão ser estimados quando for determinado o número e tipo destes.

- incômodo à população e funcionários.

a) Medidas mitigadoras:

As medidas mitigadoras para os impactos causados pela emissão de ruídos, são descritas a seguir:

- implantação do cinturão verde para minimizar o nível de ruídos,
- Construção das estruturas fixas com materiais que produzam boa atenuação dos ruídos para o interior das edificações;
- fornecimento de equipamentos de proteção individual aos funcionários que estiverem submetidos a níveis elevados de ruídos, de acordo com a ABNT.

5.1.9.2.6 - ATERRAMENTO DE RESÍDUOS

Consiste no aterramento dos resíduos nas células do aterro celular, de acordo com especificações e detalhes técnicos previstos em projeto.

- movimentação de máquinas e veículos pesados
- movimentação de terra
- geração de líquidos
- geração de gases

- tratamento dos sólidos, líquidos e gases
- emissão de ruídos
- saúde dos funcionários que trabalham na frente de serviço

a) Medidas mitigadoras:

Para os impactos descritos no item anterior, são apresentadas as seguintes medidas mitigadoras:

- impermeabilização do fundo, laterais e topo das células de aterramento, com coeficiente de permeabilidade máximo, $k = 10^{-7}$ cm/s;
- implantação da rede de drenagem de líquidos percolados
- implantação do tratamento de líquidos percolados;
- implantação da rede de drenagem de gases;
- implantação do tratamento de gases
- manutenção da cobertura diária e final, de forma a evitar a migração de gases e exposição do lixo aterrado;
- localizar a frente de serviço de tal forma que esta tenha a sua visão dificultada, evitando assim impactos visuais para a população local;
- fornecimento de equipamentos de proteção individual aos funcionários

5.1.9.2.7 - COLETA E TRATAMENTO DOS LÍQUIDOS PERCOLADOS

Coleta e tratamento dos líquidos percolados, de acordo com técnicas detalhadas em projeto, que asseguram a redução do seu potencial poluidor, adequando-os aos padrões de lançamento previstos na legislação existente.

- redução do potencial poluidor dos líquidos percolados
- evitar a poluição de águas superficiais e subterrâneas
- controle operacional rígido
- indicador da eficiência do tratamento

Neste caso, os impactos decorrentes do tratamento de líquidos percolados, são positivos, ou sejam, contribuem para a melhoria da qualidade ambiental da área do aterro celular. Portanto, não são previstas medidas mitigadoras.

5.1.9.2.8 - DESCARTE DE EFLUENTES TRATADOS

Consiste no lançamento em corpos d'água dos efluentes provenientes da unidade de tratamento de líquidos percolados e do sistema de tratamento físico-químico.

- lançamento de efluentes tratados em corpos d'água
- potencial aumento do volume de água nos córregos
- alteração na qualidade das águas

a) Medidas mitigadoras:

Para os impactos descritos no item anterior, são apresentadas as seguintes medidas mitigadoras:

- monitorar a eficiência do tratamento de efluentes, para garantir que os líquidos descartados estejam dentro dos padrões permitidos por lei;
- controlar a vazão de descarga, de forma a evitar acréscimos significativos na vazão dos córregos receptores.

5.1.9.2.9 - EMISSÃO DE GASES

Consiste na emissão de gases gerados pelo processo de decomposição anaeróbia dos resíduos dispostos no aterro celular para a atmosfera. Estes gases, no entanto, serão tratados de forma que, os seus efeitos adversos sejam evitados.

- ocorrência de odores
- potencial aumento da poluição do ar
- risco potencial à saúde humana e ao meio biológico

a) Medidas mitigadoras:

Para os impactos descritos no item anterior, são apresentadas as seguintes medidas mitigadoras:

- implantação do sistema de captação e tratamento dos gases emitidos pelo aterro celular
- implantação de um programa de acompanhamento das condições de saúde da população local;
- implantação de um programa de acompanhamento das condições do meio biológico;
- implantar um sistema de obtenção de dados meteorológicos para orientações operacionais.

5.2 - PROJETO BÁSICO

Nesta fase, deve ser apresentado, inicialmente, um ajuste do modelo básico proposto, em função do avanço do dimensionamento do projeto. Este item tem como objetivo básico compatibilizar a proposta apresentada nos Estudos Preliminares aos resultados obtidos no dimensionamento e detalhamento do projeto.

O projeto básico consiste, fundamentalmente, em uma primeira parte de definições, na qual é apresentado o método de tratamento e elementos que compõem o projeto.

A segunda parte consiste no dimensionamento dos métodos de tratamento e elementos definidos anteriormente.

5.2.1 - MOVIMENTAÇÃO DE TERRA

Considerando a estratégia de ocupação dos topos, para a implantação das células de aterramento, a movimentação de terra é necessária para a preparação das células, construção do sistema viário e, fundamental, para garantir material para a cobertura do lixo, implantação do sistema viário e outras obras que compõem a unidade e, manter um estoque que permita a manutenção do sistema durante a sua vida útil, sem que seja necessário a importação de solo de outros locais.

A metodologia para o cálculo do volume de corte e aterro tem como diretrizes: a extração *in loco* de material de cobertura; distanciamento do lençol freático; aspectos estéticos; permeabilidade, impactos ambientais.

O dimensionamento deve seguir os seguintes passos:

- selecionar 5 seções de modo que pelo menos 3 passem na área a calcular;
- rebater para o corte os perfis naturais dessas 3 seções;
- lançar, no corte, o projeto das unidades/vias/off sets, etc.
- calcular no corte as áreas formadas pelos perfis naturais e compara-los com o perfil projetado
- preencher a tabela 7 de balanço e calcular os volumes de corte e aterro.

Tabela 7 - Planilha de Cálculo do Volume do Movimento de Terra

Seção	Áreas de		Distância entre seções (m)	$(S_n + S_{n+1}) \times \frac{D}{2}$		Volumes Parciais	
	Aterro (m ²)	Corte (m ²)		X $\frac{S}{\text{Aterro}}$	Y $\frac{S}{\text{Corte}}$	Aterro (m ³)	Corte (m ³)
1	X ₁	Y ₁	D ₁	$(X_1 + X_2) \times \frac{D_1}{2}$	$(Y_1 + Y_2) \times \frac{D_1}{2}$	V _{A1}	V _{C1}
2	X ₂	Y ₂	D ₂	$(X_2 + X_3) \times \frac{D_2}{2}$	$(Y_2 + Y_3) \times \frac{D_2}{2}$	V _{A2}	V _{C2}
3	X ₃	Y ₃	D ₃	$(X_3 + X_4) \times \frac{D_3}{2}$	$(Y_3 + Y_4) \times \frac{D_3}{2}$	V _{A3}	V _{C3}
4	X ₄	Y ₄	D ₄	$(X_4 + X_5) \times \frac{D_4}{2}$	$(Y_4 + Y_5) \times \frac{D_4}{2}$	V _{A4}	V _{C4}
Volumes Totais						$\sum V_A$	$\sum V_C$

Onde:

$X_1 = Y_1 = X_5 = Y_5 =$ Áreas de corte e aterro na seção escolhida

$D_1 = D_2 = D_3 = D_4 = D_5 =$ Distância entre as seções escolhidas

$S_N + S_{N+1} =$ Soma das áreas das seções

5.2.3 - TRATAMENTO PRIMÁRIO

O tratamento primário de sólidos, conforme já definido por LIMA (51), consiste nos processos físicos que não alterem as características físicas, químicas e biológicas dos resíduos e de seus contaminantes.

Este processo se aplica, no caso do aterro sanitário celular, aos resíduos sólidos, líquidos e gasosos. A figura 19 apresenta de forma esquemática a seção típica de uma célula durante o tratamento primário.

5.2.3.1 - TRATAMENTO PRIMÁRIO DE SÓLIDOS

Consiste do aterramento diário do lixo, o qual deve ser executado pelo método de rampa, com inclinação 1:3 (vertical : horizontal), onde os resíduos, após a descarga na frente de serviço, são compactados no talude, em sentido ascendente, de modo que o trator execute 3 a 5 passadas, até que todos os materiais volumosos estejam perfeitamente adensados. Em termos gerais, o índice de compactação de $0,7 \text{ t/m}^3$ deve ser mantido como meta, conforme apresentado nos estudos de Buivid citado por LIMA (46). Faz ainda parte do tratamento primário de sólidos a cobertura do lixo compactado, a qual deve ser diária e somente no topo da célula, com espessura de 20 cm. A cobertura final da célula deve ser de 1,00 m de espessura. Para ambos os casos, o material a ser utilizado é de natureza argilosa. O material utilizado para cobertura, deverá o excedente do movimento de terra. As células devem ser providas de drenos para líquidos e gases. Desta forma, conclui-se que há um tratamento primário dos resíduos, pois a aplicação deste método elimina a proliferação de vetores, migração de gases e líquidos, além de melhorar o aspecto estético da massa de resíduos em tratamento.

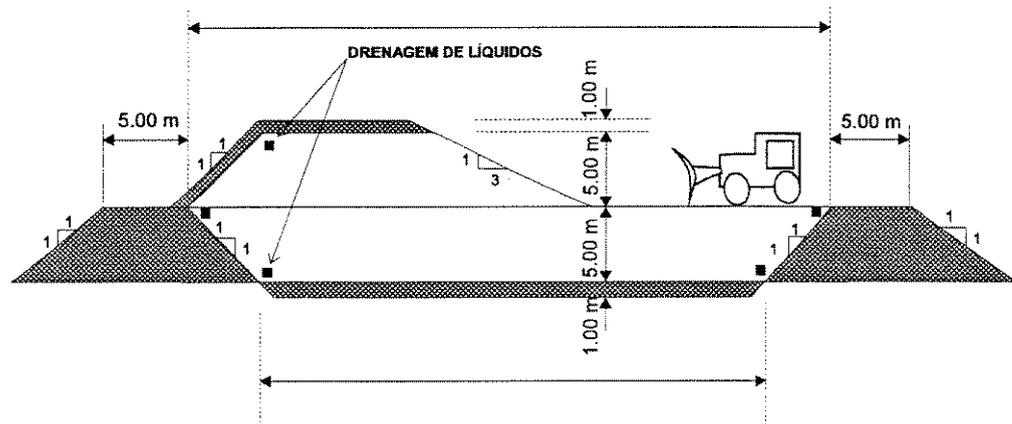


Figura 19 - Tratamento primário - Seção típica da célula de aterramento. Fonte: LIMA (50)

O dimensionamento da largura da frente de serviço, deve considerar a quantidade total de lixo aterrada diariamente e, também o número de caminhões que chega, simultaneamente, nos horários de pico. Desta forma, deve-se considerar uma frente de serviço com largura mínima de 10 metros, no caso quantidades pequenas de resíduos e que utilize-se apenas um trator de esteira e, conseqüentemente, receba um número pequeno de veículos.

No caso de aterros que recebam um grande número de veículos, é importante considerar o espaço para a manobra dos caminhões, junto à frente serviço.

5.2.3.2 - TRATAMENTO PRIMÁRIO DOS LÍQUIDOS

Consiste na drenagem e captação dos líquidos. Para tanto, as células devem ser providas de drenos horizontais formando uma malha interna e, direcionando o fluxo dos resíduos para os drenos colocados ao redor da célula, denominados anelares. A seção mínima destes drenos é de 0,50 x 0,50 m. Os drenos devem ser distribuídos nas zonas de fundo, meio e topo. Os líquidos drenados devem ser conduzidos a poços de captação ou a poços de passagem e, em seguida, para o tratamento de líquidos.

O dimensionamento do sistema de tratamento primário dos líquidos é elaborado a partir do cálculo do volume de líquidos que será gerado pela célula de aterramento. Para este cálculo é utilizado o modelo descrito na figura 20, onde o volume de água de infiltração, obtido através do Método do Balanço das Águas, CETESB (28), é somado ao volume de líquidos gerados pelo processo de hidrólise, que ocorre na decomposição do lixo, de acordo com LIMA (46), em torno de 20% do peso da matéria orgânica aterrada e mais o volume de recirculação, em torno de 2 litros por tonelada de matéria orgânica aterrada.

Este processo pode ser definido pela Eq. (9) :

$$V_t = V_i \times t + 0,2002 \times P_{mo} \times \gamma_{\text{água}} \quad \text{Eq. (9)}$$

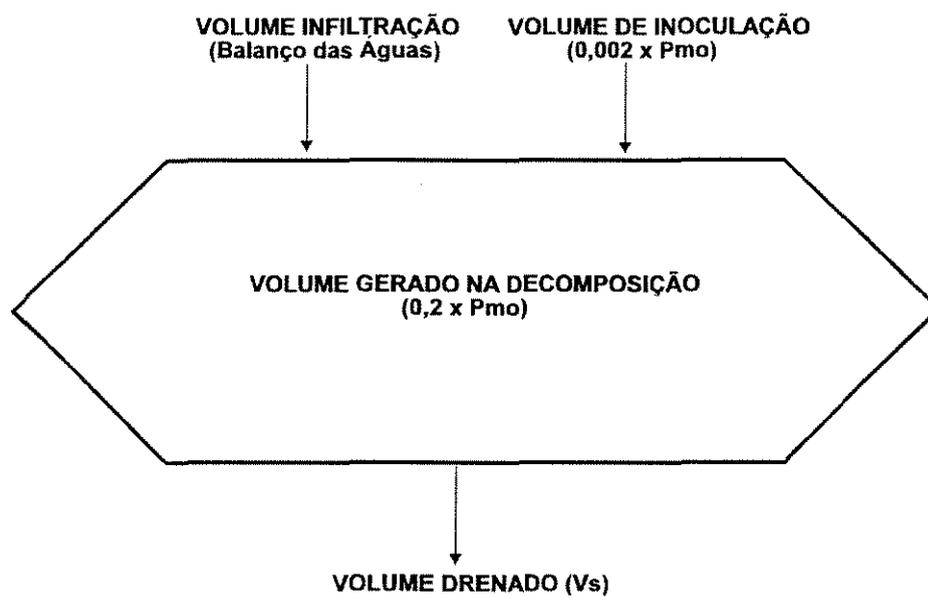


Figura 20 - Modelo para o cálculo do volume de líquidos.

Fonte: LIMA (46)

onde:

- V_t = volume total de líquidos drenado
- V_i = volume infiltração de águas pluviais (Balanço das Águas)
- t = período de aterramento e tratamento dos sólidos e líquidos
- P_{mo} = peso da matéria orgânica aterrada (t)
- $\gamma_{\text{água}}$ = 1,0 t/m³

O volume obtido serve para o dimensionamento da drenagem de líquidos percolados e para o cálculo dos dois reatores físico-químicos e um reator biológico, bem como, para determinar o tempo de duração da fase de tratamento terciário de líquidos.

5.2.3.3 - TRATAMENTO PRIMÁRIO DE GASES

Consistindo da drenagem e captação dos gases. Para tanto, as células devem ser providas de drenos verticais, com seção mínima de 1,00 x 1,00 m. Os drenos verticais devem ser instalados a partir do fundo. Os gases devem ser drenados e dirigidos para um único ponto, ou seja, para unidade de tratamento térmico dos gases.

O cálculo do volume de gases produzidos é o passo inicial para o dimensionamento do sistema de drenagem de gases. Este cálculo pode ser feito utilizando-se parâmetros descritos na literatura, como o adotado por LAQUIDARA, LEUSCHNER e WISE (43), ou seja uma taxa de 0,35 l CH₄/g de matéria orgânica degradada, ou a metodologia proposta por LIMA (45), que fundamenta-se em um arranjo matemático da produção de gás em relação ao tempo.

Neste segundo caso, deve-se calcular os fatores de produção para o componente facilmente degradável, utilizando-se a taxa de 50 Nm³/tonelada para resíduos facilmente e moderadamente degradáveis, LIMA (45), o tempo de degradação previsto na tabela 4 e a porcentagem de materiais facilmente degradáveis na composição do lixo em estudo. Multiplicando-se a esta

porcentagem pela taxa de produção, obtém-se a quantidade de gás metano produzida pela parcela facilmente degradável, sendo esta calculada pela Eq. (10).

$$QL_{FD} = \frac{1000 \times \%FD}{100} \quad \text{Eq. (10)}$$

onde:

QL_{FD} = taxa de geração de resíduos facilmente degradáveis (kg/t)
 $\%FD$ = porcentagem de resíduos facilmente degradáveis no lixo

De modo análogo, pode ser obtida taxa de geração de resíduos moderadamente degradáveis. A quantidade de gás produzida por esta parcela, pode ser considerada como a diferença entre o valor total, 50 Nm³/tonelada, e o valor obtido para a parcela facilmente degradável.

A partir destes valores podem ser obtidas as planilhas de cálculo das taxas de produção de gás por um período de 10 anos, considerando os resíduos facilmente e moderadamente degradáveis. A tabela 8 apresenta a planilha de cálculo para os resíduos facilmente degradáveis.

Tabela 8 - Planilha de cálculo da taxa de produção de metano para o resíduos facilmente degradáveis

Ano	Fator Kn	Peso do Lixo (Kg)	Valor (%)	Taxa de produção de metano (Nm ³ /t)
1	K1	V1 x QL _{FD}	(A1/AT)x100	V1 x Qmetano
2	K2	V2 x QL _{FD}	(A2/AT)x100	V2 x Qmetano
3	K3	V3 x QL _{FD}	(A3/AT)x100	V3 x Qmetano
4	K4	V4 x QL _{FD}	(A4/AT)x100	V4 x Qmetano

onde:

$A_{1,2,3,4}$ = áreas apresentadas na Figura 13, descritas para cada ano, para os resíduos facilmente degradáveis

A_T = área total apresentada na Figura 13, descrita pela curva de produção de metano para os resíduos facilmente degradáveis

$V_{1,2,3,4}$ = porcentagem que $A_{1,2,3,4}$ representam em relação ao total
 Q_{metano} = quantidade de metano produzida pela parcela facilmente degradável

De maneira análoga, podem ser calculadas as taxas de produção de metano para a parcela de resíduos moderadamente degradáveis, considerando a respectiva curva, apresentada na Figura 13 e, o tempo de 10 anos.

Para a obtenção das taxas agregadas de geração de metano para as parcelas facilmente e moderadamente degradáveis, deverão ser somadas as taxas das duas parcelas em cada ano.

5.2.4 - TRATAMENTO SECUNDÁRIO

Segundo LIMA (51), o tratamento secundário pode ser definido como todos os processo biológicos que alteram as características físicas, químicas e biológicas dos resíduos e de seus contaminantes. O tratamento secundário é mostrado esquematicamente na figura 21.

Da mesma forma que o tratamento primário, nesta fase também têm que ser considerados os sólidos, líquidos e gases.

5.2.4.1 - TRATAMENTO SECUNDÁRIO DE SÓLIDOS

Consiste na remoção da carga orgânica, presente nos resíduos e sua transformação em uma matéria biogênica mais resistente às ações das espécies decompositoras. Em outras palavras, esse processo reside na transformação da fração orgânica sólida em líquidos e gases através da ação de microrganismos específicos. Esse processo ocorre em duas fases distintas: Fase Acetogênica, onde ácido acético é produzido a partir da ação de bactérias denominadas acetogênicas, sobre os ácidos graxos voláteis e

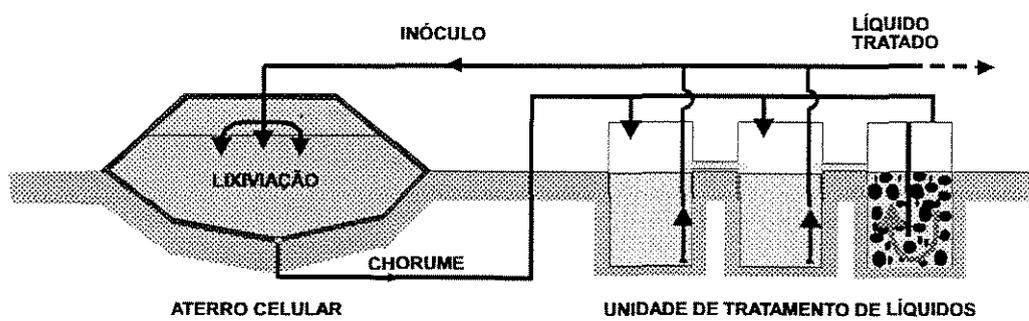


Figura 21 - Tratamento secundário. Fonte: LIMA (50)

álcoois. Em seguida, ocorre a Fase Metanogênica, onde o ácido acético é consumido e transformado em biogás (mistura de metano e dióxido de carbono) por ação de bactérias denominadas metanogênicas.

Após o encerramento destas fases, os sólidos remanescentes apresentam-se na forma de um composto natural, bioestabilizado, ou seja, mais resistente à ação de decompositores primários.

5.2.4.2 - TRATAMENTO SECUNDÁRIO DE LÍQUIDOS

O tratamento secundário de líquidos consiste na remoção da carga orgânica presente nos líquidos, expressa em termos de DQO (demanda química de oxigênio) e SV (teor de sólidos voláteis). Na verdade, o tratamento secundário dos líquidos é obtido através da ação das bactérias acetogênicas e metanogênicas, as quais transformam os líquidos em compostos bioestabilizados e mais resistentes às espécies consumidoras. Para tanto, as células devem ser providas de reatores biológicos, formando assim, conjuntos que promovem estas alterações.

Vale salientar que, em função das reações bioquímicas seqüenciais, que ocorrem durante o processo de decomposição é possível tratar, inclusive, metais pesados, freqüentemente encontrados nos resíduos domésticos. Assim, durante a fase acetogênica os metais pesados são solubilizados e transferidos da fração sólida para a fração líquida. Com a instauração da fase metanogênica, os metais são precipitados, formando compostos menos solúveis, que ficam encapsulados na massa de resíduos. Desse modo, é possível tratar os metais pesados presentes no lixo e torná-los menos perigosos ao meio ambiente.

O tratamento do sólidos e líquidos deve ser considerado como um sistema composto por células e reatores biológicos. Segundo LIMA (46), os líquidos tratados de forma anaeróbia, apresentam características capazes de acelerar o processo de decomposição anaeróbia dos sólidos, dentro das células. Portanto, o sistema funciona dentro um ciclo que inicia-se com a

coleta do líquidos, pelo o sistema de drenagem e o seu encaminhamento aos reatores anaeróbios. Após o seu tratamento, os mesmos são recirculados para o interior da célula. Cada fase de recirculação dura 6 meses, totalizando um ano para o tratamento secundário de líquidos e sólidos.

No entanto, a recirculação do chorume cru causa inibição no processo de decomposição anaeróbia, em particular, à metanogênese, como comprovam os estudos de LIMA (46) e TEIXEIRA (70).

O processo é dividido em duas fases: acetogênica e metanogênica. Na primeira, a ação dos organismos decompositores na matéria orgânica, através dos processos de hidrólise e fermentação, produz ácido acético, ácidos graxos e álcoois. Na segunda fase, os compostos produzidos, em especial o ácido acético, são consumidos por organismos que irão produzir gases, que têm como componentes principais o metano (CH_4) e o dióxido de carbono (CO_2).

5.2.4.3 - TRATAMENTO SECUNDÁRIO DE GASES

Consiste na complementação do sistema de drenagem de gases, descrito no tratamento primário, com a implantação de queimadores distribuídos pelo topo da célula, com o objetivo de possibilitar a saída natural dos gases e queimá-los, evitando assim, a sua liberação na atmosfera. Este processo visa reduzir a pressão que o acúmulo de gases no interior da célula pode causar aos taludes e também, evitar a migração dos mesmos por toda a superfície da cobertura do lixo.

5.2.5 - TRATAMENTO TERCIÁRIO

Conforme LIMA (51), o tratamento terciário corresponde aos processos físicos e químicos que alteram as características físicas, químicas e biológicas dos resíduos e de seus contaminantes. O tratamento terciário é mostrado esquematicamente nas figuras 22 e 23.

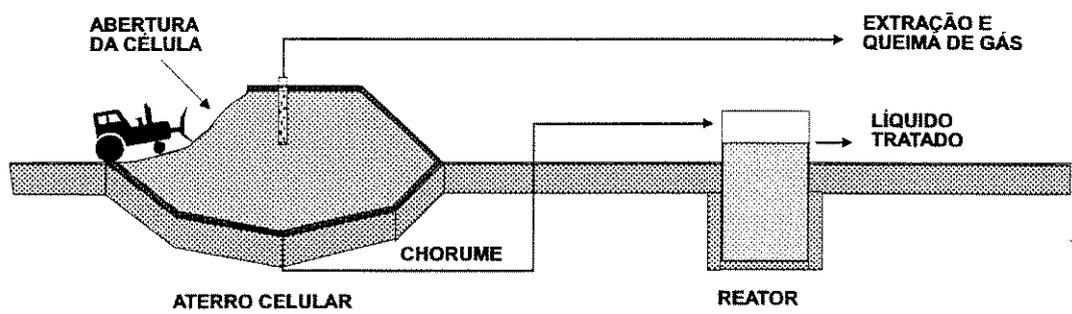


Figura 22 - Tratamento terciário - primeiro estágio. Fonte: LIMA (50)

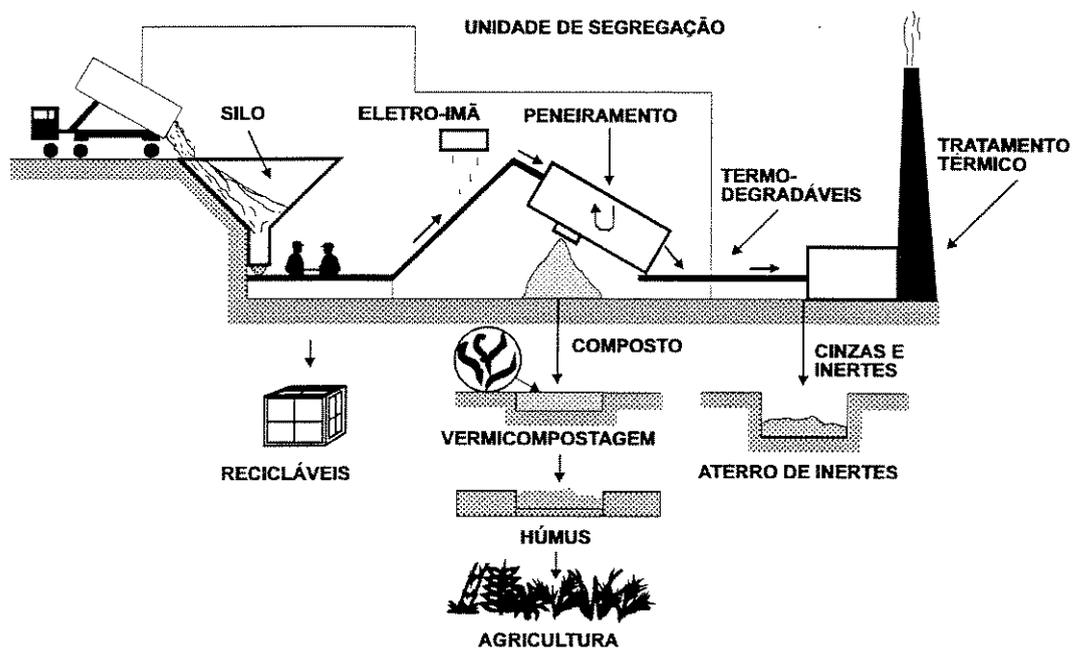


Figura 23 - Tratamento terciário - segundo estágio. Fonte: LIMA (50)

5.2.5.1 - TRATAMENTO TERCIÁRIO DOS SÓLIDOS

Consiste na reabertura das células e segregação dos resíduos, onde é possível recuperar terra para cobertura, metais e vidros. O rejeito: têxteis, couros e plásticos, desde que para este último não haja mercado, podem ser incinerados e assim inertizados. Para que se complete o tratamento dos resíduos, o aterro deve ser complementado com uma Unidade de Segregação, uma de Unidade Tratamento Térmico, e um Aterro de Inertes, conforme a proposta de um Sistema Integrado de Tratamento de Resíduos.

Os resíduos termodegradáveis podem ser utilizados como combustível alternativo em sistemas térmicos abertos, como exemplo, usinas de asfalto ou caldeiras industriais. Quanto ao material bioestabilizado, este pode ser utilizado como composto orgânico ou como material para recomposição de áreas urbanas degradadas, tais como pedreiras, saibreiras, jazidas de areia, etc.

5.2.5.2 - TRATAMENTO TERCIÁRIO DOS LÍQUIDOS

Consiste na drenagem, coleta e tratamento dos líquidos, após o tratamento secundário, através de processos químicos tradicionais: alcalinização, floculação, decantação, desinfecção, remoção de lodos e lançamento do efluente dentro dos padrões internacionais de controle ambiental.

5.2.5.3 - TRATAMENTO TERCIÁRIO DOS GASES

Consiste na inertização dos gases através da combustão controlada dos mesmos. Para tanto, as células devem ser providas de redes de captação forçada dos gases e de uma unidade de tratamento térmico.

5.2.4 - DRENAGEM DE ÁGUAS PLUVIAIS

O sistema de drenagem de águas pluviais tem como objetivo a proteção dos taludes, da cobertura final, do sistema viário e a redução na geração de chorume.

De acordo com a extensão da área do aterro, devem ser considerados dois critérios: a macrodrenagem e a microdrenagem.

O primeiro critério deve ser considerado quando a área do empreendimento ultrapassar 100 hectares, de acordo com CETESB (29). Neste caso o método racional não se aplica, portanto é necessário calcular a chuva efetiva, para um período de retorno de 10 anos e, traçar os hidrogramas, de forma a obter-se as vazões de projeto.

No dimensionamento da drenagem das águas pluviais nas células, a determinação de vazão de drenagem, Q , é feita utilizando-se o Método Racional como mostra a equação Eq. (8)

A intensidade de chuva crítica, pode ser calculada através da tabela de altura pluviométrica, intensidade, duração e frequência, publicadas pelo DNOS, ou através de equações de chuva, que estão desenvolvidas para algumas cidades.

Para a obtenção da intensidade crítica (i_c), adota-se t (tempo de duração da chuva) = t_c (tempo de concentração da bacia).

O tempo de concentração em minutos pode ser calculado pela Eq. (11):

$$t_c = t_s + 10 \quad \text{Eq. (11)}$$

onde t_s é o tempo de escoamento, em minutos, após formada a lâmina líquida, e pode ser calculado utilizando-se a fórmula de George Ribeiro, citada por AZEVEDO NETO (12), e mostrada na Eq.(13).

$$t_s = \frac{16.L}{(1,05 - 0,2.Pa) \cdot (100.Im)^{0,04}} \quad \text{Eq. (13)}$$

onde:

L = comprimento do talvegue (km)

Pa = fração de área verde na bacia considerada

Im = declividade média do talvegue

O período de retorno considerado para este sistema é de 5 anos.

O dimensionamento dos canais de argila compactada, é feito utilizando-se a Equação de Chezy com coeficiente de Manning, e mostrada na Eq. (14).

$$Q = \frac{1}{n} \times A \times R_h^{2/3} \times I^{1/2} \quad \text{Eq. (14)}$$

onde:

n = coeficiente de rugosidade de Manning

A = área da seção transversal molhada do canal (m²)

Rh = raio hidráulico (m)

I = declividade do talvegue (m/m)

Q = vazão de projeto na seção (m³/s)

A forma escolhida da seção transversal dos canais de pé de talude em argila compactada é, triangular simétrico, apresentando inclinação lateral, seguindo a relação (V:H) = (1:3), de forma que os acessos às células não fiquem comprometidos. O coeficiente de rugosidade adotado para os canais de argila compactada é de 0,025, CETESB (30). A velocidade máxima adotada para estes canais é de 0,8 m/s, nos casos em que a mesma é ultrapassada, o canal é calculado novamente, considerando que o mesmo será cascalhado e portanto, o coeficiente de rugosidade será de 0,030 e é admitida uma velocidade 1,7 m/s, CETESB (30).

Os canais de argila deverão direcionados para caixas de passagem que com dimensão de 1,00 m X 1,00, executadas em blocos de concreto. Os poços de visita deverão ter o diâmetro de 1,00 m e poderão ser executados com tubos de concreto.

O dimensionamento das tubulações de águas pluviais pode seguir o seguinte critério, para os trechos onde a declividade for superior a 10%, o que implica em velocidades elevadas e, conseqüentemente, um regime de escoamento para o qual as fórmulas para condutos livres não se aplicam. Assim, foi assumindo que estes trechos funcionarão como rampas, de acordo com BOTELHO (20), com velocidade igual a 3 m/s, e pode obter-se o diâmetro das tubulações através da Eq. (15):

$$Q = v \times A \quad \text{Eq. (15)}$$

onde:

Q = vazão (m³/s)

v = velocidade (m/s)

A = área da seção (m²)

Os trechos onde a declividade for inferior a 10%, pode ser utilizada a Fórmula de Ganguillet - Kutter, apresentadas nas tabelas elaboradas por Oliveira, J.O. et alli, citadas por AZEVEDO NETO (12).

5.2.5 - ESTABILIDADE DE TALUDES

Para a verificação da estabilidade dos taludes, serão adotados os procedimentos da Mecânica dos Solos. Mas, de acordo com CANCELLI (25) e BENVENUTO, CRUZ e MIRANDA (16), deverão ser consideradas algumas diferenças básicas, como a heterogeneidade do lixo, a existência de componentes química e biologicamente ativos e, uma variabilidade de parâmetros de resistência muito grande, devido principalmente, à forma de manejo do resíduo.

Para a verificação da estabilidade dos taludes deverá ser considerada uma superfície de ruptura circular, de acordo com BENVENUTO, CRUZ e MIRANDA (16), como pode ser visto na figura 24.

Para a verificação da estabilidade deve ser considerada a situação mais crítica, ou seja, o sistema de drenagem de líquidos não esteja funciona e o nível da manta de chorume encontra-se na base da cobertura de solo. Nesta situação, ter-se-á, a atuação das pressões neutras sobre o talude.

De forma a visualizar a atuação das forças atuantes e forças resistentes, a figura 25, apresenta o modelo de o comportamento para uma camada de lixo. Sendo que, como pode ser visto, a cobertura final poderá ser considerada como uma sobrecarga em relação ao lixo aterrado.

Da relação entre as forças resistentes e as forças atuantes, obtém-se o coeficiente de segurança, que indica o estado de equilíbrio do talude, quando o seu valor é 1,0. Como critério de projeto, deverá adotado um coeficiente de segurança mínimo é de 1,2, sendo que, para sua obtenção, poderá ser utilizada a Eq. (16).

$$FS = R \times [c \times b_0 + (N_{sat} - U) \times \tan\phi] + F_B \times R' + F_c \times R_1 / (T_{sat} \times R) + F_{ct} \times R_2 \quad \text{Eq. (16)}$$

onde:

ϕ	= ângulo de atrito - (graus)
b_0	= largura da lamela na superfície de ruptura - (m)
c	= coesão - (t/m ²)
F_B	= força resultante da sobrecarga da berma - (t)
F_c	= força resultante da sobrecarga da cobertura do talude - (t)
F_{ct}	= força resultante da sobrecarga da cobertura do topo - (t)
N_{sat}	= força normal (solo saturado) - (t)
R', R_1, R_2	= distância do ponto de aplicação da força até o centro da superfície de ruptura - (m)
T_{sat}	= força tangencial (solo saturado) - (t)
U	= força resultante das pressões neutras - (t)

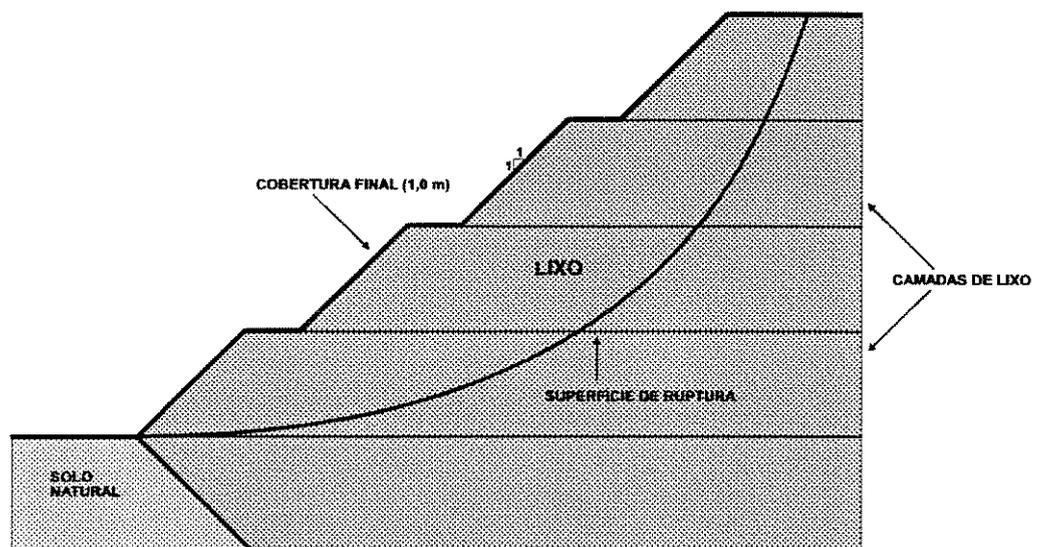


Figura 24 - Esquema da superfície de ruptura circular em um aterro sanitário.
Fonte: BENVENUTO, DA CRUZ e MIRANDA (16)

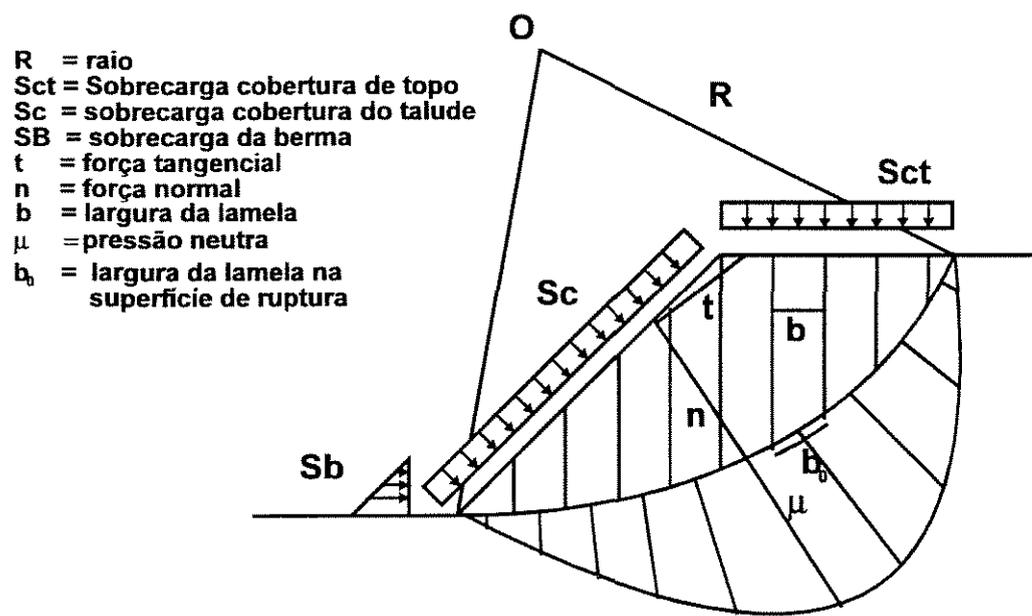


Figura 25 - Modelo de cálculo para estabilidade de taludes

5.3 - PROJETO EXECUTIVO

O projeto executivo consiste no detalhamento do Projeto Básico, sendo composto pelos seguintes tópicos:

- especificações de materiais, serviços e mão-de-obra
- manual de operação
- plano de monitoramento
- memória de cálculo
- orçamento
- desenhos

5.3.1 - ESPECIFICAÇÕES DE MATERIAIS, SERVIÇOS E MÃO-DE-OBRA

Neste item, deverão ser descritos os serviços a serem executados, assim como os materiais necessários. É importante ressaltar que a especificação de materiais deve considerar a região onde a obra está localizada, de forma a facilitar a obtenção dos mesmos.

Também deverá ser apresentada a necessidade de mão-de-obra para a operação do empreendimento e, uma descrição das funções a serem exercidas.

5.3.2.- MANUAL DE OPERAÇÃO

O manual de operação consiste na apresentação dos procedimentos que deverão ser adotados durante a operação do aterro sanitário celular, de forma a possibilitar ao pessoal encarregado a sua execução diária.

No manual de operação devem ser destacadas as medidas mitigadoras previstas no Estudo de Impactos Ambientais (EIA), ou no caso de

dispensa deste pelos órgãos de controle ambiental, aquelas propostas pelo Estudo Preliminar de Impactos Ambientais (EPIA), constante dos Estudos Preliminares do projeto.

5.3.3.- PLANO DE MONITORAMENTO

O uso de áreas para o tratamento de resíduos provoca impactos ambientais, que através de uma operação correta e adotando-se medidas mitigadoras são minimizados. Este processo depende de um acompanhamento constante da sua evolução, justificando assim, a existência do plano de monitoramento.

O plano de monitoramento deverá apresentar a especificação do número e localização dos pontos de amostragem, frequência de coleta e parâmetros a serem analisados

O objetivo do plano é estabelecer as diretrizes gerais e uma sistemática para o desenvolvimento do monitoramento. Sendo este dividido em monitoramento dos recursos naturais da área e do processo de operação do sistema.

5.3.3.1 - MONITORAMENTO DOS RECURSOS NATURAIS

O monitoramento dos recursos naturais da área do empreendimento visa o acompanhamento da evolução das condições naturais existentes, devido ao uso dado.

Esta ação irá verificar a eficiência das medidas mitigadoras, previstas em projeto, e da operação do sistema, tendo como detectar alguma eventual falha, evitando com isso, o agravamento de um possível impacto ambiental.

Neste caso, os principais parâmetros são o monitoramento das águas superficiais, subterrâneas e vegetação.

5.3.3.2 - MONITORAMENTO DO PROCESSO DE OPERAÇÃO

O monitoramento da operação consiste na avaliação constante dos padrões de eficiência do tratamento dos resíduos, sendo de fundamental importância, para a manutenção da qualidade ambiental na área e a correção de eventuais problemas que possam causar impactos ambientais ou comprometer a vida útil do sistema ou comprometer a eficiência do sistema de tratamento.

Neste caso, vários parâmetros deverão ser analisados e contemplados.

- líquidos percolados (quantidade gerada e composição);
- emissão de gases;
- sólidos;
- nível da manta líquida;
- recalques.
- estado de conservação do sistema viário, das unidades de apoio, bermas e taludes, sistema de drenagem de águas pluviais, etc.

5.3.3.3 - METODOLOGIA

As amostras deverão ser coletadas, acondicionadas e submetidas aos ensaios físico-químicos de acordo com as Normas Técnicas da Associação Brasileira (ABNT) ou métodos descritos no Standard Methods. Para os padrões de qualidade de lançamento de efluentes deverão ser adotados os limites recomendados na Resolução CONAMA N° 20, de 18 de junho de 1986.

5.3.4 - MEMÓRIA DE CÁLCULO

Consiste na apresentação detalhada dos cálculos realizados para o dimensionamento dos elementos de projeto e das unidades de apoio.

5.3.5 - ORÇAMENTO

Consiste na estimativa dos custos de implantação, operação, manutenção e monitoramento do aterro. O quadro 4 apresenta alguns valores fornecidos pela SPA (63), que ilustram a ordem de grandeza dos custos de um aterro sanitário celular.

Quadro 4 - Custos de um Aterro Sanitário Celular

ATIVIDADE	CUSTO (dólares/ton)
Implantação (1 célula)	2,36
Operação	15,49
Manutenção	0,14
Monitoramento	0,29
Total	18,28
Observações: - o item implantação, pode apresentar uma variação maior em função do movimento de terra necessário - não estão incluídas no item implantação as instalações de apoio, administração, balança, prédio de manutenção, etc.	

6 - DISCUSSÃO

A metodologia proposta tem como principal fundamento, a mudança na concepção da técnica de aterramento de resíduos, ou seja, passa a ser considerada como um tratamento de resíduos e, não mais como uma forma de confinamento.

6.1 - ESTUDOS PRELIMINARES

Os itens constantes dos estudos preliminares são em sua maioria previstos pela ABNT (3), no entanto, a norma indica que estes façam parte do memorial descritivo que, na realidade é uma descrição global do projeto, sem que haja uma divisão em fases que permita a avaliação e ajuste da fase anterior.

O estudo de viabilidade de uma área, para a implantação de um aterro sanitário celular, elaborado com o objetivo de subsidiar a tomada de decisão, quanto ao uso ou não de um sítio, para esta finalidade, consiste em um dos itens que deveria ser acrescido nas normas técnicas. A execução do estudo de viabilidade, possibilita a paralisação de um projeto, ainda na sua fase inicial, evitando assim, equívocos, que venham a provocar sérios problemas ao meio ambiente, à população atendida e ao órgão responsável

pelo o empreendimento. O estudo de viabilidade pode ser executado, também, para várias áreas, com o objetivo de permitir a seleção da mais adequada ao uso pretendido.

Dentre os estudos solicitados pela ABNT (3), não consta a definição do modelo tecnológico, definindo assim as tecnologias que serão empregadas, considerando que o aterro celular é parte de um sistema integrado de tratamento de resíduos. Desta forma, deveria ser solicitada também, a elaboração do fluxo mássico de resíduos, que possibilitará o dimensionamento do aterro e unidades complementares e, principalmente definir o tempo de utilização das células.

Os estudos preliminares devem apresentar a análise dos principais impactos ambientais que a implantação desta unidade irá provocar e, conseqüentemente, prever as medidas mitigadoras, que deverão fazer parte do manual de operação do aterro. Atualmente, apesar da ABNT (3) e CETESB (30), citarem a questão ambiental em suas normas de apresentação de projeto, não existe a exigência desta análise. No entanto, unidades que recebam menos que 50 toneladas/dia de resíduos domésticos, de acordo com a Resolução CONAMA n° 001 de 23 de janeiro de 1986, podem ser dispensadas da obrigatoriedade de apresentação de um Estudo de impacto ambiental.

É importante ressaltar que, qualquer projeto de aterro sanitário, independente da quantidade a ser aterrada, deveria ser precedido por um Estudo de Impacto Ambiental, que permitisse a quantificação dos impactos e a adoção de medidas mitigadoras. Em função desta falha na legislação e nos procedimentos para elaboração de projeto, este trabalho incorpora a análise ambiental nos estudos preliminares.

A ABNT (3), não exige a apresentação de um estudo demográfico, que juntamente com os estudos de caracterização dos resíduos gerados irá permitir a estimativa da quantidade de resíduos que deverá ser aterrada ao longo do tempo e/ou a vida útil do aterro, portanto esta deveria ser uma exigência a ser acrescentada, conforme previsto na metodologia proposta.

A caracterização dos resíduos, é um procedimento que deverá ser repetido com uma frequência, a ser estabelecida em função das características

da localidade, quanto à economia, aspectos culturais, etc. Desta forma, poderá ser feito um acompanhamento da evolução da composição física e de outras características do lixo. O acompanhamento da quantidade gerada é fundamental para que seja feita uma comparação com a estimativa de projeto e, para que sejam implementados programas que visem a minimização da geração de resíduos.

A caracterização hidrogeológica e geotécnica deve ser encarada, juntamente com o levantamento topográfico, como o estudo fundamental para a definição do "lay out" do projeto. Em função da topografia, pode-se definir um a disposição do projeto, procurando obter um balanço positivo no movimento de terra, evitando a necessidade da importação deste material para a cobertura do lixo, impermeabilização das células e manutenção de acessos. A caracterização hidrogeológica e geotécnica fornece o suporte para a definição das cotas dos cortes, em função do nível do lençol freático e das características do solo local.

6.2 - PROJETO BÁSICO

O Projeto Básico é a fase do projeto, onde são utilizados os dados coletados nos Estudos Preliminares e, apresentadas as definições básicas do projeto, assim como a descrição dos elementos e os métodos de dimensionamento.

Quando se apresenta a proposta de ocupação de áreas de cotas mais elevadas, a intenção é que se evite as áreas de baixada que, em geral, são mais frágeis ambientalmente e estão mais próximas do lençol freático. Esta estratégia de utilização da área visa, também, a obtenção de um balanço de terra favorável, de forma que, o próprio local forneça o material de cobertura e manutenção de acessos, bermas e taludes. Esta ação evidentemente, evitaria a necessidade de uma jazida de material, que iria implicar em impacto ambiental a mais para o empreendimento.

A ABNT (3) e CETESB (30), indicam que o projeto deve contar com uma área de emergência. Na maioria dos casos, estes locais são utilizados nos dias de chuva quando o acesso à frente de serviço fica prejudicado,

caracterizando desta forma, um lixão dentro do aterro, pois em geral, o lixo ali depositado não é recolhido para o local adequado. Dentro desta nova concepção, o dimensionamento, implantação e manutenção, deve visar principalmente, permitir o acesso dos caminhões à frente de serviço em qualquer circunstância.

O controle de compactação juntamente com a execução da cobertura diária do lixo, são as operações cujo monitoramento deve ser diário, de forma a evitar que a ocupação da célula ocorra de forma mais rápida que o previsto e que a capacidade de suporte da camada não venha a comprometer os trabalhos futuros na célula. A cobertura diária é fundamental para minimizar a ocorrência de odores e a atração de vetores.

O dimensionamento do volume das células deve considerar a quantidade de lixo gerada diariamente, a área disponível e, o tempo que se pretende para o tratamento dos resíduos. Este procedimento visa evitar que o lixo seja disposto em grandes áreas, que levariam mais tempo para serem ocupadas e, devido às diferenças de fase de degradação dos resíduos, o processo de degradação anaeróbia tenderia a inibição.

Os mecanismos de atenuação ou estabilização, que ocorrem no processo de decomposição anaeróbia do lixo, POHLAND (61), LIMA (46) e BAGCHI (14), são de grande importância para os aterros onde ocorre a co-disposição dos resíduos e, também porque normalmente, no lixo doméstico, existem resíduos que podem ser considerados perigosos, conforme mostram LIMA (46) e TEIXEIRA, NUNES e OLIVEIRA (68). Desta forma a impermeabilização das células, a drenagem e tratamento dos líquidos, a recirculação dos mesmo e o tratamento dos sólidos contribuem para a estabilização destes compostos.

O estudo de estabilidade dos taludes é um dos elementos de projeto que apresentam um maior grau de incerteza, em virtude da adaptação dos conceitos da mecânica dos solos clássica, conforme CANCELLI (25) e BENVENUTO, CRUZ e MIRANDA (16), necessitando de pesquisas específicas para o aprimoramento das técnicas e parâmetros a serem utilizados.

6.3 - PROJETO EXECUTIVO

O projeto executivo é a fase que apresenta os procedimentos de implantação, operação, monitoramento e orçamentação e cronograma físico-financeiro.

As especificações de materiais, equipamentos e mão-de-obra devem considerar as condições econômicas locais e, compatibilizar as exigências de projeto com esta situação, procurando a utilização de materiais da região que permitam um custo mais acessível.

A operação aterro celular em relação a técnica convencional, apresenta algumas variações, com a delimitação da área de disposição, controle de compactação mais rigoroso, mas a principal diferença consiste no tratamento de líquidos e sólidos através da recirculação do chorume, conforme descrito por LIMA (46). Este procedimento possibilita, além do tratamento adequado dos resíduos, a possibilidade de reabertura das células de aterramento e a reutilização do espaço físico. Desta forma, o processo de operação é acrescido de atividades como a reabertura da células e preparação da área para nova disposição.

O monitoramento ambiental já previsto pela ABNT (5) e CETESB (29 e 30), é acrescido do monitoramento da operação, sendo que este procedimento é função da mudança conceitual de aterro sanitário, ou seja, o aterro sanitário celular é uma unidade de tratamento de resíduos, e não, um local de confinamento. Esta mudança implica na necessidade da avaliação da eficiência dos procedimentos adotados, como a recirculação do chorume, produção de gases, etc., consistindo em parâmetros que servirão para orientar a operação.

7 - CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Deste trabalho algumas conclusões e recomendações foram tiradas:

- apesar da situação financeira da maioria dos municípios do País, não se justifica que exista uma norma técnica para a elaboração de projeto de aterros controlados, pois na realidade se trata apenas da regularização de um lixão, que posteriormente poderá ocasionar problemas ambientais de difícil solução. Neste caso uma recomendação é que esta norma seja eliminada e, que para este casos, sejam feitos estudos de materiais alternativos e de otimização que permitam a execução de aterros com controle de migrações de gases e líquidos, monitoramento das condições ambientais e, controle do processo de tratamento.
- a norma que trata dos projetos de aterros sanitários deveria ser revisada, iniciando pela definição da unidade, ou seja, modificar o conceito de local de confinamento para unidade de tratamento, pois, então, toda a concepção de projeto é alterada.

Alguns pontos ainda merecem estudos mais aprofundados e, que fatalmente trarão melhorias a esta unidade:

- o cálculo da estabilidade de taludes, resistência à carga deverão ser mais estudados, de forma a obter-se parâmetros mais confiáveis, que irão servir para o estabelecimento de limites máximos de altura dos aterros.
- os mecanismos de percolação na massa de lixo e de geração de líquidos.
- os mecanismos que definem como se comportam os processos de geração e difusão dos gases na massa de lixo, ao longo do tempo.
- a utilização de materiais alternativos na drenagem de líquidos é um assunto que merece destaque e, evidentemente, estudos, pois considerando a situação econômica do nosso país alternativas que propiciem a redução dos custos neste tipo de obra são de grande importância.

É importante destacar que, o aterro celular isoladamente não representa a solução o problema de resíduos sólidos de um município, esta unidade deve ser encarada como uma parte do sistema integrado de tratamento de resíduos, que uma vez implantado, irá propiciar o tratamento adequado para cada tipo de resíduo, estimular a minimização na geração, promover a segregação na origem e, conseqüentemente, a quantidade de resíduos que deverá ser destinada aos aterros será bem menor.

8 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Amostragem de resíduos. NBR 10007. 1987.
- (2) ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Apresentação de projetos de aterros controlados de resíduos sólidos urbanos - Procedimento. NBR 8849. 1985.
- (3) ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Apresentação de projetos de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos - Procedimento. NBR 8419. 1984.
- (4) ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Classificação de resíduos sólidos. NBR 10004. 1987.
- (5) ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Lixiviação de resíduos. NBR 10005. 1987.
- (6) ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Manuseio de resíduos de serviços de saúde - Procedimento. NBR 12809. 1993.
- (7) ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Solubilização de resíduos. NBR 10006. 1987.

- (8) ACQUAJET CONSULTORIA E MONITORAMENTO DE POÇOS TUBULARES LTDA. Levantamento geológico geotécnico e geofísico - Ilha de Itaparica, 1993. São Paulo.
- (9) ANDREOLI, C. V. et alli. Diretrizes para elaboração de estudo de impactos ambientais para obras de saneamento. In: Métodos de Avaliação de Impacto Ambiental - MAIA. 1ª ed. PIAB, 1992.
- (10) ANDREOTTOLA, G. e ACAIA, C. Contaminated soil reclamation a state of the art. International Solid Wastes e Public Cleansing Association. Cambridge, 1991-92.
- (11) ANDREOTTOLA, G., COSSU, R. e SERRA, R. A method for the assessment of environmental impact of sanitary Landfill. In: CHRISTENSEN, T. W., COSSU, R., STEGMANN, R. (eds.). Sanitary landfilling: process, technology and environmental impact. Academic Press, 1989.
- (12) AZEVEDO NETO, J. M. e ALVAREZ, G. A. Manual de Hidráulica. 6. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 1977.
- (13) BAETZ, B. W. e ONYSKO, K. A. Storage volume sizing for landfill leachate-recirculation systems. Journal of Environmental Engineering, 119, 2, Mar/Abr., 1993.
- (14) BAGCHI, A. Design, construction, and monitoring of sanitary landfill. John Wiley e Sons, 1990.
- (15) BALDERRAMA, L. M. B. Estudo de impacto ambiental causado por aterro sanitário, via migração de gases. Tese de mestrado, FEC - UNICAMP, 1993.
- (16) BENVENUTO, C., DA CRUZ, P. T. e MIRANDA, I. C. S. B. A metodologia geotécnica aplicada à disposição dos resíduos sólidos. In: Geoambiental'94 - Seminário sobre geotecnia de aterros para disposição de resíduos, Rio de Janeiro, 1994.

- (17) BLIGHT, G. E., BALL, J. M. e BLIGHT, J. J. Moisture and suction in sanitary landfills in semiarid areas. Journal of Environmental Engineering, 118, 6, Nov./Dec., 1992.
- (18) BISSET, R. Methods for environmental impact assesment: a selective survey with case studies. In: BISWAS, A. R. e GEPING, Q (eds.). Environmental impact assesment for developing countries. Londres. Tycooly International, 1987.
- (19) BÔA NOVA, A. C. Energia e Classes Sociais no Brasil. São Paulo: Loyola, 1985. 247p.
- (20) BOTELHO, M. H. C. Águas de chuva : engenharia das águas pluviais nas cidades. São Paulo, Edgard Blücher, 1985.
- (21) BRITTON, P. W. Improving manual solid waste separation studies. Journal Sanitary Engineering Division, 717-29, oct. 1972.
- (22) BUARQUE DE HOLANDA, A. Novo dicionário da língua portuguesa. Nova Fronteira, 2ª ed. 1986.
- (23) BUSWELL, A. M. e MUELLER, H. F. Mechanism of methane fermentation. Industrial and Engineering Chemistry, v. 44, n. 3, Mar. 1952.
- (24) CADARSO, F. e MUÑOZ, P. Los residuos solidos en la Comunidad de Madrid: Programs frente a problemas. In: 6º Congreso y Exposicion Internacional de Residuos Solidos. Madrid. 1992.
- (25) CANCELLI, A. Soil and refuse stability in sanitary landfills. In: CHRISTENSEN, T. W., COSSU, R., STEGMANN, R. (eds.). Sanitary landfilling: process, technology and environmental impact. Academic Press, 1989.
- (26) CANZIANI, R. e COSSU, R. Landfill hidrology and leachate production. In: CHRISTENSEN, T. W., COSSU, R., STEGMANN, R. (eds.). Sanitary landfilling: process, technology and environmental impact. Academic Press, 1989.

- (27) CANTER, L. W. Environmental impact assessments for hazardous waste landfills. Journal of Urban Planning and Development, v. 117, n. 2, jun. 1991.
- (28) CETESB. Resíduos Sólidos Industriais, CETESB/ASCETESB, 1985. Série Atlas da CETESB.
- (29) CETESB. Drenagem urbana : manual de projeto. São Paulo: CETESB/ASCETESB, 1986.
- (30) CETESB. Norma para apresentação de projetos de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos. P4.241.1981.
- (31) CETESB. Construção de poços de monitoramento de aquífero freático - Procedimento. 060.10. 1988.
- (32) CHRISTENSEN, T. H. Environmental aspects of sanitary landfilling. In: CHRISTENSEN, T. W., COSSU, R., STEGMANN, R. (eds.). Sanitary landfilling: process, technology and environmental impact. Academic Press, 1989.
- (33) CHRISTENSEN, T. H. e KJELDSSEN, P. Basic biochemical processes in landfills. In: CHRISTENSEN, T. W., COSSU, R., STEGMANN, R. (eds.). Sanitary landfilling: process, technology and environmental impact. Academic Press, 1989.
- (34) CLEMENTE, A. e JUCHEM, P. A. Valoração econômica do meio ambiente. In: Métodos de Avaliação de Impacto Ambiental - MAIA. 1ª ed. PIAB, 1992.
- (35) COSSU, R. Role of landfilling in solid waste management. In: CHRISTENSEN, T. W., COSSU, R., STEGMANN, R. (eds.). Sanitary landfilling: process, technology and environmental impact. Academic Press, 1989.
- (36) DE MELLO, L. G. e DO VAL, E. C. Considerações sobre o revestimento de fundo de áreas de disposição de resíduos à luz das recomendações internacionais atuais. In: Geoambiental'94 - Seminário sobre geotecnia de aterros para disposição de resíduos, Rio de Janeiro, 1994.

- (37) FINDIKAKIS, A. N. et ali. Modeling gas production in managed sanitary landfill. Department of Civil Engineering - Stanford University, Technical report n° 280, 1985.
- (38) GOMES et alli. Avaliação da composição, coleta, tratamento e valorização dos resíduos sólidos domésticos. Limpeza Pública, n. 16, jan./fev. 1980.
- (39) GUJER, W. e ZEHNDER, A. J. Conversion processes in anaerobic digestion. Water Science Technology, Copenhagen, v.15. 1983.
- (40) HAM, R. K. e BARLAZ, M. A. Measurement and prediction of landfill gas quality and quantity. In: CHRISTENSEN, T. W., COSSU, R., STEGMANN, R. (eds.). Sanitary landfilling: process, technology and environmental impact. Academic Press, 1991.
- (41) HARRINGTON, A. I. e MARIS, P. J. The treatment of leachate: a UK perspective. Journal of Water Pollution Control Federation, v. 85, n. 1, p. 45-62, 1986.
- (42) KIROV, N. Y. Solid waste treatment and disposal. Ann Arbor Science. 1973.
- (43) LAQUIDARA, M. J., LEUSCHNER, A. P. e WISE, D. L. Procedure for determining potential gas quantities in an existing sanitary landfill. In: International Seminar on Anaerobic Treatment in Tropical Countries, 1986. São Paulo. 1986.
- (44) LEE, N. Environmental impact assesment: a review. Applied Geography, n. 3, 5-27, 1983.
- (45) LIMA, L. M. Q. Método da biodegradabilidade para determinação da produção de gás metano no aterro energético Santa Bárbara da cidade de Campinas. CPFL, vol II, nov. 1985.
- (46) LIMA, L. M. Q. Estudo da influência da reciclagem de chorume na aceleração da metanogênese em aterro sanitário. Tese de doutorado, EESC- USP, nov. 1988.

- (47) LIMA, L. M. Q. Tratamento de Lixo. Hemus. sdt.
- (48) LIMA, L. M. Q. Bio-remediación de áreas degradadas por desechos sólidos: Estudio de caso de la ciudad de Americana, SP, Brasil. In: 6° Congreso y Exposición Internacional de Residuos Sólidos. Madrid. 1992.
- (49) LIMA, L. M. Q. Aula do Curso de IC- 750 - Tratamento de lixo no curso de pós-graduação da FEC- UNICAMP no 1° semestre de 1993.
- (50) LIMA, L. M. Q. Bio-remediação de áreas degradadas por resíduos sólidos. In: Geoambiental'94 - Seminário sobre geotecnia de aterros para disposição de resíduos, Rio de Janeiro, 1994.
- (51) LIMA, L. M. Q. Sistema integrado de tratamento de lixo. Projeto de bio-remediação de Canabrava. Resultados preliminares. 1994.
- (52) LOUWMAN, D. Papel de los vertederos en un sistema integrado de gestión de residuos. In: 6° Congreso y Exposición Internacional de Residuos Sólidos. Madrid. 1992.
- (53) McCARTY, P. L. Anaerobic Processes. Birmingham Short Course on Design of Biological Treatment. IAWPCR, 1974.
- (54) McINERNEY, M. J. e BRYANT, M. P. Basic principles of bioconversions in anaerobic digestion e methanogenesis. In: Biomass Conversion Processes for Energy and Fuels. Plenum Press, N.Y., 1981.
- (55) MONZÓN, I. T. et alii. Estudio de los lixiviados del vertedero de Meruelo II (Cantabria). In: 6° Congreso y Exposición Internacional de Residuos Sólidos. Madrid. 1992.
- (56) MOREIRA, I. V. D. Origem e síntese dos principais métodos de avaliação de impacto ambiental (AIA). In: Métodos de Avaliação de Impacto Ambiental - MAIA. 1ª ed. PIAB, 1992.
- (57) OLIVEIRA, W. E. Recuperação de recursos dos resíduos sólidos. Revista DAE, v. 44, n. 139 p. 292-300, dez. 1984.

- (58) PEREIRA NETO, J. T. Reciclagem e compostagem do lixo domiciliar. In: 1º Seminário Internacional de Resíduos Sólidos, Campinas. 1991.
- (59) POVINELLI, J. Ação dos metais pesados nos processos biológicos de tratamento de águas residuárias. Tese de livre docência, EESC - USP, mar., 1987.
- (60) PINTO, M. S. A coleta e disposição do lixo no Brasil. Fundação Getúlio Vargas/CONSULTEC. 1º ed. 1979.
- (61) POHLAND, F. G. e GOULD, J. P. Codisposal of municipal refuse and industrial waste sludge in landfills. In: International Seminar on Anaerobic Treatment in Tropical Countries, São Paulo. 1986.
- (62) SLEAT, R., et alli. Activities and distribution of key microbial groups in landfill. In: CHRISTENSEN, T. W., COSSU, R., STEGMANN, R. (eds.). Sanitary landfilling: process, technology and environmental impact. Academic Press, 1989.
- (63) SPA - Dados fornecidos baseados em projetos executados pela empresa. 1994.
- (64) STEGMANN, R. Principles of landfilling - the current approach. In: CHRISTENSEN, T. W., COSSU, R., STEGMANN, R. (eds.). Sanitary landfilling: process, technology and environmental impact. Academic Press, 1989.
- (65) STEGMANN, R. e SPENDLIN, H. H. Enhancement of degradation: German experiences. In: CHRISTENSEN, T. W., COSSU, R., STEGMANN, R. (eds.). Sanitary landfilling: process, technology and environmental impact. Academic Press, 1989.
- (66) TCHOBANOGLIOUS, G., THEISEN, H. e ELIASSEN, R. Solid wastes : engineering principles and management issues. McGraw-Hill. 1977.
- (67) TEIXEIRA, E. N. Adaptação de estruturas existentes (esterqueiras) em biodigestores. Tese de mestrado, FEAA - UNICAMP, 1985.

- (68) TEIXEIRA, E. N., NUNES, C. R. e OLIVEIRA, S. Revisão crítica das normas sobre resíduos sólidos. Parte 1. Saneamento Ambiental, set./out. 1991.
- (69) TEIXEIRA, E. N., NUNES, C. R. e OLIVEIRA, S. Revisão crítica das normas sobre resíduos sólidos. Parte 4. Saneamento Ambiental, abr./mai. 1992.
- (70) TEIXEIRA, E. N. Efeito inibidor da recirculação direta de chorume na decomposição anaeróbia de resíduos sólidos. Tese de doutorado, EESC-USP, abr. 1993.
- (71) WORKMAN, J. P. e KEEBLE, R. L. Design and construction of liner systems. In: CHRISTENSEN, T. W., COSSU, R., STEGMANN, R. (eds.). Sanitary landfilling: process, technology and environmental impact. Academic Press, 1989.