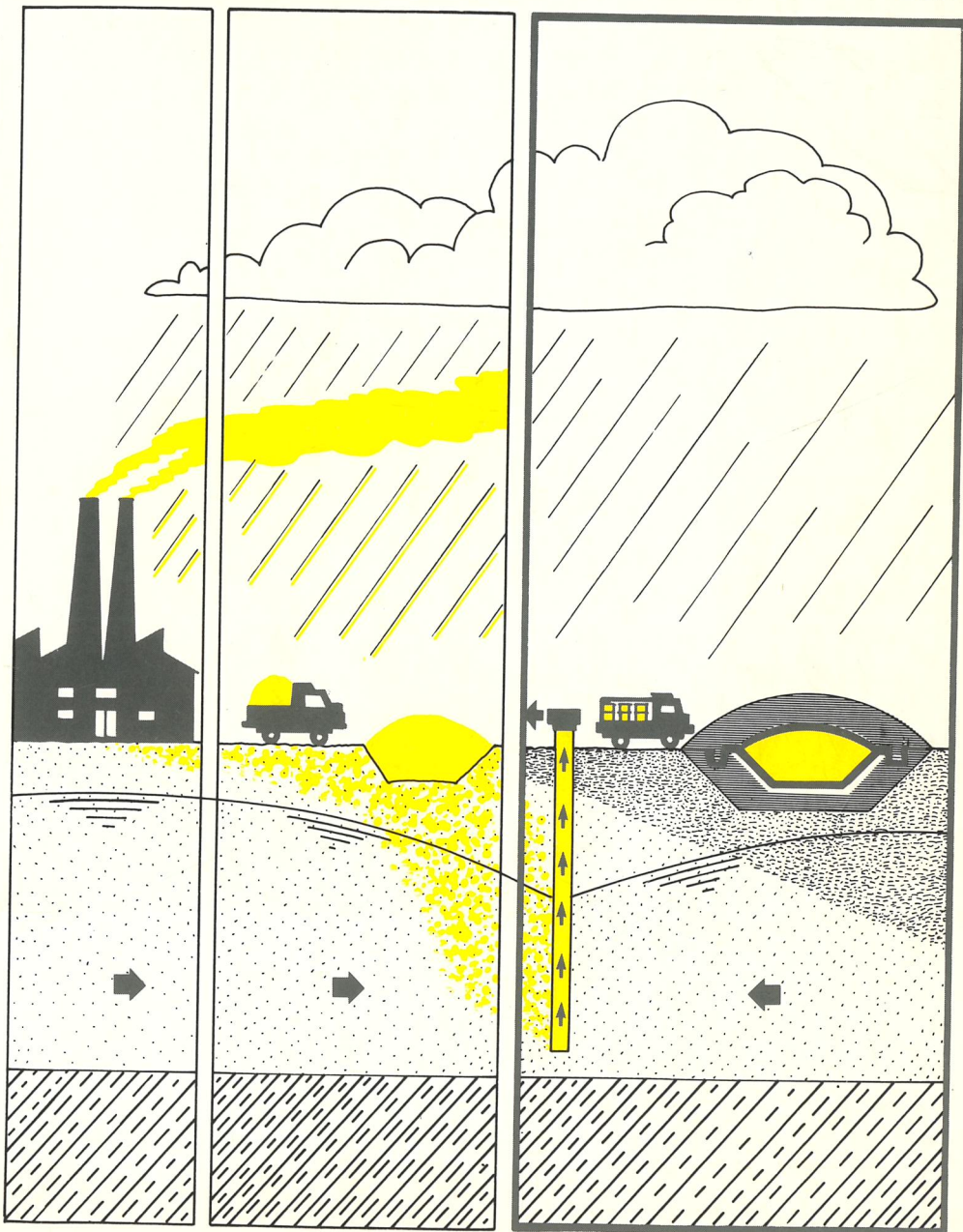


RESÍDUOS SÓLIDOS INDUSTRIAIS

TRABALHO ELABORADO PELO CORPO TÉCNICO DA CETESB



RESÍDUOS SÓLIDOS INDUSTRIAIS

CETESB - Companhia Ambiental

do Estado de São Paulo

Biblioteca Prof^o Dr^o Lucas Nogueira Garcez

Av. Prof^o Frederico Hermann Jr., 345 Pinheiros

05459-900 - São Paulo - Brasil

e-mail: biblioteca@cetesbnet.sp.gov.br

2ª Edição

REVISTA E AMPLIADA

Eng^o Alfredo Carlos C. Rocca
Eng^a Angela Maria M.B. Iacovone
Tec^o Ariovaldo José Barrotti
Biol Doroty C.P. Casarini
Geol Elton Gloeden
Eng^a Elvira Lidia Straus
Eng^o João Antonio Romano
Eng^o Leandro Razuk Ruiz
Geol Leziro Marques da Silva
Eng^a Luzia Mitiko Saito
Eng^a Maria Cecilia Pires
Eng^a Maria Lais Guzzo Leão
Eng^o Pedro Penteado de Castro Neto
Eng^o Ricardo Collucci
Geol^o Rodrigo C. A. Cunha

Nossos agradecimentos à Divisão de Microinformática da Cetesb, em particular à Miriam Lucy Simões pelos trabalhos de digitação, e à Eng^a Mirtes Portela Groke pelos trabalhos de revisão final.

CLASS.	610202
AUTOR	R58R
TOMBO	D12096

ex 2

DIREITOS RESERVADOS PELA
CETESB - COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO
AMBIENTAL, SÃO PAULO, BRASIL - 1992

APOIO: PROCOP - PROGRAMA DE CONTROLE DE POLUIÇÃO
INDUSTRIAL

É proibida a reprodução total ou parcial por quaisquer meios, sem a autorização expressa da CETESB

R566r Rocca, Alfredo Carlos C.
 2. ed. Resíduos sólidos industriais / Alfredo Carlos C. Rocca, Angela Maria M.B. Iacovone, Ariovaldo José Barrotti ... | et al. | . — 2.ed. rev. ampl. — São Paulo : CETESB, 1993
 233 p. : il. ; 22 cm

Publicado anteriormente como : Resíduos Sólidos Industriais / Lúcio Aurélio Fontes Pavan ... | et al. | . — São Paulo : CETESB / ASCETESB, 1985.

— (Série ATAS, 1).

Bibliografia.

ISBN

1. Resíduos sólidos industriais - disposição 2. Resíduos sólidos industriais - tratamento I. Iacovone, Angela Maria M.B. II. Barrotti, Ariovaldo José. III. Casarini, Doroty Carmen P. IV. Título.

CDD (18.ed.) 628.54

CDU (2.ed. med. port.) 628.54

PREFÁCIO

O acelerado processo de industrialização observado em algumas regiões do País, aliado à expansão demográfica dele decorrente, tem acarretado um aumento considerável na produção de resíduos sólidos, particularmente no que se refere aos de origem industrial.

O trato inadequado dos resíduos sólidos industriais contribui de forma marcante para o agravamento dos problemas ambientais, notadamente nos grandes centros urbanos.

Como evidência deste fato, destaca-se o destino final dos resíduos sólidos industriais que constitui tarefa potencialmente poluidora do meio ambiente: ar, solo e principalmente águas superficiais e do subsolo.

Atenta à gravidade da situação, uma vez que ela abrange questões de saúde pública além daqueles de natureza social, urbanística e ambiental, a CETESB vem realizando, desde 1977, estudos neste campo com vistas ao desenvolvimento de uma tecnologia aplicável às nossas condições.

O trabalho “Resíduos Sólidos Industriais” que ora se apresenta com participação decisiva do PROCOP na sua efetivação, se constitui em importante subsídio às atividades de controle de poluição ambiental.



Foi originalmente elaborado pela DRI. Divisão de Resíduos Sólidos Industriais, em agosto de 1985, através da seguinte Equipe Técnica:

Eng^o Lucio Aurélio Fontes Pavan
Eng.^a Luzia Mitiko Saito
Eng.^a Maria Lais Guzzo Leão
Eng^o Pedro Penteadado de Castro Neto
Eng^o Redicieri Zaniolo Jr.
Eng.^a Yara de Campos Almeida

Foi revisto e ampliado pela CAIR - Setor de Controle de Resíduos Sólidos Industriais em Dezembro de 1990, através da seguinte Equipe Técnica:

Eng^o Alfredo Carlos C. Rocca
Eng.^a Angela Maria M.B. Iacovone
Tec^o Ariovaldo José Barrotti
Eng.^a Elvira Lidia Straus
Eng^o João Antonio Romano
Eng^o Leandro Razuk Ruiz
Geol Lezire Marques da Silva
Eng.^a Luzia Mitiko Saito
Eng.^a Maria Cecilia Pires
Eng.^a Maria Lais Guzzo Leão
Eng^o Pedro Penteadado de Castro Neto
Eng^o Ricardo Collucci
Geol. Rodrigo C. A. Cunha

SUMÁRIO

PÁG.

1. CLASSIFICAÇÃO	11
2. MINIMIZAÇÃO DE RESÍDUOS.....	19
2.1 Programa de Minimização de Resíduos.....	22
2.1.1 Redução na Fonte.....	25
2.1.2 Reciclagem	27
3. ARMAZENAMENTO, MANUSEIO E TRANSPORTE.....	29
3.1 Manuseio, Acondicionamento e Armazenamento.....	31
3.1.1 Treinamento de Pessoal.....	31
3.1.2 Segregação.....	32
3.1.3 Acondicionamento.....	34
3.1.4 Transporte Interno.....	35
3.1.5 Armazenamento de Resíduos.....	35
3.1.6 Procedimentos de Emergência.....	39
3.2 Transporte	39
3.2.1 Transporte Rodoviário.....	40
4. TRATAMENTO	43
4.1 Secagem e Desidratação de Lodos.....	45
4.1.1 Centrifugação	46
4.1.2 Filtragem com Filtro-Prensa de Placas.....	46
4.1.3 Filtragem com Filtro-Prensa de Cinto.....	48
4.1.4 Filtragem a Vácuo.....	50
4.1.5 Leitões de Secagem.....	51
4.2 Incineração.....	55
4.2.1 Introdução	55
4.2.2 Caracterização de Resíduos para Incineração.....	56
4.2.3 A incineração como um processo.....	56
4.2.4 Incineração em Equipamentos Industriais.....	68
4.2.4.1 Fornos Industriais.....	69
4.2.4.2 Caldeiras Industriais.....	70
4.2.5 Controle de Emissão.....	71
4.2.6 Aplicabilidade dos Equipamentos de Incineração por Tipo de Resíduo	78
4.2.7 Monitoramento e Sistema de Intertravamento.....	83
4.2.8 Teste de Queima.....	84
4.2.9 Custos	84

4.3	Estabilização e Solidificação.....	86
4.3.1	Definição.....	86
4.3.2	Considerações Gerais.....	86
4.3.3	Tecnologias Desenvolvidas e Aplicadas.....	87
4.3.3.1	Processo à Base de Cimento.....	87
4.3.3.2	Processo à Base de Cal e Materiais Pozolânicos (não incluindo o Cimento).....	89
4.3.3.3	Processo à Base de Cimento e Materiais Pozolânicos.....	91
4.3.3.4	Técnicas à Base de Polímeros.....	91
4.3.3.5	Técnicas à Base de Polímeros Orgânicos.....	93
4.3.3.6	Técnicas de Encapsulamento Superficial.....	94
4.3.3.7	Técnicas de Auto-Solidificação.....	95
4.3.3.8	Técnicas de Transformação em vidro, Produção de Materiais Sintéticos ou Cerâmicos.....	95
4.3.4	Propriedades dos Resíduos Estabilizados/Solidificados.....	96
4.3.4.1	Características do Resíduo a ser Tratado.....	96
4.3.4.2	Exigências para uma Estabilização/Solidificação Ideal.....	96
4.3.4.3	Compatibilidade dos Resíduos, Aditivos e Processos.....	96
4.3.4.4	Processos Específicos.....	101
4.3.5	Ensaio para Verificar a Viabilidade da Utilização de Processos de Estabilização/Solidificação de Resíduos Perigosos.....	104
4.3.5.1	Ensaio de Propriedades Físicas dos Resíduos Estabilizados.....	105
4.3.5.2	Ensaio de Lixiviação dos Resíduos Estabilizados.....	110
4.3.6	Efeitos de Ataque Biológico nos Resíduos Tratados.....	112
4.3.7	Efeitos dos Processos de Cura e Envelhecimento no Material Tratado.....	112
4.3.8	Considerações Econômicas.....	113
4.4	Sistemas Landfarming de Tratamento de Resíduos.....	116
4.4.1	Introdução.....	116
4.4.2	Critérios para Seleção de Local.....	117
4.4.3	Projeto.....	118
4.4.3.1	Sistema de Controle de Água.....	118
4.4.3.2	Esquema de Unidades de Tratamento.....	120
4.4.4	Operação e Práticas de Manejo.....	122
4.4.4.1	Preparação do Solo.....	123
4.4.4.2	Taxa e Frequência de Aplicação.....	123
4.4.4.3	Aplicação do Resíduo.....	124
4.4.4.4	Aração.....	125
4.4.4.5	Controle do pH.....	125
4.4.4.6	Fertilização.....	125
4.4.4.7	Temperatura e Umidade.....	126

4.4.5	Monitoramento	126
4.4.6	Fechamento	127
4.4.7	Considerações finais	129
4.5	Outros Métodos de Tratamento de Resíduos	129
4.5.1	Oxidação	129
4.5.2	Redução	130
4.5.3	Neutralização	130
4.5.4	Precipitação	130
4.5.5	Troca Iônica	130
4.5.6	Recuperação Eletrolítica	131
4.5.7	Extração por Solventes	131
4.5.8	Flotação	131
4.5.9	Adsorção	131
4.5.10	Osmose Reversa	132
4.5.11	Eletrodialise	132
4.5.12	Ultrafiltração	132
5.	DISPOSIÇÃO FINAL	133
5.1	Propriedades dos Solos	135
5.1.1	Propriedades Físicas, Físico-Químicas e Classificação	135
5.1.2	Obras de Terra	151
5.1.3	Aqüíferos	159
5.1.4	O solo como Atenuador de Poluição	161
5.2	Aterros Industriais	166
5.2.1	Seleção de Locais para Implantação de Aterros	167
5.2.2	Projeto de Aterros	169
5.2.3	Infra-Estrutura Básica de Aterros	171
5.2.4	Elementos de Proteção Ambiental	176
5.2.5	Gerenciamento e Operação do Aterro	204
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	211
	ANEXO I	217

1. CLASSIFICAÇÃO

São considerados resíduos sólidos industriais os resíduos em estado sólido e semi-sólido que resultam da atividade industrial, incluindo-se os lodos provenientes das instalações de tratamento de águas residuárias, aqueles gerados em equipamentos 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 isto, soluções economicamente inviáveis, em face da melhor tecnologia disponível.

As decisões técnicas e econômicas tomadas em todas as fases do trato dos resíduos sólidos industriais (manuseio, acondicionamento, armazenagem, coleta, transporte e disposição final) deverão estar fundamentadas na classificação dos mesmos.

Com base nesta classificação serão definidas as medidas especiais de proteção necessárias em todas as fases, bem como os custos envolvidos.

A ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas editou um conjunto de normas para padronizar, a nível nacional, a classificação dos resíduos:

- NBR 10004 - Resíduos Sólidos - Classificação
- NBR 10005 - Lixiviação de Resíduos - Procedimento
- NBR 10006 - Solubilização de Resíduos - Procedimento
- NBR 10007 - Amostragem de Resíduos - Procedimento

Esse conjunto de normas está bastante completo e permite a qualquer interessado a classificação de resíduos.

A norma NBR 10004 - "Resíduos Sólidos - Classificação", classifica os resíduos quanto aos seus riscos potenciais ao meio ambiente e à saúde pública, indicando quais resíduos devem ter manuseio e destinação mais rigidamente controlados.

A classificação proposta baseia-se fundamentalmente nas características dos resíduos, em listagem de resíduos reconhecidamente perigosos e em listagens de padrões de concentração de poluentes, a saber:

- Listagem 1 - Resíduos perigosos de fontes não específicas;
- Listagem 2 - Resíduos perigosos de fontes específicas;
- Listagem 3 - Constituintes perigosos - base para a relação dos resíduos e produtos das listagens 1 e 2;
- Listagem 4 - Substâncias que conferem periculosidade aos resíduos;
- Listagem 5 - Substâncias agudamente tóxicas;
- Listagem 6 - Substâncias tóxicas;
- Listagem 7 - Concentração - Limite máximo no extrato obtido no teste de lixiviação;
- Listagem 8 - Padrões para o teste de solubilização;
- Listagem 9 - Concentrações Máximas de poluentes na massa bruta de resíduos utilizadas pelo Ministério do Meio Ambiente da França para Classificação de Resíduos;
- Listagem 10 - Concentração mínima de solventes para caracterizar o resíduo como perigoso.

Segundo a Norma NBR 10004 os resíduos são agrupados em três classes:

- Resíduos Classe I - perigosos;
- Resíduos Classe II - não inertes e
- Resíduos Classe III - inertes.

RESÍDUOS CLASSE I - PERIGOSOS

São classificados como resíduos classe I ou perigosos os resíduos sólidos ou mistura de resíduos que, em função de suas características de inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade e patogenicidade, podem apresentar risco à saúde pública, provocando ou contribuindo para um aumento de mortalidade ou incidência de doenças e/ou apresentar efeitos adversos ao meio ambiente, quando manuseados ou dispostos de forma inadequada.

As listagens n^o 1 e 2 da referida Norma fornecem uma relação de resíduos sólidos industriais reconhecidamente perigosos.

Os resíduos que submetidos ao Teste de Lixiviação, conforme Norma Brasileira NBR 10005 - “Lixiviação de Resíduos - Procedimento”, apresentarem teores de poluentes no extrato lixiviado em concentração superior aos padrões constantes da listagem 7 - Limite Máximo no Extrato obtido no Teste de Lixiviação, são classificados como perigosos.

Os valores padronizados nessa listagem se referem exclusivamente a alguns metais pesados e pesticidas.

Assim sendo, o teste de lixiviação se aplica somente àqueles resíduos que apresentam entre seus constituintes um ou mais dos elementos e substâncias constantes da listagem n^o 7 da NBR-10004

São ainda classificados como resíduos perigosos os resíduos de restos de embalagens contaminados com substâncias da listagem n^o 5 e os resíduos de derramamento ou produtos fora de especificação de qualquer substância das listagens n^{os} 5 e 6.

Qualquer outro resíduo, que se supõe ser tóxico e que não conste destas listagens, deverá ter sua classificação baseada em dados bibliográficos disponíveis, uma vez que os testes de toxicidade a organismos superiores (DL50 oral ratos, CL50 inalação ratos ou DL50 dérmica coelhos) não são usuais entre nós.

RESÍDUOS CLASSE II - NÃO INERTES

São classificados como Classe II ou resíduos não inertes os resíduos sólidos ou mistura de resíduos sólidos que não se enquadram na Classe I - perigosos ou na Classe III - inertes.

Estes resíduos podem ter propriedades tais como combustibilidade, biodegradabilidade ou solubilidade em água.

RESÍDUOS CLASSE III - INERTES

São classificados como Classe III ou resíduos inertes os resíduos sólidos ou mistura de resíduos sólidos que, submetidos ao teste de solubilização (Norma NBR 10006 - “Solubilização de Resíduos - Procedimento”) não tenham nenhum de seus constituintes solubilizados, em concentrações superiores aos padrões definidos na Listagem 8 - ” Padrões para o teste de solubilização.

Como exemplos destes materiais, pode-se citar: rochas, tijolos, vidros e certos plásticos e borrachas que não são facilmente decompostos.

Como ficou demonstrado, os resíduos são classificados em função de suas propriedades físicas, químicas ou infecto-contagiosas e com base na identificação de contaminantes presentes em sua massa. Contudo, essa identificação é bastante complexa em inúmeros casos, em face dos limitações existentes nos laboratórios nacionais.

Por isso e, também, pela forma como as listagens são consultadas, um conhecimento prévio do processo industrial é imprescindível para a classificação do resíduo, identificação das substâncias presentes no mesmo e verificação da sua periculosidade.

Quando um resíduo tem origem desconhecida, o trabalho para classificá-lo torna-se ainda mais complexo. A experiência e o bom senso do técnico serão fundamentais.

A partir disso é que se definirão quais características e substâncias deverão ser pesquisadas.

Muitas vezes, mesmo para resíduos com origem conhecida, torna-se impossível conseguir uma resposta conclusiva e nesses casos, será necessário analisar parâmetros indiretos ou mesmo realizar bioensaios.

A amostragem de resíduos sólidos constitui uma operação de fundamental importância, pois os resultados de uma análise efetuada na amostra somente terão valor se aquela porção do resíduo tomada para a análise representar o mais fielmente possível a composição e as propriedades do todo que ela representa.

Geralmente a quantidade de material que é submetida aos processos analíticos é pequena e freqüentemente os resultados têm de ser dados em relação a partidas ou depósitos de dezenas ou mesmo de centenas de toneladas. Assim, pode-se avaliar a delicadeza que o problema representa.

A amostragem é o conjunto das operações que conduzem à obtenção de uma pequena porção realmente representativa da composição média do todo.

O resíduo a ser amostrado pode ser um meio contínuo, ou consistir de uma mistura de fragmentos diversos com composição irregular. Quando se trata de um resíduo homogêneo, a amostragem não representa nenhum problema, porque a menor quantidade retirada de qualquer ponto é representativa.

O mesmo não acontece com resíduos heterogêneos, onde o processo de amostragem é sempre crítico.

As se programar uma campanha de amostragem deve-se ter sempre em mente que as propriedades das amostras coletadas deverão corresponder às propriedades do todo, bem como que quanto maior for o número de amostras mais próximo do valor médio verdadeiro estará o valor médio obtido para os parâmetros em estudo.

A Norma ABNT NBR 10007 - "Amostragem de Resíduos - Procedimento" relaciona os procedimentos a serem adotados em uma campanha de amostragem.

Mesmo assim, sugere-se que as recomendações abaixo sejam seguidas:

- [] o número de amostras deve ser maior ou igual a quatro;
- [] o resíduo deve ser amostrado logo após sua geração; quando estocado ao ar-livre pode ter seus constituintes previamente liberados ao meio ambiente, mascarando os resultados obtidos;
- [] caso seja necessário amostrar resíduos estocados ao ar-livre, as amostras devem ser tomadas a profundidades superiores a 15 cm,
- [] sempre que possível, as amostras devem ser compostas.

O fluxograma da Figura 1.1 apresenta a metodologia a ser adotada na classificação de um resíduo.

Como ficou claro no fluxograma, a pesquisa para a classificação começa com a origem do resíduo. Uma vez determinada sua origem, verifica-se sua presença, conforme o caso, nas Listagens 1 e 2 ou 5 e 6.

Os resíduos que não forem identificados nestas listagens devem ser avaliados quanto à presença em sua composição de substâncias constantes da Listagem 4 - Substâncias que conferem periculosidade aos resíduos.

As substâncias presentes na Listagem 4 são as que comprovadamente se revelaram tóxicas, cancerígenas, mutagênicas ou teratogênicas aos seres vivos e ao homem.

Contudo, a simples presença de uma dessas substâncias no resíduo não implica, necessariamente, sua classificação como perigoso. Para isso, deverão ser analisados, também, os seguintes fatores:

- [] natureza da toxicidade apresentada pelo resíduo;
- [] concentração do constituinte no resíduo;
- [] potencial que o constituinte tem de migrar do resíduo para o ambiente sob condições impróprias de manuseio;
- [] persistência do constituinte ou de qualquer produto tóxico de sua degradação;
- [] potencial que o constituinte, ou qualquer produto tóxico de sua degradação, tem em degradar-se em constituintes não perigosos considerando-se a velocidade em que ocorre sua degradação;
- [] extensão em que o constituinte ou os produtos de sua degradação são capazes de bioacumular nos ecossistemas.

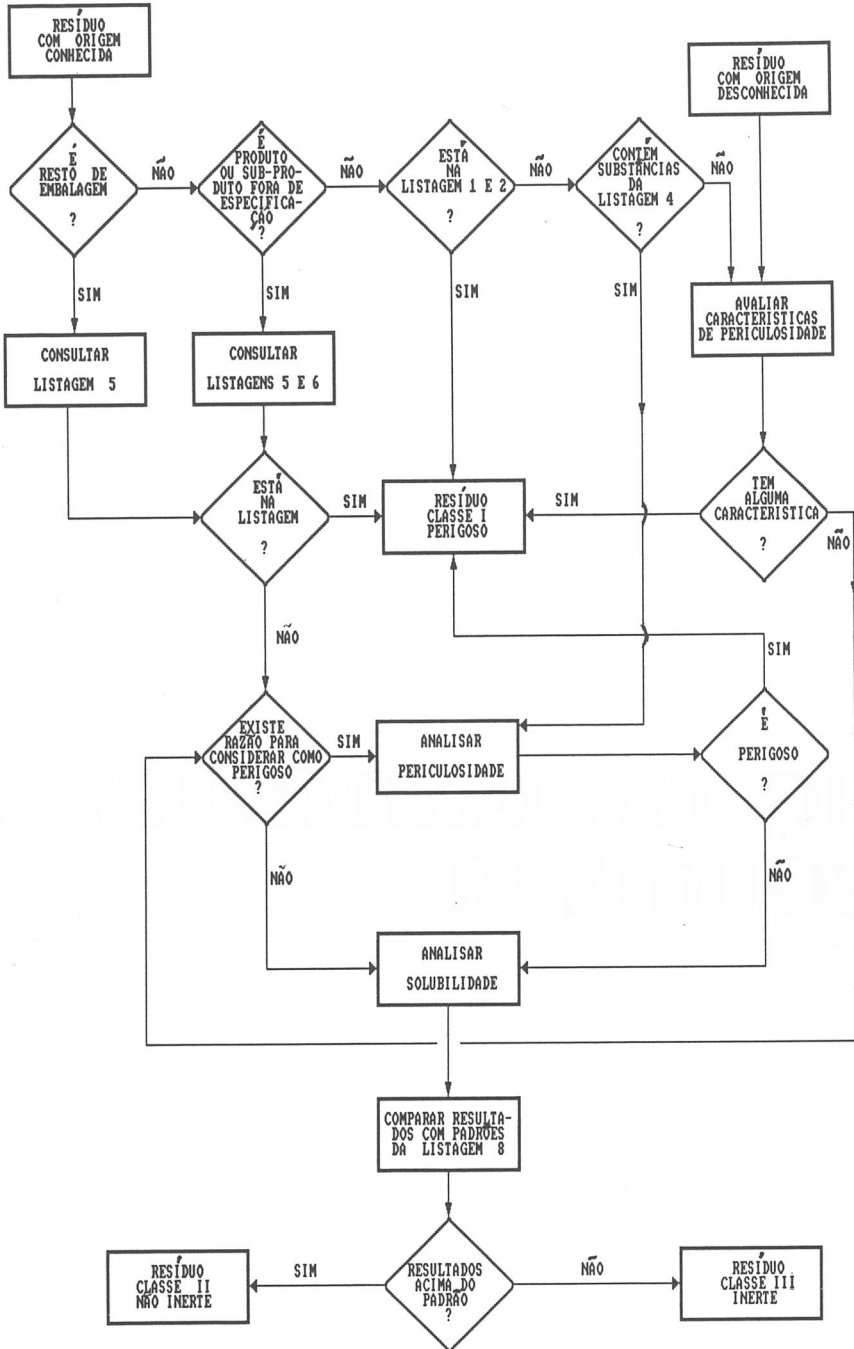
Caso ainda não seja possível classificar o resíduo, deve-se então avaliar sua periculosidade real através da comprovação de pelo menos uma das seguintes características: inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade ou patogenicidade.

Se ainda assim existirem dúvidas quanto à classificação, deve-se proceder da mesma maneira como se fez em relação às substâncias da Listagem 4, ou seja: analisar os fatores descritos no parágrafo anterior.

Neste ponto, já será possível classificar o resíduo como perigoso ou não. Se for classificado como não perigoso, o próximo passo é submetê-lo ao teste de solubilização. Pela comparação dos resultados obtidos na análise do extrato do teste de solubilização com os padrões da Listagem 8, classificam-se os resíduos como inertes ou não inertes.

Deve-se ressaltar que as listagens apresentadas não são estáticas. Um resíduo ou substância pode ser incluído ou retirado das mesmas de acordo com a evolução do conhecimento científico sobre o assunto. Portanto essas listagens devem ser continuamente atualizadas.

FIGURA 1.1. Fluxograma para classificação de resíduos





2. MINIMIZAÇÃO DE RESÍDUOS

ANÁLISE DE RESÍDUOS

A minimização da geração de resíduos se constitui numa estratégia importante no gerenciamento de resíduos e se baseia na adoção de técnicas que possibilitem a redução do volume e/ou toxicidade dos resíduos e, conseqüentemente, de sua carga poluidora.

Destaca-se como objetivo da minimização de resíduos a prevenção da geração de resíduos perigosos e a utilização de alternativas de disposição que não incluam a destinação no solo.

As práticas de minimização de resíduos tem-se mostrado economicamente vantajosas já que oferecem uma possibilidade de redução dos custos de destinação associada à alteração das características qualitativas e quantitativas dos resíduos e obtenção de receita pela comercialização dos produtos obtidos no tratamento e/ou separação dos resíduos.

A verificação das possibilidades de minimização de resíduos começa por um perfeito entendimento do processamento. Recomenda-se que neste estudo sejam envolvidas todas as pessoas que detêm conhecimento das diferentes etapas do processo. As ações de minimização a serem investigadas durante o estudo do processamento industrial são de dois tipos:

- atividades de caráter organizacional tais como treinamento de pessoal e manutenção e
- alterações de caráter técnico.

As tabelas 2.1, 2.2 e 2.3 apresentam uma relação de medidas de redução baseadas na análise de diversos processos e em auditorias industriais. Estas tabelas se mostram como um excelente passo inicial para verificação de possibilidades de minimização.

Ainda assim o ingrediente mais importante na implantação de um programa de minimização de resíduos é o compromisso do gerenciador da instalação, visto que a legislação ambiental brasileira não prevê ainda a obrigatoriedade de implantação de tais programas.

Na Alemanha e nos Estados Unidos o procedimento de minimização de resíduos vem sendo adotado como linha de ação prioritária do governo de alguns estados, tendo em vista incentivar a pesquisa de novas metodologias que se mostrem ambientalmente vantajosas.

Tabela 2.1
Roteiro Geral de Metodologia para Redução da Geração de Resíduos.

Ponto de Geração	Medidas recomendadas
Todas as Fontes de Resíduo	<ol style="list-style-type: none"> 1. Usar materiais de maior pureza 2. Usar matérias-primas menos tóxicas 3. Usar materiais não-corrosivos 4. Converter os processos por batelada em processos contínuos 5. Efetuar inspeção e manutenção mais rigorosas de equipamentos 6. Melhorar o treinamento dos operadores 7. Efetuar supervisão contínua 8. Adotar práticas operacionais adequadas 9. Eliminar ou reduzir o uso de água para limpeza de derramamentos 10. Implementar técnicas adequadas de limpeza de equipamentos 11. Usar sistemas de monitoramento aprimorados 12. Usar bombas com selo mecânico duplo
Fundo e Topo de Colunas	<ol style="list-style-type: none"> 1. Desenvolver Catalisadores mais seletivos 2. Otimizar o projeto do reator e das variáveis da reação 3. Efetuar queima com recuperação de calor
Catalisadores gastos e perdas	<ol style="list-style-type: none"> 1. Desenvolver um suporte de catalisador mais seguro 2. Usar filtro dentro da borda livre do reator 3. Regenerar e reciclar catalisadores gastos
Ponto de Geração	Medidas Recomendadas
Resíduos de Limpeza de Equipamentos	<ol style="list-style-type: none"> 1. Aumentar o tempo de drenagem do equipamento 2. Usar materiais resistentes à corrosão 3. Agitar e/ou isolar tanques de estocagem 4. Reexaminar a necessidade de produtos químicos para limpeza 5. Usar selo de nitrogênio para reduzir as oxidações
Derramamentos e Vazamentos	<ol style="list-style-type: none"> 1. Usar válvulas de selagem com alarme 2. Usar bombas sem selo 3. Maximizar o uso de juntas soldadas em relação às flangeadas 4. Instalar bacias de contenção de derramamentos

Fonte: Batstone R. et alii, The Safe Disposal of Hazardous Wastes. The Special Needs and Problems of Developing Countries. Vol I, II, III, Washington, World Bank, World Health Organization, United Nations Environmental Programme, 1989

Tabela 2.2
Roteiro de Metodologias para Redução da Geração de Resíduos
no Processamento por Batelada

(Pigmentos, inorgânicos, tinturas, tintas, formulações químicas agrícolas,
 resinas fenólicas, preservantes de madeira)

Fase do Processo	Medidas Recomendadas
Manuseio de Materiais	<ol style="list-style-type: none"> 1. Segregar as embalagens vazias por tipo de material estocado (conteúdo) 2. Utilizar tambores laváveis e passíveis de reciclagem 3. Comprar materiais a granel ou em embalagens maiores 4. Comprar materiais em embalagens previamente pesadas 5. Usar tubulação para transferências de materiais 6. Purgar linhas
Reação / Processamento	<ol style="list-style-type: none"> 1. Otimizar as variáveis de reação/projeto do reator 2. Otimizar método de adição de reagentes 3. Eliminar o uso de catalisadores tóxicos
Filtração e Lavagem	<ol style="list-style-type: none"> 1. Utilizar métodos de lavagem/enxague eficientes 2. Eliminar o uso de auxiliares de filtração 3. Usar lavagem em contracorrente 4. Reciclar águas de lavagem usadas 5. Maximizar a desidratação dos lodos
Poeira dos Coletores de pó	<ol style="list-style-type: none"> 1. Aumentar o uso de sistemas que evitem a emissão de pós 2. Usar moagem úmida em vez de moagem a seco 3. Programar o esvaziamento dos coletores de pó
Produtos fora de especificação	<ol style="list-style-type: none"> 1. Controlar a temperatura de reação de forma rigorosa 2. Reformular produtos fora de especificação
Limpeza de Equipamentos	<ol style="list-style-type: none"> 1. Instalar sistemas de lavagem a alta pressão 2. Alterar a programação de produção 3. Usar raspadores mecânicos nos tanques de mistura 4. Limpar os tanques de mistura logo após o uso 5. Usar sequência de lavagem em contracorrente 6. Reciclar a água de lavagem gasta 7. Aumentar o tempo de decantação das águas de lavagem gastas 8. Reexaminar a necessidade de limpeza com produtos químicos 9. Desidratar lodos

Fonte: Batstone R. et alii, The Safe Disposal of Hazardous Wastes. The Special Needs and Problems of Developing Countries. Vol I, II, III, Washington, World Bank, World Health Organization, United Nations Environmental Programme, 1989

Tabela 2.3

Roteiro para Verificação de Metodologias de Redução
de Geração de Resíduos nas Operações de Manufatura

(Eletrodeposição, Impressão litográfica, Tratamento Superficial de Metais,
Aplicação de Pintura, Placas de Circuitos Impressos)

Fase do Processo	Medidas Recomendadas
Manuseio de Materiais	<ol style="list-style-type: none"> 1. Segregar as embalagens vazias por tipo de material estocado (conteúdo) 2. Utilizar tambores laváveis e passíveis de reciclagem 3. Comprar materiais a granel ou em embalagens maiores 4. Comprar materiais em embalagens previamente pesadas
Solventes de Limpeza	<ol style="list-style-type: none"> 1. Instalar e operar os tanques de limpeza de forma apropriada 2. Evitar contaminação cruzada de solventes 3. Evitar contaminação de solventes com água 4. Remover o lodo continuamente 5. Monitorar a composição dos solventes 6. Consolidar operações de limpeza a frio 7. Reciclar solventes gastos
Agentes de Limpeza alcalinos/ácidos	<ol style="list-style-type: none"> 1. Instalar e operar os tanques de limpeza adequadamente 2. Evitar contaminação cruzada de solventes 3. Remover o lodo freqüentemente
Soluções Decapantes e de Acabamento Superficial	<ol style="list-style-type: none"> 1. Aumentar a vida do banho de solução de tratamento superficial 2. Usar banhos galvânicos com concentrações menores 3. Usar cromo trivalente no lugar do cromo hexavalente 4. Usar soluções galvânicas sem cianetos 5. Usar técnicas de recuperação em linha 6. Regenerar soluções de banhos gastos 7. Segregar todas as correntes de resíduos 8. Inspeccionar todas as partes para verificação da limpeza
Águas de Lavagem	<ol style="list-style-type: none"> 1. Instalar e operar os tanques de lavagem de forma apropriada 2. Usar tanques de lavagem múltiplos 3. Instalar drenos e tanques para gotejamento 4. Usar unidades de aspersão tipo spray 5. Agitar o banho de lavagem 6. Usar água deionizada para lavagem 7. Reciclar e reusar águas de lavagem 8. Segregar todas as correntes de resíduos 9. Reaproveitar metais das águas de lavagem
Aplicações de Tintas	<ol style="list-style-type: none"> 1. Usar equipamento com pouco excesso de aspersão 2. Inspeccionar todas as partes antes da pintura
Vazamentos e Derramamentos	<ol style="list-style-type: none"> 1. Instalar barreiras contra respingos e coletores de gotejamentos 2. Prevenir o transbordamento do tanque

Fonte: Batstone R. et alii, The Safe Disposal of Hazardous Wastes. The Special Needs and Problems of Developing Countries. Vol I, II, III, Washington, World Bank, World Health Organization, United Nations Environmental Programme, 1989

2.1 PROGRAMA DE MINIMIZAÇÃO DE RESÍDUOS

Existem basicamente duas estratégias para minimização de resíduos: redução na fonte e reciclagem.

2.1.1 Redução na fonte

A redução na fonte consiste na redução ou eliminação da geração de um resíduo de processo através de modificações dentro do processo, que se dividem nos seguintes tipos:

- Alterações de matérias-primas
 - substituição de matérias-primas e
 - purificação de matérias-primas.

- Alterações de Tecnologia
 - mudanças no processo;
 - mudanças no arranjo dos equipamentos e tubulações;
 - automatização;
 - mudança nas condições operacionais;
 - redução do consumo de água e
 - redução do consumo de energia.

- Mudanças de procedimento/ práticas operacionais
 - prevenção de perdas;
 - treinamento do pessoal e
 - segregação.

a) Alteração dos materiais utilizados

A efetividade da alteração das matérias-primas como técnica de redução de geração na fonte varia de acordo com o tipo de processamento envolvido.

Nas sínteses químicas esta técnica representa a utilização de um material de maior pureza.

Quando o processo é essencialmente uma atividade de purificação, esta redução vai estar associada ao uso de materiais de maior grau de pureza ou minérios que gerem menos resíduos.

Materiais auxiliares que são usados no processo e não são convertidos em produtos podem, às vezes, ser substituídos por materiais menos tóxicos e mais seguros. Como exemplo temos a substituição dos solventes clorados altamente tóxicos por detergentes biodegradáveis inócuos e o uso de inibidores de corrosão menos tóxicos no lugar dos cromatos nas torres de refrigeração.

b) Alterações tecnológicas

A substituição de tecnologias, através do uso das chamadas tecnologias limpas, se mostra como uma opção efetiva na minimização de resíduos. Um produto pode, geralmente, ser manufaturado de duas ou mais formas distintas. Por exemplo a fabricação de cloro e soda pelo processo eletrolítico, a partir da salmoura, pode ser efetuada tanto pelo método das células de mercúrio como por células de diafragma, o qual gera uma quantidade muito menor de resíduos perigosos.

Convém observar que as alterações tecnológicas caracterizam-se como uma solução a longo prazo, envolvendo estudos e pesquisas prolongadas, bem como investimentos consideráveis. Não se deve, no entanto, deixar de buscar alcançar, dentro das possibilidades técnicas, a produção com geração de quantidade zero de resíduos.

O desenvolvimento de tecnologias com baixa geração de resíduos se constitui no foco central da minimização de resíduos.

c) Mudanças de procedimento

A adoção de boas práticas de operação num processamento industrial inclui alterações dos procedimentos organizacionais e dos aspectos institucionais, com o objetivo de limitar a geração desnecessária de resíduos, atribuída à intervenção humana (ou pela falta dela).

Como exemplos citam-se: treinamento de pessoal, controle de inventário, segregação das correntes de resíduos, melhoria do manuseio dos materiais, criação de escalas para utilização de equipamentos, prevenção de derramamentos e vazamentos e manutenção preventiva.

Outras práticas incluem a programação das operações por batelada, de modo a limitar a frequência de limpeza dos equipamentos e, conseqüentemente, de geração de resíduos; a segregação dos resíduos perigosos dos não perigosos, de modo a minimizar o volume de resíduos contaminados e a redução de excesso na aplicação de tinta por spray.

Das práticas citadas destaca-se a segregação dos resíduos, a qual é baseada na simples acumulação segregada dos mesmos no ponto de geração ou na separação dos resíduos de acordo com suas características visando sua destinação final. A adoção da segregação é especialmente importante pois viabiliza a recuperação ou reprocessamento dos resíduos gerados. Esta técnica se constitui numa prática de implantação imediata.

d) Substituição de produtos auxiliares

Outro método eficiente de redução na fonte é a substituição de um produto por outro de uso idêntico. Como exemplo a utilização de solventes menos tóxicos como os hidrocarbonetos alifáticos em substituição a solventes mais tóxicos como o percloroetileno ou tricloroetileno vai levar à geração de um resíduo de solvente menos tóxico.

A análise de viabilidade da substituição de produtos como forma de minimização de resíduos deverá se basear na análise dos seguintes aspectos:

- se o substituto pode funcionar adequadamente como reposição do produto original;
- se o custo econômico do substituto justifica seu uso como reposição do produto;
- se o processamento e a destinação dos resíduos gerados na fabricação do substituto reduzem as conseqüências ambientais;
- se o custo/benefício ambiental do substituto é suficientemente atrativo; e
- se existem fatores sócio-políticos tais como ações governamentais para promover a substituição.

O balanço das vantagens e desvantagens vai ser o fator determinante para a seleção do substituto. Por exemplo, tintas a base de água, usadas na impressão, tem a vantagem de ser menos tóxicas que as tintas a base de solventes, mas requerem mais

energia para a secagem, possuem pouco brilho e podem fazer o papel enrolar e, ocasionalmente, requerem paradas no processo. Os solventes alifáticos, que apresentam a vantagem de ser menos tóxicos, podem ser usados na limpeza a seco. No entanto, eles são muito mais inflamáveis que o percloroetileno comumente usado, o qual é por sua vez muito mais tóxico.

Geralmente a substituição de produtos é efetivada nos casos em que é possível reduzir custos e melhorar a qualidade do produto e, conseqüentemente, aumentar os lucros e, nos casos em que devam ser atendidas exigências ambientais impostas pela legislação.

2.1.2. Reciclagem

A reciclagem, através do reuso ou recuperação de resíduos ou de seus constituintes que apresentem algum valor econômico é uma das formas mais atraentes de solução dos problemas de gerenciamento de resíduos, tanto do ponto de vista empresarial como dos órgãos estaduais de proteção do meio ambiente.

O correto transporte, tratamento e disposição final de um resíduo apresentam um custo que, em alguns casos, pode ser bastante elevado. Assim, se o industrial encontrar uma forma de reaproveitar ou vender esses resíduos, ele estará criando uma maneira bastante atraente de resolver o problema e ainda conseguir uma fonte de renda adicional.

Do ponto de vista dos órgãos estaduais de proteção do meio ambiente, essa prática é muito conveniente, pois diminui a quantidade de resíduos lançados no meio ambiente, além de contribuir para conservação dos recursos naturais, minimizando a utilização dos recursos naturais não renováveis.

Este assunto é tão importante que em muitos países uma série de resíduos devem ser obrigatoriamente recuperados. No Brasil, até o momento, esta obrigatoriedade existe apenas para os resíduos de óleos lubrificantes.

Em termos práticos a reciclagem por recuperação de um resíduo depende dos seguintes fatores:

- proximidade da instalação de reprocessamento;
- custos de transporte dos resíduos;
- volume de resíduos disponíveis para o reprocessamento;
- custos de estocagem do resíduo no ponto de geração ou fora do local de origem.

Assim, um determinado material só será recuperado se o seu preço de venda puder ser menor ou igual ao preço de mercado, ou então, se for mais barato recuperá-lo que transportá-lo e tratá-lo ou dispô-lo adequadamente.

Para incentivar as atividades de reciclagem, têm sido criados em muitos países, inclusive no Brasil, sistemas de troca de informações através de uma publicação denominada "Bolsa de Resíduos". Os interessados em vender ou doar algum material anunciam na Bolsa indicando nome, composição química e quantidade do resíduo. Os interessados em comprar entram em contato através da Bolsa ou diretamente com o vendedor ou doador e acertam os aspectos econômicos e operacionais da transação. Do mesmo modo, se algum empresário deseja receber ou comprar um determinado resíduo ele também pode utilizar-se da Bolsa com esse objetivo.

Ao que se sabe, as tentativas realizadas no Brasil têm apresentado resultados sofríveis pois apenas 10 a 15% das operações anunciadas são efetivamente concluídas.

Provavelmente, isso se deve ao fato de que os industriais ainda desconhecem a existência desse mecanismo ou, por qualquer motivo, têm algum tipo de receio em anunciar seus resíduos ou, ainda, não acreditam plenamente nas informações fornecidas.

Um dos problemas relacionados a qualquer Bolsa de Resíduos é a dificuldade de se controlar a “qualidade” dos materiais anunciados de modo a atender os padrões requeridos para os processamentos. Por serem gerados em processos que, via de regra, apresentam variações, quase todos têm composições diferentes, o que dificulta sua utilização como matéria-prima

Em geral a recuperação é executada de três formas distintas: uso direto ou reutilização do produto dentro do processo; recuperação de um material secundário para um determinado uso final e remoção das impurezas do resíduo para obtenção de uma substância, relativamente pura e passível de reutilização.

Como exemplo da reutilização direta cita-se o reuso de solventes para a limpeza de equipamentos, a recirculação dos pós e poeiras de pesticidas coletados nas áreas de formulação destes produtos.

A fim de tornar os resíduos recicláveis economicamente competitivos, em comparação com os materiais que eles estão substituindo, estes resíduos, freqüentemente, devem ser tratados antes de sua reutilização. Os processos de tratamento incluem separação química, física e eletroquímica entre os quais se destacam como exemplo:

- destilação de resíduos de solventes;
- técnicas de concentração de metais tais como extração com solventes, troca iônica, precipitação, cristalização e evaporação, usadas para tratar correntes diluídas de resíduos contendo metais.

Estão se tornando cada vez mais comuns as instalações comerciais que efetuam a recuperação de resíduos fora da origem. Como exemplos temos as indústrias de re-refina de óleo lubrificante, as recuperadoras de solventes e as recuperadoras de tintas. Observa-se também que essas instalações vem se dedicando a múltiplas atividades de recuperação e tratamento, seguindo a tendência de outros países que é da constituição de centrais de tratamento. Essas centrais compreendem tipicamente instalações de recebimento de resíduos, laboratório de controle, sistemas de estocagem, desidratação de lodos, sistemas de tratamento de resíduos inorgânicos, incinerador para resíduos orgânicos e aterro industrial.

3. ARMAZENAMENTO, MANUSEIO E TRANSPORTE

TRANSPORT
MANAGEMENT
AND
OPERATIONS

A maior parte dos resíduos industriais e principalmente aqueles caracterizados como perigosos são freqüentemente tratados ou dispostos em locais distantes do seu ponto de geração. Esses locais eventualmente podem estar situados na própria área industrial ou a vários quilômetros, como geralmente ocorre. O envio de um resíduo do ponto de geração até o seu destino final envolve geralmente a coleta, o acondicionamento, o transporte e armazenamento dentro da própria indústria e a coleta e o transporte até o local de tratamento ou disposição. A fase interna é, sem dúvida, de responsabilidade exclusiva do industrial, enquanto que a fase externa é, muitas vezes, de responsabilidade de contratados. Nesses casos, a legislação vigente torna o industrial co-responsável por qualquer acidente de contaminação que porventura venha a ocorrer. Isso implica que os resíduos devem ser adequadamente gerenciados pelo industrial em todas as fases, sendo por isso recomendável que só sejam contratadas firmas idôneas de transporte, tratamento ou disposição, ou seja, empresas transportadoras cadastradas e locais de armazenamento, tratamento ou disposição final aprovados ou licenciados pelo órgão de controle ambiental.

3.1 MANUSEIO, ACONDICIONAMENTO E ARMAZENAMENTO

Toda empresa deve possuir um sistema de coleta, manuseio e armazenamento para seus resíduos.

Na elaboração desse sistema os aspectos mais importantes a serem considerados são: treinamento de pessoal, segregação dos resíduos, acondicionamento, transporte interno, armazenamento e procedimentos de emergência.

3.1.1 Treinamento de pessoal

A movimentação dos resíduos nas indústrias, com raras exceções, é realizada por pessoal não qualificado. Em geral, esse serviço está ligado às áreas administrativas e tanto os trabalhadores como suas chefias normalmente se expõem a riscos desnecessários, por desconhecimento completo do assunto. Muitas vezes, um resíduo não apresenta efeito imediato e visível, comparável a uma intoxicação aguda ou a uma queimadura; porém, poderá acarretar, com o decorrer do tempo, distúrbios irreversíveis no organismo humano e mesmo danos genéticos aos descendentes dos operários.

Os operários devem ser informados dos riscos inerentes ao trato de cada resíduo, treinados na execução das tarefas de coleta, acondicionamento, transporte e armazenamento para as quais forem designados, bem como quanto à utilização dos equipamentos de transporte e dos equipamentos de proteção individual colocados a sua disposição e, principalmente, treinados quanto aos procedimentos de emergência em caso de acidentes ou derramamentos.

Outro ponto de grande importância seria subordinar essas tarefas a uma área técnica da indústria, por exemplo, de higiene e segurança, ou, preferencialmente, ao departamento ambiental.

A conscientização dos empresários não é uma tarefa fácil. Freqüentemente, estão envolvidos com problemas relacionados aos aspectos econômicos e produtivos da empresa e delegam a administração das tarefas relativas aos resíduos a um pessoal de nível hierárquico mais baixo. Portanto, a forma mais eficiente de atuação é a pressão dos órgãos representativos dos funcionários ou das Comissões Internas de Prevenção de Acidentes - CIPA's, tudo isso aliado a um maior esforço do Estado, através de seus órgãos: trabalhista, de higiene ou ambientais.

Uma solução paliativa para o caso, que tem demonstrado bons resultados nas indústrias que a adotaram é a utilização de um código numérico ou de cores para a identificação dos diversos resíduos, dos recipientes adequados a cada um deles, bem como dos locais onde esses resíduos devem ser colocados.

A aplicação desse sistema é bastante simples e consiste basicamente na adoção do mesmo código tanto para os containers colocados junto aos pontos de geração como para aqueles da área de armazenagem.

Paralelamente, os operários são informados do significado de cada símbolo e dos riscos de manuseio dos resíduos relacionados a cada um deles. Por exemplo: supondo que um resíduo corrosivo seja gerado e ao mesmo esteja associado o símbolo A1, todos os equipamentos que entrarem em contato com ele devem, também, conter o símbolo A1 e os operários devem estar cientes do risco de manusear um produto codificado como A1. Assim como os procedimentos de emergência a serem adotados em caso de contato ou contaminação, esse sistema permite, também, a segregação dos resíduos, assunto que será abordado mais adiante.

A solução do problema só será possível se a indústria elaborar e aplicar um programa de treinamento, o que dependerá da atuação dos próprios funcionários, dos técnicos e do Estado.

3.1.2 Segregação

A segregação dos resíduos dentro da indústria e nos locais de tratamento ou disposição é de suma importância para o gerenciamento de resíduos sólidos e tem como objetivos básicos: evitar a mistura de resíduos incompatíveis, contribuir para o aumento da “qualidade” dos resíduos que possam ser recuperados ou reciclados e diminuir o volume de resíduos perigosos ou especiais a serem tratados ou dispostos.

A mistura de dois ou mais resíduos incompatíveis pode ocasionar reações indesejáveis ou incontroláveis que resultem em conseqüências adversas ao homem, ao meio ambiente, aos equipamentos e mesmo à própria instalação industrial. A extensão dos danos dependerá das características dos resíduos, das quantidades envolvidas, do local de estocagem e do tipo de reação.

Os fenômenos mais comuns que podem ter origem na mistura de resíduos incompatíveis são: geração de calor, fogo ou explosão; geração de fumos e gases tóxicos; geração de gases inflamáveis; volatilização de substâncias tóxicas ou inflamáveis; solubilização de substâncias tóxicas ou polimerização violenta. Na figura 3.1 é apresentado um quadro de incompatibilidade de resíduos que deve ser consultado sempre que um programa de estocagem ou de disposição for estabelecido.

Em um processo industrial, de forma geral, existem muitos resíduos que poderiam ser recuperados ou reciclados. Na medida em que possam retornar ao próprio processo industrial ou, então, servir como matéria-prima para outras indústrias, isso se tornará uma fonte adicional de renda ao empresário, porque, se de um lado ele economiza na aquisição de matéria-prima, de outro recebe pela venda de um subproduto e não dispense recursos para o transporte e disposição desses resíduos.

Muitas vezes a quantidade de resíduos é pequena e o ganho, aparentemente, pode não ser interessante. Todavia, se os custos de transporte e de disposição forem computados, provavelmente, essa idéia poderá se modificar.

Outro aspecto a ser considerado é que, mesmo pequenos, os recursos obtidos com a reutilização ou a reciclagem podem cobrir parte ou todo o custo de armazenagem

dos outros resíduos. Para que um resíduo possa ser reutilizado ou reciclado, normalmente precisa estar isento de “impurezas” o que torna obrigatório dedicar-se atenção especial à coleta e ao armazenamento, isto é, não deverá ser misturado com qualquer outro. Finalmente, a mistura indiscriminada de resíduos gerará, além dos problemas citados, um maior volume a ser transportado e tratado ou disposto, ocasionando grande aumento de custos, principalmente se a mistura for considerada perigosa.

FIGURA 3.1
Quadro de incompatibilidades de resíduos

1	Ácidos Minerais Oxidantes	I																		
2	Bases Cáusticas	C	2																	
3	Hidrocarbonetos Aromáticos	C F		3																
4	Orgânicos Halogenados	C F GT	C		4															
5	Metais	GI C F			C F	5														
6	Metais Tóxicos	S	S							6										
7	Hidrocarbonetos Alifáticos Saturados	C F										7								
8	Fenóis e Cresóis	C F																		8
9	Agentes Oxidantes Fortes		C	C	F		C	F	C											9
10	Agentes Redutores Fortes	C F GT			C								GI	C	F	E				10
11	Água e Soluções Aquosas	C			C	E		S											GI	11
12	Substâncias que reagem com água	Extremamente Reativo: não misturar com nenhum produto químico ou resíduo																		12

E - Explosivo
F - Fogo
GI - Gás Inflamável
GT - Gás Tóxico
C - Geração de Calor
S - Solubilização de Toxinas

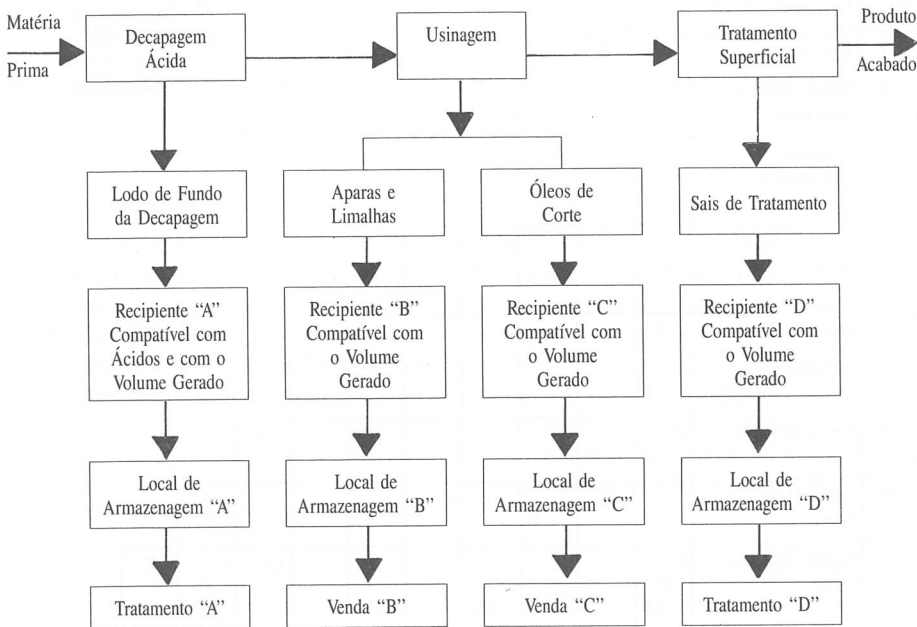
A título ilustrativo dos aspectos mencionados consideremos uma indústria metalúrgica que tenha os seguintes processos: decapagem ácida, fundição, usinagem e tratamento superficial de metais. Esta indústria gerará, entre outros, os seguintes resíduos: banhos gastos de decapagem, areia de fundição, aparas e limalhas metálicas, saís de tratamento térmico e lodos provenientes de sistema de tratamento de águas residuárias. Terá também restos de embalagens e resíduos de escritório. Se todos esses resíduos forem misturados entre si, a mistura dos mesmos será considerada um resíduo perigoso e, conseqüentemente, terá um custo de transporte, tratamento e dis-

posição final muitas vezes superior àquele decorrente do trato individual de cada resíduo. Além disso, os resíduos passíveis de reciclagem, como os de papel e papelão e as aparas e limalhas metálicas, não mais seriam comercializados. Ressalta-se ainda que no caso dos sais de têmpera conterem cianetos, ocorreria seguramente a liberação de gases tóxicos na atmosfera.

A figura 3.2 apresenta um esquema de segregação para um processo de tratamento superficial de metais.

FIGURA 3.2

Esquema de segregação para um processo de tratamento superficial de metais (têmpera)



3.1.3 Acondicionamento

Os recipientes a serem utilizados para acondicionamento de resíduos sólidos devem: ser construídos com material compatível com os resíduos; ser estanques, ou seja, ter capacidade de conter os resíduos no seu interior; apresentar resistência física a pequenos choques, durabilidade e compatibilidade com o equipamento de transporte, em termos de forma, volume e peso.

A escolha do tipo de recipiente mais adequado para um caso especificado irá depender basicamente das características do resíduo, das quantidades geradas, do tipo de transporte a ser utilizado, da necessidade ou não de tratamento e da forma de disposição a ser adotada.

Geralmente, as indústrias utilizam dois tipos de recipientes: um menor, colocado

ao lado dos pontos de geração do processo industrial e um maior, instalado na área de armazenagem da indústria. Na prática, os recipientes menores geralmente são: tambores de 200 l, inteiros ou cortados ao meio; recipientes plásticos, tipo bombonas; sacos plásticos ou de papel; containers removíveis e containers especialmente construídos sobre rodas.

É importante adequar o recipiente à forma de remoção, porque, se removido por um homem, o seu peso, quando cheio, não deve ser superior a 30 ou 40 Kg; deve ainda possuir bordas arredondadas e alças que permitam o seu manuseio. Se, por outro lado, o recipiente for removido por empilhadeira mecânica é imprescindível colocá-lo sobre um estrado, metálico ou de madeira.

Na área de armazenagem, de modo geral, usam-se containers e/ou tambores, tanques, ou, então, os resíduos são armazenados a granel, como acontece em muitas indústrias. A adoção de um sistema de contenção e armazenagem deve levar em conta também o tipo de equipamento de transporte e o modo do seu carregamento.

3.1.4 Transporte interno

O transporte interno de resíduos é, também, fator de risco para toda a instalação industrial. A elaboração de um sistema de transporte interno deve considerar pelo menos: necessidade de rotas preestabelecidas; equipamentos compatíveis com o volume, peso e forma do material a ser transportado; pessoal familiarizado com esses equipamentos e determinação das áreas de riscos para equipamentos especiais.

De maneira geral, nas indústrias brasileiras é utilizado todo e qualquer equipamento disponível no momento e freqüentemente os próprios operários transportam manualmente os resíduos.

São, assim, utilizados para o transporte interno: carrinho de mão, empilhadeiras, caminhonetes, caminhões de carroceria aberta basculante ou não e caminhões tipo poliguindastes.

3.1.5 Armazenamento de resíduos

Basicamente, o armazenamento de resíduos tem como definição a contenção temporária de resíduos em área autorizada pelo órgão de controle ambiental, à espera de reciclagem/recuperação, tratamento ou disposição final adequada, desde que atenda às condições básicas de segurança.

O armazenamento dos resíduos deverá atender à Portaria Minter nº 124 de 20/08/80 e ser executado conforme as condições estabelecidas nas seguintes normas:

- NB 1183 "Armazenamento de Resíduos Sólidos Perigosos - Procedimento" - ABNT;
- NB 1264 "Armazenamento de Resíduos Sólidos Classes II e III" - ABNT;
- NB 98 - "Armazenamento e Manuseio de Líquidos Inflamáveis e Combustíveis";
- Instrução Normativa SEMA/STC/CRS nº 001 de 10/06/83 - Dispõe sobre as condições de manuseio, armazenamento e transporte de bifenilas policloradas (PCB's) e de resíduos contaminados com PCB's.

A fim de que se possa efetuar um projeto de armazenamento de resíduos adequada e implantá-lo, devem ser observados critérios mínimos para a escolha da sua localização, bem como as seguintes condições de segurança: isolamento e sinalização e

controle de operação. Além disso devem ser consideradas as formas de acondicionamento e segregação dos resíduos dentro da própria área de estocagem, segundo os conceitos anteriormente citados.

No que se refere aos critérios a serem adotados para a escolha e a seleção de local para implantação de área de armazenamento, além de se levar em conta as legislações e normas já mencionadas, devem ser ressaltados os seguintes aspectos:

- o impacto ambiental deve ser minimizado ao máximo de maneira a não acarretar danos ao meio ambiente e à saúde pública;
- a aceitação pela vizinhança do projeto e sua implantação, quando for o caso, deve ser obtida para garantir que não ocorram problemas durante o seu funcionamento;
- as restrições estabelecidas para a proteção de mananciais hídricos de lençóis freáticos e também de núcleos populacionais devem ser obedecidas, e
- os locais onde existe risco maior de ocorrência de fenômenos naturais, tais como chuvas intensas, inundações, recalques ou erosões, etc., bem como aqueles com alto risco de incidência de acidentes, isto é, faíscas, vapores reativos, umidade excessiva, tráfego intenso e outros devem ser evitados.

Em relação à proteção ambiental, deve se verificar a necessidade de adoção de medidas tais como: impermeabilização inferior da área; colocação de cobertura; instalação de sistemas de drenagem de águas pluviais e de líquidos percolados e derramamentos acidentais, construção de bacias de contenção e de poços de monitoramento de qualidade de águas subterrâneas.

Quanto às condições de segurança da área de armazenamento, essa deve possuir um sistema de isolamento ao acesso de estranhos e de sinalização para alertá-los quanto aos perigos do local, deve dispor de iluminação e força para ações em situações de emergência e de sistema de comunicação, com possibilidade de uso em situações emergenciais e deve ter seus acessos internos e externos mantidos em boas condições. Além disso, deve ser estabelecido um Plano de Controle dos Materiais Estocados, que inclua o tipo, a procedência, a quantidade; a localização etc. Plano de Movimentação de Resíduos e Ocorrências, tais como acidentes, vazamentos, irregularidades, danificação de recipientes e outros, assim como um Plano de Segregação de Resíduos Armazenados para evitar a mistura daqueles incompatíveis, caso hajam acidentes, vazamentos ou derramamentos, evitando dessa maneira os problemas citados anteriormente.

Nas áreas de armazenagem os resíduos são usualmente acondicionados em tambores ou container, tanques ou à granel:

- a área deve ser preferencialmente coberta, fechada e ventilada, com base de concreto ou outro material impermeabilizante, se o resíduo a ser estocado for perigoso. Caso não seja fechada, deverá ser provida de bacia de contenção, conforme descrito posteriormente. Além disso, essa área deve possuir sistema de coleta de líquidos contaminados para posterior tratamento ou novo entamboramento;
- a identificação do resíduo deve ser feita através de um único rótulo para a sua rápida identificação;
- os tambores ou containers devem se apresentar em boas condições de uso, sem ferrugem nem defeitos estruturais aparentes. Dependendo das características dos resíduos esses devem ser construídos de material compatível ou devem receber algum tipo de revestimento ou impermeabilização, para que se evitem reações indesejáveis e conseqüentemente danos aos mesmos;

- os recipientes não devem ser abertos, manuseados ou armazenados de maneira a possibilitar o vazamento do material ou, ainda, rompê-los ou danificá-los;
- as operações de transferência, estocagem, adição, retiradas, abertura ou fechamento de tambores ou containers devem ser executadas, notadamente no caso de resíduos perigosos, por pessoal treinado e dotado de equipamento de proteção individual;
- a disposição de containers na área de estocagem deve ser feita de forma a permitir que esses possam ser inspecionados visualmente, sendo que os primeiros devem ser colocados sobre pallets para evitar o seu contato direto com o piso e garantir uma inspeção adequada;
- os tambores e containers devem ser dispostos em suas áreas específicas, conforme as características de compatibilidade dos resíduos nesses contidos e,
- a inspeção da área de armazenamento deve ser feita obedecendo uma frequência preestabelecida, onde devem ser verificados os pontos de deterioração dos recipientes e vazamentos causados por corrosão ou outros fatores, bem como os sistemas de contenção.

O armazenamento de resíduos em tanques deve observar as seguintes condições:

- os tanques devem ser construídos com material compatível com os resíduos a serem armazenados;
- os tanques devem ser providos de dispositivos de controle de pressão, quando fechados e dispositivos automáticos de controle de nível que corte a alimentação quando o nível máximo é atingido;
- a área de armazenamento de resíduos perigosos, particularmente os inflamáveis, deve estar provida de bacia de contenção cujo volume mínimo e aspecto construtivo devem seguir a NBR-1505. Armazenamento de Petróleo e seus Derivados e NB98 Armazenamento e Manuseio de Líquidos Inflamáveis e Combustíveis;
- os equipamentos de controle de transbordamento, de pressão nos tanques, de nível e etc. devem ser inspecionados diariamente;
- as partes externas do tanque devem ser vistoriadas semanalmente para detectar corrosão de vazamentos em conexões ou costuras. O mesmo se aplica para a área que circunda o tanque e,
- o plano de inspeção dos tanques deve incluir o seu esvaziamento periódico para permitir a inspeção do seu interior.

O armazenamento de resíduos a granel deve ser realizado, observando-se as seguintes condições:

- os resíduos sólidos devem ser armazenados de forma que estejam protegidos de precipitações, evitando assim escoamentos superficiais e lixiviação de seus constituintes;
- os materiais, para serem armazenados em montes, não devem apresentar líquido livre, conforme definido na PN 1:603.06-004 - Teste para Determinação de Líquidos Livres. Além disso, o projeto e a operação do sistema devem considerar o controle da dispersão dos resíduos pelo vento e prever um sistema de drenagem e contenção dos líquidos percolados, para a coleta e tratamento dos mesmos, quando for o caso;
- os resíduos perigosos devem ser armazenados em construções cobertas, fechadas e devidamente impermeabilizadas, como os depósitos com única saída, ou então em silos com múltiplas saídas ou depósitos transportáveis;

- as construções devem ser feitas com materiais cujas propriedades possam prevenir falha devido à gradiente de pressão, contatos físicos com o resíduo de lixiviado, condições climáticas, “stress” da instalação ou da operação diária, etc.; devem ser apoiadas sobre uma fundação ou base capaz de promover um suporte adequado para prevenir falhas de impermeabilização, quando da sua execução ou devido à compressão ou elevação e devem ser instaladas de forma a cobrir toda terra circunvizinha, que poderia entrar em contato com os resíduos. Essas devem também, caso haja formação de lixiviado, ser providas de sistema de drenagem e coleta de líquidos capaz de assegurar que a lâmina d’água sobre o sistema de impermeabilização não exceda 30 cm, construído com materiais quimicamente resistentes ao resíduo e ao lixiviado que se formar e ter resistência e espessura suficientes para prevenir colapsos provocados pelo peso do próprio resíduo, materiais de cobertura ou qualquer equipamento utilizado no local, bem como projetado e operado para funcionar sem entupimento.
- os sistemas de impermeabilização e as coberturas devem ser inspecionados, durante a construção, quanto à sua uniformidade e possível existência de imperfeições, tais como buracos, fendas, etc.
- inspeção da operação de armazenamento em montes deve ser efetuada semanalmente e, caso não haja cobertura, após índices pluviométricos elevados; devem ser inspecionados os sistemas de controle de escoamentos superficiais, de líquidos nos sistemas de detecção de vazamentos, e, quando houver, o sistema de coleta de percolados.

Quando o sistema de armazenamento de resíduos for dotado de bacia de contenção de líquidos, esta deve ser projetada e operada de maneira a atender os seguintes quesitos:

- a base não deve apresentar rachaduras ou buracos, deve ser impermeabilizada a fim de que possa conter e resistir a vazamentos, derramamentos e precipitações acumuladas;
- o sistema de contenção deve ser projetado e operado para drenar e remover os líquidos;
- a capacidade da bacia de contenção, no caso de resíduos líquidos, deve ser de no mínimo 10% do volume total armazenado;
- a bacia de contenção deve ser construída de forma a impedir o fluxo do escoamento superficial da vizinhança para o seu interior;
- a bacia deve possuir, quando houver sistema fixo de água para combate a incêndios, dreno com válvula de bloqueio, externo à mesma e dimensionado de modo a eliminar risco de transbordamento;
- a remoção de quaisquer vazamentos ou derramamentos que ocorram bem como de águas pluviais retidas deve ser realizada periodicamente para evitar transbordamento do sistema de coleta e se esse material coletado for contaminado com substâncias que lhe conferem periculosidade, o seu manuseio, tratamento ou destinação final devem ser feitos de forma a não causar danos ao Meio Ambiente e riscos à saúde pública e,
- as bacias de contenção devem ser independentes para cada área, caso os resíduos sejam perigosos incompatíveis, a fim de minimizar os riscos de mistura na ocorrência de acidentes.

No caso de se encerrar as atividades de armazenamento, devem ser tomadas as seguintes providências:

- devem ser removidos todos os resíduos do local de estocagem. Portanto, as bases, os impermeabilizantes e o solo, se estiverem contaminados, devem ser removidos e tratados. Caso contrário os pisos dos armazéns e das áreas de estocagem a granel e as bacias de contenção devem ser lavados e, se os sistemas destinavam-se ao armazenamento de resíduos perigosos, os efluentes devem ser coletados e analisados, antes do seu lançamento na rede pública coletora ou em corpos d'água;
- os containers e tambores remanescentes, caso contenham resíduos perigosos, devem ser limpos ou tratados e,
- os restos de resíduos devem ser removidos dos tanques, dos equipamentos de controle de descarga e das estruturas de confinamento das descargas, para posterior tratamento e disposição.

3.1.6 Procedimentos de emergência

Os locais de estocagem de resíduos, assim como outras áreas específicas da indústria, estão sujeitos a acidentes de várias espécies e diferentes intensidades, sendo os mais freqüentes os incêndios, derramamentos e vazamentos. A existência desses riscos potenciais faz com que as empresas tenham necessidade de desenvolver um sistema de prevenção e controle de acidentes que leve em consideração qualquer um desses eventos. De maneira geral, um plano de emergência é um conjunto de instruções e ações preestabelecidas a serem imediatamente adotadas em casos de acidente. Os objetivos básicos desse sistema são a minimização das conseqüências e a proteção da integridade física dos funcionários, dos equipamentos e das instalações da fábrica, bem como a proteção do meio ambiente.

Com relação exclusivamente a incêndios, a maioria das empresas possui um sistema de prevenção e controle adequado e eficiente.

Esse sistema pode servir de modelo para outro maior e mais abrangente que considere os vários tipos de emergência que possam ocorrer.

O Plano de Emergência deve basicamente conter as informações de possíveis incidentes e das ações a serem tomadas, a indicação da pessoa que deve atuar como coordenador e seu substituto, indicando seus telefones e endereços e a lista de todos os equipamentos existentes, incluindo localização, descrição do tipo e capacidade. É importante que os dados estejam sempre atualizados e que a forma de apresentação do plano siga a NBR-10157.

3.2 TRANSPORTE

Os resíduos sólidos apresentam uma característica bastante peculiar, pois ao contrário dos resíduos líquidos e gasosos, necessitam ser transportados mecanicamente do ponto de geração ao local de tratamento ou disposição. Existem basicamente três modalidades de transporte associada aos resíduos sólidos que são: marítimo ou fluvial, ferroviário e rodoviário.

O transporte marítimo ou fluvial é utilizado em países mais adiantados que dispõem de rede hidrográfica navegável ou se localizam em ilhas como a Inglaterra e o Japão. Essa modalidade de transporte é interessante, sob o ponto de vista econômico, para grandes quantidades de resíduos a granel com baixo potencial poluidor e que devam percorrer grandes distâncias, para grandes quantidades de carga de fácil manuseio no carregamento e descarregamento ou para cargas de grandes dimensões. Porém, nesse tipo de transporte a velocidade é consideravelmente menor quando comparado a ou-

tros meios; as despesas portuárias são sempre elevadas; podem ocorrer restrições operacionais de carga ou descarga devido a condições climáticas. Em caso de acidentes a área de comprometimento pode ser significativa e exige a construção de estações de transbordo no porto de origem e de chegada.

O transporte ferroviário é uma boa opção, porque a rota de trânsito, bem definida, não permite alterações, e o pessoal que opera o sistema é fixo e com experiência no transporte de matérias-primas perigosas. Outra característica interessante é que a grande maioria das ferrovias possui planos de emergência estabelecidos e dispõe de sistemas de comunicação, o que permite rápida detecção de acidentes. Essa modalidade de transporte se torna eficiente e econômica para grandes quantidades de carga, mesmo que estas cargas sejam diferentes entre si. Além disso, o custo de transporte é relativamente baixo para grandes distâncias; as operações de carga e descarga sofrem menor influência das condições climáticas; a segurança quanto a possíveis acidentes é relativamente grande e a área de abrangência de um eventual derramamento ou vazamento é semelhante àquela do transporte rodoviário. Em contrapartida, as taxas de embarque são elevadas para pequenas quantidades; é necessária a contratação do transporte com certa antecedência e a existência de estações de transbordo no local de embarque e desembarque e o sistema ferroviário já deve estar implantado.

Sem dúvida, o transporte rodoviário é a modalidade mais utilizada em todo o mundo. No Brasil, é responsável por, praticamente 100% dos resíduos transportados. Esse meio de transporte será discutido em detalhe mais adiante.

Geralmente, o transporte rodoviário apresenta as seguintes vantagens: baixo custo para pequenas quantidades; baixo custo para pequenas distâncias; não necessita de sistema de transbordo, tendo acesso aos pontos de geração e descarga e o serviço pode ser contratado de imediato. Porém, não é adequado para grandes quantidades, o custo é elevado para grandes distâncias, as rotas podem ser alteradas facilmente, apresenta alta rotatividade de mão-de-obra e maiores dificuldades na comunicação de acidentes.

3.2.1 Transporte rodoviário

Como mencionado anteriormente, o meio de transporte predominante no Brasil é o rodoviário. A adoção desse transporte e a escolha de um determinado equipamento devem considerar pelo menos:

- a falta de outra modalidade mais segura e barata;
- a habilidade e o nível de treinamento dos motoristas;
- a adequação do equipamento ao peso da carga, à sua forma e estado físico;
- o estado de conservação do veículo e do compartimento de carga;
- a reatividade química do resíduo;
- a compatibilidade do resíduo e o compartimento de carga;
- a existência de “kits” de emergência específicos para a carga a ser transportada.

De maneira geral, no Brasil, nenhuma dessas considerações é feita e o que se tem notado é a utilização de qualquer equipamento para o transporte de resíduos industriais, desde pequenas peruas até caminhões de carroceria fechada utilizados para entrega de alimentos.

Dentre os equipamentos utilizados, três tipos de veículos são os mais apropriados para o transporte de resíduos industriais: os caminhões tipo poliguindaste, que ope-

ram com caçambas intercambiáveis; caminhões tipo basculante e caminhões-tanque. Caminhões carroceria aberta, de carga geral, também, poderiam ser usados se os resíduos fossem previamente embalados.

Os caminhões poliguindastes são os mais adotados no transporte de resíduos a granel, não corrosivos e de toxicidade moderada a baixa. Os caminhões-tanque são usados para o transporte de resíduos líquidos ou pastosos bastante fluídos.

Quando se transportam resíduos corrosivos, aconselha-se que o interior do tanque ou caçamba estanque receba um revestimento protetor, de material adequado (plásticos, resinas, tintas, etc.).

No transporte de alguns ácidos e solventes, é necessário que o tanque seja construído em aço inoxidável.

Esses veículos devem possuir bombas próprias para carga e descarga ou sistema de armazenamento a vácuo. No seu projeto, deve constar a colocação de dispositivos de proteção do tanque e das válvulas a fim de se aumentar a segurança no caso de colisão ou outros acidentes.

Independentemente do tipo de veículo, o treinamento dos motoristas e de seus ajudantes é fundamental para o bom desempenho do sistema. Esse treinamento assegurará aos operários conhecer a operação adequada do veículo e de todos os seus equipamentos e, além disso, saber também como agir correta e rapidamente em caso de acidente ou avaria do equipamento. Basicamente, eles devem receber informações sobre: o que está sendo transportado, qual o risco da carga, qual a rota a ser seguida, o que fazer em caso de acidente ou avaria na carga ou no veículo, como proceder nesses casos e onde obter informações adicionais e quem contactar e/ou acionar se necessário.

Não se pretende que o motorista e seus ajudantes sejam especialistas em resíduos sólidos ou em atendimento de emergências, mas que possuam um mínimo de conhecimento e treinamento para preservar sua própria vida e evitar danos maiores à população e ao meio ambiente.

Os acidentes são eventos que podem ocorrer a qualquer momento e em qualquer ponto da rota, mesmo que todos os pontos comentados anteriormente sejam considerados e efetivamente adotados. Por isso, é necessário que os veículos transportadores de resíduos sólidos, principalmente os que transportam resíduos perigosos, possuam em seu interior, em local pré-determinado e de fácil acesso, informações referentes à carga, instruções para casos de emergência e telefones de órgãos como polícia, corpo de bombeiros, entidade de proteção ambiental com jurisdição e do gerador do resíduo. Tais informações servirão tanto para o motorista como para as equipes de socorro. Além disso, deve ser fixado em local visível o símbolo de risco do resíduo e qualquer outra informação de importância.

No Brasil ainda não existem os conjuntos de instruções acima apresentadas, especificamente para resíduos. Assim, devem ser utilizadas as do transporte de cargas perigosas do Decreto Lei Federal nº 96044 de 18 de maio de 1988; e as seguintes Normas ABNT:

- NBR 7500 - Transporte de cargas perigosas - simbologia
- NBR 7501 - Transporte de cargas perigosas - terminologia
- NBR 7502 - Transporte de cargas perigosas - classificação
- NBR 7503 -Fichas de emergência para o transporte de cargas perigosas
- NBR 7504 -Envelope para Transporte de cargas perigosas - Dimensões e utilizações.
- PN 1:603.04-003 - Transporte de Resíduos



4. TRATAMIENTO

A. TRATAMENTO

4.1 SECAGEM E DESIDRATAÇÃO DE LODOS

Um tipo de resíduo que freqüentemente aparece nas instalações industriais constitui-se por materiais líquidos ou semi-sólidos. Originam-se no próprio processo industrial, como resultado de operações de filtração, decantação, destilação ou armazenagem ou, então nas instalações de tratamento de efluentes líquidos ou gasosos.

Essas instalações procuram retirar os poluentes dos efluentes concentrando-os em um lodo ou lama.

Grande parte desse material é constituída por uma fase líquida (geralmente água ou solvente) e uma fase sólida e apresentam um teor de umidade alto, freqüentemente superior a 90 ou 95%.

Independentemente do tipo de material que os constitui, os lodos devem ser tratados ou dispostos em instalações localizadas dentro da própria indústria ou fora dela e transportados dos locais de geração até essas instalações.

Como os custos de transporte são função do volume e da distância e as instalações de tratamento ou disposição estão normalmente localizadas a vários quilômetros dos pontos de geração, pode ser interessante para o industrial adotar um tratamento que permita a redução do volume a ser transportado.

Isso pode ser conseguido através da secagem e desidratação.

Existem inúmeros métodos de tratamento e destinação de lodos.

A escolha de um método em particular vai depender das características físicas, físico-químicas e químicas do lodo e da disponibilidade de instalações para processar esses materiais.

Os custos desses métodos são também dependentes das características do material e do volume a ser tratado ou disposto de modo que, freqüentemente, pode ser interessante que os lodos sofram uma redução de volume.

Dentre os processos de tratamento ou destinação de lodos, um dos mais usados, no atual nível tecnológico do país, é o da disposição em aterros industriais.

Muito embora em alguns casos particulares seja possível dispor em aterros resíduos com teor de umidade superior a 85%, geralmente só se aceitam materiais com baixo teor de umidade e com uma certa capacidade de suporte.

Essas instruções destinam-se a evitar a maior geração de percolados pela liberação da fase líquida do resíduo, para garantir um certo nível de qualidade operacional e a estabilidade física do aterro.

Os principais processos de secagem e desidratação de lodos, que serão apresentados, foram desenvolvidos basicamente para o processamento industrial. Atualmente, vêm sendo utilizados para uma grande variedade de lodos industriais com bastante sucesso, desde que esses lodos sejam constituídos por uma fase sólida filtrável.

Em muitos casos, os lodos necessitarão de condicionamento prévio com adição de produtos químicos para que possam ser submetidos aos processos de secagem e desidratação. Em alguns outros casos, os processos apresentados a seguir não poderão ser utilizados. Os métodos mais comumente utilizados para secagem e desidratação de lodos são: centrifugação, filtração em filtros-prensa de placas, filtração em filtros-prensa de cinto, filtração a vácuo e leitos de secagem.

Os equipamentos mecânicos de filtração funcionam simplificada pela retenção das partículas sólidas em um anteparo perfurado colocado contra um fluxo de resíduo artificialmente mantido pela aplicação de uma força externa.

Num primeiro instante, esse anteparo reterá somente as partículas cujo diâmetro for maior que a abertura da malha.

Com o passar do tempo, as partículas maiores vão se acumulando e diminuindo os espaços vazios entre elas, o que provoca a retenção de partículas cada vez menores até o momento em que a energia fornecida ao sistema não será mais suficiente para garantir a passagem dos líquidos.

Esses equipamentos diferem basicamente pela forma com que essa força externa é aplicada.

Na centrifugação, a força é aplicada para girar velozmente o lodo em uma cuba cuja parede é o anteparo filtrante.

Devido à inércia, as partículas são comprimidas contra o anteparo que as retêm e permite a passagem dos líquidos. Nos filtros-prensa de placas, a força externa é aplicada no resíduo bruto e por diferença entre a pressão interna e externa ocorrerá um fluxo através do meio filtrante.

Nos filtros-prensa de cinto, a força é aplicada externamente aos meios filtrantes, comprimindo-os contra o lodo e criando dessa maneira um fluxo através deles.

Nos filtros a vácuo, a força externa é criada rebaixando-se a pressão no interior de um cilindro filtrante, o que também criará um fluxo através dele.

Já nos leitos de secagem, não é aplicada nenhuma força artificial; a desidratação do lodo se dá por evaporação e pela passagem do líquido através de um leito filtrante.

4.1.1 Centrifugação

Neste processo de desidratação, a filtração e desidratação são realizadas através de um equipamento denominado centrífuga, que opera, em muitos casos, continuamente.

Seu funcionamento é simples, limpo e de custo relativamente baixo. Como dispõe de uma cuba interna que gira a grande velocidade, devem ser tomados cuidados especiais de instalação e manutenção com relação a ruídos e vibrações produzidos.

Possui alta eficiência. Porém, na maioria dos casos, seu efluente líquido ainda contém grande quantidade de sólidos finos não sedimentáveis que, quando retornam ao início do tratamento, podem prejudicar a eficiência das unidades de decantação, diminuindo a quantidade de lodo e alterando a qualidade de saída dos efluentes líquidos tratados.

Este problema deve ser bem estudado e uma das maneiras de contorná-lo é condicionar o lodo com produtos químicos floculantes, o que proporciona um aumento na captura de sólidos na centrífuga.

A obtenção de lodos com teor de umidade da ordem de 70% ou inferior, é possível, através da centrifugação.

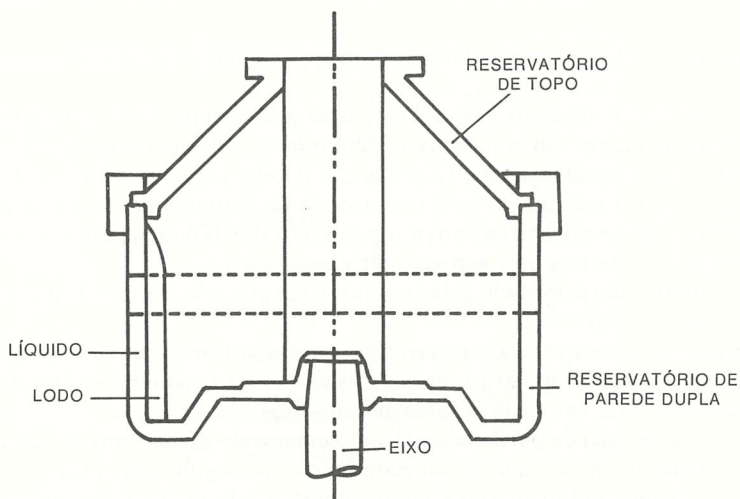
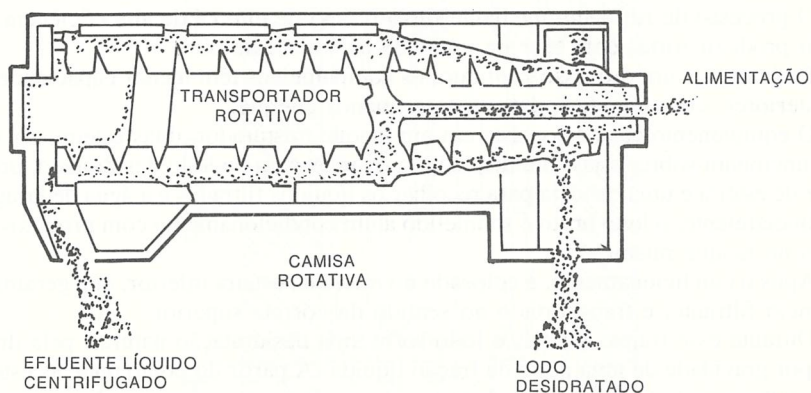
A centrífuga tem a vantagem de ser um processo fechado que requer pouco espaço em sua instalação.

As Figuras 4.1 e 4.2 mostram esquemas de centrífugas.

4.1.2 Filtragem com Filtro-prensa de Placas

A filtragem é, sem dúvida, o processo mais utilizado em instalações industriais brasileiras, cujo equipamento é fornecido por um grande número de fabricantes.

O filtro-prensa é constituído por uma série de placas verticais que podem, dependendo da fase de processo, estar unidas face a face ou separadas.

Figura 4.1 — Esquema de uma centrífuga — eixo vertical**Figura 4.2** — Esquema de uma centrífuga — eixo horizontal

Essas placas são côncavas, isto é, mais espessas nas bordas do que na parte central, formando, quando estão unidas, um vazio entre as quais se acumulará o lodo desidratado.

A superfície das placas apresenta ranhuras por onde se dará a drenagem dos líquidos filtrados.

Sobre as superfícies ranhuradas se colocam as mantas de tecido filtrante que retêm os sólidos.

Como se verá no processo operacional, esse equipamento funciona em bateladas. Inicialmente, as placas são separadas e sobre elas é colocado o tecido filtrante.

A seguir são mantidas juntas, face a face, e o lodo, já previamente condicionado, é bombeado para o interior do conjunto através de orifícios de alimentação.

A pressão de bombeamento força a passagem dos líquidos pelo meio filtrante, ficando os sólidos retidos nos espaços entre as placas.

O líquido filtrado é coletado pelas ranhuras das placas e, através de dutos, conduzido para fora do filtro.

Dependendo de sua qualidade, pode retornar ao início do tratamento ou ser descartado.

Com o passar do tempo as tortas de lodo vão se formando no interior das câmaras dificultando cada vez mais a passagem dos líquidos.

Por isso, a pressão de bombeamento vai aumentando gradativamente até alcançar um valor-limite, acima do qual é antieconômico prosseguir a operação.

Nesse instante, a alimentação é interrompida, tendo início a descarga de tortas. As placas são separadas e, por gravidade, as tortas caem e são coletadas por dispositivos mecânicos que as conduzem para armazenagem e posterior disposição.

A pressão de operação do filtro e a espessura das tortas de lodo devem ser fixadas em função do tipo de lodo a ser tratado. As Figuras 4.3 e 4.4, mostram os esquemas operacionais dos filtros-prensa.

4.1.3 Filtragem com Filtro-prensa de Cinto

O processo de filtragem mediante filtro-prensa de cinto é de alta eficiência, podendo produzir tortas com teor de umidade da ordem de 60%.

Embora seja um processo contínuo, os equipamentos têm menor capacidade que os anteriores, consumindo, relativamente, menos energia.

O equipamento básico consiste em um tanque misturador, duas esteiras rolantes que funcionam sobrepostas, um dispositivo de raspagem de lodo desidratado, um lavador de esteira e uma bandeja para recolher os líquidos filtrados e a água de lavagem.

Inicialmente, o lodo bruto é submetido a um condicionamento com produtos químicos no tanque misturador.

Após o condicionamento, é colocado no início da esteira inferior, que geralmente é o meio filtrante, e transportado no sentido da correia superior.

Durante esse trajeto inicial, o lodo sofre uma desidratação natural, pela drenagem por gravidade de uma parte da fração líquida. A partir do ponto onde as esteiras se encontram, o lodo é transportado entre elas e estas passam entre roletes, os quais promovem a compressão de uma esteira contra a outra.

Desse modo, o lodo entre elas vai estar sujeito a uma pressão que obrigará o deslocamento do líquido através do meio filtrante, desidratando o lodo.

No fim do processo, sobre a esteira inferior, produz-se uma camada de lodo, a qual é retirada por gravidade, ou então com o auxílio de um raspador.

Figura 4.3 — Esquema de alimentação de um filtro-prensa

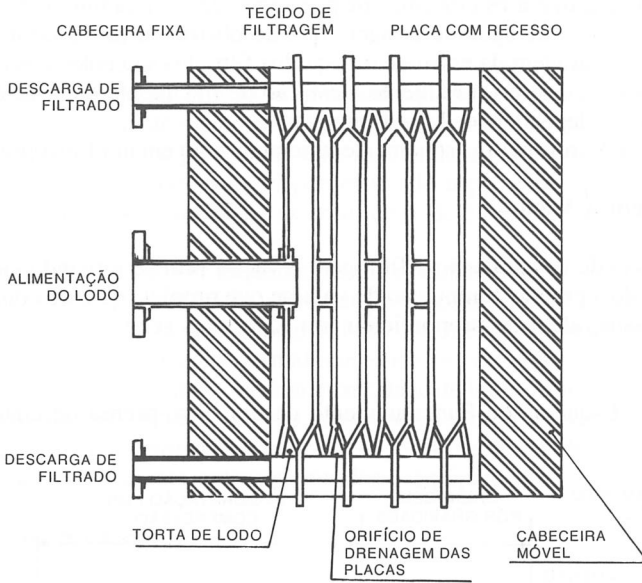
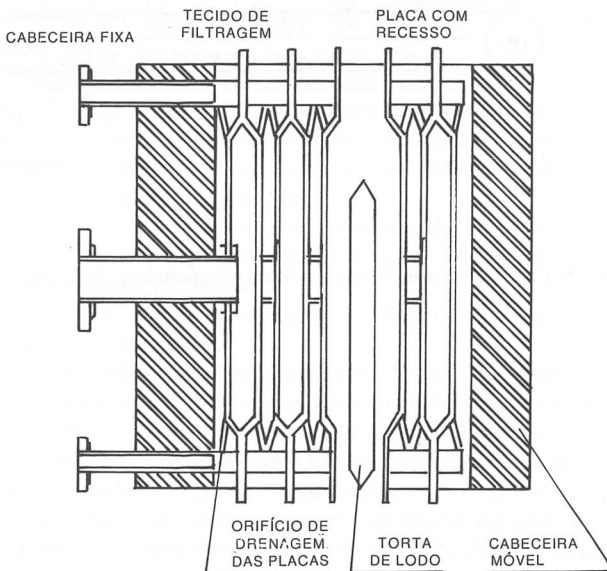


Figura 4.4 — Esquema de descarga de um filtro-prensa



Essa torta cai sobre dispositivos mecânicos que promovem sua retirada e armazenagem.

A medida em que a esteira inferior prossegue em seu caminho, recebe, em um certo ponto, um jato de água de lavagem que desobstrui os poros do meio filtrante.

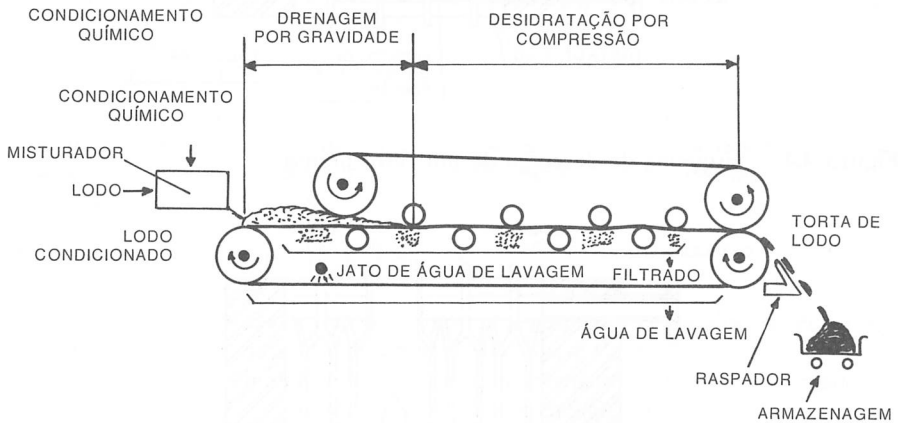
As águas de lavagem da esteira e os líquidos filtrados são coletados em uma bandeja e podem ser enviados novamente à estação de tratamento de efluentes ou então são descartados, dependendo de sua qualidade.

A Figura 4.5, mostra um esquema de funcionamento em um filtro-prensa de cinto.

4.1.4 Filtragem a Vácuo

O processo de desidratação e filtragem a vácuo vem se tornando cada vez mais utilizado devido à grande diminuição de volume que propicia quando comparado com outros processos, além de proporcionar um lodo mais seco.

Figura 4.5 — Esquema de Funcionamento de um filtro-prensa de cinto



Fonte: Neto, Pedro P. Castro e outros. *Resíduos Sólidos Industriais, Série Atas, CETESB, 1985.*

As tortas de filtração obtidas através desse processo freqüentemente apresentam teores de umidade da ordem de 70%, podendo, em alguns casos, atingir valores menores.

Esse tipo de processo é, geralmente, utilizado em grandes instalações que produzem consideráveis quantidades de lodo.

Uma unidade típica de filtragem a vácuo consiste de um cilindro de eixo horizontal, construído de material poroso, e uma bandeja onde o lodo é colocado.

Através de bombas de vácuo, produz-se uma diminuição da pressão interna do cilindro e, como o cilindro gira lentamente mantendo a parte inferior de sua superfície externa em contato com o lodo, por efeito de aspiração, uma parcela de lodo desidrata-se e adere à sua superfície externa, de onde é retirada por raspagem ou por insuflação de ar.

A Figura 4.6, mostra um esquema de funcionamento desse equipamento.

Em alguns casos, é necessário adicionar produtos químicos, como, por exemplo, cal ou cloreto férrico, para condicionar o lodo e aumentar a eficiência do processo.

A filtragem a vácuo requer, normalmente, maior consumo de energia que os demais processos para desidratar a mesma quantidade de lodo. Além disso, são necessários cuidados especiais de construção e manutenção com relação aos ruídos causados pela operação dos equipamentos auxiliares especialmente das bombas de vácuo.

A Figura 4.7, apresenta um esquema desse equipamento.

4.1.5 Leitos de Secagem

O processo de desidratação de lodos através de leitos de secagem, um dos mais antigos que se conhece, é bastante utilizado entre nós.

Ele foi inicialmente considerado para o tratamento de lodos de esgoto em instalações pequenas e médias e com menor disponibilidade de área.

Atualmente, está sendo adotado para tratamento de lodos de diversos tipos de indústria com relativo sucesso.

Também é usado em pequenas e médias instalações que não geram grandes quantidades de lodo. Nessas condições, são realmente econômicos.

Dentre os parâmetros a serem considerados no projeto e operação de leitos de secagem incluem-se: condições climáticas, características do lodo, valor comercial do terreno, condições de vizinhança, etc.

Os leitos de secagem consistem, basicamente, de tanques rasos.

Em geral, seu fundo é o próprio solo do local, ou, em alguns casos especiais, é construído em concreto ou alvenaria.

O fundo, é moldado com uma certa declividade que direciona os líquidos filtrados para uma rede de drenagem.

Sobre o fundo é, então, construído um filtro de material granular inerte, em geral de areia e cascalho ou brita, sendo colocados primeiramente os materiais de maior diâmetro de partícula e posteriormente os de menor diâmetro.

Sobre esse filtro são então colocados tijolos rejuntados com areia fina, o que permitirá a retirada do lodo desidratado sem danificar o material filtrante.

As bordas do tanque são construídas em alvenaria ou concreto.

Os leitos de secagem removem a umidade do lodo, diminuem seu volume e alteram suas características físico-químicas.

Essa secagem só se dá pela drenagem dos líquidos por gravidade e por evaporação na superfície superior exposta ao ar e ao calor.

A drenagem dos líquidos verifica-se através dos drenos de fundo e, em alguns casos, dos drenos laterais. Em situações especiais, quando a qualidade do líquido filtrado assim o permite, a drenagem não é executada e esses líquidos simplesmente se infiltram no subsolo.

Quando existe a rede de drenagem, os líquidos captados podem ser enviados novamente à estação de tratamento de efluentes ou então descartados junto com os efluentes, dependendo de sua qualidade.

Quanto menor o tempo de secagem, mais econômico se torna o processo. As condições climáticas, portanto, são fatores condicionantes na adoção de leitos de secagem como método de tratamento.

Como é um processo natural, quanto maior a incidência de luz solar, temperatura do ar e velocidade do vento e menor a taxa de precipitação e a umidade relativa do ar, mais eficiente será o processo. Desse modo, as regiões áridas ou semi-áridas são as mais indicadas para as instalações desses sistemas.

Uma boa ventilação é importante para controlar a umidade e otimizar a taxa de evaporação.

Em regiões de condições climáticas desfavoráveis, o problema pode ser contornado adotando-se uma cobertura do local para proteger o lodo da chuva, e se conveniente, um sistema de ventilação forçada, para dissipar o ar úmido de cima dos leitos.

Eventualmente, alguns lodos podem apresentar problemas de odor e, nesse caso, além de uma cobertura dos leitos, uma localização apropriada, considerando-se a direção predominante dos ventos, pode minorar o problema.

A adoção de vários leitos menores apresenta uma maior eficiência de secagem do que um único leito de dimensões maiores.

Experiências mostram que somente 67% a 75% de área requisitada para leitos de secagem abertos são necessárias para leitos cobertos. A adaptação de equipamentos mecânicos para remoção do lodo seco torna-se mais difícil nos leitos de secagem cobertos.

A espessura da lâmina inicial de lodo também é um fator determinante do processo.

Lâminas muito espessas oferecem maior dificuldade na liberação de umidade para a atmosfera. Em consequência, apenas a parcela superior da camada estará convenientemente desidratada.

De modo geral e em condições favoráveis, após 10 a 15 dias pode-se obter um lodo como teor de umidade de cerca de 60%.

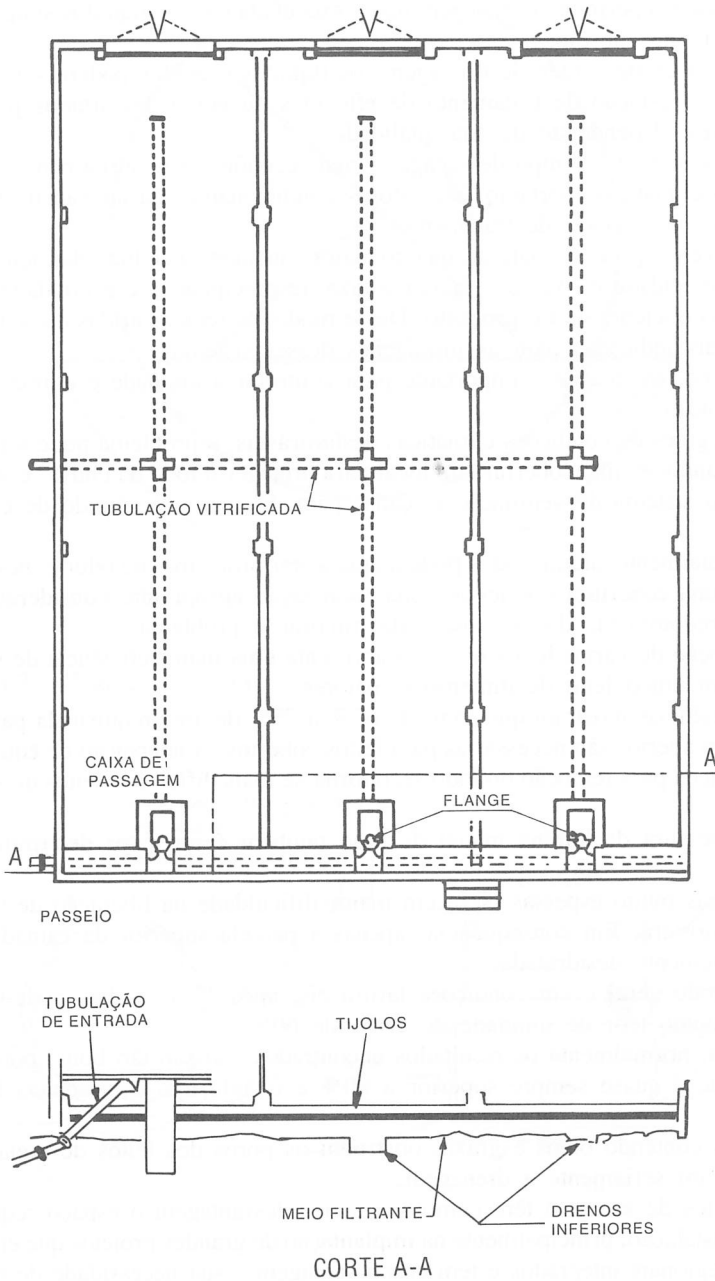
Porém, normalmente os resultados encontrados não são tão bons, pois o teor de umidade é quase sempre superior a 80% e o lodo tem consistência bastante fluída.

Lodos contendo óleos e graxas obstruem os poros dos leitos de areia e com isso retardam seriamente a drenagem.

Os leitos de secagem têm como sua maior desvantagem o espaço requisitado para sua instalação, principalmente na implantação de grandes projetos que envolvem sistemas regionais integrados e têm como vantagem a sua necessidade de mão-de-obra pouco especializada na sua operação.

A Figura 4.8, apresenta um esquema de um leito de secagem.

Figura 4.8 — Esquema de leito de secagem



4.2 INCINERAÇÃO

4.2.1 Introdução

A incineração, considerada por alguns como forma de disposição final, é um método de tratamento que se utiliza da decomposição térmica via oxidação, com o objetivo de tornar um resíduo menos volumoso, menos tóxico ou atóxico, ou ainda eliminá-lo, em alguns casos.

O desenvolvimento do processo de incineração teve início há muitos anos, com o enfoque voltado à queima de resíduos domiciliares e patogênicos. Hoje, a aplicação deste processo no tratamento de resíduos perigosos passou a receber uma atenção maior, tendo em vista os problemas ambientais ocasionados pela deposição inadequada no solo de materiais tóxicos não degradáveis, altamente persistentes, e até mesmo daqueles não passíveis de disposição no solo.

De maneira geral, as unidades de incineração variam desde instalações pequenas, projetadas e dimensionadas para um resíduo específico, e operadas pelos próprios geradores, até grandes instalações de propósitos múltiplos, para incinerar resíduos de diferentes fontes. No caso de materiais tóxicos e perigosos, estas instalações requerem equipamentos adicionais de controle de poluição do ar, com conseqüente demanda de maiores investimentos.

Dentre os tipos de resíduos que apresentam maior potencial, no que diz respeito à adequabilidade ao processo de incineração, incluem-se: resíduos orgânicos constituídos basicamente de carbono, hidrogênio e/ou oxigênio; resíduos que contêm carbono, hidrogênio, cloro com teor inferior a 30% em peso e/ou oxigênio e resíduos que apresentam seu poder calorífico inferior (PCI) maior que 4.700 kcal/kg (não necessitando de combustível auxiliar para queima).

As características dos resíduos e seu comportamento durante a combustão determinam como devem ser misturados, estocados e introduzidos na zona de queima. Alguns líquidos, com baixo ponto de fulgor, serão facilmente destruídos enquanto outros, incapazes de manter a combustão, deverão ser introduzidos através de uma corrente de gás quente ou aspergidos diretamente sobre a chama. Neste caso, pode ocorrer um fenômeno químico chamado craqueamento, no qual novas e indesejáveis substâncias podem ser formadas. Por exemplo, se o resíduo contiver certos compostos orgânicos de cloro, há o risco da formação de fosgênio (COCl_2) que é um gás venenoso. Para evitar este tipo de problema, é necessário manter-se a temperatura de combustão na faixa de 1.200°C a 1.400°C e o tempo de detenção entre 0,2 a 0,5 segundos ou em alguns casos, de até 2 segundos.

A incineração de resíduos contendo enxofre, flúor, cloro, bromo, e iodo resulta num efluente gasoso em cuja composição são encontrados estes poluentes. A forma mais comum de eliminá-los é fazer com que os gases da combustão passem através de uma torre onde são lavados em contracorrente. O efluente líquido resultante da operação é recolhido na parte inferior da torre e, após ser neutralizado, pode ser lançado na rede de esgotos.

Em resumo, a incineração é, provavelmente, a melhor solução para o tratamento de resíduos altamente persistentes, tóxicos e muito inflamáveis. Estão incluídos aqui solventes e óleos não passíveis de recuperação, defensivos agrícolas halogenados e vários produtos farmacêuticos.

4.2.2 Caracterização de Resíduos para Incineração

A verificação da possibilidade de se incinerar um resíduo, bem como das condições operacionais para sua destruição, é feita com base em uma caracterização efetiva desse resíduo. Desta caracterização resulta a definição do tipo de incinerador e de sistema de controle de poluição do ar a serem utilizados.

As informações necessárias para a caracterização dos resíduos são:

- a) sobre o processo industrial:
 - matérias-primas empregadas e produtos fabricados
 - fluxograma do processamento industrial indicando os pontos de geração de resíduos
- b) sobre o resíduo:
 - quantidade;
 - estado físico;
 - poder calorífico;
 - viscosidade (para os líquidos);
 - densidade, viscosidade e porcentagem de sólidos (para as lamas);
 - densidade (para gases);
 - corrosividade;
 - composição química (particularmente os teores de constituintes orgânicos tóxicos constantes da listagem n^o 4 da NBR - 10.004 - “Classificação de Resíduos”)
 - composição elementar (C,H,O,P,Cl,F,I,Br,N,S, metais e cinzas)

4.2.3 A Incineração como um Processo

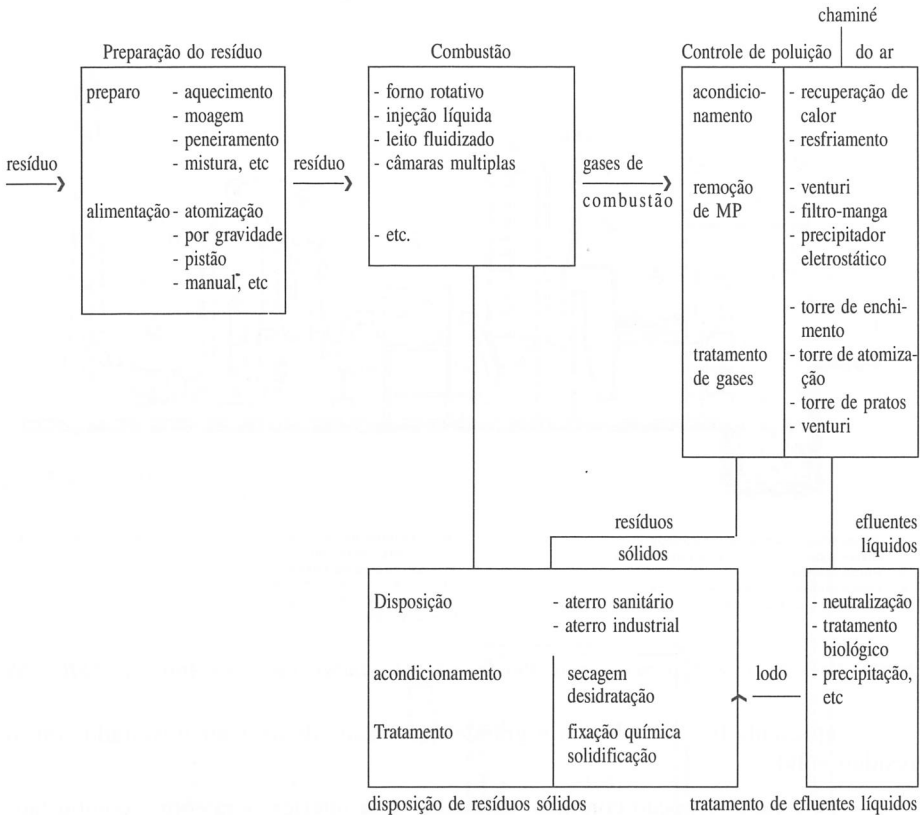
O processo de incineração deve ser visto como um conjunto de 5 sistemas, os quais têm como função:

- preparação do resíduo para a queima;
- combustão do resíduo;
- tratamento de gases de saída;
- tratamento de efluentes líquidos e
- acondicionamento e disposição dos resíduos sólidos gerados no processo de queima e nos equipamentos de controle de poluição do ar.

A figura 4.9 apresenta o esquema de um sistema completo de incineração, com os seus componentes, cuja combinação apropriada depende das propriedades físicas e químicas do resíduo a ser incinerado.

Dos sistemas apresentados, o mais importante é o de combustão, onde através da oxidação térmica ocorre a detoxificação dos resíduos. O oxidante é o ar atmosférico e o processo de combustão é controlado por meio de três variáveis principais que são a temperatura, a turbulência e o tempo de residência. A temperatura representa a quantidade de energia fornecida ao resíduo para que ocorra quebra e recombinação de moléculas existentes. A turbulência indica o grau de mistura do resíduo com o oxigênio. O tempo de residência é o tempo no qual as substâncias permanecem na temperatura adequada, tempo este disponível para que as reações de oxidação aconteçam.

A seguir serão descritos os principais tipos de equipamentos utilizados para a incineração de resíduos:

Figura 4.9. Esquema de um Sistema de Incineração

a) Fornos Rotativos:

Os fornos rotativos são incineradores cilíndricos, revestidos internamente com material refratário, montados com uma ligeira inclinação em relação ao plano horizontal. A relação entre o comprimento do cilindro e o diâmetro pode variar de 2 a 10. O tempo de residência é controlado pela velocidade de rotação.

Os resíduos sólidos têm sua fração volátil convertida em gases no forno rotativo, os quais são queimados em uma câmara secundária. Nesta câmara pode ser efetuada a injeção de resíduos líquidos.

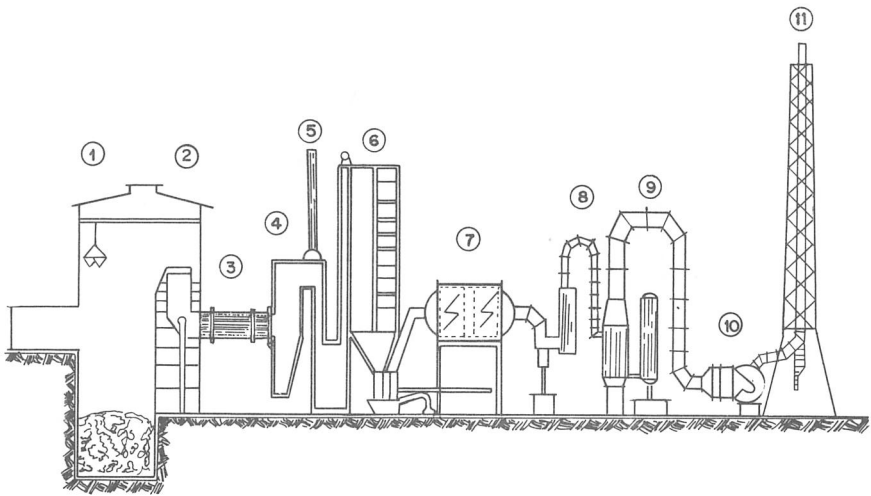
A figura 4.10 apresenta um esquema de um forno rotativo.

Vantagens:

- apresenta grande flexibilidade operacional, pois permite incinerar resíduos sólidos, líquidos e semisólidos, além de resíduos relativamente volumosos, com a adaptação de diversos tipos de mecanismos de alimentação;

- possibilita a incineração de resíduos sólidos que se fundem no interior do forno;

FIGURA 4.10 — Incinerador rotativo



- 1 – Armazenagem de resíduos sólidos
- 2 – Sistema de carregamento do incinerador
- 3 – Forno rotativo
- 4 – Queimadores de resíduos líquidos
- 5 – Câmara de pós-queima com chaminé de emergência

- 6 – Trocador de calor (aquecedor) para recuperação de energia
- 7 – Filtros eletrostáticos
- 8 – Lavadores de gases
- 9 – Lavador - oxidação na água
- 10 – Exaustor com trocador de calor
- 11 – Chaminé

Fonte: Neto, Pedro P. Castro e outros, *Resíduos Sólidos Industriais Série Atas*, CETESB, 1985

— apresenta boa turbulência e grande quantidade de ar a ser misturado com o resíduo sólido;

- permite a remoção contínua das cinzas sem interferência com a combustão;
- é destituído de partes internas móveis;

— permite o controle do tempo de residência dos componentes não-voláteis por meio do ajuste da velocidade de rotação;

- permite o uso de equipamento de tratamento de gases via úmida;
- minimiza a necessidade de preparação do resíduo, tal como mistura ou pré-aquecimento;

— pode ser operado com temperaturas superiores a 1400°C, o que é muito útil para a destruição de compostos termicamente estáveis como PCBs.

Desvantagens:

- requer altos investimentos para instalação;
- necessita de cuidados na operação para impedir danos aos refratários principalmente por choque térmico;
- é provável a ocorrência de emissão de partículas de material antes da combustão completa;

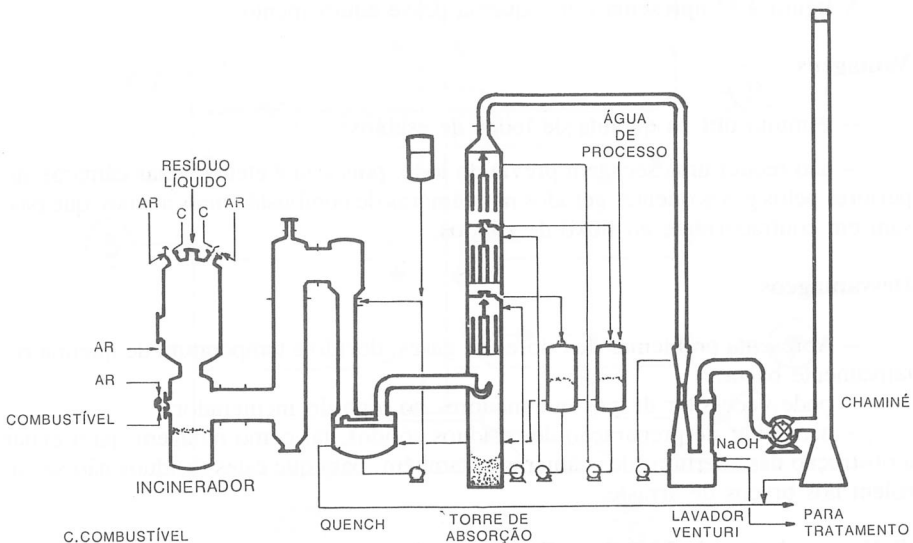
- alguns recipientes cilíndricos ou esféricos podem rolar através do forno antes de estarem totalmente destruídos;
- apresenta necessidade freqüente de adição de ar em função dos vazamentos que ocorrem pelos extremos;
- promove uma elevada emissão de particulados;
- possui uma eficiência térmica relativamente baixa.

b) Fornos de Injeção Líquida

Os fornos de injeção líquida tem formato cilíndrico e são revestidos internamente por refratários, podendo ser verticais ou horizontais. Como o próprio nome indica, este tipo de incinerador só pode ser utilizado para líquidos, os quais devem apresentar viscosidade cinemática na atomização superior a 160 cST. Além disso, há uma limitação quanto ao tamanho das partículas sólidas no resíduo, que não devem ultrapassar 35 mesh.

A figura 4.11 apresenta um esquema de forno de injeção líquida.

FIGURA 4.11 — Incinerador de injeção líquida



Vantagens:

- dispensa sistema contínuo de remoção de cinzas;
- apresenta baixo custo de manutenção;
- é destituído de partes móveis;
- apresenta uma resposta rápida às mudanças nas características do resíduo, pela variação imediata da temperatura.

Desvantagens:

- incinera apenas resíduos que possam ser atomizados através do bico do queimador;
- caso o resíduo não apresente poder energético suficiente para manter a temperatura (poder calorífico inferior maior que 2.500 kcal/kg), haverá necessidade de combustível auxiliar;
- os queimadores estão sujeitos a entupimentos e
- o tamanho das partículas do resíduo é um parâmetro crítico para a operação.

c) Forno de Múltiplos Estágios

O incinerador de múltiplos estágios é composto por uma estrutura externa de aço, protegida internamente com refratários, abrigando um número variado de câmaras e uma coluna giratória central, na qual estão fixados braços de arraste. Este equipamento tem, em geral, de 6 a 12 câmaras. O ar insuflado é usado para resfriar a coluna e os braços de arraste. O ar quente da parte superior retorna para o fundo, para conservação do calor.

A figura 4.12 apresenta um esquema desse equipamento.

Vantagens:

- é muito útil na queima de lodos de esgotos;
- não requer uma secagem prévia do lodo, pois esta é efetuada nas câmaras superiores pelos gases quentes gerados nas câmaras de combustão mais abaixo, que passam em contracorrente ao fluxo de sólidos.

Desvantagens:

- Apresenta problemas de odores de gases, devido à temperatura de queima relativamente baixa;
- pode necessitar de pós-queimadores no topo do incinerador;
- necessitar de preparação de resíduos sólidos, tal como moagem, para evitar a obstrução das aberturas das câmaras e, também, para que estes resíduos não se enrolem nos braços de arraste.

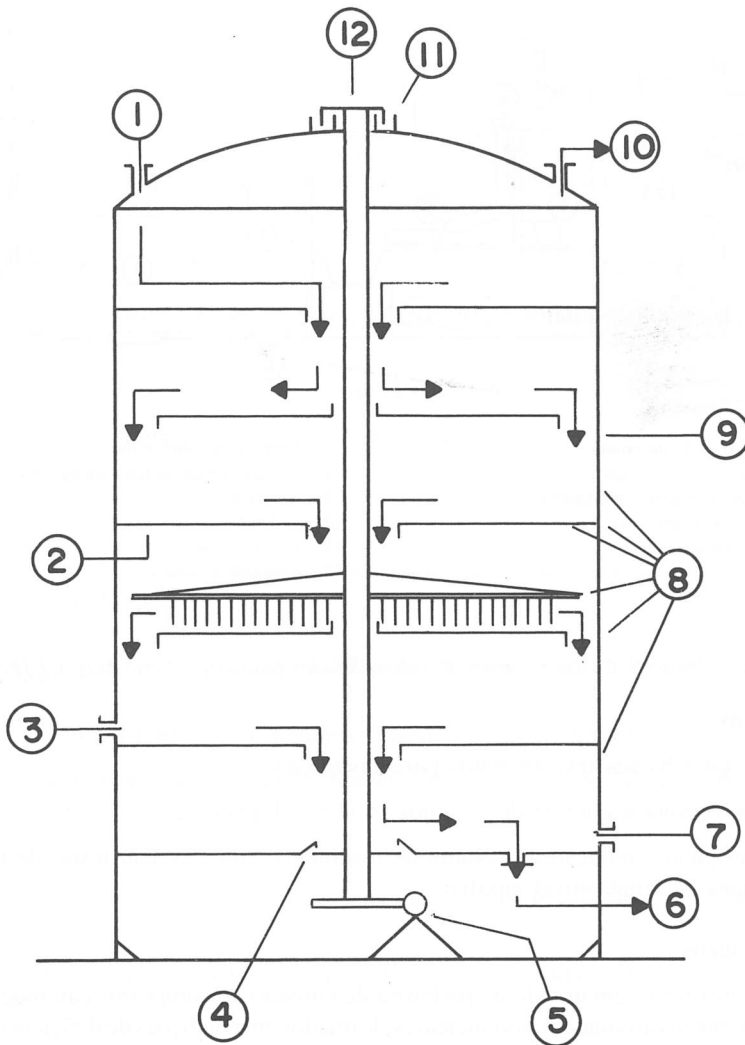
d) Fornos de Grade Móvel ou fixa

Geralmente, este tipo de forno é constituído de duas câmaras, sendo necessário o uso de combustível auxiliar para o início e manutenção da queima. Deve ser previsto um adequado suprimento de ar destinado à combustão nas câmaras primária e secundária e à garantia de uma turbulência para misturar o ar e os resíduos.

As reações de combustão e turbulência na câmara primária são mantidas a níveis baixos para minimizar a formação de particulados. Na prática, o suprimento de ar é de 100 a 200% em excesso.

A figura 4.13 apresenta um esquema de um incinerador de grade móvel.

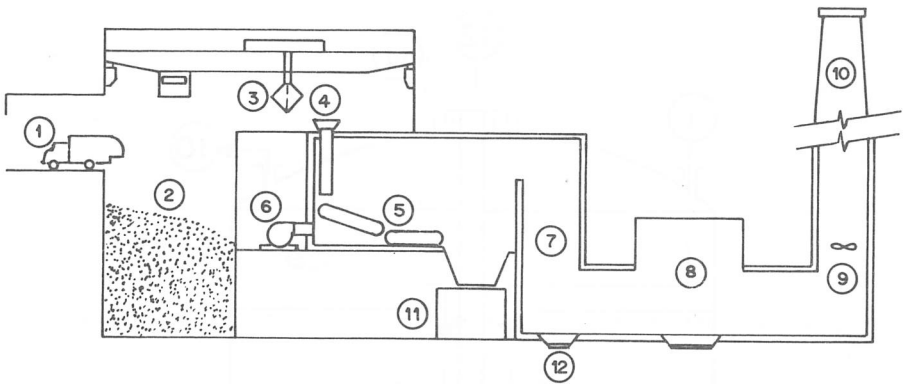
FIGURA 4.12 — Incinerador de múltiplo estágio



- 1 - Entrada de resíduos
- 2 - Pisos fixos
- 3 - Queimador
- 4 - Selo de areia
- 5 - Motor
- 6 - Descarga de cinzas

- 7 - Ar de combustão
- 8 - Braços de arraste em todas as câmaras
- 9 - Parede de aço com refratários
- 10 - Saída de gases de combustão
- 11 - Selo de areia
- 12 - Ar de refrigeração

FIGURA 4.13 — Incinerações de grade móvel ou fixa



- 1 - Caminhão de coleta
- 2 - Poço de estocagem
- 3 - Ponte rolante e multigarra
- 4 - Poço de alimentação
- 5 - Grades rolantes
- 6 - Insulfador

- 7 - Câmara de combustão
- 8 - Equipamentos de limpeza de gases
- 9 - Exaustor
- 10 - Chaminé
- 11 - Container de resíduos
- 12 - Saída de cinzas

Fonte: Neto, Pedro P. Castro e outros, Resíduos Sólidos Industriais Série Atas, CETESB, 1985

Vantagens:

- requer baixos investimentos para instalação;
- possibilita a queima de resíduos sólidos e líquidos e
- propicia a redução de volume de resíduos volumosos sem o uso de grandes quantidades de combustível auxiliar

Desvantagens

- constitui-se em uma fonte poderosa de emissão de compostos carcinogênicos, como compostos aromáticos polinucleares, formados em condições de deficiência de ar;
- não é recomendado para a queima de resíduos com nitrogênio, enxofre, metais, sódio, silício, fósforo, flúor, bromo, cloro ou iodo;
- não é adequado para a incineração de lodos sem estar internamente equipado para a remoção de crostas;
- normalmente a remoção de cinzas é feita de forma descontínua e requer a parada do incinerador e
- apresenta dificuldades para operação contínua, com toda a problemática decorrente.

e) Forno de Leito Fluidizado

Este forno consiste em um vaso contendo leito de material granulado inerte, geralmente areia, o qual se mantém a uma temperatura que varia de 450 a 850°C. O ar de fluidização é injetado através de um disco distribuidor localizado abaixo do leito e tem como objetivo manter o leito em suspensão. Os resíduos e o combustível auxiliar são injetados radialmente em pequenas quantidades que, em contato com o leito, recebem o calor e, em combustão, devolvem a energia ao leito.

A figura 4.14 apresenta um esquema de incinerador de leito fluidizado.

Vantagens:

- pode ser utilizado para incineração de resíduos sólidos combustíveis, resíduos líquidos e gases;
- sua concepção e projeto são simples;
- não requer partes móveis na zona de queima;
- sua vida útil é longa;
- seu custo de manutenção é baixo e
- dispõe de grande área de contacto, que resulta da fluidização e proporciona alta eficiência de queima.

Desvantagens:

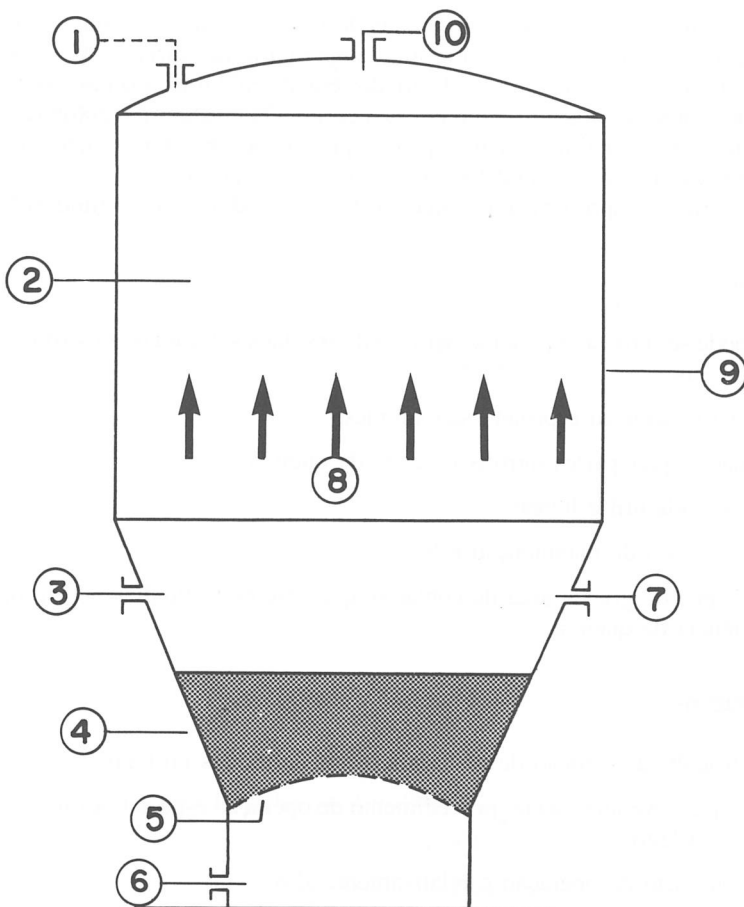
- dificulta a remoção de materiais residuais retidos no leito;
- requer, eventualmente, procedimento de operação especial, a fim de se prevenir danos ao leito;
- seu custo de operação é relativamente alto;
- apresenta possíveis dificuldades na incineração de resíduos com grandes porcentagens de umidade e
- é desaconselhável para resíduos a granel ou resíduos com cinzas passíveis de se fundir.

f) Incinerador de Plasma

Este incinerador se utiliza de plasma, que é um gás ionizado eletricamente condutivo, constituído de partículas carregadas e de nêutrons. Neste processo a energia elétrica é transformada em plasma, que por sua vez age como um mecanismo de transferência e conversão de energia. Esta energia libera elétrons que quebram as ligações entre as moléculas quase instantaneamente, sendo que o resfriamento rápido impede a recombinação destas moléculas.

As figuras 4.15 e 4.16 apresentam esquemas de incinerador de Plasma.

Figura 4.14 — Incinerador de leito fluidizado



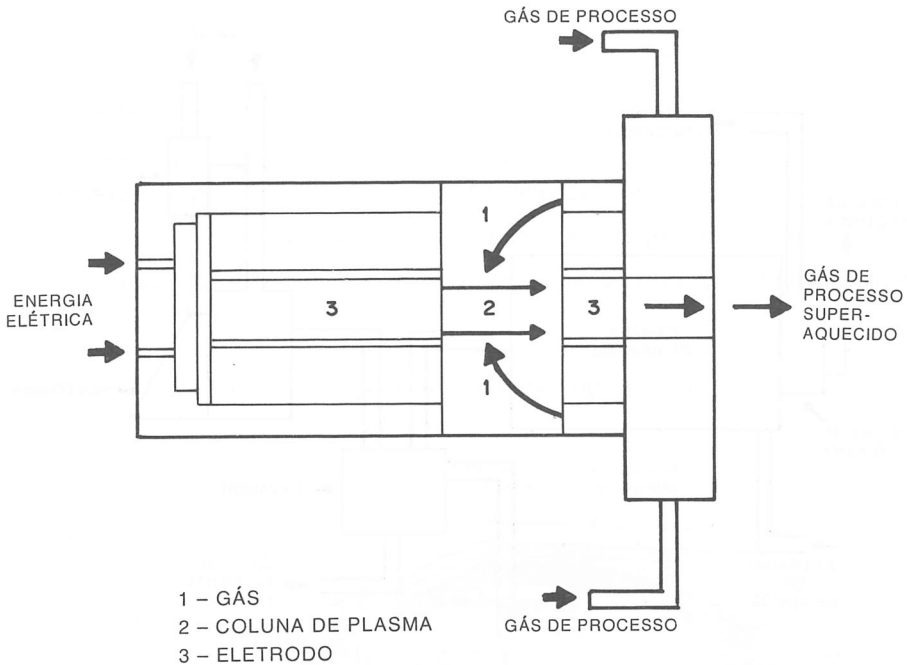
1 – Entrada Alternativa de Resíduos
 2 – Área livre
 3 – Entrada dos resíduos
 4 – Leito de areia
 5 – Piso perfurado

6 – Ar para fluidização
 7 – Queimador
 8 – Arraste das cinzas
 9 – Parede de aço com retratários
 10 – Saída de cinzas e gases de combustão

Fonte: Neto, Pedro P. Castro e outros, *Resíduos Sólidos Industriais Série Atas, CETESB, 1985*

Vantagens:

- apresenta elevado grau de controle do processo;
- apresenta uma simplicidade operacional e baixo custo de energia, necessitando apenas de linhas de água e de força (480 V);

Figura 4.15 — Incinerador de Plasma

- as ligações químicas são quebradas diretamente, sem passar pelas reações químicas;
- apresenta elevada eficiência de destruição e remoção, com pouca possibilidade de formação de produtos de combustão incompleta (temperatura > 4.000 °C)
- apresenta a possibilidade de utilização de unidades móveis.

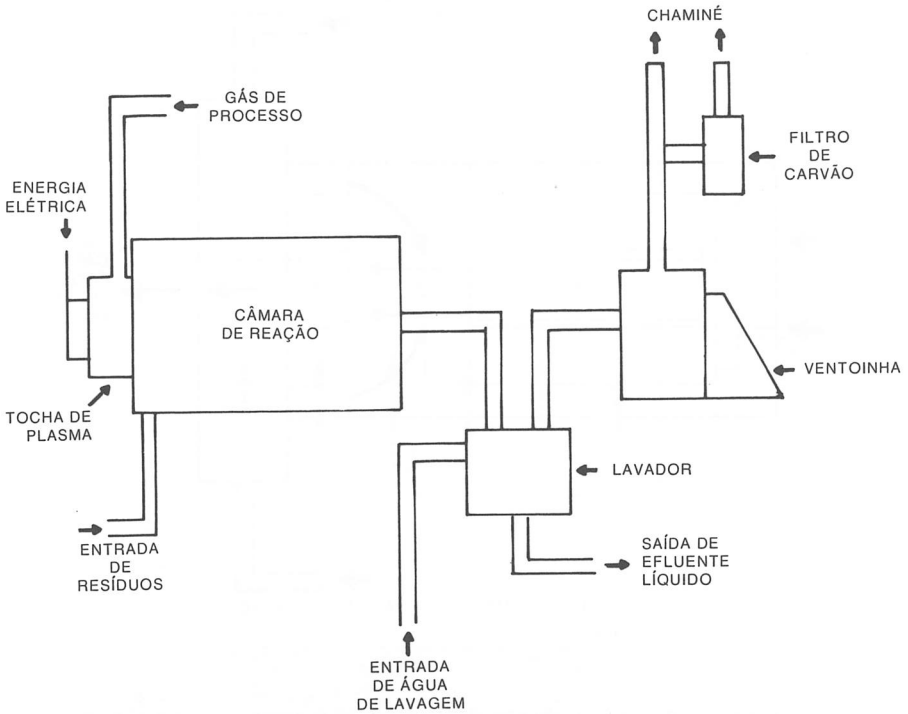
Desvantagens:

- apresenta elevado teor de CO e H₂ nos gases de saída;
- os resíduos devem ser líquidos ou bombeáveis;
- apresenta limitações de tamanho das partículas sólidas e de sua porcentagem no resíduo.

g) Incinerador de Câmaras Múltiplas

O incinerador de câmaras múltiplas é constituído, geralmente, de três câmaras refratárias, cuja configuração grosso modo, pode ser de 2 tipos: tipo retorta, onde os gases fluem através das câmaras distribuídas em V e tipo em linha, onde as câmaras são construídas em série.

Figura 4.16 — Esquema de Incinerador de Plasma



A alimentação, a ignição e a queima do resíduo se procedem na 1ª câmara (câmara de ignição) e os gases compostos de vapores e componentes voláteis provenientes da oxidação parcial do resíduo passam para a 2ª câmara (câmara de mistura) através de uma abertura chamada porta de chama. O ar secundário é introduzido na 2ª câmara onde ocorre a combustão da mistura turbulenta de gases. Essa combustão, quando necessário, é auxiliada por queimadores. Os gases são direcionados para a 3ª câmara (câmara de combustão) para a combustão final.

Esse tipo de incinerador pode ser utilizado para resíduos sólidos e líquidos. Entretanto, a queima de resíduo líquido requer um tempo de residência maior e utilização de combustível auxiliar, caso seu poder calorífico seja baixo. Os líquidos são bombeados no incinerador através de bico de atomização juntamente com o ar que contribui para a eficiência de combustão.

Vantagens:

- simplicidade do projeto;
- custo relativamente baixo;

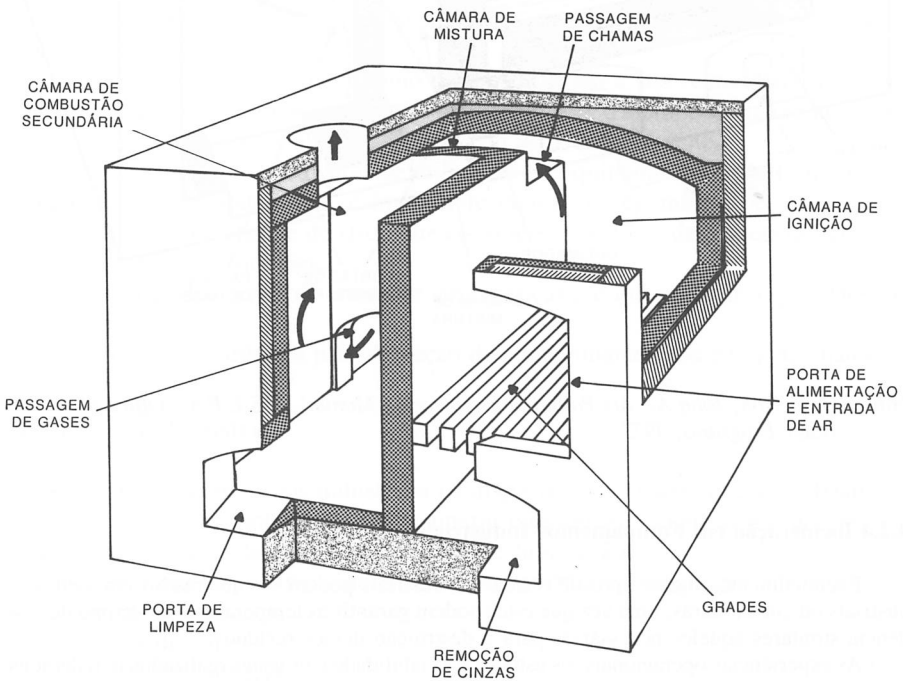
- destruição efetiva de resíduos líquidos e sólidos através de um bom controle da temperatura e do tempo de residência da fase gasosa;
- facilidade de manuseio de resíduos volumosos e
- possibilidade de incinerar ampla variedade de resíduos.

Desvantagens:

- ocorrência de choque térmico durante o carregamento do resíduo e remoção de cinzas, que pode reduzir a vida útil dos refratários e
- custo da reposição do refratário superior àquele para os fornos rotativos.

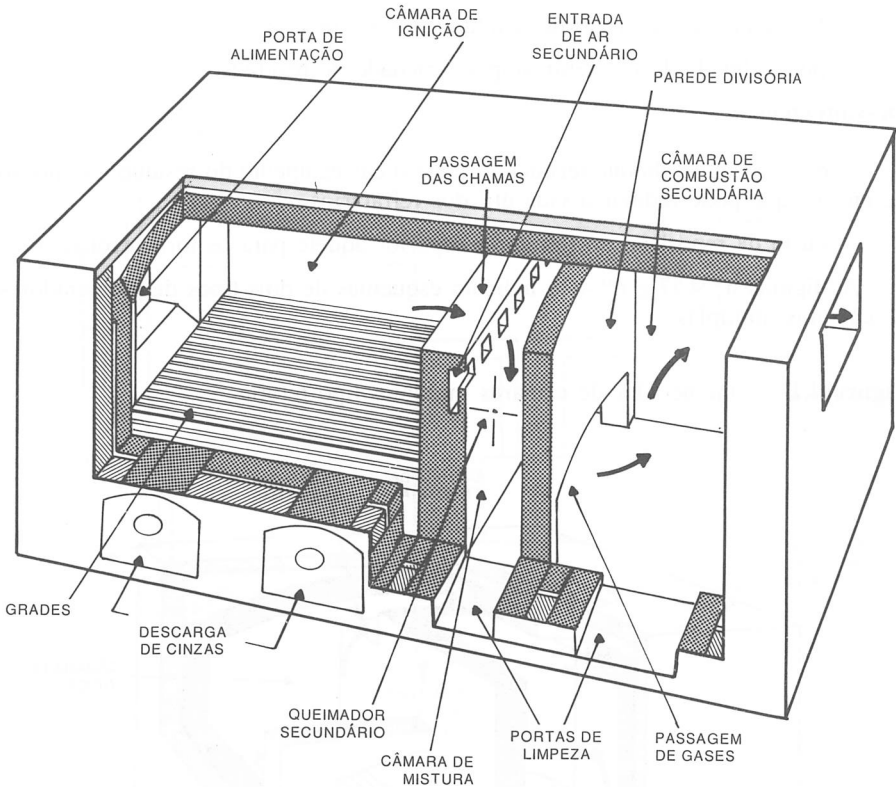
As figuras nº 4.17 e nº 4.18 indicam esquemas de dois tipos de incineradores de câmaras múltiplas.

Figura 4.17 — Incinerador de câmaras múltiplas tipo retorta



Fonte: Danielson, John A., *Air Pollution Engineering Manual*, U.S.E.P.A., Office of Air and Water Programs 1973

Figura 4.18 — Incinerador de câmaras múltiplas em série



Fonte: Danielson, John A., Air Pollution Engineering Manual, U.S.E.P.A., Office of Air and Water Programs, 1973

4.2.4 Incineração em Equipamentos Industriais

Eventualmente, alguns tipos de resíduos industriais podem ser queimados em fornos industriais ou em caldeiras, uma vez que estes podem garantir as temperaturas e o tempo de residência similares àqueles necessários para a destruição desses resíduos.

As experiências operacionais, os estudos de viabilidade e os testes realizados têm demonstrado que a incineração utilizando esses equipamentos pode garantir uma alternativa aceitável, tanto no que se refere a custos quanto à proteção ambiental.

Além disso o investimento de capital em novos equipamentos de incineração não é necessário. Entretanto, a introdução de correntes de resíduos pode interromper o processo produtivo ou atacar o produto, ou, ainda, pode necessitar de equipamentos adicionais para o controle de emissões gasosas.

A Tabela 4.1 apresenta alguns processos alternativos de incineração e suas variações operacionais típicas.

Tabela 4.1

Processos Alternativos de Incineração e suas Variações Operacionais Típicas

Tipo de Indústria	Processo ou Equipamento	Faixa de Temperatura (°C)	Tempo de Residência (Gases em s)
Diversas caldeiras	fogo tubular	1000 - 1400	0.1 - 0.5
	água tubular	900 - 1300	0.3 - 0.2
	carvão pulverizado	1000 - 1300	0.9 - 4.0
Cimento	Forno de cimento via úmida	1400 - 2000	6.0 - 10.0
Cal	Forno rotativo	700 - 1800	6.0 - 10.0
Ferro e Aço	Alto-Forno	1200 - 1800	2,0

De uma maneira geral, a utilização desses equipamentos está restrita aos seguintes casos:

— o resíduo não apresenta na sua composição nenhum material relacionado na listagem nº 4 “Substâncias que conferem periculosidade aos resíduos” da Norma NBR. 10.004 - “Resíduos Sólidos - Classificação”, ou, se apresentar, a concentração dessa substância não é significativa;

— o resíduo foi considerado perigoso apenas por sua inflamabilidade e/ou corrosividade;

— o resíduo foi classificado como perigoso devido a sua reatividade, mas não libera gases, vapores e fumos tóxicos, ou se isso ocorrer, a quantidade liberada é insuficiente para causar danos à saúde humana ou ao meio ambiente.

Na avaliação da possibilidade de utilização de equipamentos industriais para a queima de resíduos industriais, é importante incluir os seguintes aspectos:

— realização de análise de risco que considere os valores de dispersão, receptores locais e efeitos toxicológicos;

— avaliação dos níveis de emissões atmosféricas para não alterar a qualidade do ar local e

— realização de estudos para detecção de contaminantes nos gases da chaminé.

4.2.4.1 Fornos Industriais

São considerados fornos industriais os dispositivos fechados que se utilizam de chama de combustão controlada para recuperar ou produzir materiais ou energia, como um componente integrante do processo de fabricação.

Dentre esses dispositivos incluem-se basicamente os seguintes:

— fornos de cimento;

— fornos de cal;

— fornos de coqueria;

— altos-fornos;

— fornos de fusão e refinação de minérios;

— fornos para agregados (inclusive fornos para a secagem de agregados usados nas indústrias de concreto asfáltico);

— fornos de recuperação (tais como de recuperação do licor na fabricação de papel, de compostos de enxofre do ácido sulfúrico gasto, etc.).

A seguir serão descritos os principais tipos de fornos industriais.

— Forno de Cimento e Cal

Os fornos de cimento e cal, devido às altas temperaturas (1.400°C ou mais), ao grande tempo de residência dos gases e da alcalinidade do material (produto) são excelentes equipamentos para destruição de resíduos perigosos, particularmente orgânicos halogenados.

A utilização desses equipamentos ainda é restrita. Entretanto existem plantas funcionando na França, Itália, Noruega, Suécia, Canadá e Estados Unidos.

Nem todos os resíduos incineráveis são passíveis de uso em fornos de cimento. Os mais usuais são os líquidos com alto poder calorífico e baixo teor de água, os sólidos e os metais. O teor de água normalmente é limitado a 1% em volume e o de metais deve ser baixo o suficiente para evitar o entupimento dos queimadores. O teor de sólidos geralmente é limitado a 20%. A viscosidade menor que 1.400 SSU garante o bombeamento à temperatura ambiente.

Outra consideração a ser feita na seleção dos resíduos passíveis de utilização está relacionada com os efeitos do uso desses resíduos sobre o processo produtivo e a qualidade dos produtos elaborados ou também com a qualidade das emissões atmosféricas.

— Alto-forno

A queima de resíduos em alto-forno não é usual, mas pelo menos um caso já foi relatado onde resíduos líquidos são utilizados como fonte de calor e de carbono para substituir parte da carga de coque do alto forno.

A alta temperatura e o tempo de residência nesses equipamentos favorecem altas eficiências de destruição. Entretanto as reações de redução que também acontecem podem acarretar a formação de produtos de combustão incompleta.

4.2.4.2 Caldeiras Industriais

A utilização de resíduos oleosos para queima em caldeiras industriais vem ocorrendo há muito tempo. A contaminação desses resíduos com solventes ou substâncias organocloradas e metais pesados requer controles mais severos para sua utilização nas caldeiras uma vez que os equipamentos não dispõem de sistemas eficientes de controle de poluição.

Uma gama muito grande de resíduos pode ser destruída de maneira segura nessas caldeiras desde que os resíduos sejam muito bem caracterizados e que o processo seja controlado adequadamente.

Os resíduos que normalmente são destruídos nesses equipamentos são constituídos por óleos, solventes aromáticos e alifáticos, resíduos líquidos contendo fenóis e lodos. Já aqueles constituídos por substâncias organocloradas, ou contendo enxofre, fósforo ou metais, somente poderão ser incinerados se o equipamento dispuser de um sistema eficiente de controle de emissões atmosféricas.

Esse tipo de incineração apresenta alguns pontos bastante interessantes, principalmente no que se refere à economia de combustível e ao menor custo da disposição de resíduos, além de apresentar uma alta eficiência de destruição. Em contrapartida muito poucas caldeiras apresentam sistemas eficientes de controle de emissão atmosférica e isso limita tanto a qualidade quanto a quantidade dos resíduos a serem incine-

rados. Além disso somente resíduos bombeáveis podem ser queimados nesse tipo de equipamento.

As caldeiras água tubular são mais apropriadas para queima de resíduos perigosos. Sua grande capacidade térmica permite altas taxas de injeção.

Além disso, essas unidades são normalmente equipadas com múltiplos queimadores permitindo que um ou mais deles sejam dedicados para a injeção de resíduos. Já os equipamentos do tipo fogo tubular são menos apropriados devido a sua pequena capacidade.

De qualquer modo, a utilização desses equipamentos poderá acarretar um maior dispêndio relativo à necessidade de equipamentos para manusear os resíduos (tanques de armazenamento, mistura, filtragem e bombeamento).

As caldeiras a serem utilizadas na queima de resíduos industriais devem apresentar as seguintes características:

- a câmara de combustão e a seção de recuperação de energia deverão ter um projeto único (por exemplo, as instalações de recuperação de calor proveniente da queima de resíduo em um incinerador não são consideradas caldeiras);

- a eficiência de recuperação da energia térmica deverá ser de pelo menos 60% e
- a energia recuperada não deve ser aproveitada para o uso interno no próprio equipamento (pré-aquecimento do ar de combustão ou do óleo, ou para o funcionamento de exaustores de ar de combustão ou bombas de água de alimentação) devendo ser utilizada para outros fins.

Cabe finalmente ressaltar que as caldeiras de uso residencial, comercial ou institucional não devem ser utilizadas para queima de resíduos.

4.2.5 Controle de Emissão

Os poluentes na incineração de resíduos perigosos aparecem como conseqüência da combustão incompleta, bem como produtos de combustão de constituintes presentes nos resíduos e no ar de combustão.

Os produtos de combustão incompleta incluem o monóxido de carbono, hidrocarbonetos, aldeídos, aminas, ácidos orgânicos, materiais orgânicos policíclicos, alguns componentes do resíduo ou produtos parcialmente degradados que escaparam da destruição térmica no incinerador. Nos incineradores bem projetados e operados esses produtos de combustão incompleta são emitidos em quantidades desprezíveis. De maneira geral, o produto final de combustão é constituído de dióxido de carbono e vapor d'água. Entretanto, dependendo da composição do resíduo incinerado e das condições operacionais, são gerados vários produtos. Por exemplo, na queima de hidrocarbonetos clorados são formados o cloreto de hidrogênio (HCl) e uma pequena quantidade de cloro (Cl_2). No caso de queima de fluoretos orgânicos é formado o fluoreto de hidrogênio (HF). A maior parte do enxofre presente no combustível auxiliar transforma-se em dióxido de enxofre (SO_2) e 1 a 5% em trióxido de enxofre (SO_3). Além disso, há formação de óxido nítrico (NO) pela fixação térmica do nitrogênio do ar de combustão e dos compostos nitrogenados presentes no resíduo. As emissões de particulados incluem partículas de óxidos minerais e sais provenientes dos constituintes minerais no resíduo, bem como fragmentos da queima incompleta de materiais combustíveis.

A seguir serão descritos alguns tipos de equipamentos utilizados para o controle de poluição do ar.

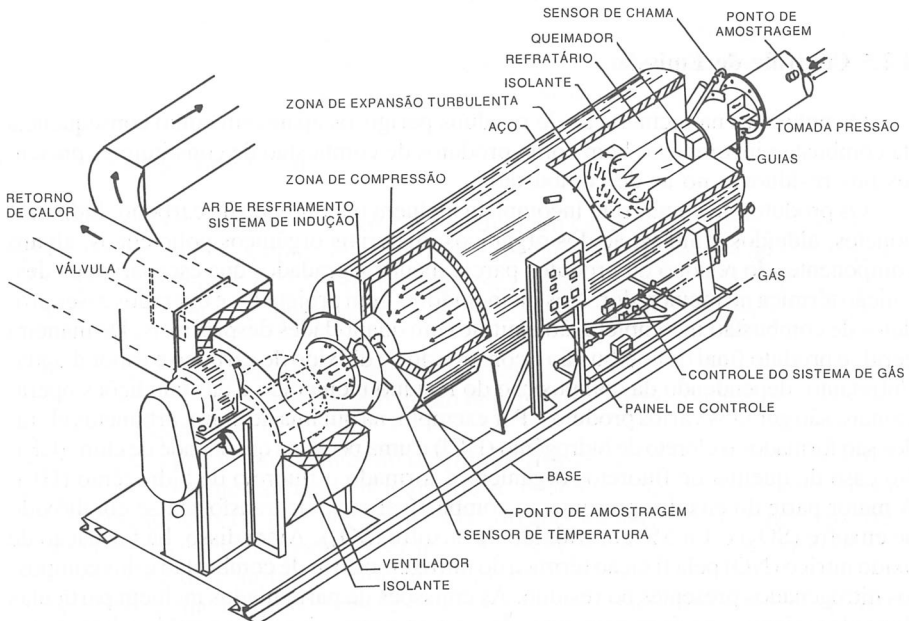
a) Pós-queimadores:

Os pós-queimadores são câmaras de combustão simples empregadas para oxidar os hidrocarbonetos gasosos não destruídos no incinerador. Os principais tipos são: de chama direta, térmicos e catalíticos. Os dois primeiros são similares, diferindo, porém, quanto à forma de destruição de vapores orgânicos. No caso de pós-queimadores de chama direta os vapores passam diretamente através da chama. Na unidade térmica os vapores permanecem no meio oxidante, a altas temperaturas, por um período de tempo suficiente para completar a reação de oxidação. Os equipamentos catalíticos são providos de superfície catalítica para acelerar a oxidação.

A figura 4.19 apresenta um esquema geral de pós-queimadores.

Os pós-queimadores térmicos, geralmente, fazem parte dos fornos rotativos utilizados para a incineração de resíduos perigosos. Estes são adequados para vários materiais gasosos. Os pós-queimadores catalíticos são aplicáveis para a destruição de materiais combustíveis em baixa concentração. Esse tipo não pode ser utilizado para hidrocarbonetos clorados devido à formação de HCl.

Figura 4.19 — Pós-queimador de chama direta



b) Lavadores Venturi

O lavador Venturi se utiliza da energia cinética do fluxo de gás em movimento para atomizar o líquido de lavagem. Nesse processo, o gás passa em altas velocidades (30 120 m/s) através da garganta do Venturi (secção que afunila), onde o líquido é injetado, e se dissipa com o alargamento da secção subsequente.

A figura 4.20 apresenta um esquema simplificado de lavador Venturi.

Esse tipo de lavador é normalmente utilizado nos incineradores de forno rotativo e injeção líquida, podendo ser empregado, também, em incineradores de leito fluidizado. É adequado para a remoção de particulados e apresenta uma eficiência satisfatória na remoção de gases nocivos, que são altamente solúveis (HCl, HF) ou reativos com a solução de lavagem (SO_2 , NO_x , HCN).

c) Torre de Enchimento

Trata-se de um lavador que consiste, basicamente, de um recipiente preenchido desordenadamente com materiais tais como anéis e selas. Os poluentes são removidos, através desses materiais, pelo processo de absorção do gás, o qual depende do contacto entre gás e líquido.

O líquido de lavagem é alimentado no topo da torre, em contracorrente com o gás, ou de forma cruzada. O líquido flui através do leito, umedecendo o material de enchimento e propiciando a superfície interfacial para transferência de massa com a fase gasosa, tal como ilustra a figura 4.21.

Esse equipamento é muito utilizado em incineradores de resíduos perigosos, predominantemente em incineradores de injeção líquida, devido à sua particularidade de apresentar baixos teores de particulados, que podem entupir os materiais de enchimento.

É adequado para a remoção de gases nocivos de efluentes com pequenas cargas de particulados.

d) Lavadores de Atomização

Esse tipo de lavador se utiliza do processo de absorção do gás para a remoção dos poluentes. O líquido de lavagem é atomizado em alta pressão através dos bocais de esguicho, em direção ao fluxo de gás, que pode ser em contracorrente, em corrente ou cruzado, conforme ilustra a figura 4.22

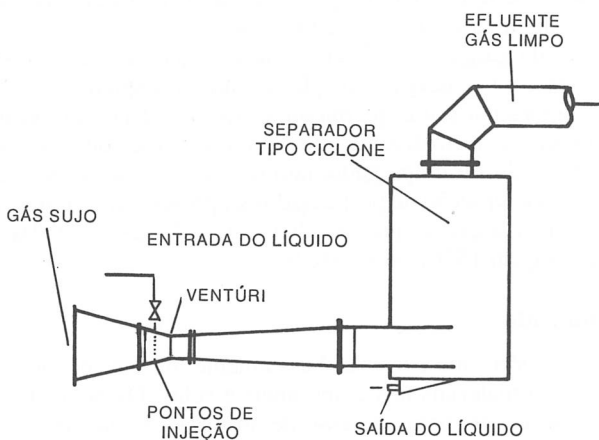
Os lavadores de atomização são adequados para efluentes gasosos com partículas e poluentes gasosos. Seu projeto é simples e aceita efluentes gasosos com temperaturas elevadas, elevado teor de umidade e grande carga de pó.

e) Lavadores de Pratos

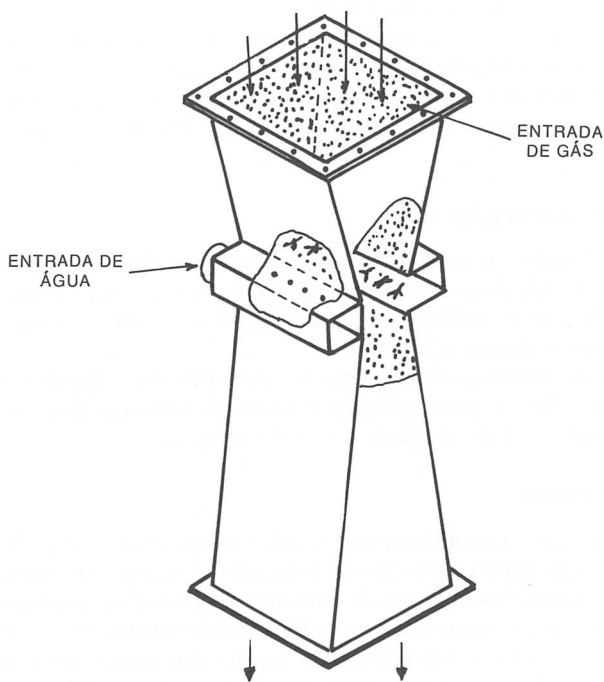
O lavador de pratos é um outro tipo de lavador via úmida que se utiliza do processo de absorção de gás para a remoção de poluentes. Consiste basicamente em uma coluna vertical cilíndrica onde ficam distribuídos os pratos ou bandejas. O líquido de lavagem é introduzido no prato superior e flui sucessivamente através de cada prato para o fundo da torre. O gás proveniente do incinerador passa, em contracorrente, através das aberturas de cada prato, conforme ilustra a figura 4.23.

Esse tipo de lavador é adequado para a remoção de gases tóxicos com baixo teor de particulados. Conseqüentemente é muito utilizado para o controle de emissões gasosas provenientes dos incineradores de injeção líquida.

Figura 4.20 — Esquema de Lavador Venturi



VENTÚRI



VENTÚRI

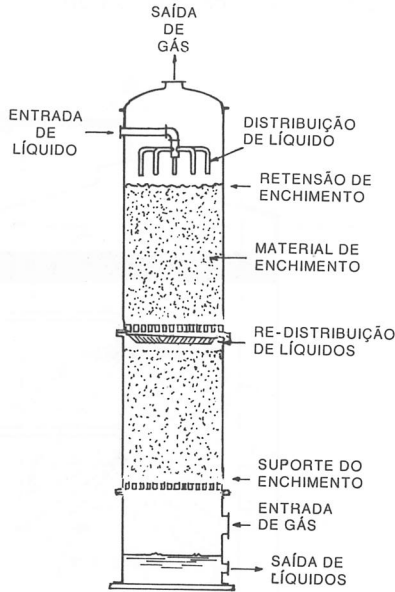


Figura 4.21 — Esquema de Torre de Enchimento



ANÉIS DE RASCHIG



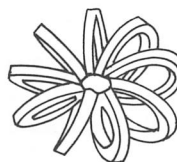
SELA DE BERIL



SELA DE INTALOX

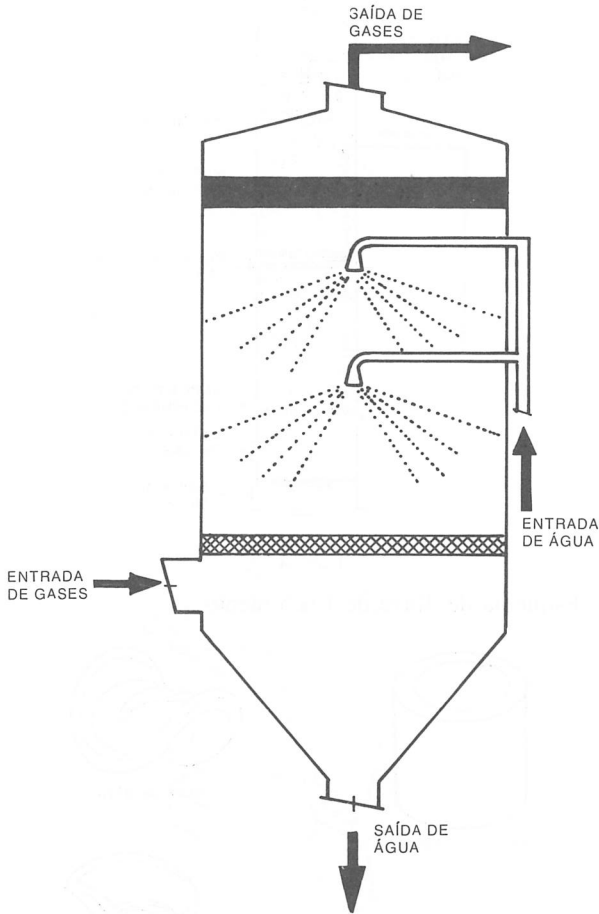


ANÉIS DE PALL



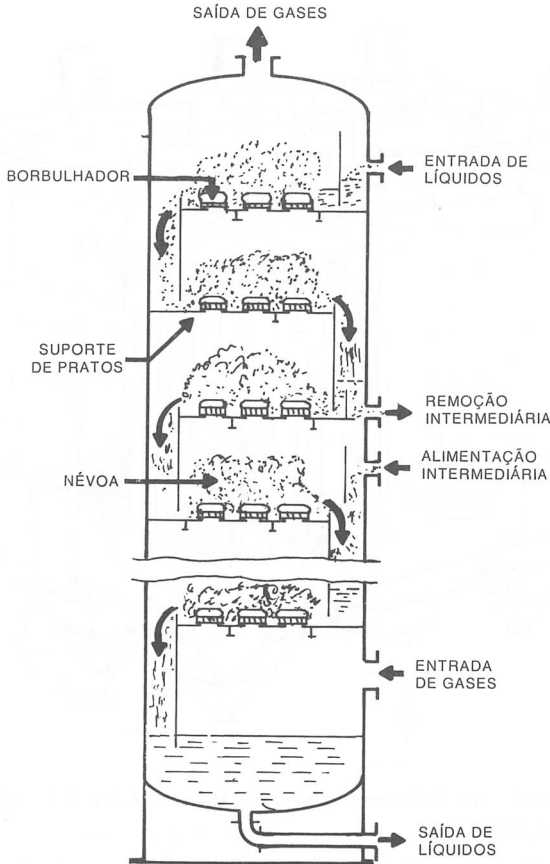
TELLERETTE

TIPOS DE ENCHIMENTO

Figura 4.22 — Esquema de Lavador de Atomização

Fonte: Danielson, John A., *Air Pollution Engineering Manual*, U.S.E.P.A., Office of Air and Water Programs 1973

Figura 4.23 — Esquema de Lavador de Pratos



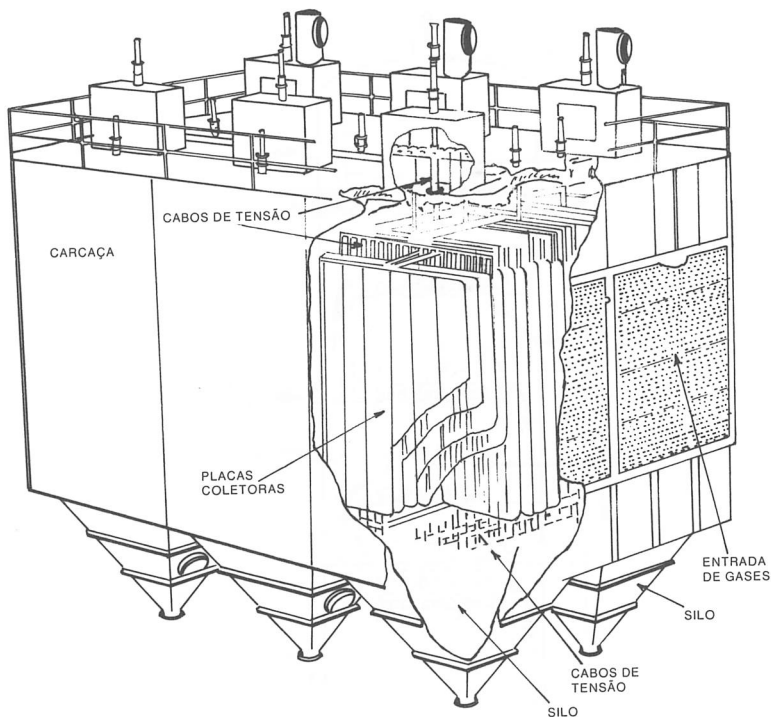
Fonte: Danielson, John A., *Air Pollution Engineering Manual*, U.S.E.P.A., Office of Air and Water Programs 1973

f) Precipitador Eletrostático

É um processo em que as partículas em suspensão no gás são eletricamente capturadas e separadas do efluente gasoso sob a ação de um campo elétrico. As partículas são coletadas nos pratos onde sua remoção é efetuada através de percussão ou lavagem conforme ilustra a figura 4.24

Os precipitadores eletrostáticos são amplamente utilizados em caldeiras, incineradores municipais e industriais. São adequadas para a remoção de partículas finas, mas não são capazes de capturar gases tóxicos.

Figura 4.24 — Precipitador Eletrostático



Fonte: Danielson, John A., Air Pollution Engineering Manual, U.S.E.P.A., Office of Air and Water Programs 1973

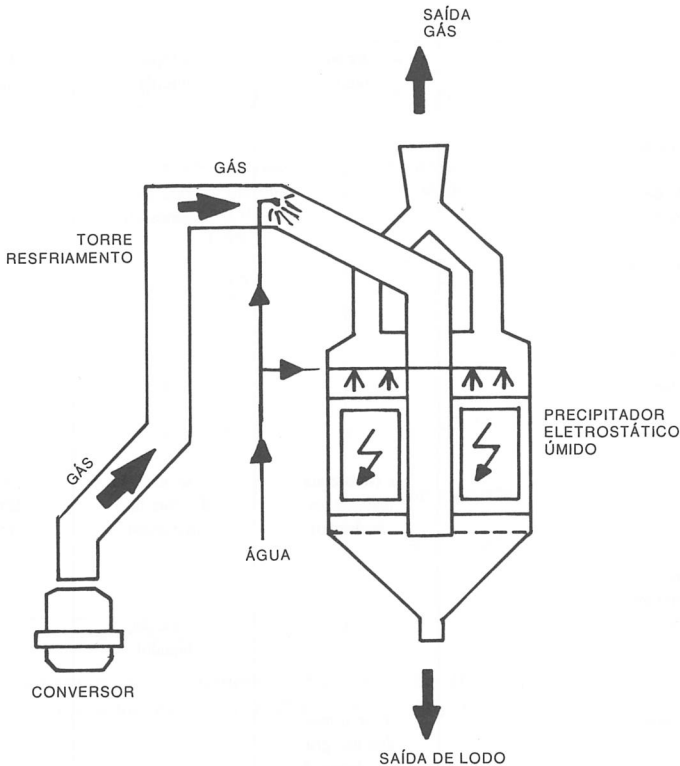
g) Precipitadores Eletrostáticos Via Úmida

O precipitador eletrostático via úmida é uma variação do precipitador anteriormente mencionado. A coleta das partículas é realizada pela introdução de líquido distribuído uniformemente em gotículas no fluxo de gás, através de pulverizadores localizados sobre uma seção de campo eletrostático. As partículas capturadas e as gotículas do líquido migram para pratos coletores, conforme ilustra a figura 4.25.

Atualmente esse tipo de precipitador não está sendo utilizado em incineradores de resíduos perigosos. É adequado na remoção de partículas finas e gases orgânicos condensados.

4.2.6 Aplicabilidade dos Equipamentos de Incineração por Tipo de Resíduo

A adequabilidade de um equipamento de incineração depende das características do resíduo a ser incinerado. A tabela 4.2 apresenta um quadro da aplicabilidade de alguns incineradores por tipo de resíduo.

Figura 4.25 - Esquema de Precipitador Eletrostático Via Úmida

Para a seleção do tipo de forno e equipamento de controle de poluição do ar em função das características do resíduo é necessário analisar os pontos comentados a seguir.

- Forma Física do Resíduo

Como pode ser observado na tabela 4.2 apresentada, à exceção dos fornos rotativos que aceitam resíduos em qualquer forma, os demais tipos apresentam restrições no que se refere à forma física do resíduo. Por exemplo, em fornos de injeção líquida não é possível queimar resíduos sólidos. Para os resíduos líquidos, sua viscosidade deverá ser adequada para o queimador, bem como o tamanho das partículas em suspensão, para se evitar possível entupimento.

Tabela 4.2
Aplicabilidade de alguns incineradores por tipo de resíduo

Tipo de resíduo	forno rotativo	injeção líquida	forno de câmaras
Sólidos:			
- granular, homogêneo	x		x
- irregular	x		x
- de baixo ponto de fusão como alcatrões	x	x (se for bombeável)	x
- orgânicos com cinzas fundentes	x		
- volumosos	x		
Líquidos:			
- aquosos contendo orgânicos sólidos	x	x	
- orgânicos	x	x	x
Gasosos:			
- orgânicos	x (se adequadamente introduzido)	x (se adequadamente introduzido)	x (se adequadamente introduzido)
Sólidos/líquidos:			
- contendo compostos aromáticos halogenados	x	x (se for líquido)	
Lamas			
- orgânicos aquosos	x (se o resíduo não agrupar, depois de de seco)		x

Fontes: T.A. Bonner et alii - *Engineering Handbook for Hazardous Waste Incineration Rep to E.P.A - 1981 - U.S.A.*

A tabela nº 4.3 apresenta um quadro das limitações de viscosidade e sólidos por tipo de queimador.

Tabela 4.3
Limitações de Viscosidade e Sólidos por Tipo de Queimador

Tipo de queimador	Viscosidade cinemática máxima admissível (CST) a 37,9°C	Tamanho máximo de sólidos (mm)	Concentração máxima de sólidos (em peso)
Corpo rotativo	38 a 65	0,15 a 0,4	20%
Fluido simples	32	—	praticamente zero
mistura interna	21	—	praticamente zero
ar baixa pressão (< 30psi)			
mistura externa	43 a 325	0,074 *	30%
ar baixa pressão			
mistura externa	32 a 1080	0,074 a 0,147*	70%
ar alta pressão			
mistura externa	32 a 1080	0,074 a 0,147*	70%
vapor a alta pressão			

* depende do diâmetro interno dos furos dos queimadores

Fonte: T.A. Bonner et alli - Engineering Handbook for Hazardous Waste Incineration Report to E.P.A. - 1981 - U.S.A.

- Teor de Compostos da Listagem nº 4 da NBR 10.004 - “Resíduos Sólidos - Classificação” Presentes no Resíduo

A análise dos compostos tóxicos constantes da listagem nº 4 da NBR 10.004 - “Resíduos Sólidos - Classificação” presentes no resíduo indica quais são os compostos mais difíceis de queimar.

Dependendo da substância presente, o processo de incineração requererá temperatura, tempo de residência e turbulência mais elevados, o que implica a utilização de equipamentos mais sofisticados.

- Temperaturas necessárias para a destruição do resíduo

A temperatura necessária para a destruição do resíduo é fundamental na definição do tipo do equipamento. Por exemplo, os fornos de câmara operam com temperaturas relativamente baixas, motivo pelo qual se tornam inadequados para a queima de resíduo de difícil destruição, como por exemplo os solventes clorados.

A tabela nº 4.4 indica as faixas de temperaturas para queima de alguns tipos de incineradores.

Tabela 4.4.
Faixas de Temperatura para queima de alguns resíduos

Processo	Faixa de Temperatura (°C)	Tempo de Residência
Forno rotativo	820 - 1600	líquidos e gases: 1,0 a 3,0 s sólidos: 1,0 a 1,5 h
Injeção líquida	650 - 1600	0,1 a 2 s
Leito fluidizado	450 - 980	líquido e gases: ordem de segundos sólidos: horas
Câmaras Múltiplas	zona de secagem 320 - 540 zona de incineração 760 - 980	0,25 a 1,5 h

Fonte: T. Bonner et alli - Hazardous Waste Incineration Engineering - USA - 1981

- Características dos Gases de Saída

Os gases de saída esperados podem ser classificados, a grosso modo, em dois tipos:

- gases constituídos essencialmente de óxidos de carbono (CO_2 e CO) e nitrogênio;
- vapor d'água contendo halogênios, enxofre, fósforo ou metais.

As porcentagens de carbono, hidrogênio, oxigênio, nitrogênio, enxofre, halogênios e umidade no resíduo são fundamentais para o cálculo da necessidade de ar estequiométrico e para prever o fluxo de gases de combustão, bem como a sua composição. A presença de enxofre e halogênios em quantidades significativas podem resultar na formação de compostos tais como HCl , Cl_2 , SO_x , HF e H_2S , o que implica a necessidade de instalação de equipamentos de controle para a remoção destes poluentes. Na incineração de compostos organo-clorados deverá ser fornecido hidrogênio em quantidades suficientes para que o cloro saia na forma de HCl e não Cl_2 , que é muito tóxico e de difícil remoção através de lavadores. Os óxidos de nitrogênio são formados pela reação a altas temperaturas do nitrogênio do ar com o oxigênio. Os teores podem ser aumentados se o resíduo contiver compostos ricos em nitrogênio.

Quanto à presença de metais tais como arsênio, bário, cádmio, cromo, mercúrio, chumbo, selênio e prata, em efluentes gasosos, estudos de risco de casos de câncer associados a este tipo de emissões revelaram que os riscos de ocorrência são maiores quando comparados com os riscos associados à emissão de compostos orgânicos. Assim sendo, os resíduos com teores elevados de metais não devem ser incinerados.

- Teores de Cinzas

O teor de cinzas no resíduo é um bom indicador da formação de material particulado e da quantidade do resíduo sólido a ser gerado na incineração. Deve ser avaliada a possibilidade dessas cinzas fundirem na temperatura de incineração, para evitar os danos que poderão causar ao refratário. Além disso, deve-se analisar o teor de elementos como Na, Mg, Al e F, tendo em vista a proteção do refratário. As cinzas poderão ser classificadas como fundentes, não fundentes ou metálicas.

- Poder Calorífico:

O poder calorífico corresponde ao calor liberado quando o resíduo é queimado. É expresso em kcal/kg e é utilizado para estabelecer o balanço térmico do equipamento e definir se o equipamento necessita ou não do combustível auxiliar. Em geral, um resíduo pode manter-se em combustão com o poder calorífico inferior de 2.500 kcal/kg. Geralmente são feitas misturas de resíduos de forma que o poder calorífico inferior médio fique em torno de 4.000 kcal/kg.

4.2.7 Monitoramento e Sistema de Intertravamento

O monitoramento é um procedimento fundamental para a segurança e o controle do processo de incineração a fim de se manter as condições adequadas. Nesse contexto, o próprio processo de incineração e as operações de controle de emissões devem ser monitoradas, bem como deverão ser previstos sistemas de alarme e de segurança contra falhas. Os incineradores que queimam resíduos perigosos devem, também, ser dotados de mecanismos automáticos de interrupção da queima para evitar a emissão de substâncias tóxicas no ambiente, quando da ocorrência de problemas na combustão, falhas no equipamento de controle da poluição do ar ou se houver riscos aos próprios equipamentos.

A Norma NB 1265 - "Incineração de Resíduos Sólidos Perigosos - Padrões de Desempenho" propõe para incineradores de resíduos perigosos sistemas de intertravamento que interrompam a alimentação de resíduos sempre que houver ocorrência de:

- baixa temperatura de queima;
- ausência de chama no queimador;
- queda de teor de O_2 na chaminé;
- mau funcionamento de monitores de CO, O_2 e temperatura;
- valores de CO entre 100 a 500 ppm por mais de 10 minutos;
- valores de CO superiores a 500 ppm, em qualquer instante;
- inexistência de depressão no incinerador; ou
- falta de energia elétrica ou queda brusca de tensão.

A temperatura nos incineradores é prefixada a um determinado valor e o ar secundário é mantido a uma vazão constante, sendo que as oscilações da temperatura são controladas pelo aumento ou diminuição do fornecimento do resíduo e de combustível auxiliar. Este controle está sujeito a restrições, pois caso a alimentação do resíduo ou do combustível for reduzida excessivamente poderá ocorrer combustão dentro do queimador danificando-o e, por outro lado, o aumento demasiado na alimentação poderá ocasionar um deslocamento da chama apagando-a. Para manter a relação estequiométrica entre ar e resíduo, a vazão de ar primário também é controlada. A ausência de chama implica a emissão de resíduos não queimados, o que pode ser agravado com a queda de temperatura do incinerador.

O monitoramento contínuo de O_2 e CO é fundamental no controle do processo de combustão, pois estes parâmetros indicam as más condições de queima.

No caso de falhas no sistema úmido de acondicionamento ou tratamento, a interrupção da alimentação de resíduos e combustível auxiliar deve ocorrer quando:

- faltar líquido de lavagem nos lavadores;
- a temperatura de saída exceder a temperatura máxima estabelecida no projeto da coluna de resfriamento;

- a temperatura após o resfriamento ultrapassar aquela estabelecida no projeto para o lavador;
- houver parada no ventilador;
- o pH do líquido de lavagem ultrapassar os limites estabelecidos; ou
- a perda de carga através dos lavadores aumentar, com indício de entupimento.

4.2.8 Teste de Queima

Trata-se de queima experimental, realizada com o acompanhamento dos técnicos dos órgãos de Controle, antes do incinerador entrar em operação normal, ou antes de se incinerar um resíduo não especificado na licença. Tem como objetivo a avaliação do desempenho do incinerador, a verificação da eficiência de destruição do resíduo bem como o atendimento aos padrões exigidos para cada parâmetro.

No plano de teste de queima deverão constar as seguintes informações:

- características do resíduo a ser incinerado;
- taxa de alimentação do resíduo;
- pontos de tomada das amostras;
- frequência de coleta das amostras;
- parâmetros a serem analisados nos efluentes gasosos, efluentes líquidos, cinzas e pó;
- tempo de amostragem para cada parâmetro; e
- metodologia empregada para a coleta de amostras gasosas, bem como para análises laboratoriais.

Os padrões para teste de queima estão propostos na Norma NB 1265 - “Incineração de Resíduos Sólidos Perigosos - Padrões de Desempenho”.

4.2.9 Custos

Os custos dos incineradores dependem do grau de sofisticação, da sua capacidade e dos equipamentos de controle de emissões utilizados. Por exemplo, um incinerador de forno rotativo, com capacidade de queima de 7,5 toneladas diárias, provido de “quençh” e lavadores Venturi, possui um custo que gira em torno de 4,0 milhões de dólares. Por outro lado, um mesmo tipo de incinerador, cuja capacidade é quase 7 vezes maior, equipado de “quençh”, Venturi e filtro-manga, custa cerca de 13,5 milhões de dólares.

A tabela nº 4.5 indica alguns dados sobre os preços cobrados na incineração de resíduos industriais.

Tabela 4.5
Indicação de Preços Cobrados para a incineração de alguns resíduos

Tipo de equipamento	Tipo de resíduo	Preço	Local/Propriedade
Forno rotativo	- resíduo com alto poder calorífico acondicionado em tambores de fibra	165 cents/kg	Nova Jersey (Rollins)
	- resíduo a granel com poder calorífico superior a 10.000 BTU	24 cents/kg	"
	- resíduo com baixo poder calorífico	500 US\$/tambor	"
	- líquidos não contaminados com alto poder calorífico	13 cents a 53 US\$/T	
	- resíduos líquidos	53 a 273 US\$/T	
	- resíduos sólidos e líquidos altamente tóxicos	395 a 791 US\$/T	
Forno rotativo	resíduos sólidos e líquidos industriais	2.000 US\$/T	Suzano (Hoechst)
Queima em alto-mar (navios Vulcano)	resíduos líquidos clorados, com pH e partículas de tamanhos preestabelecidos e PCB's, sendo a quantidade mínima de 20.000 toneladas	150 US\$/T	O navio vem até os portos da América do Sul (Chemical Waste Management, Inc & Ocean Combustion Service BV)

Fonte: OTA - *Technologies and Management Strategies for Hazardous Waste Control* - March - 1983

4.3 ESTABILIZAÇÃO E SOLIDIFICAÇÃO

4.3.1 - Definição

A estabilização consiste em um estágio de pré-tratamento através do qual os constituintes perigosos de um resíduo são transformados e mantidos nas suas formas menos solúveis ou menos tóxicas. Tais transformações se dão por meio de reações químicas que fixam elementos ou compostos tóxicos em polímeros impermeáveis ou em cristais estáveis. Quanto às características físicas do resíduo, estas podem ou não ser alteradas e melhoradas.

A solidificação, por sua vez, é uma forma de pré-tratamento que gera uma massa sólida monolítica de resíduo tratado, melhorando tanto a sua integridade estrutural, quanto as suas características físicas, tornando assim mais fácil o seu manuseio e transporte.

Portanto, a estabilização/solidificação tem como objetivos: melhorar as características físicas e de manuseio dos resíduos, diminuir a área superficial através da qual possa ocorrer a transferência ou perda de poluentes, limitar a solubilidade ou destoxificar quaisquer constituintes perigosos contidos no resíduo.

4.3.2 Considerações gerais

A estabilização/solidificação não é uma forma de tratamento que se justifique para qualquer tipo de resíduo. A decisão técnica e econômica sobre que tipo de resíduo deve ou não ser submetido a tal processo de tratamento, baseia-se em dados sobre a sua quantidade, composição e propriedades físicas, local de geração e problemas quanto a sua disposição final. É importante verificar também a eficiência e os custos associados aos sistemas de tratamento disponíveis comercialmente e que são aplicáveis ao resíduo em questão. Os resíduos classificados como perigosos e gerados em grandes quantidades são os que comumente justificam esse tipo de tratamento. Além desses, alguns tipos de resíduos não perigosos também podem ser tratados dessa maneira, a fim de torná-los mais fáceis de manusear e mais difíceis de perder constituintes indesejáveis que possam contaminar a água subterrânea quando dispostos no solo: (ex.: lodos da limpeza de unidade de gaseificação, fluidos de perfuração de poços etc.).

As tecnologias disponíveis para a estabilização/solidificação melhor se aplicam aos resíduos inorgânicos do que aos orgânicos, pois esses últimos ocorrem nas fontes de geração de resíduo de formas diversificadas e apresentam propriedades físico-química e biológica muito variadas.

Não é recomendável que resíduos com mais de 10 a 20% de constituintes orgânicos sejam tratados pelas técnicas de fixação comerciais existentes, uma vez que eles interferem nos processos físicos e químicos, os quais são importantes para manter agregados os resíduos. Algumas instalações que tratam grandes volumes de resíduos inorgânicos podem aceitar pequenos volumes de resíduos orgânicos específicos, que serão misturados aos primeiros em baixas concentrações.

Os tratamentos que melhor se aplicam aos resíduos orgânicos são a decomposição por sistemas biológicos, a incineração, e outros. Mesmo para resíduos com pequenas quantidades de orgânicos, é melhor efetuar primeiro sua separação por extração de solventes ou destilação e só então submetê-los a esse ou outros processos de tratamento.

Assim sendo, os resíduos que são efetivamente estabilizados/solidificados constituem-se de material inorgânico em solução ou suspensão aquosa contendo consideráveis quantidades de metais pesados ou sais inorgânicos.

4.3.3 Tecnologias desenvolvidas e aplicadas

Os processos de estabilização/solidificação existentes são classificados como fixação inorgânica e técnicas de encapsulamento. No primeiro caso os processos baseiam-se na utilização de materiais como cimento, cal, silicatos e argilas, enquanto que no segundo caso são empregados polímeros orgânicos específicos. Encontram-se disponíveis os processos e as técnicas apresentadas a seguir.

4.3.3.1 Processo à Base de Cimento

O cimento (Portland) é um clinker anidro, que contém aluminato tricálcico, silicato de cálcio, silicato tricálcico e outros componentes, e é obtido através da queima de uma mistura de cal, argila e outros silicatos, a altas temperaturas.

Quando misturado com água, o cimento é hidratado, formando posteriormente um sólido rígido. A hidratação se dá em dois estágios, sendo que no primeiro ocorre a formação de uma membrana protetora na superfície das partículas de silicato de cálcio e no segundo, após a cura inicial, observa-se em cada grão de cimento o crescimento de fibrilas, que se irradiam por todo espaço intersticial. Desta forma, tem-se um aumento no comprimento e no número de fibrilas, que gradualmente começam a emaranhar-se uma com as outras e, quando cessa o seu crescimento, elas começam a unir-se lateralmente formando lâminas contínuas do material. Esta matriz fibrilar incorpora os agregados e/ou resíduos adicionados na massa sólida monolítica.

A maioria dos resíduos na forma de lamas podem ser misturados diretamente com o cimento e os sólidos suspensos serão incorporados na matriz rígida do concreto endurecido. Este processo é particularmente eficiente para resíduos com elevados teores de metais tóxicos, uma vez que no pH da mistura diversos cátions de múltiplas valências são convertidos em hidróxidos e carbonatos insolúveis. Os íons metálicos também podem ser incorporados na estrutura cristalina que os minerais do cimento formam.

A presença de sulfetos, asbestos, látex e plásticos rígidos nos resíduos, a serem solidificados, pode aumentar a resistência e a estabilidade do resíduo concretado. Entretanto, certos compostos inorgânicos presentes, tanto nos resíduos quanto na água utilizada na mistura, podem ser prejudiciais para o endurecimento e cura da mistura resíduo-cimento.

a) Interferências no processo causadas pela presença de determinados compostos.

O endurecimento e a cura dos cimentos Portland comuns podem ser retardados por muitos dias, pela presença de impurezas tais como matéria orgânica, siltes, argila, carvão ou lignita. A presença de materiais insolúveis, na forma de pó (partículas que passam pela peneira de nº 200), é indesejável, visto que podem estar presentes na forma de poeiras ou aderir a partículas maiores, enfraquecendo a ligação entre as partículas maiores e o cimento.

O tempo de endurecimento da mistura bem como reduções significativas na resistência física podem sofrer grandes variações em função da presença de sais solúveis de manganês, estanho, zinco, cobre e chumbo, sendo que os três últimos sais

são os mais prejudiciais. Outros compostos que também atuam como retardadores do endurecimento do cimento Portland, mesmo que presente em baixas concentrações (alguns gramas por quilo de cimento), são os sais de sódio, tais como arseniato, borato, fosfato, iodato e sulfito.

Além de retardar o endurecimento, produtos contendo grandes quantidades de sulfatos, assim como os lodos provenientes da lavagem de gás de exaustão ou combustão, podem reagir e formar sulfa-aluminato de cálcio hidratado, causando aumento de volume ou a fragmentação do material solidificado. Para prevenir tal reação, quando da solidificação de resíduos com altas concentrações de sulfatos, foi desenvolvido um cimento especial com baixo teor de alumina.

b) Aditivos

Com a finalidade de melhorar as características físicas da mistura e diminuir as perdas por lixiviação de lodos fixados, muitos aditivos foram desenvolvidos para serem usados com o cimento, mas como são patenteados, não é possível efetuar-se estudos comparativos.

Em alguns trabalhos experimentais realizados com resíduos radioativos, observou-se que a adição de vermiculita ou argila como absorvente melhorou as condições de fixação e redução daqueles resíduos.

Os silicatos solúveis têm sido utilizados como aditivos nos processos à base de cimento para reter os contaminantes, mas esses causam um aumento de volume durante o endurecimento das misturas resíduo-cimento.

Como uma adaptação do processo à base de cimento foi proposta uma técnica na qual são dissolvidos resíduos ricos em metais com sílica de granulação fina, em pH baixo, sendo a mistura posteriormente polimerizada através da elevação do pH até 7. O gel resultante é adicionado ao cimento que endurece em três dias.

De acordo com os testes efetuados pelo "Brookhaven National Laboratory", a mistura de silicato de sódio e cimento Portland endurece rapidamente, sem que os íons metálicos afetem esse processo. Aparentemente, o silicato de sódio precipita a maioria dos íons inibidores que estão presentes na massa gelatinosa, eliminando suas interferências e acelerando o endurecimento da mistura cimento-resíduo. Dos resíduos testados, somente aqueles contendo ácido bórico inibiram o endurecimento das misturas.

Portanto, a formação de um gel é um fato importante no desenvolvimento dessa técnica. Além disso, uma demora no endurecimento e uma diminuição da resistência final do produto podem ser causadas por excessiva agitação do gel depois de formado.

c) Impregnação com polímeros

Outro trabalho executado pelo "Brookhaven National Laboratory" baseou-se no processo de impregnação com polímeros, que pode ser usado para diminuir a permeabilidade das misturas de resíduos com cimento. Os poros do produto final são preenchidos com monômeros de estireno, por imersão. A seguir o material é aquecido para que ocorra a polimerização. Através desse processo tem-se um aumento significativo da resistência e da durabilidade do produto final.

d) Revestimento superficial

Inúmeras pesquisas têm sido realizadas em relação ao revestimento superficial do aglomerado e os principais problemas encontrados referem-se à falta de aderência do revestimento e à falta de resistência do produto cimento-resíduo.

Dentre os materiais de revestimento superficial pesquisados pode-se citar o asfalto, emulsão asfáltica e vinil, mas os resultados dessas investigações não podem ser avaliados, visto que não se encontram publicados.

As vantagens dos sistemas de tratamento à base de cimento são:

- a) a matéria-prima é abundante e barata;
- b) a tecnologia e o controle das misturas e manuseio do cimento são bem conhecidos;
- c) a secagem e a desidratação do resíduo não são necessárias, visto que o cimento precisa de água para sua hidratação e posterior endurecimento. Assim sendo, a quantidade de cimento a ser adicionada pode ser dosada em função do teor de água do resíduo;
- d) o sistema é tolerante à maioria das variações químicas. O cimento, dada a sua alcalinidade, pode neutralizar ácidos e não é afetado por oxidantes fortes, tais como nitratos ou cloretos;
- e) as características de lixiviação do produto final, se necessário, podem ser melhoradas através de revestimento selante; e
- f) a quantidade de cimento usada pode variar, permitindo assim que os produtos finais tenham uma alta capacidade de suporte e uma baixa permeabilidade.

As desvantagens desse processo são:

- a) a necessidade de quantidades relativamente grandes de cimento, o que em parte é compensado pelo baixo custo do material. O peso e o volume do produto final são, normalmente, o dobro do de outros processos de fixação;
- b) a necessidade de aterros bem projetados e construídos para a disposição de produtos finais não revestidos. Conforme foi observado na disposição de resíduos radioativos, alguns poluentes são liberados por lixiviação, especialmente por soluções levemente ácidas;
- c) a necessidade de efetuar um pré-tratamento ou utilizar cimentos especiais de custo mais elevado ou aditivos, caso os resíduos contenham grandes quantidades de impurezas que afetem o endurecimento e a cura da mistura resíduo-cimento, tais como boratos e sulfatos; e
- d) a formação de amônia, a partir do íon amônio, devido à alcalinidade do cimento.

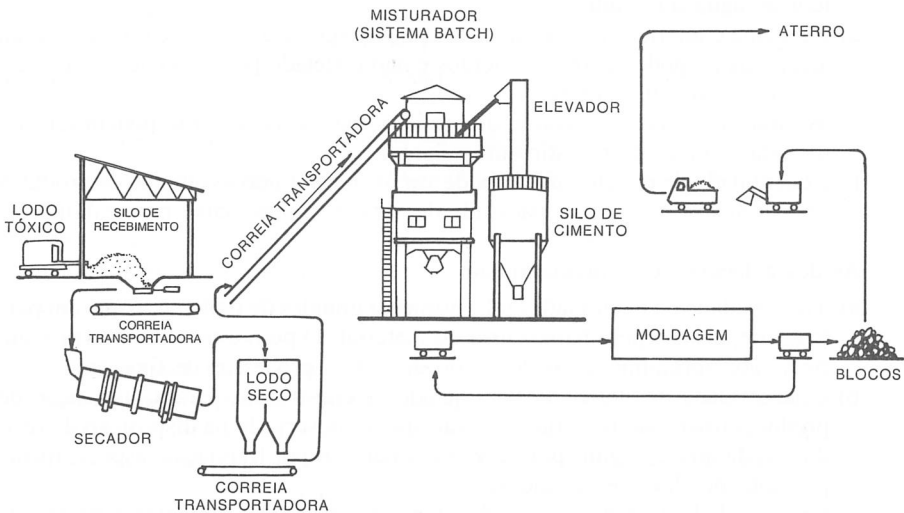
A figura 4.26 mostra um exemplo simplificado de uma instalação de solidificação, onde o lodo perigoso é conduzido por meio de uma correia transportadora, do silo de recebimento para o misturador, de forma a não permitir que o material se espalhe. Após a pesagem, o lodo, o cimento, os aditivos, e a água são introduzidos no misturador. A mistura homogeneizada segue para os moldadores e depois de 28 dias de cura os blocos são encaminhados para o aterro.

4.3.3.2 Processo à Base de Cal e Materiais Pozolânicos (não incluindo o cimento)

Os materiais pozolânicos, artificiais ou naturais, contêm, dentre outras, partículas silicosas que combinadas com cal, na presença de água, produzem um material com propriedades similares ao concreto.

Nos processos de fixação química, os materiais pozolânicos comumente usados são as cinzas, poeiras de forno de cimento ou escória de alto-forno, que são produtos residuais com pequeno ou nenhum valor comercial. O uso desses materiais é particularmente vantajoso, pois permite que resíduos gerados em duas fontes distintas sejam tratados ao mesmo tempo. Pode-se citar como exemplo o tratamento da lama proveniente da limpeza dos sistemas de gases de combustão com as cinzas geradas em usinas termo-elétricas, cal e outros aditivos, produzindo um material sólido, fácil de ser manuseado.

Figura 4.26 — Exemplo de uma instalação de solidificação de lodos perigosos



Fonte: Neto, Pedro P. Castro e outros, *Resíduos Sólidos Industriais, Série Atas, CETESB, 1985*

Dos comentários feitos em relação ao processo à base de cimento, praticamente todos se aplicam ao caso em questão.

As vantagens do processo à base de cal e materiais pozolânicos são:

- o produto obtido é geralmente um sólido, cujas características de manuseio e permeabilidade são melhores do que as do resíduo original;
- o sistema não requer equipamentos especiais para sua operação, podendo ser empregados aqueles normalmente utilizados em instalações de neutralização de resíduos com cal;
- as reações químicas que ocorrem entre a cal e os materiais pozolânicos são relativamente bem conhecidas. Além disso, o sulfato não causa fragmentação ou rachadura; e

d) a secagem ou desidratação não são necessárias, visto que a presença de água é obrigatória no conjunto de reações do processo.

Quanto as desvantagens têm-se:

- a) A cal e os outros aditivos usados aumentam o peso e o volume do produto a ser transportado e/ou aterrado; e
- b) a construção de aterros projetados especialmente para dispor materiais fixados e sem revestimentos pode ser exigida como uma forma de garantir que não haja perda de poluentes potenciais por lixiviação.

4.3.3.3 Processo à Base de Cimento e Materiais Pozolânicos

Certos sistemas de tratamento enquadram-se na categoria de processos à base de materiais pozolânicos e cimento, sendo a combinação desses materiais feita com o intuito de obter a melhor e mais econômica forma de contenção de um resíduo específico.

Os materiais pozolânicos são freqüentemente adicionados ao cimento Portland para reagir com o hidróxido de cálcio livre e assim melhorar a resistência física e química do resíduo aglomerado. Na solidificação, os materiais pozolânicos são freqüentemente usados como absorventes, podendo tornar-se inativos pelos resíduos. Qualquer reação que ocorra entre o cimento Portland e a sílica livre, presente nos materiais pozolânicos, resultará em um produto final de maior resistência e durabilidade.

As formulações utilizadas neste processo variam muito, assim como os materiais que podem ser adicionados para melhorar sua qualidade. Dentre eles pode-se citar os silicatos solúveis, gels de sílica hidratada e argilas, tais como bentonita, illita e atapulgita.

De uma forma geral, pode-se dizer que, todos os comentários feitos para os processos em separado, aqui também são válidos.

4.3.3.4 Técnicas à Base de Polímeros

Os termoplásticos comumente empregados para solidificar resíduos são o betume, o asfalto e o polietileno. Estes são polímeros orgânicos que, quando submetidos respectivamente ao aquecimento e resfriamento amolecem e endurecem.

Normalmente o resíduo é seco, aquecido e disperso no termoplástico aquecido. A mistura é então resfriada e solidificada, o que normalmente ocorre dentro de um recipiente, por exemplo um tambor metálico.

Nesse processo são necessários alguns equipamentos especiais para aquecer e misturar os resíduos e o termoplástico. Os equipamentos disponíveis no mercado, tais como misturadores e extrusora, podem ser perfeitamente utilizados para esse fim. Além disso, a quantidade de polímero empregada em relação a de resíduo é geralmente muito alta, isto é, de 1:1 ou 1:2 de material fixador para resíduo, em base seca. Dependendo das características do termoplástico e do tipo de equipamento usado, o plástico deve ser misturado no resíduo seco a temperaturas que variam de 130° a 230°C.

Como uma variação desse processo tem-se a utilização de um produto betuminoso emulsificado, que é miscível com o lodo úmido e que é a esse misturado a uma temperatura abaixo da do ponto de ebulição do betume. Posteriormente, toda a massa é aquecida e seca para poder estar em condição de ser disposta. As quantidades de

emulsão e resíduo devem estar nas proporções de 1:1 a 1:1,5 para uma adequada incorporação.

Os produtos químicos orgânicos que atuam como solventes não podem ser usados diretamente nesses sistemas. Assim como, os sais fortemente oxidantes (nitratos, cloretos, percloratos), que reagem com o polímero, causando sua lenta deterioração. Além disso, a mistura termoplástico-oxidante é extremamente inflamável nas elevadas temperaturas em que ocorre o processo.

Através de testes de lixiviação feitos com o produto obtido da impregnação de betume com sais anidros, observa-se que sua reidratação pode ocorrer quando o mesmo é embebido em água.

Tal fato pode causar a dilatação e o rompimento do asfalto ou betume, aumentando bastante a área superficial do material solidificado e a sua taxa de perda de poluentes. Alguns sais, tais como sulfato de sódio, são naturalmente desidratados em determinadas temperaturas, tornando o betume plástico, por isso, compostos facilmente desidratáveis devem ser evitados na estabilização termoplástica.

As principais vantagens dos sistemas à base de termoplásticos são:

- a) as taxas de perda por lixiviação são significativamente menores que as observadas no sistema à base de cimento ou outros materiais pozolânicos;
- b) o volume do produto final é bastante reduzido, uma vez que os resíduos são adicionados a seco;
- c) a maioria dos materiais termoplásticos é resistente ao ataque de soluções aquosas e a degradação microbiana é mínima;
- d) os materiais termoplásticos aderem bem aos materiais incorporados; e
- e) os materiais adicionados aos termoplásticos podem ser recuperados, se necessário.

As desvantagens apresentadas por esse sistema são:

- a) a necessidade de equipamentos sofisticados e técnicos especializados;
- b) o processo não se aplica a materiais que se decompõem a altas temperaturas, especialmente os citratos e certos tipos de plásticos;
- d) a liberação de óleos e odores desagradáveis pode ocorrer durante o aquecimento de algumas misturas, causando uma poluição secundária;
- e) o aumento do consumo de energia, uma vez que o resíduo deve ser misturado a seco, para evitar as perdas por lixiviação;
- f) a incorporação de tetraborado de ferro e sais de alumínio no betume causa um endurecimento prematuro, podendo bloquear e danificar os equipamentos de mistura;
- g) os oxidantes fortes, normalmente, não podem ser misturados com compostos orgânicos sem que ocorram reações de oxidação. Além disso, altas concentrações desses oxidantes nas elevadas temperaturas do processo podem causar fogo;
- h) o custo de transporte e de disposição final é elevado pois, dada a plasticidade da mistura termoplástico-resíduo, faz-se necessária a utilização de containers; e
- i) a reidratação de sais desidratados adicionados ao termoplástico ocorrerá lentamente se a mistura for embebida em água. O sal reidratado expandirá a mistura, aumentando consideravelmente sua área superficial e causando uma fragmentação do bloco de resíduo solidificado.

4.3.3.5. Técnicas à Base de Polímeros Orgânicos

Os processos à base de Uréia Formaldeído, poliéster e butadieno são os mais usuais, notadamente o primeiro. Esses polímeros orgânicos termofixos são obtidos através da adição de um catalisador a um pré-polímero.

No sistema uréia-formaldeído (UF), a polimerização ocorre através de um processo em bateladas, onde os resíduos, secos ou úmidos, são misturados com um pré-polímero em um recipiente ou um misturador especialmente projetado para este fim. A seguir, adiciona-se um catalisador, continuando-se a misturar até que este esteja totalmente disperso. A mistura termina antes que o polímero se forme e, se necessário, é transferida para um container. O material polimerizado não se combina com o resíduo e sim forma uma massa esponjosa que captura as partículas sólidas. Qualquer líquido associado ao resíduo permanecerá após a polimerização e, portanto, a massa polimerizada deve ser seca antes da disposição final.

Um processo à base de ester vinílico-estireno (Binder 101) foi desenvolvido pela Dow Industrial Division, para ser usado com resíduos radioativos.

A Seção de Materiais Poliméricos da Universidade do Estado de Washington desenvolveu um sistema que emprega resinas de poliéster para ser usado na solidificação de resíduos.

As principais vantagens apresentadas por esses processos, especialmente o sistema UF, são :

- a) a necessidade de menores quantidades de reagentes para solidificar resíduos do que os requeridos em outros processos. A relação resíduo/reagente é, normalmente, cerca de 30% maior para o sistema UF do que para os sistemas à base de cimento;
- b) o resíduo tratado é geralmente desidratado, mas não necessariamente seco. Entretanto, o polímero solidificado deve estar seco antes da sua disposição final;
- c) os custos de transporte dos reagentes e produto final são menores, visto que essas resinas são consideravelmente menos densas que o cimento (densidade específica = 1.3) e,
- d) a resina solidificada não é inflamável e para a sua formação não são necessárias altas temperaturas.

As principais desvantagens da técnica de resinas orgânicas, notadamente da UF, são:

- a) a não-reação química entre os poluentes e as resinas. Como as partículas de resíduos são retidas fisicamente no polímero orgânico, caso haja qualquer ruptura ou lixiviação haverá liberação de poluentes;
- b) os catalisadores usados no sistema UF são ácidos fortes e a mistura resíduo - UF deve ser mantida a um pH = 1,5 +/- 0,5 para que a solidificação se dê rapidamente. Caso isto não ocorra, a polimerização será lenta e os resíduos sólidos se depositarão e não serão efetivamente retirados no material fixado. Portanto, é fundamental que o pH seja mantido na faixa citada para que os poluentes fiquem dispersos na solução;
- c) a água que frequentemente está associada ao resíduo e não reage, deve ser evaporada para que se tenha um polímero completamente curado. As misturas de

- resíduos - UF retraem-se com o passar do tempo, podendo liberar água, que pode ser fortemente ácida e pode conter elevados teores de poluentes;
- d) a necessidade de equipamentos especiais de mistura e containers impermeáveis, visto que alguns dos catalisadores usados na polimerização são altamente corrosivos;
 - e) a liberação de fumos, que podem ser perigosos ou degradáveis, mesmo que em baixas concentrações, devido às reações que geram a resina;
 - f) a biodegradabilidade que algumas resinas curadas apresentam, principalmente as dos sistemas UF e,
 - g) os custos de tratamento e transporte são elevados, uma vez que tambores de aço são comumente utilizados para contenção secundária.

4.3.3.6. Técnicas de Encapsulamento Superficial

Quando se emprega esta técnica, os resíduos prensados, aglomerados ou entamborados são revestidos superficialmente, a pincel ou spray, com materiais tais como poliuretanos, resinas de fibra de vidro ou mistura destes. Tais materiais atuam como um selo entre o resíduo e o meio ambiente.

Processos para revestir resíduos industriais solidificados foram testados pelo TRW Corporation. Na maioria dos casos constatou-se que o material de revestimento apresentou falhas devido à falta de adesão entre esse e os resíduos, além de não manter sua integridade ao longo do tempo. Após pesquisar vários processos alternativos de ligação e de revestimento, o TRW Corporation desenvolveu diversos estudos para obter o sistema ótimo de encapsulamento no qual o resíduo precisa estar totalmente seco antes de ser misturado com uma solução de acetona e 1,2 - polibutadieno modificado, durante cinco minutos.

A seguir, deixa-se a mistura endurecer por duas horas. A quantidade ótima de ligante é de 3 a 4% do material fixado em base seca. O material de revestimento é colocado em um molde e submetido a uma leve pressão e aquecido entre 120°C e 200°C para fundir. Sobre o material aglomerado, que é um bloco rijo e resistente, é fundida uma jaqueta de polietileno, de 3,5 mm de espessura, que adere ao ligante de polibutadieno. Para um bloco de 360 a 450 kg, requer-se cerca de 4% do resíduo fundido, em base seca de polietileno.

As maiores vantagens do sistema de encapsulamento são:

- a) o resíduo nunca entra em contato com a água e, por esta razão, materiais muito solúveis, tais como cloreto de sódio, podem ser encapsulados através desta técnica com sucesso e,
- b) a lixiviação de poluentes é eliminada enquanto o revestimento impermeável for mantido intacto.

As maiores desvantagens desse sistema são:

- a) o alto custo da resina utilizada para fixação;
- b) o elevado consumo de energia que o processo requer para a secagem, a fusão do ligante e a formação do revestimento;
- c) riscos de fogo, visto que o polietileno é combustível, com ponto de fulgor de 350°C;
- d) o grande investimento de capital em equipamentos e,

- e) a necessidade de mão-de-obra especializada para operar os equipamentos de moldagem e fusão.

4.3.3.7 Técnicas de Auto-Solidificação

Alguns resíduos industriais, tais como os lodos provenientes de limpeza de gases de exaustão ou dessulfurização, contêm grandes quantidades de sulfito ou sulfeto de cálcio. Assim sendo, essa tecnologia foi desenvolvida para tratar esses tipos de resíduos, a fim de torná-los auto-solidificáveis.

Nesse processo, normalmente, uma pequena porção (8 a 10 % em peso) de lodo de sulfito/sulfato seco é calcinado, sob condições cuidadosamente controladas, para produzir um sulfito/sulfato de cálcio, parcialmente desidratado, com características similares ao cimento. Esse resíduo calcinado é reintroduzido no lodo, juntamente com aditivos patenteados. Frequentemente são adicionadas cinzas para ajustar a umidade. O produto final é um material duro como a argamassa, com boas características de manuseio e baixa permeabilidade.

As maiores vantagens desse sistema são:

- a) os reagentes utilizados em maiores quantidades encontram-se disponíveis no local de tratamento;
- b) os tempos de endurecimento e cura do material são inferiores aos dos sistemas à base de cal;
- c) o material produzido é estável, não inflamável e não biodegradável;
- d) a retenção efetiva de metais pesados, devido, provavelmente, à ligação química dos poluentes potenciais com o material utilizado na solidificação e,
- e) o sistema não requer que o resíduo esteja completamente seco, dadas as reações de hidratação que irão ocorrer.

As maiores desvantagens desse sistema são:

- a) o processo é aplicável apenas para os lodos com altas concentrações de sulfitos ou sulfatos;
- b) os lodos auto-solidificados apresentam as mesmas características de lixiviação dos processos à base de cimento, cal e material pozolânico;
- c) o consumo adicional de energia necessário para calcinar parte do resíduo e,
- d) a necessidade de equipamentos de mistura sofisticados e mão-de-obra especializada.

4.3.3.8 Técnicas de Transformação em Vidro, Produção de Minerais Sintéticos ou Cerâmicos

Esta técnica baseia-se na fusão de resíduos com sílica ou outros materiais para formar vidro, material de silicato ou cerâmica.

Os vidros e os silicatos cristalinos lixiviam muito lentamente sob ação de água, fazendo com que os produtos obtidos através desse processo sejam, geralmente, considerados materiais seguros quanto à disposição final e que não requerem uma contenção secundária. Esses processos aplicam-se a materiais extremamente perigosos e radioativos.

As principais vantagens do processo são:

- a) alto grau de contenção dos resíduos e,
- b) o baixo custo (sienite e cal) dos aditivos utilizados.

As principais desvantagens são:

- a) a evaporação e a dispersão de alguns constituintes, especialmente os metais, antes de se ligarem à sílica derretida, caso o processo ocorra a altas temperaturas;
- b) o alto consumo de energia, uma vez que a mistura resíduo-silicato precisa ser aquecida, frequentemente acima de 1350°C para ser derretida e,
- c) a necessidade de equipamentos sofisticados e mão-de-obra especializada.

4.3.4 Propriedades dos resíduos estabilizados/solidificados

A seleção do mais adequado processo de tratamento requer um conhecimento detalhado dos constituintes e das características do resíduo a ser tratado, da quantidade a ser manuseada, da localização e das características ambientais da área onde o resíduo será disposto.

4.3.4.1 Características do Resíduo a ser Tratado

O primeiro passo para a seleção do processo mais adequado de tratamento é conhecer profundamente os resíduos a serem processados. Deve-se efetuar um inventário complexo de todos os seus constituintes em cada fonte de geração, isto é, para cada tipo de resíduo deve ser identificado o processo ou operação que o gerou, como esse foi transportado, estocado e tratado, qual a quantidade produzida e como se dá essa produção. Tais dados serão também necessários para um plano de disposição final.

Estas informações detalhadas devem incluir os tipos de materiais e concentrações, constituintes orgânicos, solventes, etc. Onde se constatar a presença de materiais orgânicos é essencial se conhecer detalhes sobre sua estabilidade química, ponto de fúgor e poder calorífico.

Os componentes inorgânicos e suas concentrações relativas devem também ser determinados, bem como a porcentagem de metais pesados tóxicos, que, mesmo em pequenas concentrações, são de grande interesse. Para muitos sistemas de tratamento, é de fundamental importância o conhecimento do pH, o efeito tampão e teor de umidade do resíduo.

4.3.4.2 Exigências para uma Estabilização/Solidificação Ideal

Um processo de fixação ideal torna os constituintes perigosos quimicamente não-reativos ou estáveis, de forma a se obter uma disposição final segura, sem qualquer contenção secundária. Para ser completamente eficaz, o processo de tratamento deve gerar um produto final com boa estabilidade dimensional, resistência às intempéries, ao ataque de agentes biológicos e elevada capacidade de suporte.

4.3.4.3 Compatibilidade dos Resíduos, Aditivos e Processos

Como em qualquer operação de manuseio de resíduos perigosos, devem ser tomados cuidados durante os processos de estabilização/ solidificação evitando a mistu-

ra de materiais que possam reagir entre si de forma danosa. O mesmo se aplica aos reagentes ou materiais utilizados no tratamento.

A mistura indevida de resíduos pode provocar a geração de calor, a liberação de materiais tóxicos ou gases inflamáveis e fogo ou explosão.

A Tabela 4.6 sumaria algumas das reações típicas que podem ocorrer durante o manuseio e o tratamento dos resíduos.

Tabela 4.6
Reações Que Ocorrem Entre os Resíduos Incompatíveis

RESÍDUO	RESÍDUO INCOMPATÍVEL	CONSEQUÊNCIA POTENCIAL
BASES: Lama de acetileno Líquidos fortemente alcalinos, Líquidos de limpeza alcalinos, Líquidos alcalinos corrosivos, Fluído alcalino de bateria Águas residuárias alcalinas, Lama de cal e outros álcalis corrosivos, Solução de cal e Soluções cáusticas gastas	ÁCIDOS: Lamas ácidas, Soluções ácidas, Ácidos de bateria, Líquidos de limpeza, Eletrólitos ácidos, Líquidos utilizados para desenho em metais, Componentes de líquidos de limpeza, Banho de decapagem e outros ácidos corrosivos, Ácidos gastos, Mistura de ácidos esgotada e Ácido sulfúrico gasto	Geração de calor, reação violenta
MATERIAIS TÓXICOS : Resíduos de asbestos e outras substâncias tóxicas, Resíduo de berílio, Embalagens vazias de pesticidas não lavadas e Resíduo de pesticidas	MATERIAIS INFLAMÁVEIS : Solventes de limpeza, Explosivos absolutos, Resíduos de petróleo, Resíduos de refinaria Solventes em geral Resíduos de óleo e outros resíduos inflamáveis e explosivos	Liberação de substâncias tóxicas em caso de fogo ou explosão
METAIS REATIVOS: Alumínio Berílio, Cálcio Lítio, Magnésio, Potássio, Sódio, Zinco, em pó e outros metais reativos e hidretos metálicos	ÁCIDOS OU BASES FORTES: Resíduos ácidos ou básicos anteriormente relacionados	Fogo ou explosão, geração de hidrogênio gasoso inflamável
MATERIAIS AQUOSOS : Álcoois e Soluções aquosas	MATERIAIS ANIDRO DE REAÇÃO VIOLENTA: Cálcio, Lítio, Hidretos metálicos Potássio e SO ₂ Cl ₂ , SOCl ₂ , PCl ₃ , CH ₃ SiCl ₃ e outros resíduos reativos com água	Fogo, explosão ou geração de calor, geração de gases inflamáveis ou tóxicos
CIANETOS E SULFETOS: Soluções gastas e cianetos e sulfetos	ÁCIDOS: Resíduos ácidos anteriormente relacionados	Geração de gás cianídrico ou gás sulfídrico

CONTINUA

CONTINUAÇÃO

RESÍDUO	RESÍDUO INCOMPATÍVEL	CONSEQUÊNCIA POTENCIAL
MATERIAIS ORGÂNICOS REATIVOS: Álcoois; Aldeídos Hidrocarbonetos halogenados, Hidrocarbonetos nitrados e outros compostos orgânicos reativos e solventes Hidrocarbonetos insaturados	ÁCIDOS OU BASES FORTES E METAIS REATIVOS Ácidos ou Bases Fortes e Metais Reativos anteriormente relacionados	Fogo, explosão ou reação violenta
OXIDANTES FORTES: Cloratos, e outros oxidantes fortes, Cloro, Cloretos, Ácido crômico, Hipocloritos, Nitratos, Ácido nítrico fumegante, Percloratos, Permanganato e Perióxidos	MATERIAIS REDUTORES: Materiais Inflamáveis Metais Reativos, Materiais Orgânicos reativos e Ácidos Orgânicos	Fogo, explosão ou reação violenta

Fonte: U.S. Environmental Protection Agency, Federal Register Vol.43 n° 243 pág. 59018, USA, december 18, 1978.

Em diversos processos, a formação de produtos não-reativos ou mais estáveis depende da mistura de resíduos que reagem entre si ou destes com reagentes. Portanto, tais processos são muito específicos e exigem um conhecimento exato da natureza e composição dos resíduos. Normalmente esses problemas podem ocorrer em instalações que tratam de diversos tipos de resíduos provenientes de diversas fontes.

Além da incompatibilidade de resíduos entre si, é necessário observar-se a dos resíduos com os materiais de estabilização / solidificação, tanto a curto como a longo prazo. Embora muitas das reações entre resíduos e reagentes utilizados no processo ocorram lentamente, essas podem resultar na aceleração da deterioração do resíduo estabilizado/solidificado e na perda das propriedades de contenção. A Tabela 4.7 indica os principais problemas de incompatibilidade que podem ser encontrados entre resíduos e as diversas técnicas de estabilização/solidificação existentes. Dentre as dificuldades encontradas, a maioria são similares às constatadas em qualquer operação de manuseio de resíduos perigosos. Alguns reagentes solidificantes podem nunca endurecer se os resíduos contiverem materiais inibidores. As reações poliméricas de silicato podem ser retardadas por compostos orgânicos ou concentrações elevadas de certos metais. Os polímeros orgânicos podem ser atacados por solventes, oxidantes fortes ou ácidos fortes, conforme está indicado na Tabela 4.8, e são, também, degradados por radiação ultravioleta (exposição à luz solar).

Em geral, os processos à base de silicatos (cimento, cal e material pozolânico) são mais tolerantes quanto a variações que possam ocorrer nos resíduos.

TABELA 4.7. - COMPATIBILIDADE DE DETERMINADAS CATEGORIAS DE RESÍDUOS COM DIFERENTES TÉCNICAS DE SOLIDIFICAÇÃO/ESTABILIZAÇÃO DE RESÍDUOS

COMPONENTE DO RESÍDUO	TIPO DE TRATAMENTO		
	BASEADO EM CIMENTO	BASEADO EM CAL E MATERIAIS POZOLÂNICOS	SOLIDIFICAÇÃO POR TERMOPLÁSTICO
ORGÂNICOS			
1 - Solventes Orgânicos e Óleos	Muitos impedem o endurecimento, pode ocorrer emissão de vapores.	Muitos impedem o endurecimento, pode ocorrer a emissão de vapores	Orgânicos podem evaporar por aquecimento.
2 - Sólidos Orgânicos (plásticos, resinas, alcatrão)	Boa, freqüentemente, aumenta a durabilidade	Boa, freqüentemente, aumenta a durabilidade	Possibilidade de uso como agentes ligantes
INORGÂNICOS			
1 - Resíduos Ácidos	O cimento neutralizará os ácidos	Compatível	Podem ser neutralizados antes da incorporação
2 - Oxidantes	Compatível	Compatível	Podem causar a ruptura da matriz e fogo
3 - Sulfatos	Podem retardar o endurecimento e causar fragmentação a não ser que se use cimento especial	Compatível	Podem desidratar e reidratar causando fissuramento
4 - Haletos	Facilmente lixiviados do material cimentado. Podem retardar o endurecimento	Podem retardar o endurecimento. A maior parte é facilmente lixiviada	Podem desidratar
5 - Metais Pesados	Compatível	Compatível	Compatível
6 - Materiais Radioativos	Compatível	Compatível	Compatível

(CONTINUA)

(CONTINUAÇÃO)

TABELA 4.7. - COMPATIBILIDADE DE DETERMINADAS CATEGORIAS DE RESÍDUOS COM DIFERENTES TÉCNICAS DE SOLIDIFICAÇÃO/ESTABILIZAÇÃO DE RESÍDUOS

BASEADO EM POLÍMERO ORGÂNICO (UF)	TIPO DE TRATAMENTO		
	ENCAPSULAMENTO SUPERFICIAL	AUTO-CIMENTAÇÃO	FORMAÇÃO DE VIDRO E DE MATERIAS SINTÉTICOS
Podem retardar o endurecimento dos polímeros	Necessitam, primeiramente, serem absorvidos pela matriz sólida	Risco de fogo por aquecimento	Os resíduos decompõem-se à altas temperaturas
Podem retardar o endurecimento dos polímeros	Compatível - muitos materiais de encapsulamento são plásticos	Risco de fogo por aquecimento	Os resíduos decompõem-se a altas temperaturas
Compatível	Podem ser encapsulados antes da incorporação	Podem ser neutralizados formando sais de sulfato	Podem ser neutralizados e incorporados
Podem causar a ruptura da matriz	Podem causar a deterioração dos materiais de encapsulamento	Compatível se houver a presença de sulfatos	Altas temperaturas podem causar reações indesejáveis.
Compatível	Compatível	Compatível	Compatível em muitos casos
Compatível	Compatível	Compatível se houver a presença de sulfatos	Compatível em muitos casos
ph ácido solubiliza os hidróxidos metálicos	Compatível	Compatível se houver a presença de sulfatos	Compatível em muitos casos
Compatível	Compatível	Compatível se houver a presença de sulfatos	Compatível

Tabela 4.8
Resistência Química ao Longo do Tempo de Polímeros Orgânicos (Resinas)
usados em Solidificação

PRODUTO QUÍMICO	RESISTÊNCIA DAS RESINAS		
	POLIETILENO CONVENCIONAL	POLIETILENO LINEAR DE ALTA DENSIDADE	CLORETO DE POLIVINILA
Ácido acético 50%	Excelente	Excelente	Excelente
Ácido crômico	Excelente	Excelente	Excelente
Ácido sulfúrico(conc)	Moderada	Moderada	Não resistente
Benzeno	Fraca	Moderada	Não resistente
Butadieno	Não resistente	Não resistente	Não resistente
Clorofórmio	Fraca	Moderada	Não resistente
Cresol	Fraca	Fraca	Fraca
Diclorobenzeno	Fraca	Fraca	Não resistente
Éter dietílico	Não resistente	Não resistente	Não resistente
Gasolina	Fraca	Moderada	Fraca
Sol. de sais metálicos	Excelente	Excelente	Excelente
Tetracloroeto de carbono	Fraca	Moderada	Moderada
Tricloroetano	Não resistente	Não resistente	Não resistente

Fonte: Adaptado de informações fornecidas por "Nalge Chemical Company"

4.3.4.4 Processos Específicos

Dentro do contexto de solidificação/estabilização descrito anteriormente, foram desenvolvidas internacionalmente diversas técnicas, algumas delas patenteadas.

A Tabela 4.9 apresenta os principais métodos desenvolvidos em diferentes países e informações sobre os tipos de resíduos tratados e os não adequados ao tratamento.

Tabela 4.9
Processos específicos

PROCESSO	DESCRIÇÃO	TIPO DE RESÍDUOS TRATADOS	TIPO DE RESÍDUOS INCOMPATÍVEIS
Chemifix	técnica que se baseia na adição de cimento e silicatos solúveis	- maioria	alguns tipos incluindo determinados compostos orgânicos ou ânions tóxicos.
Sealosafe (Stablex)	técnica que consiste na introdução de dois tipos de aditivos a base de silicatos	- inorgânicos; - orgânicos passíveis de serem incorporados homogeneamente na fase aquosa; - metais pesados inclusive mercúrio, arsênio e asbestos.	oleosos, solventes e graxas.
Actor Radwaste Solidification System	técnica a base de confinamento em alvenaria usando cimento.	os provenientes dos reatores de água das usinas nucleares	lamas que não combinam com o cimento.
Calcilofix	técnica que se baseia na adição de pó de origem inorgânica.	- todos a base de cálcio, provenientes de lavagem de gás SO _x ; - provenientes do processamento de minerais inorgânicos com grandes quantidades de sílica e alumina; - os provenientes do preparo de carvão fino - os provenientes de fábrica de urânio.	- lodos contendo resíduos orgânicos e lamas de esgoto
E.TC Solidification System	técnica que consiste na adição de cal e reagentes adequados.	- ácidos gastos de decapagem; - soluções gastas de galvanização; - lodos do sistema de tratamento de resíduos industriais - lodos provenientes do lavador de gases e lodos orgânicos.	- informação não disponíveis.

CONTINUAÇÃO

PROCESSO	DESCRIÇÃO	TIPO DE RESÍDUOS TRATADOS	TIPO DE RESÍDUOS INCOMPATÍVEIS
Envirotech Corporation	técnica que consiste na adição do cimento e silicato de sódio	- informações não disponíveis	- informações não disponíveis
Poz-O-Tec	técnica que se baseia na adição de cinzas finas e outros aditivos	- lodos provenientes do lavador de gás SO ₂ , os provenientes de processos químicos, de galvanoplastia e de fabricação de aço.	orgânicos (alguns)
Enviroclean	técnica que consiste na adição de cimento Portland ou cal e pozo-lânico, ou cimento e cal, e pozolânicos.	- industriais municipais (alguns).	orgânicos (maioria), e resíduos com menos de 15% de sólidos.
Canadian Waste Technology Inc	técnica baseada na produção de compostos de silicatos estáveis análogos aos materiais geol. naturais.	- industriais inorgânicos - lodos de esgotos das instalações de tratamento primário e secundário.	orgânicos (alguns)
Polymeric Materials Section-Washington State University	técnica que emprega polímero orgânico (resina poliéster).	- radioativos; - inorgânicos com íons metálicos, cianetos ou arsênio; - orgânicos (alguns) e os provenientes de indústria farmacêutica (alguns)	lamas altamente ácidas (especialmente com pH 1,0)
Protective Packaging Inc.	técnica que emprega em polímeros orgânicos	- nucleares	informações não disponíveis.
Terra Crete	técnica que emprega o processo de auto cimentação	- lodos à base de em sulfito/sulfeto - lodos de sulfito de cálcio/sulfato	nenhuma especificação

CONTINUAÇÃO

PROCESSO	DESCRIÇÃO	TIPO DE RESÍDUOS TRATADOS	TIPO DE RESÍDUOS INCOMPATÍVEIS
Terra Tite	técnica que consiste na adição de materiais cimentosos-	- industriais (maioria)	nenhuma especificação
TST - Takenaka Sludge Treatment System	técnica que emprega cimento ou materiais a base de cimento e aditivos especiais	- lamas com teores de água relativamente elevados	com teores gorduras e óleos superiores a 20 % lodo contendo grandes quantidades de resíduos de pintura.
Safe T-Set	técnica à base de adição em polímeros orgânicos.	- lodos radioativos	não testado em outros resíduos industriais.
TRW Systems Group	técnicas baseadas na adição de: a) cimentos inorgânicos: cimento Portland tipo 2, gesso e cal b) resinas poli-butadieno de configurações estéres específicas (1,2 poli-butadieno atático).	- sólidos e lodos (maioria), particularmente aqueles contendo arsênio, mercúrio, selênio, cromo, cádmio e chumbo.	não estipulado
Werner and Pleider Corp	técnica à base de em betume.	- lodos ou sólidos contendo arsênio	lodos contendo oxidantes fortes tais como nitratos cloratos, percloratos e persulfatos

4.3.5 Ensaios para Verificar a Viabilidade da Utilização de Processos de Estabilização/Solidificação de Resíduos Perigosos

Os diversos processos de estabilização/solidificação normalmente necessitam de adaptações para o tratamento de resíduos perigosos. O desenvolvimento dos processos se dá de forma aleatória, uma vez que muitas das reações químicas envolvidas não podem ser antecipadamente previstas. Assim sendo, uma série de ensaios físicos e químicos são realizados para avaliar se um particular processo serve para o tratamento de determinados resíduos perigosos ou não.

Cabe ressaltar que, avaliar as características dos constituintes químicos dos resíduos estabilizados a partir de propriedades físicas é muito mais difícil do que avaliar suas características físicas a longo prazo.

4.3.5.1 Ensaios de Propriedades Físicas dos Resíduos Estabilizados

As propriedades físicas dos resíduos são modificadas pelos processos de estabilização/solidificação. Em muitos casos, o produto final é um bloco sólido semelhante a concreto de baixa resistência, podendo, portanto, ser submetido a ensaios padronizados de propriedades físicas a fim de que se possa prever a sua durabilidade sob as condições de campo. Alguns dos processos produzem um produto friável ou semelhante a solo, que deve ser submetido a testes mais comumente usados para solo-cimento.

Os principais objetivos dos testes físicos para resíduos tratados e não tratados são:

- a) determinar a distribuição granulométrica, porosidade, permeabilidade, densidade aparente e peso específico em base seca;
- b) avaliar as propriedades gerais;
- c) prever a reação do material a tensões aplicadas em aterros; e
- d) avaliar a durabilidade.

Cinco ensaios padronizados têm sido utilizados e são apresentados a seguir, de forma resumida.

a) Peso Unitário aparente e em base seca

O peso unitário aparente é definido como sendo o peso (sólidos mais água) dividido pelo volume total de material, independentemente da quantidade de água.

O peso unitário em base seca é a relação entre o peso seco em estufa e o volume total.

O volume da amostra testada é geralmente calculado através da medição do molde produzido de forma regular.

A temperatura de secagem empregada para obter o peso seco do material deve ser especificada.

Os pesos unitários fornecem informações sobre as relações entre o peso e o volume, o que vem a ser medida da densidade e que indiretamente representa o volume de vazios.

b) Resistência à compressão não confinada

A resistência a compressão não confinada é definida como a máxima tensão de compressão axial que leva o material testado a ruptura ou a 15% de deformação, isto é, o que primeiro ocorrer.

Este ensaio é aplicável somente a materiais aglomerados ou coesivos.

A resistência a compressão é determinada através de uma carga axial a um corpo de provas, que normalmente tem uma forma cilíndrica. Geralmente os resultados são apresentados graficamente, ou seja, resistência a compressão versus deformação.

A resistência ao cisalhamento de um material coesivo é obtido multiplicando-se a resistência a compressão não confinada por 0,5, sendo este um fator importante para a determinação da capacidade máxima de suporte do resíduo tratado, de estabilidade dos aterros constituídos de resíduos solidificados e da pressão aplicada contra as paredes de contenção dos resíduos.

c) Permeabilidade

A permeabilidade é definitiva como a capacidade que o material tem de conduzir ou liberar água quando submetida a um gradiente hidráulico. Esta depende de vários parâmetros tais como: densidade, grau de saturação e distribuição granulométrica.

No caso da determinação da permeabilidade de lodos tratados ou não, de acordo com alguns estudos realizados, são necessários dois tipos de ensaios. Para o lodo no estado natural pode ser utilizado o ensaio de permeabilidade a carga variável e para os lodos fixados pode ser efetuado o ensaio a carga constante modificado, em uma câmara de compressão triaxial com uma contrapressão, que visa garantir uma saturação completa.

A permeabilidade de um material indica a menor ou maior capacidade em permitir a passagem de água e é um fator importante a ser considerado quando da disposição de resíduos, porque influencia na taxa de liberação de poluentes no meio ambiente.

d) Resistência ao umedecimento e à secagem

Este ensaio de durabilidade em condições de saturação e desidratação é realizado para avaliar a resistência das misturas resíduo-aglomerante ao desgaste por intempéries, com relação a umedecimento e secagem.

Os corpos de prova curados são submetidos a 12 ciclos de testes, cada um consistindo de 5 horas de imersão em água e 42 horas de secagem em estufa a baixa temperatura.

Após cada ciclo, os corpos de prova são submetidos, em toda a área superficial, a dois golpes fortes com uma escova de arame de aço.

Os resultados dos testes são, geralmente, expressos pela perda de peso depois de 12 ciclos de umedecimento/secagem ou o número de ciclos que causa uma desintegração da amostra, isto é, o que ocorrer primeiro.

A reprovação dos corpos de prova neste ensaio implica que não se pode esperar que o material ensaiado apresente boas propriedades de contenção ao longo do tempo, para aqueles processos em que o isolamento do resíduo é necessário.

e) Resistência ao Congelamento/Descongelo

Este ensaio é empregado para se avaliar a resistência das misturas de resíduo - aglomerante ao desgaste por intempéries, no que diz respeito a congelamento e descongelamento.

Os corpos de prova curados são submetidos a 12 ciclos de testes, cada um consistindo de congelamento por 24 horas e descongelamento por 23 horas. Posteriormente, toda a área superficial é submetida a dois golpes fortes com uma escova de aço.

O desempenho dos corpos de prova é avaliado pela determinação da perda de peso depois de 12 ciclos ou pelo número de ciclos que causa desintegração, ou seja, o que ocorrer primeiro.

Os corpos de prova reprovados não apresentam resistência ao congelamento/descongelamento, o que quer dizer que, no caso de processos que necessitam do isolamento do resíduo ou redução de sua área superficial, o material deve ser protegido de geadas para uma boa contenção.

A Tabela 4.10 sumaria alguns resultados de ensaios físicos de resíduos industriais estabilizados e não tratados.

Os dados apresentados mostram que os processos de estabilização geralmente aumentam a densidade e a resistência dos resíduos e diminuem a permeabilidade dos

Tabela 4.10
Resultados Característicos de Ensaio Físicos de Resíduos
não Tratados e Estabilizados

TABELA 4.10 - RESULTADOS CARACTERÍSTICOS DE ENSAIOS FÍSICOS DE RESÍDUOS NÃO TRATADOS E ESTABILIZADOS

TIPO DE RESÍDUO E TRATAMENTO	PESO UNITÁRIO		RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO NÃO CONFUNDIDA (kg/cm ²)	PERMEABILIDADE (cm/seg)	DURABILIDADE/CICLOS DE TESTES À RUPTURA	
	APARENTE (kg/m ³)	EM BASE SECA (kg/m ³)			UMEDECIMENTO/ SECAGEM	CONGELAMENTO/ DESCONGELAMENTO
Resíduo de bateria de cádmio e níquel						
. Não tratado	-	703,2	-	5,7 x 10 ⁻⁶	-	-
. Produto pozolânico baseado em cal	1.665,9	1.380,8	11,9	1,9 x 10 ⁻⁶	9	-
. Material semelhante a solo, com aditivos patenteados	1.492,9	757,7	0,5	1,9 x 10 ⁻⁴	1	1
Resíduo de produção de cloro						
. Não tratado	-	1.025,2	-	1,0 x 10 ⁻⁴	-	-
. Produto pozolânico baseado em cal	1.649,9	1.419,2	9,3	8,5 x 10 ⁻⁷	-	-
. Material semelhante a solo com aditivos patenteados	1.697,9	1.302,3	1,5	3,6 x 10 ⁻⁵	2	1
Resíduo de fluoreto de cálcio						
. Não tratado	-	749,6	-	3,5 x 10 ⁻⁵	-	-
. Produto pozolânico baseado em cal	1.376,0	1.066,8	1,8	3,8 x 10 ⁻⁵	1	1
. Material semelhante a solo com aditivos patenteados	1.380,8	845,8	1,8	8,7 x 10 ⁻⁶	1	2
Resíduo de Eletro galvanização						
. Não tratado	-	450,1	-	3,1 x 10 ⁻⁵	-	-
. Produto pozolânico baseado em cal	1.601,8	1.239,8	5,4	4,0 x 10 ⁻⁷	5	-
. Material semelhante a solo com aditivos patenteados	1.395,2	759,3	2,3	1,1 x 10 ⁻⁵	2	-
. Material semelhante a borracha, com resina orgânica	1.207,8	844,2	52,5	1,1 x 10 ⁻⁴	1	12
. Encapsulamento plástico	1.178,9	1.178,9	108,3	impermeável (1)	NR (0,00) (2)	NR (0,00) (2)
Resíduo de limpeza de gás de exaustão						
. Não tratado	-	841,9	-	3,6 x 10 ⁻⁵	-	-
. Produto pozolânico baseado em cal	1.601,8	1.295,9	7,0	2,0 x 10 ⁻⁶	3	2
. Material semelhante a solo, com aditivos patenteados	1.233,4	695,2	1,7	1,6 x 10 ⁻⁴	1	1
. Produto semelhante a concreto, baseado em cimento	1.617,8	1.520,1	180,7	7,9 x 10 ⁻⁴	NR (15,80) (2)	10

OBS.: - Não testado

- (1) Valor questionável porque a restrição de fluxo causada pelo suporte da amostra pode ter influenciado o fluxo através da amostra.
- (2) NR indica que não houve ruptura em 12 ciclos; os números em parênteses representam a porcentagem de perda de peso depois de 12 ciclos.

FONTE: "Encapsulamento de Resíduos Perigosos" — CETESB, São Paulo, 1978

mesmos. Para muitas das amostras tratadas não foram mencionados dados referentes a durabilidade. Observando-se esses dados, verifica-se que os processos de tratamento não geram produtos com propriedades físicas similares.

Os produtos obtidos quando se utilizam as técnicas a base de cal são similares a concreto de baixa resistência, com elevados pesos aparentes e, mesmo em base seca, a resistência a compressão é relativamente alta, enquanto que a permeabilidade é baixa. Apresenta também essas propriedades o produto semelhante a concreto obtido através do processo a base de cimento, sendo elevada a sua resistência a compressão. Por outro lado, os produtos semelhantes ao solo tem uma permeabilidade maior e uma resistência comparável a dos solos naturais.

Se o objetivo dos processos de tratamento for o isolamento dos constituintes do resíduo em um bloco monolítico sólido, a resistência e a impermeabilidade são fatores importantes. Espera-se que um produto impermeável e denso perca poucos poluentes para o meio ambiente, devido a redução da área superficial do resíduo que está exposta ao processo de lixiviação.

Os blocos solidificados precisam ser praticamente impermeáveis para apresentar uma contenção efetiva, isto porque, mesmo pequenos volumes de água movendo-se através do material carrearão quantidades apreciáveis de contaminantes.

Se a diferença entre o peso unitário aparente e o peso unitário em base seca for grande, isto indica que há uma grande quantidade de poros (vazios), o que permite uma alta permeabilidade e / ou difusão relativamente rápida dos materiais no interior da massa solidificada.

Um encapsulamento plástico (ver resíduo de eletro galvanização na Tabela 4.10) apresenta um ótimo resultado, produzindo um material impermeável. Este revestimento obstrui a passagem de água através do mesmo, de maneira que os pesos unitário aparente e em base seca são idênticos e a permeabilidade é extremamente baixa, isto é, o bloco é praticamente impermeável. Enquanto o revestimento permanecer intacto é possível que ocorra uma difusão muito pequena de material ou fluxo através do produto.

Nos processos onde são empregados aditivos patenteados para produzir um material semelhante ao solo, a estabilização pode ocorrer através de diferentes métodos. Em geral, o pH é ajustado em uma faixa pré-selecionada, sendo então adicionado o aditivo (silicato de sódio) que fixa os constituintes inorgânicos do resíduo de maneira que estes fiquem seguros na matriz resíduo-aglomerante. O produto final é semelhante a solo, com uma grande diferença entre os pesos unitários aparente e em base seca (devido a grande quantidade de poros), baixa resistência e permeabilidade relativamente alta. Para que a contenção de poluentes seja segura, devem ser avaliados alguns fatores intervenientes tais como precipitação e adsorção.

Existem evidências de que em qualquer sistema de tratamento, o isolamento físico ou a imobilização química, podem ser eficazes para contaminantes específicos. Isoladamente, as propriedades físicas não são suficientes para prever se um processo de tratamento qualquer tem ou não capacidade de reter um determinado tipo de poluente. Para que tais propriedades tenham alguma valia, é necessário conhecer-se em detalhes o método de contenção utilizado em um processo específico, bem como o de contenção do resíduo tratado.

f) Outros ensaios de propriedades físicas

Existem outros ensaios que podem ser usados para determinar se um processo de tratamento é adequado para os resíduos cujas propriedades são diferentes ou não usuais ou para aplicações especiais do material tratado.

• Ensaios de Solo

Dentre os ensaios adicionais de solo que podem ser úteis nas circunstâncias mencionadas tem-se: compactação, limite de Atterberg, compressão triaxial e capacidade de suporte.

Os ensaios de compactação são utilizados para determinar o peso unitário máximo ou o mínimo índice de vazios que pode ser obtido para um material semelhante ao solo, sendo geralmente empregados para avaliar se a disposição de resíduos tratados onde está previsto a execução de construções é viável.

Os testes de limites de Atterberg são usados para determinar o teor de umidade no qual o solo atinge o seu limite de liquidez ou o seu limite de plasticidade. Esses ensaios são aplicáveis somente a materiais coesivos de granulação fina. O teor de umidade é empregado para estimar propriedades como compressibilidade, características de dilatação e de resistência, que fornecem uma indicação de como o material reagirá quando solicitado.

Os ensaios de compressão triaxial são usados para determinar a resistência ao cisalhamento dos materiais semelhantes ao solo, sob condições de drenagem controlada. A resistência ao cisalhamento dá uma indicação da capacidade de suporte do material e da estabilidade de aterros construídos com esse material.

Os testes de capacidade de suporte fornecem dados relativos ao endurecimento da estrutura com relação a aplicação de cargas no material que está sendo testado.

As determinações de resistência devem incluir uma série de corpos vibrados, visto que algumas amostras de resíduos que aparentam ser sólidas e estáveis podem liquefazer se forem vibradas.

Outro tipo de ensaio de solo que não é usual, mas que tem aplicação para aterro de resíduos ou lodos tratados é o teste de traficabilidade. A disposição de grandes quantidades de resíduos requer o uso de veículos para movimentar e dispor o material. Portanto é importante saber que tipo de veículo pode ser usado na disposição do material e qual o período de cura necessário para permitir o tráfego sobre o mesmo. Tais informações podem ser obtidas através da execução de ensaios de penetração cônica e dos outros testes de solo já comentados. Para completar as avaliações, deve-se obter, junto aos fabricantes de equipamentos de terraplenagem, informações específicas sobre cada tipo de equipamento

• Ensaios de Concreto

Dos testes de concreto que são aplicáveis a misturas de solo-cimento, um que, em particular, pode ser útil na avaliação de resíduos estabilizados para uso comercial, é o ensaio de resistência versus tempo de cura. Neste ensaio é feita uma determinação similar a do teste de resistência a compressão não confinada da mistura curada de resíduo-cimento. Estes são realizados diariamente até que a resistência máxima seja alcançada.

Os ensaios de resistência versus tempo de cura são úteis na determinação do tempo de cura necessário para que o material depois de disposto possa receber, de forma segura, a aplicação de cargas.

Os ensaios de dilatação do tipo usado para concreto também são adequados para resíduos tratados, tendo em vista os problemas observados em relação às reações de sulfatos em lodos estabilizados. Nos ensaios padronizados pela ASTM empregam-se uma solução de sulfato, que no caso de resíduos tratados pode ser substituída por água

destilada. Alterações significativas ou perdas de resistência e aumento de volume indicam que a mistura resíduo-aglomerante não foi adequada.

Os ensaios descritos neste item só se justificam a resíduos estabilizados/solidificados que serão empregados em aplicações especiais, dado os custos que esses acarretam.

4.3.5.2 Ensaios de Lixiviação dos Resíduos Estabilizados

Os ensaios de lixiviação são utilizados para determinar ou avaliar a estabilidade química dos resíduos tratados, quando em contato com soluções aquosas que podem ser encontradas em um aterro, permitindo assim verificar o grau de imobilização dos contaminantes. Encontram-se disponíveis diversas técnicas de ensaios de lixiviação, mas nenhuma delas é capaz de reproduzir, isoladamente, todas as condições variáveis que se observam nos aterros.

A maioria dos testes é realizada em temperaturas que variam entre 20° e 25°C e a pressões normais. As principais variáveis estudadas nesses ensaios são:

- natureza da solução de lixiviação;
- relação do resíduo para a solução de lixiviação;
- número de eluições da solução de lixiviação usado;
- tempo de contato do resíduo com a solução de lixiviação;
- área superficial do resíduo e,
- técnica de agitação empregada.

a) Natureza da Solução de Lixiviação

A solução de lixiviação empregada em qualquer ensaio deve assemelhar-se ao fluido real que estará em contato com os resíduos no meio ambiente.

Entretanto, não existe um meio de se desenvolver uma solução única, representativa de todas as variáveis, tais como: pH, potencial de oxidação-redução, presença de agentes quelantes ou complexos e outros.

A tendência geral é usar uma solução de lixiviação agressiva, com baixo pH e baixo potencial de oxi-redução, para simular a pior situação do meio de um aterro. Baseando-se no fato de que as precipitações naturais e as águas do solo (que contém CO₂) são levemente ácidas, usualmente empregam-se soluções fracamente ácidas, tais como ácido carbônico (CO₂ - água saturada) ou ácido acético.

Soluções tampão a base de acetado vêm sendo empregadas para avaliar a presença de traços de metais em solos usados para a agricultura, como por exemplo a solução Morgam, que é constituída de ácido acético e acetato de sódio. Na medida em que as soluções levemente ácidas refletem um aumento de solubilidade na água de chuva ou na água do solo, estas apresentam-se como o melhor meio de lixiviação. O pH das águas subterrâneas em um aterro (especialmente nos aterros contendo somente resíduos industriais solidificados) não deve nunca atingir o baixo pH observado nas soluções a base de ácido acético, mas o crescimento de raízes de plantas no interior do aterro pode reduzir o pH na sua vizinhança a níveis similares aos observados nas soluções de ácido acético e soluções tampão de acetato.

b) Relação Resíduo/Solução de Lixiviação

A determinação da relação entre a quantidade de resíduo e a quantidade de solução de lixiviação é de fundamental importância, uma vez que após a disposição final

o resíduo pode estar em contato com uma grande quantidade desta solução (água de chuva, lençol freático etc).

A solubilidade de certos constituintes químicos pode ser reduzida pelos efeitos de íons comuns quando a relação resíduo/solução de lixiviação é muito grande, ou seja, 1:1 ou 1:2.

Na maioria dos casos, as restrições práticas dos ensaios exigem que seja utilizado um volume suficientemente grande de solução de lixiviação, para que as análises possam ser efetuadas com o rigor e a segurança necessários, de forma a garantir a saúde das pessoas que executam esse trabalho. Assim sendo, se for preciso detectar o teor de um composto orgânico em ppb (partes por bilhão), vários litros de lixiviado serão necessários para a realização do ensaio.

A disponibilidade de grandes volumes de lixiviado é particularmente importante quando do desenvolvimento de estudos, pois permite que os testes sejam realizados em duplicata ou triplicata.

c) Número de Eluições das Soluções de Lixiviação Usadas

Os testes de lixiviação, na sua maioria, consideram que as amostras iniciais do lixiviado produzido contém as máximas concentrações dos contaminantes potenciais que serão observados no decorrer do ensaio. Isto se deve ao fato de que, no início, as amostras apresentam as concentrações mais elevadas de contaminantes solúveis presentes na superfície do resíduo tratado. Durante a primeira eluição, tem-se também a presença da máxima quantidade de material sólido de granulação fina, dada a sua maior solubilidade em função do tamanho das partículas.

d) Área Superficial do Resíduo

A área superficial do resíduo tratado exposta à solução de lixiviação, em um sistema ideal de ensaio, seria a mesma que em um aterro.

No caso de um material denso impermeável, esta área superficial pode ser apenas igual a da superfície de contorno de um bloco monolítico. Em compensação, para os materiais pulverulentos ou lamas, a área superficial pode ser cem ou mil vezes maior do que a da superfície de contorno.

Um dos objetivos de muitos processos de estabilização/solidificação de resíduos é produzir um bloco com uma área superficial mínima através da qual a perda de poluentes possa ocorrer. O emprego de técnicas de ensaio onde os resíduos são triturados até transformarem-se em pó destrói muitas das vantagens criadas pela solidificação efetuada por esses processos. Entretanto, alguns deles são projetados para conter o resíduo, mesmo após a sua pulverização. Portanto, essas técnicas permitem avaliar a perda de poluentes na pior situação, ou seja, a massa monolítica totalmente danificada.

Desta forma, seria importante testar o comportamento de um resíduo solidificado através de ensaios de impacto e usar como corpos de prova um bloco inteiro e um bloco fragmentado.

A vantagem deste procedimento é permitir que um material, que normalmente não seria aterrado em fragmentos, seja testado com uma configuração tal que a área de perda de contaminantes seja mínima.

As principais desvantagens de tal sistema: em relação aos ensaios físicos e químicos são:

- a tensão exata de ruptura do corpo de prova não pode ser determinada com precisão para todos os casos, pois não se consegue determinar com exatidão a que pressões os resíduos estarão sujeitos durante seu aterramento e compactação;
- a área superficial do corpo de prova não pode ser definida com exatidão depois que o mesmo tenha sido fragmentado. Isto é importante caso a taxa de transferência do contaminante por unidade de superfície de área deva ser considerada;
- os ensaios de umidecimento/secagem e congelamento/descongelamento mostram uma rápida desintegração de muitos resíduos tratados. Em muitos casos, esta fragmentação pode ser mais completa que uma simples fissura do corpo de provas no aparelho de ensaio de impacto e,
- a variação de formas, posições e extensões das fraturas dos moldes entre corpos de prova de um mesmo resíduo introduz outro nível de incerteza nos testes e reduz a repetibilidade dos mesmos.

e) Agitação

A agitação das amostras de solução de lixiviação durante os testes de lixiviação tem sido defendida como a maneira de permitir que um equilíbrio mais rápido ocorra entre a amostra e a solução de lixiviação. Entretanto, não existe nada na natureza que permita estabelecer tal analogia. Na maioria dos casos onde os resíduos são aterrados, a água ou lixiviado em contato com o resíduo está estacionário ou com um fluxo muito lento. Assim sendo, as características de difusibilidade são de importância primordial.

A principal objeção à agitação ou mistura do lixiviado e dos resíduos solidificados é que a mistura ou agitação poderia triturar os corpos de prova em pequenos pedaços, aumentando, em consequência disso, a área superficial exposta à solução de lixiviação e invalidando o teste.

4.3.6 Efeitos de Ataque Biológico nos Resíduos Tratados

O ataque biológico nos resíduos perigosos e tóxicos tratados pode ocorrer pela utilização direta de algum material de solidificação, tal como a uréia-formaldeído, como um substrato para o crescimento de bactérias, ou pela produção biológica de materiais ácidos que possam atacar e solubilizar os resíduos fixados.

Existem outras reações que podem afetar, indiretamente, os resíduos tratados. Como exemplo, tem-se resíduos contendo sulfetos metálicos tratados pelo processo a base de cimento, onde os sulfetos podem se oxidar a sulfatos e produzir ácido sulfúrico, que pode atacar e dissolver o concreto. Este tipo de reação ocorre durante a oxidação da pirita e de sulfetos de ferro amorfos, na presença oxigênio, o que em geral se dá no topo da zona saturada de aterros ricos em sulfetos ou em resíduos amontoados.

As raízes de plantas se constituem em outra fonte de ácidos que pode ressolubilizar os resíduos. Normalmente, essas descarregam dióxido de carbono nas águas circunvizinhas e geram um ácido fraco (ácido carbônico), que é capaz de colocar muitos metais tóxicos em solução. Os ácidos orgânicos liberados pelo apodrecimento de raízes podem, também, causar corrosão de alguns materiais, particularmente aqueles solidificados por processos a base de cimento ou cal.

4.3.7 Efeitos dos Processos de Cura e Envelhecimento no Material Tratado

Os processos de cura e envelhecimento afetam vários resíduos tratados de diversas maneiras. Alguns materiais poliméricos aumentam a sua ligação durante a cura

e tornam-se mais resistentes e menos propensos a lixiviação. Entretanto, com outros polímeros, onde o resíduo não faz parte integrante da mistura, pode ocorrer a separação das fases aquosa e sólida. Isto pode ser observado quando se compara os processos a base de cimento e o processo uréia-formaldeído.

Para os processos a base de cimento, a lixiviação é menor quando as amostras são curadas por mais de 100 dias. As condições de cura são também importantes, isto é, os corpos de prova curados sob condições de umidade, onde a polimerização seria acelerada, são menos lixiviáveis que as amostras que foram deixadas a seco durante a cura.

Por outro lado, a solidificação com uréia-formaldeído resulta na formação de água que não se liga à estrutura do polímero. O envelhecimento deste material provoca sua retração e produz excesso de água.

Outros processos de tratamento que envolvem betume podem também apresentar efeitos decorrentes da cura e do envelhecimento dos materiais, mas não se encontram dados disponíveis para se avaliar se esses efeitos são prejudiciais às propriedades de contenção do material solidificado.

Os efeitos do envelhecimento são particularmente críticos para os sistemas que utilizam um revestimento superficial com polímero. Se o isolamento depender da integridade de um revestimento com polímero orgânico ou polietileno, qualquer falha ou fissura comprometerá seriamente a contenção dos resíduos.

4.3.8 Considerações Econômicas

Considerando-se que todos os resíduos a serem dispostos não possuem nenhum valor comercial, todos os custos envolvidos nos processos de estabilização/solidificação representam despesas adicionais que devem ser repassadas ao custo do produto final ou do serviço prestado. Portanto uma completa análise econômica deve considerar os custos de transporte, equipamentos e materiais necessários para a estabilização/solidificação, mão-de-obra especializada, taxas e royalties para o uso de processos patenteados, custos de transporte e disposição final dos resíduos tratados etc. A Figura 4.27 mostra todas as variáveis que devem ser consideradas quando se pretende optar pela estabilização/solidificação de resíduos.

Tal análise deve ser feita caso a caso, entretanto para se ter uma noção grosseira da viabilidade dos diferentes processos de tratamento, no presente e futuro, é possível restringir as considerações econômicas para os custos presentes e projetados dos materiais, equipamentos e energia.

Para a maioria dos sistemas, o custo de materiais tem-se mostrado o mais significativo de todos.

A Tabela 4.11 sumaria dados relativos aos custos dos processos de estabilização/solidificação.

Figura 4.27 — Fluxograma de Avaliação do Processo de Estabilização/ Solidificação

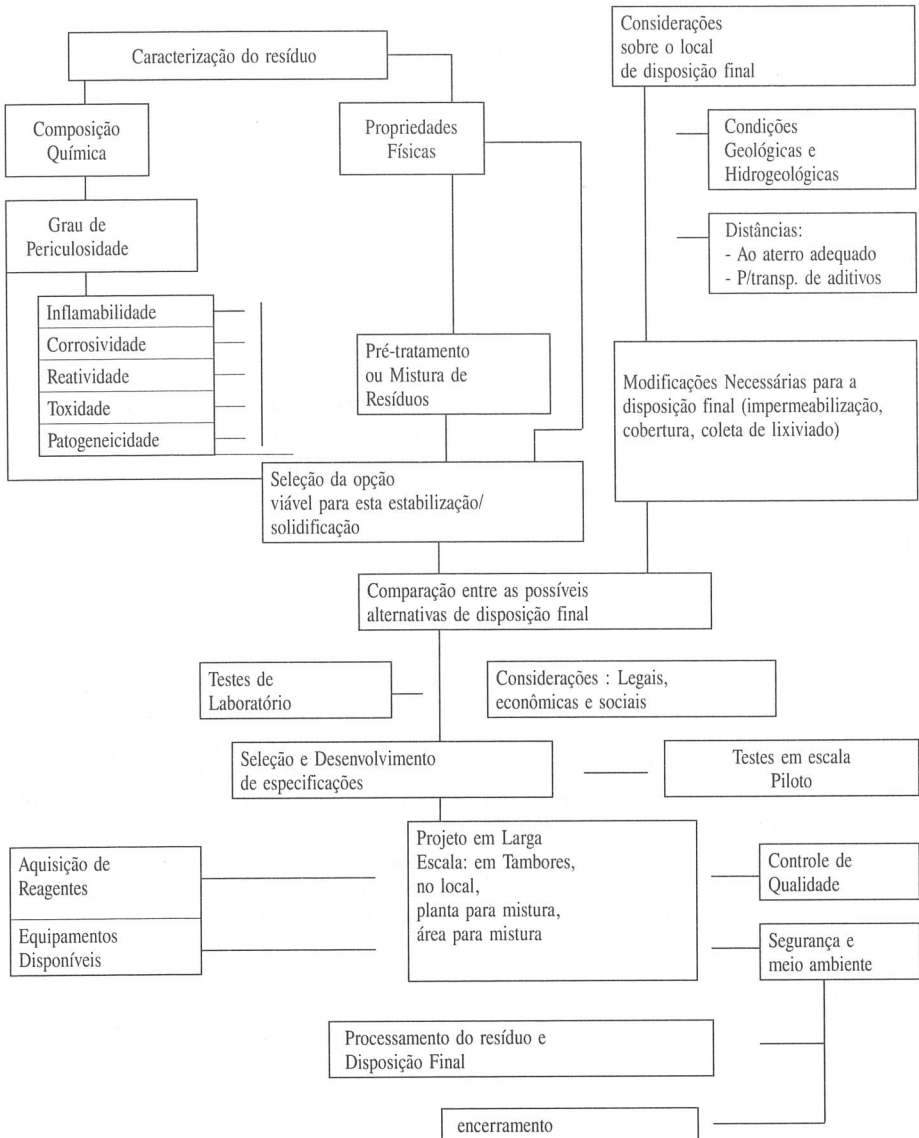


Tabela 4.11
Considerações Econômicas para os Processos de Estabilização/ Solidificação

tipo de processo	materiais utilizados	custo unitário dos materiais (1980)	quantidade de material requerida p/ tratar 100 Kg de resíduos	custo de material requerido p/ tratar 1,00 Kg de resíduo	preços de mercado	custo de equipamentos	custo de energia
à base de cimento	Cimento Portland	US 0,07/Kg	100 Kg	US 6,62	estável	baixo	baixo
à base de Cal e Materiais Pozolânicos	Cal e materiais Pozolânicos	US 0,07/Kg	100 Kg	US 6,62	estável	baixo	baixo
Termoplásticos	Betume e Tambores	US 0,11/Kg US 27/tambor	100 Kg 1,8 tambor	US 41,00	o seu preço sobe com o preço do petróleo	muito alto	alto
Polímeros Orgânicos	Poliéster Catalisador tambores	US 0,99/Kg US 2,45/Kg US 17/tambor	43 Kg de poliéster - misturado com catalisador	US 61,00	pode subir rapidamente com a falta de petróleo	muito alto	alto
Encapsulamento Superficial	Polietileno	varia	varia	US 9,92 *	pode subir rapidamente com a falta de petróleo	muito alto	alto
Auto-Solidificação	Gesso (do próprio resíduo)	**	22,05 Kg	**	estável	moderado	moderado
Transformação em vidro e materiais sintéticos	Fedspato	US 0,07/Kg	varia	-	estável	alto	muito alto

*Nota : * Baseado no custo total de US 91/t*

*** Desprezível, mas os custos de energia para calcinação são apreciáveis*

Fonte: Landreth, Robert E. (1982). Guide to Disposal Chemically Stabilized Solidified Waste. USEPA, Cincinnati, Ohio, USA.

4.4 SISTEMAS LANDFARMING DE TRATAMENTO DE RESÍDUOS

4.4.1. Introdução

Sistemas “landfarming” são sistemas de tratamento de resíduos que, através das propriedades físicas e químicas do solo, e da intensa atividade microbiana existente neste meio, promovem a biodegradação, a destoxificação, a transformação e a imobilização dos constituintes dos resíduos tratados, minimizando os riscos de contaminação ambiental. Em português, como não se dispõe de um termo que seja específico, tem-se utilizado a denominação Sistemas de Tratamento de Resíduos no Solo (STRS).

O que caracteriza este sistema é que o torna bastante atraente são os baixos custos de implantação e operação envolvidos e por possibilitar o tratamento e disposição final simultânea de uma ampla variedade de resíduos, inclusive líquidos e resíduos perigosos (Classe I). Além do mais, não prevê a utilização de impermeabilizações com camadas de argila ou mantas sintéticas ou a implantação de sistemas de coleta de líquidos percolados.

O tratamento de resíduos nestes sistemas é feito através da aplicação controlada dos resíduos na superfície ou no interior do horizonte superficial do solo, acompanhada por práticas de manejo e monitoramento constantes, que possibilitem a alteração do estado físico, químico e biológico dos resíduos através dos processos de transformação e degradação que ocorrem no solo, sem que sejam causados danos ao ambiente.

A Agência de Proteção Ambiental Americana (EPA, 1983) destaca os seguintes aspectos positivos da adoção de sistemas de tratamento de resíduos no solo:

- a curto prazo os resíduos mantêm-se na superfície, o que possibilita correções de qualquer problema constatado;
- a longo prazo a manutenção é pequena já que os compostos orgânicos devem ser biodegradáveis e o acúmulo de metais se restringe à superfície;
- muitos resíduos são passíveis de serem tratados a relativo baixo custo de implantação e operação, inclusive resíduos perigosos.

Em nosso país ainda é recente a história deste sistema, tendo início no final dos anos 70 através do tratamento de resíduos oleosos em refinarias de petróleo. Atualmente, indústrias de diferentes atividades têm por ele optado, como as indústrias químicas, têxteis, alimentícias, farmacêuticas e centrais de tratamento de efluentes.

Contudo, ao lado do incremento de unidades de STRS, os dados disponíveis relativos ao desempenho destes sistemas ainda são escassos, não possibilitando uma avaliação mais conclusiva sobre as condições operacionais em uso e seus efeitos sobre o ambiente.

Têm-se constatado, entretanto, a tendência de adoção de baixos níveis de manejo e algumas falhas operacionais que aproximam o sistema de tratamento a um sistema inadequado de disposição final de resíduos, como taxas de aplicação excessivas e ausência de sistemas de monitoramento.

Neste capítulo serão apresentados alguns princípios básicos a serem considerados na condução de um sistema de tratamento de resíduos industriais no solo tais como: seleção de locais, projeto, operação e manejo, monitoramento e fechamento das unidades.

4.4.2. Critérios para Seleção de Local

A seleção de locais para sistemas de tratamento de resíduos no solo deve ser realizada de forma a garantir a eficiência do sistema na tratabilidade dos resíduos, possibilitando, ao mesmo tempo, uma efetiva proteção ao ambiente, resguardando a população de qualquer risco advindo da operação do sistema.

Embora constitua-se num processo complexo e multidisciplinar, onde cada situação apresenta especificidades, algumas considerações básicas podem ser consideradas na seleção de locais para STRS.

Informações a respeito das características e quantidades dos resíduos a serem tratados, bem como o comportamento de seus constituintes no ambiente, devem ser levantadas. Tais informações tornam-se necessárias para definir-se a extensão da área necessária, bem como verificar a possibilidade de tratamento do resíduo nas condições climáticas e do meio físico disponível. Em relação ao local selecionado, este deve possuir características específicas que o qualifiquem como adequado e seguro.

Desta forma, áreas sob restrições legais tais como APAs (Áreas de Proteção Ambiental), APMs (Áreas de Proteção de Mananciais), áreas urbanas, ou áreas que apresentem restrições sociais, políticas e econômicas, não devem ser utilizadas.

Quanto aos fatores geológicos e hidrogeológicos, devem ser evitados locais que apresentem as seguintes características: litologia muito permeável, zonas de falha ou de fratura, aquíferos cársticos, formações geológicas cársticas, aquíferos importantes para abastecimento de água, áreas de zona de recarga de aquíferos, afloramento de rocha com o perfil do solo pouco desenvolvido e nível d'água subterrânea elevado.

Também devem ser evitadas áreas próximas de fontes de abastecimento de águas superficiais ou subterrâneas, locais pantanosos, locais suscetíveis à erosão, com declividade superior a 5%, com direção predominante dos ventos em relação aos núcleos urbanos e elevado índice pluviométrico.

Considerados estes aspectos que descredenciam uma área como viável para a implantação de sistemas de tratamento de resíduos no solo, os locais anteriormente selecionados deverão ser avaliados detalhadamente em suas características pedológicas, geológicas e hidrogeológicas. Desta maneira os solos deverão ser identificados até o nível de série, com coleta de amostras em todos os horizontes onde devem ser caracterizadas as seguintes propriedades: espessura dos horizontes, granulometria, permeabilidade, porosidade, capacidade de retenção de água, pH, capacidade de troca de cátions (CTC) e fertilidade.

Tais informações serão necessárias no estabelecimento das práticas operacionais a serem adotadas na condução do STRS, sendo fundamentais para garantir ao mesmo eficiência e baixo risco de poluição ambiental.

Na caracterização geológica amostras devem ser coletadas para identificar a litologia e a presença de sedimentos não consolidados, como também sua distribuição espacial. As falhas e as fraturas deverão ser localizadas através de métodos geofísicos, amostras indeformadas de solo ou interpretação de fotografias aéreas. Hidrogeologicamente deverão ser determinadas a variação sazonal do nível d'água subterrânea, a direção do seu fluxo e sua velocidade, o que orientará na implantação de um sistema de monitoramento adequado.

O quadro 4.12 apresenta alguns valores limites recomendados que podem ser considerados para a seleção de locais para STRS.

Quadro 4.12

Valores recomendados para algumas propriedades do solo, geologia e hidrogeologia em um STRS*

Parâmetros	Limites	Valores Ideais
pH	>5.5	7.0
CTC (meq/100g)	>5.0	25.0
Conductividade Hidráulica (cm/s)	>10	10 a 10
(para a camada reativa)	<10	
Umidade (% da capac. de campo)	>30	50 a 70
	<80	
Profundidade (m)	>1.5	> 5
Prof. do lençol freático	>3.0	> 25
Textura do solo	arenoso, argiloso	barro argilo arenoso

Fonte: Adaptado a partir de Fuller (1986).

4.4.3. Projeto

O projeto de uma unidade de STRS deve ser desenvolvido utilizando-se informações básicas das características do local e do resíduo a ser tratado, assim como em normas existentes que disciplinem o emprego deste sistema.

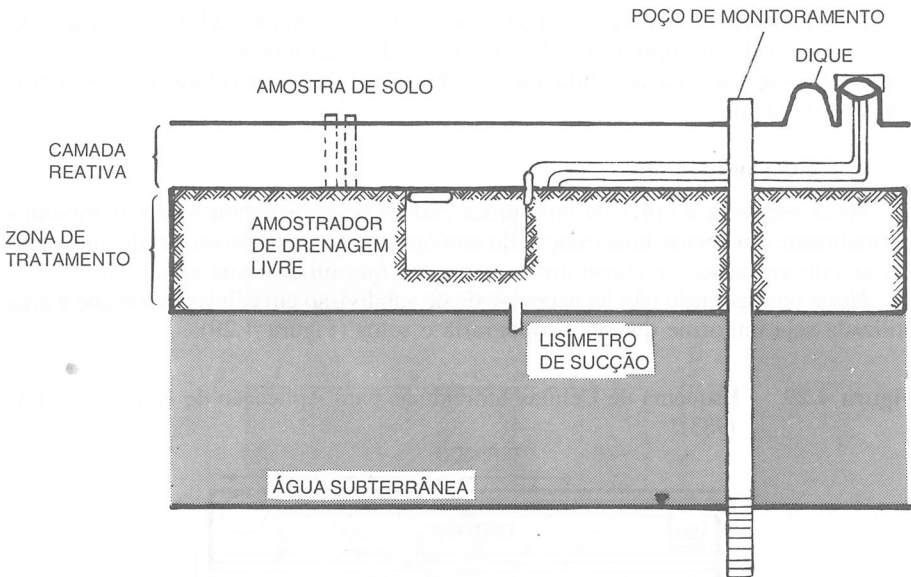
No que se refere às regulamentações, no Estado de São Paulo, por exemplo, a norma L10-101 (CETESB, 1988) define um STRS como sendo composto por uma camada reativa com 50cm de espessura e uma zona de tratamento com 150cm a partir da superfície a qual inclui a primeira (Figura 4.28). Os principais processos de degradação e imobilização dos constituintes dos resíduos ocorrerão na camada reativa, sendo a camada subjacente responsável pela minimização dos riscos de fuga destes poluentes para o ambiente.

Em geral a saída dos constituintes dos resíduos abaixo da zona de tratamento não deve ser admitida se alterar significativamente os valores naturais do meio em questão.

4.4.3.1. Sistema de controle de água

A água é o principal veículo de transporte de poluentes em um STRS, devendo ser controlada de forma bastante criteriosa. Através da água os constituintes perigosos podem ser solubilizados e transportados através do perfil do solo até atingir as águas subterrâneas, ou transportados pelas águas de escoamento superficial para fora do sistema, atingindo cursos d'água de superfície. Outro fator a ser considerado refere-se aos riscos de erosão que pode ser causada em áreas mais suscetíveis.

Desta forma, em locais onde a umidade do solo não seja um fator limitante para a atividade microbiana, deve-se procurar a manutenção de níveis apropriados de umidade no solo, o que implica evitar a entrada das águas de escoamento superficial provenientes de fora das unidades de tratamento. Isto pode ser conseguido pela implantação de estruturas de contenção como diques e/ou terraços. Para o dimensionamento destas estruturas, como medida de segurança, recomenda-se tomar por base

Figura 4.28- Perfil Esquemático de um STRT

chuvas de pico com recorrência de 25 anos (EPA, 1983). A água interceptada deve ser adequadamente disposta e se necessário, conduzida para uma unidade de tratamento de efluentes.

As águas que incidem sobre as unidades de tratamento devem ser preferencialmente contidas dentro das mesmas, evitando-se que os poluentes a serem tratados deixem o sistema e atinjam o ambiente. Assim sendo, a superfície do terreno deve ser nivelada e as unidades de tratamento contornadas por diques de contenção ou canais para condução destas águas, as quais, em determinadas circunstâncias, dependendo de sua qualidade, deverão ser conduzidas para unidades de tratamento de efluentes.

Locais que apresentem nível d'água subterrânea pouco profundo devem ser evitados para a implantação de STRS. Porém, não havendo alternativas de áreas mais apropriadas, podem ser aproveitados, mediante drenagens subsuperficiais que promovam o rebaixamento do nível d'água. Considerando-se que os principais processos envolvidos na degradação e atenuação de resíduos em um sistema de tratamento no solo ocorrem em condições aeróbias, a umidade do solo deve ser um fator a ser permanentemente controlado.

A adoção de técnicas de rebaixamento do nível d'água é, também, uma forma de minimizar os riscos de contaminação das águas subterrâneas, permitindo ainda o isolamento de eventuais plumas de contaminação advindas de falhas operacionais de um STRS. Drenagens subsuperficiais podem ser obtidas por meio de sistemas de drenagem agrícola tais como tubos de PVC perfurados ou outro tipo de dreno. A água coletada, dependendo de sua qualidade, pode ser conduzida para uma unidade de tratamento de efluentes, retornar para as células de tratamento ou ser disposta em cursos d'água superficiais.

4.4.3.2. Esquema de unidades de tratamento

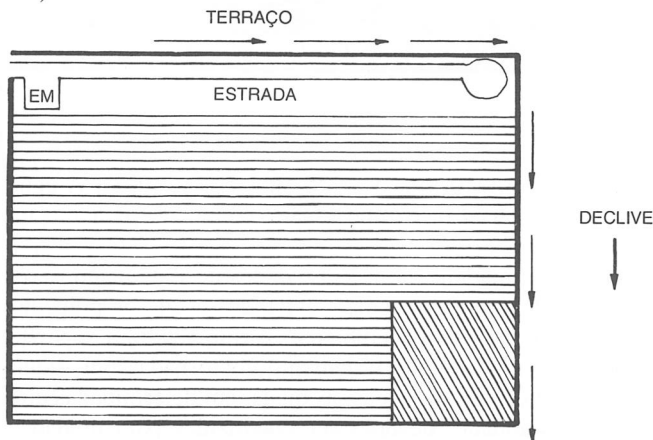
Existem vários esquemas que podem ser utilizados em um STRS dependendo do local selecionado, do tipo de resíduo a ser tratado e do terreno. Os esquemas mais conhecidos são: sistema de célula única, sistema de rotação de células e sistema progressivo de células.




a. Célula individual

Neste esquema é utilizada uma única célula, onde os resíduos são distribuídos normalmente em apenas uma estação do ano ou em poucas ocasiões, sendo ainda baixas as concentrações de constituintes perigosos que limitem sua aplicação.

Nesta configuração não há necessidade de subdivisão em células desde que a área utilizada seja uniforme quanto à topografia e solos (Figura 4.29).

Figura 4.29 — Esquema de Células Individuais para Aplicação de Resíduos (EPA, 1983).



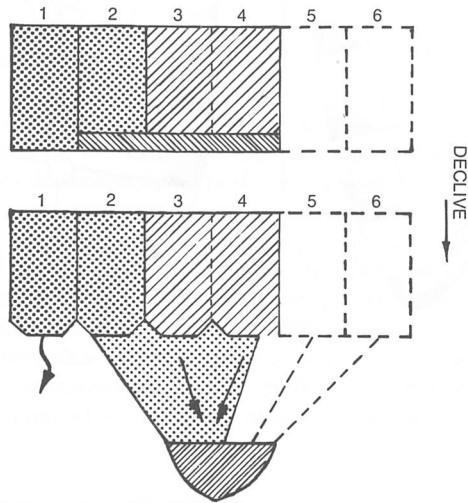
-  Bacia de Contenção de Água
-  Área de Aplicação de Resíduos
-  Caminho de Escoamento das Águas
- EM Estacionamento para Máquinas
- Terraços

b. Ampliação progressiva de unidades

Este esquema é normalmente utilizado quando são tratados resíduos contendo elevados teores de metais. Neste caso ocorre uma rápida saturação da capacidade assimilativa dos solos para estes elementos, provocando a desativação e fechamento da unidade em questão e a subsequente utilização de uma nova unidade.

Nestas situações as células construídas possuem dimensões reduzidas e devem ser tomados cuidados com a possibilidade de escoamento superficial de água a partir das células (Figura 4.30).

Figura 4.30 — Esquema de Sistema de Aplicação com Ampliação Progressiva de Unidades (EPA, 1983).



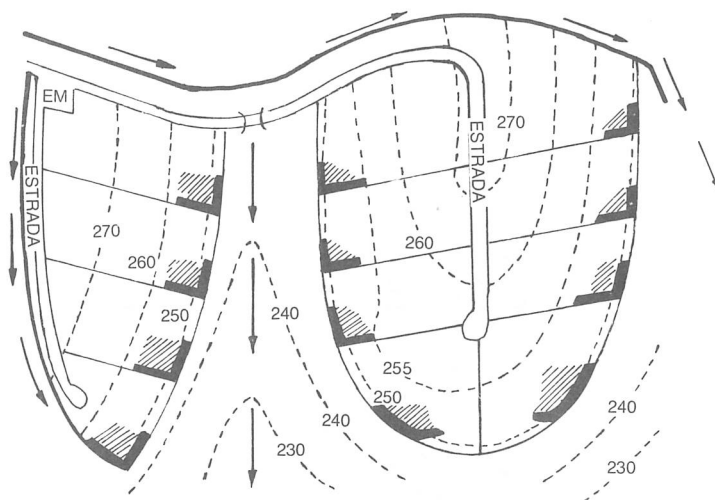
- ▨ ÁREA REVEGETADA
- ▩ BACIA DE RETENÇÃO DE ÁGUA
- ⋯ FUTURAS CÉLULAS
- ▧ ÁREAS EM TRATAMENTO
- ← CAMINHO DO FLUXO DAS ÁGUAS
- TERRAÇOS
- FUTUROS TERRAÇOS






c. Sistema de rotação

Sistemas de rotação são os esquemas mais comumente empregados e se aplicam, normalmente, para resíduos contendo baixas concentrações de elementos limitantes, o que permite que sejam dispostos freqüentemente e em taxas de aplicação mais elevadas (Figura 4.31).

Neste caso faz-se necessária a adoção de um sistema de manejo adequado que permita a recuperação da célula antes de novas reaplicações. Normalmente são empregadas várias células (6 ou mais, dependendo do volume e composição dos resíduos), o que permite uma otimização dos fatores envolvidos com a tratabilidade dos resíduos, como volatilização, evaporação, infiltração, degradação, etc.

Figura 4.31 - Aplicação de Resíduos em Sistema de Rotação de Unidades (EPA, 1983)



-  Bacia de Retenção de Água
-  Caminho de Escoamento de Água
-  Terraços
-  Diques de Retenção
- EM** Estacionamento para Máquinas
-  Linhas de Contorno

d. Tratamento por escoamento superficial

Estas unidades são utilizadas, principalmente, para o tratamento de efluentes líquidos, baseando-se na interceptação e retenção dos poluentes pelas partículas do solo e, eventualmente, por plantas. Neste sistema o solo deve possuir baixa permeabilidade, para minimizar os processos de infiltração, e ser de topografia plana (2 a 8% de inclinação).

Este sistema tem se mostrado eficiente na remoção de compostos nitrogenados, sólidos suspensos totais, metais e alguns compostos orgânicos.

4.4.4 Operação e Práticas de Manejo

Na condução de um STRS faz-se necessária a adoção de um conjunto de práticas de manejo que venham promover, na zona de tratamento, a detoxificação e a imobilização dos constituintes do resíduo, reduzindo os riscos de contaminação ambiental.

Na definição do manejo a ser adotado algumas medidas iniciais fazem-se necessárias, entre elas a caracterização do solo e do resíduo a ser tratado. Os parâmetros

a serem identificados na caracterização do solo devem ser aqueles obtidos durante a seleção do local, acrescidos de carbono orgânico, nitrogênio e fósforo.

Os resíduos devem ser analisados para: densidade, teor de água, conteúdo de sólidos totais, óleos e graxas (no caso de resíduos oleosos), carbono orgânico total (no caso de resíduos não oleosos), constituintes orgânicos voláteis, orgânicos extraíveis, pH e metais.

A seguir são descritas algumas importantes práticas de manejo normalmente adotadas em STRS.

4.4.4.1. Preparação do solo

A camada superficial de um solo é a mais importante em um STRS. Isto se dá pelo fato de nela ocorrerem de forma mais intensa os principais processos físicos, químicos e bioquímicos de atenuação de poluentes. Desta forma, torna-se imprescindível sua manutenção, preservando suas características, se possível, integralmente.

Assim sendo, nas operações de preparação do solo que antecedem o início do tratamento dos resíduos, cuidados devem ser tomados para com sua manutenção. Em locais onde se fizerem necessárias movimentações de terra, como em operações de terraplanagem, esta camada deve ser removida, armazenada e recolocada sobre as células depois que as operações de preparação do local forem concluídas.

Antes da primeira aplicação do resíduo, pedras e tocos presentes na superfície do terreno devem ser removidos para que a aração e o gradeamento do solo possam ser efetuados.

4.4.4.2. Taxa e frequência de aplicação

Na operação de um STRS, um dos primeiros fatores a serem determinados é a taxa de aplicação do resíduo (massa de resíduo/massa de solo seco ou massa de resíduo por área). A taxa de aplicação de um resíduo não deve exceder a capacidade de assimilação do meio, o que implicaria toxicidade aos organismos do solo, pouca ou nenhuma degradação e alta lixiviação de elementos perigosos em direção às águas subterrâneas.

Entre vários ensaios sugeridos na literatura (EPA, 1986), o teste de toxicidade aguda Microtox é o que se tem mostrado mais adequado para definir a taxa e a frequência de aplicação de resíduos em STRS (Matthews, 1987).

Este teste caracteriza-se por uma seqüência de testes Microtox para a fração solúvel em água (FSA) do solo, do resíduo e para 4 misturas solo-resíduo. Os resultados são usados para se definir graficamente a taxa de aplicação. A experiência sugere que sejam considerados tóxicos os resíduos que apresentarem valores de $EC_{50} < 20\%$ para a mistura solo-resíduo, sendo esse valor considerado como o ponto de corte para definir a taxa de aplicação mínima. A taxa máxima admissível é o dobro desta taxa.

A frequência de aplicação dos resíduos em STRS pode se basear na taxa de detoxificação dos mesmos. Desta forma, bioensaios podem ser montados, onde a mistura solo-resíduo é incubada em condições-padrão, sendo conduzido o teste Microtox para a FSA durante o período de 42 dias. A frequência de aplicação será equivalente ao tempo necessário para a toxicidade da mistura solo-resíduo diminuir até atingir uma EC_{50} igual a 60% (Sims, 1986).

4.4.4.3. Aplicação do resíduo

A definição sobre a técnica a ser empregada na distribuição dos resíduos deve basear-se nas características dos mesmos (teor de água, concentração de compostos voláteis), nas propriedades dos solos (permeabilidade, textura), na topografia e no clima.

Os métodos mais comumente empregados são: irrigação (aspersão, sulcos, caminhões), injeção subsuperficial, disposição a lanço e deposição na superfície do terreno.

Quanto mais de um tipo de resíduo é aplicado, normalmente procura-se optar pela aplicação dos mesmos em células separadas. Em alguns casos, porém, torna-se benéfica a codisposição de resíduos que apresentem características favoráveis. Como exemplo, se tomarmos um resíduo contendo uma elevada relação carbono/nitrogênio, sua aplicação associada a outro resíduo rico em nitrogênio será extremamente benéfica, favorecendo os processos de assimilação microbiológica do carbono.

De acordo com a EPA (1983), diversas situações têm proporcionado a ocorrência de mortes, resultado da incompatibilidade de resíduos codispostos em sistemas com baixo nível de manejo. Algumas medidas, nesta situação, devem ser implementadas, como a manipulação em separado dos resíduos incompatíveis, assim como a limpeza dos equipamentos antecedendo a aplicação de um resíduo diferente.

Também faz-se necessário um detalhado planejamento contendo medidas de separação no armazenamento dos resíduos incompatíveis e precauções necessárias para prevenir sua mistura.

Para resíduos contendo baixo percentual de sólidos ($< 8\%$) os métodos de aplicação por irrigação são os mais recomendados. Neste caso diferentes sistemas de irrigação podem ser adotados, como irrigação por canais, inundação, mangueiras, pivô central, caminhões-tanque ou tanques acoplados a tratores. A opção pelo sistema a ser adotado deverá considerar as condições do local, as características do resíduo e o custo inerente a cada sistema. A seguir são feitos comentários sobre alguns desses sistemas.

Na aplicação por caminhões-tanque uma das principais limitações está associada às dificuldades de aplicação em períodos de chuva, quando se torna difícil a circulação do veículo no interior das unidades de tratamento. Outro aspecto negativo a ser considerado está relacionado aos problemas de compactação do solo que o tráfego de caminhões normalmente provoca, o que acabará acarretando uma diminuição da permeabilidade do solo.

Irrigações por canais e por inundação apresentam como problema a não uniformidade na aplicação dos resíduos, provocando maiores taxas de aplicação nos locais próximos à entrada do resíduo na unidade de tratamento.

Entre os sistemas de irrigação, o que tem apresentado melhores resultados do ponto de vista técnico e econômico é a irrigação por aspersão. Este sistema proporciona boa uniformidade na distribuição do resíduo e apresenta um custo normalmente baixo, variando em função do sistema adotado (linha e aspersor fixos, linha e aspersor móveis ou pivô central).

Os problemas associados à aspersão são a deriva (efeito do vento na uniformidade de distribuição), obstrução dos aspersores por partículas sólidas e o favorecimento da volatilização de alguns compostos.

Os métodos de injeção subsuperficial são os mais indicados para resíduos semi-sólidos ou líquidos que apresentem compostos voláteis em sua composição. As restrições a este método são os custos de implantação.

4.4.4.4. Aração

A aração é efetuada em duas situações em um STRS, para incorporar o resíduo ao solo e para promover a oxigenação do meio durante a fase de degradação do resíduo.

Na incorporação, ao promover um maior contato entre a matriz do solo e os constituintes do resíduo, possibilita uma degradação efetiva dos compostos orgânicos e a otimização dos processos físicos e químicos de imobilização dos constituintes do resíduo. Embora ocorra biodegradação anaeróbia no solo, a biodegradação de resíduos é promovida principalmente por fungos e bactérias aeróbias (Atlas, 1984). Desta forma, ao expor o solo à atmosfera, promovendo sua oxigenação, a aração possibilita uma intensificação da atividade dos organismos aeróbios e, portanto, uma biodegradação rápida dos componentes orgânicos do resíduo.

A biodegradação anaeróbia deve ser evitada por ser um processo mais lento e incompleto, mudando o potencial redox do solo e favorecendo a lixiviação dos constituintes perigosos. A presença de oxigênio evita a produção de compostos indesejáveis, tais como sulfeto de hidrogênio, aminas e mercaptanas que causam problemas de odor.

Além da aração, várias medidas devem ser adotadas para se promover a oxigenação do solo como a aplicação do resíduo com teores adequados de umidade, evitando-se a compactação do solo e selecionando-se áreas com solos com texturas médias.

4.4.4.5. Controle do pH

A faixa de pH ideal para que ocorra a biodegradação em solos é de 6,5 - 7,5, sendo esta parcialmente inibida com o decréscimo destes valores (Dibble e Bartha, 1979). Em solos tropicais, entretanto, é muito difícil elevar o pH a estes valores. Desta forma, sugere-se que o pH seja corrigido para valores acima de 6.0 para que seja otimizada a atividade microbiana e evitada a lixiviação da maior parte dos metais indesejáveis.

A correção do pH é normalmente realizada por meio da aplicação de calcário ao solo, sendo realizada um ou dois meses antes de nova aplicação do resíduo.

Para se estabelecer a quantidade de calcário a ser aplicada, várias técnicas podem ser adotadas. Recomenda-se, entretanto, o desenvolvimento de testes de neutralização que são facilmente executados e apresentam boa resposta. Seu desenvolvimento consiste em incubar amostras de solo com diferentes quantidades de calcário, até o equilíbrio (em torno de 30 dias), quando os valores de pH são medidos e são construídas curvas de neutralização. A quantidade de calcário a ser aplicada em campo será conhecida medindo-se o pH do solo e obtendo-se na curva a quantidade de calcário correspondente, a qual deverá ser corrigida para o poder de neutralização do calcário a ser utilizado.

Desde que em geral a biodegradação de resíduos resulta na produção de radicais ácidos, é necessário que a medida e correção do pH sejam efetuadas periodicamente.

4.4.4.6. Fertilização

Em estudos de biodegradação desenvolvidos na CETESB, não se verificou a otimização da biodegradação de resíduos em STRS efetuando-se unicamente a correção

do pH do solo. Observou-se que a adição de fertilizantes como nitrogênio e fósforo era também necessária.

A biodegradação de resíduos que contém altos teores de carbono é difícil de ocorrer devido a sua relação não balanceada de C:N:P. Tal fato vem agravar-se quando estes resíduos são tratados em sistemas pobres nestes elementos, como são os solos tropicais. Desta forma, torna-se recomendável o uso de fertilizantes contendo nitrogênio e fósforo em STRS na maior parte dos solos no Brasil.

Dibble e Bartha (1979), mostraram um aumento na biodegradação de hidrocarbonetos quando adicionaram 1400kg/ha de nitrogênio e 100kg/ha de fósforo para 100 toneladas de hidrocarbonetos tratados. Essas taxas de aplicação de fertilizantes embora coerentes com a relação C:N:P, são consideradas muito elevadas para serem adotadas em campo, podendo impor um risco de contaminação por nitratos às águas subterrâneas. Da experiência com tratamento de resíduos de refinaria de petróleo, sabe-se que para cada 100 toneladas de hidrocarbonetos, devem ser aplicados 500kg de nitrogênio e 50kg de fósforo (Atlas, 1984). Desta forma, sugere-se o uso de 500kg de fórmula comercial 10:10:10 (N:P:K) precedendo a aplicação do resíduo, complementando com aplicações parceladas de 1000kg de uréia (45% de nitrogênio) durante o período de tratamento do resíduo. O parcelamento nas aplicações do fertilizante nitrogenado e o emprêgo de fontes de nitrogênio pouco solúvel, como a uréia, reduzirão os riscos de lixiviação e conseqüente contaminação dos aquíferos.

Em conseqüência dos processos de lixiviação e nitrificação, parte do nitrogênio será perdido do solo, porém em torno de 50% ficará retido na biomassa e na matriz do solo. Desta forma na próxima aplicação do resíduo somente a metade das quantidades de fertilizantes sugeridas devem ser aplicadas.

4.4.4.7. Temperatura e umidade

A temperatura e a umidade são fatores importantes a serem considerados na seleção de locais, no estabelecimento do projeto e dos métodos de manejo a serem adotados.

A temperatura do solo tem um efeito direto na taxa de biodegradação do resíduo definindo portanto a frequência de aplicação do mesmo. Uma faixa ideal de temperatura para que ocorram os processos de biodegradação está entre 20-30°C, sendo quase totalmente inibida a 5°C. De uma maneira geral quase todas as regiões do país atendem a este requisito, porém trata-se de uma informação a ser considerada especialmente nos meses de inverno de algumas regiões, quando a intensidade dos processos de biodegradação deve diminuir.

O controle da umidade no interior das unidades de tratamento de resíduos deve ser continuamente realizado. Alguns aspectos já foram considerados na seleção de locais e na elaboração do projeto do sistema. Nestas etapas procura-se evitar o excesso de umidade, inclusive a inundação de áreas. No manejo, o que se procura é a manutenção dos níveis adequados de umidade que favoreçam a atividade microbiana e impossibilitem a lixiviação. Para tanto, recomenda-se a manutenção da umidade do solo entre 50 e 70% de sua capacidade de campo. A manutenção destes níveis é feita monitorando-se continuamente a umidade do solo, irrigando-o quando seco.

4.4.5. Monitoramento

O monitoramento desenvolvido em um STRS tem como objetivos principais verificar a eficiência do sistema no tratamento dos resíduos e detectar a migração dos cons-

tituintes do resíduo, possibilitando a adoção de medidas que venham melhorar o desempenho do sistema e/ou minimizar os riscos de poluição ambiental.

A verificação do desempenho do sistema pode ser realizada mediante a retirada periódica de amostras do solo e da mistura solo-resíduo. Estas amostras são normalmente retiradas na camada reativa (0-50cm) e são analisadas para os parâmetros mais significativos no manejo: pH, umidade, nitrogênio total, fósforo, metais, óleos e graxas (para resíduos oleosos), carbono orgânico total (para resíduos não oleosos) e compostos orgânicos específicos para os quais pretende-se avaliar a degradabilidade.

A avaliação das perdas de elementos para a subsuperfície pode ser monitorada através da instalação de poços de monitoramento das águas subterrâneas e amostrando a água (mais apropriadamente chamada solução) que flui pelo espaço poroso do solo. Este último método apresenta a vantagem de detectar falhas no sistema antes que as águas subterrâneas tornem-se contaminadas.

Os equipamentos utilizados para amostrar a solução do solo são basicamente de dois tipos. O primeiro, chamado lisímetro de sucção, permite amostrar elementos que fluem pelos poros menores do solo (microporos), estando seu movimento sujeito às interações com as partículas do solo. O princípio de funcionamento destes equipamentos baseia-se na aplicação de vácuo no seu interior, o que interfere no fluxo da solução do solo ao seu redor, forçando-a para o interior do mesmo. Um esquema destes equipamentos está representado na figura 4.32. Maiores informações a respeito dos modelos existentes e da forma de instalação desses equipamentos, podem ser obtidas em Gomes et alii (1990), USEPA (1984) e Parizek & Lane (1970).

Em solos permeáveis com grande volume de macroporos, ou que apresentem canais e ranhuras, existe a tendência de ocorrer uma intensa lixiviação dos constituintes solúveis em água. Para esta situação recomenda-se o emprêgo de amostradores de drenagem livre, que constituem-se equipamentos de fácil construção e operação. Normalmente apresentam-se como blocos perfurados de vidro ou aço inox (Figura 4.33) colocados em aberturas feitas nas paredes de pequenas trincheiras abertas no solo. As águas que fluem praticamente em drenagem livre, preenchem estes blocos e são daí retiradas por meio de sucção.

O monitoramento da solução do solo deve ser realizado em duas profundidades, a 50cm e a 150cm, devendo ser instalados lisímetros de sucção e amostradores de drenagem livre nestas profundidades. O número de amostras dependerá da frequência de aplicação dos resíduos, mas recomenda-se a retirada de amostras antes da aplicação dos mesmos, algumas vezes durante o tratamento e durante o período de repouso da célula.

Outro importante aspecto a ser considerado no monitoramento de um STRS diz respeito à interpretação dos dados obtidos. Os resultados analíticos das amostras coletadas não poderão ser comparados a padrões de qualidade pois estes inexistem para solos, havendo a necessidade de compará-los a valores naturais e verificar a significância estatística das diferenças observadas. Para tanto torna-se necessário a condução de um programa de monitoramento idêntico em uma área com as mesmas características do STRS, porém sem receber a aplicação dos resíduos.

4.4.6. Fechamento

Depois um certo período de vida útil de um STRS, o sistema deve ser adequadamente fechado. O proprietário ou o operador do sistema deve então apresentar ao órgão controlador um plano de fechamento onde todas as etapas deverão estar descritas.

Figura 4.32 — Esquema de um Lisímetro de Sucção e sua Instalação (Adaptação de Parizek e Lane, 1970).

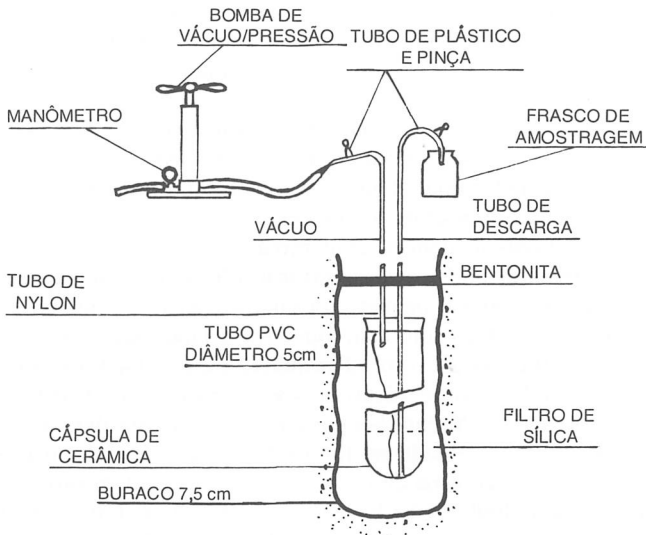
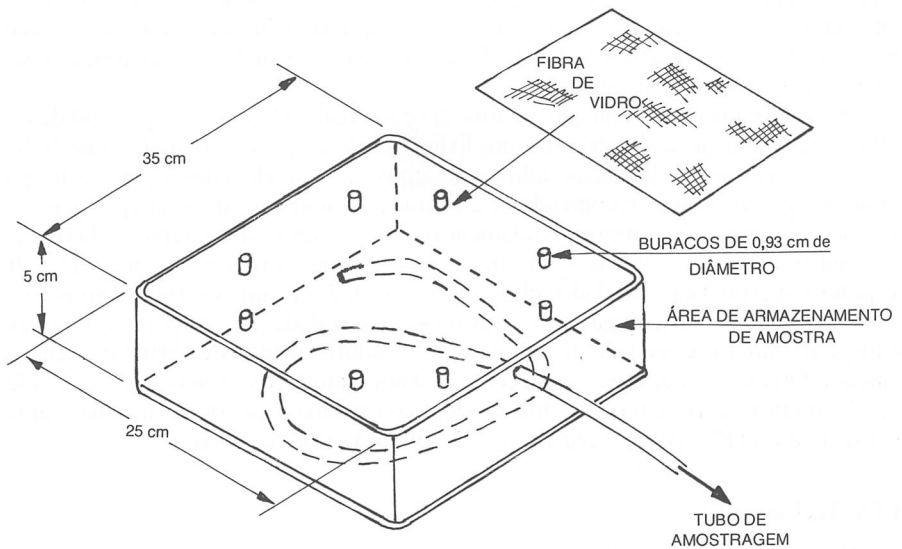


Figura 4.33 — Esquema de um Amostrador de Drenagem Livre (Brown, 1986).



Para se apresentar um plano de fechamento deve-se ter um banco de dados com informações relativas ao tipo e a quantidade de resíduos aplicados, a taxa e a frequência de aplicação, bem como todos os dados de manejo, operação e monitoramento de cada célula.

Existem muitos métodos ou combinações de métodos que podem ser adotados em um plano de fechamento de um STRS. Alguns desses métodos foram discutidos pela EPA (1987) e são os seguintes:

- remoção do solo contaminado do STRS;
- colocação de cobertura sobre a unidade, tal como vegetação, argila ou cobertura sintética;
- continuação do monitoramento das águas subterrâneas;
- continuação do tratamento do resíduo no solo com as mesmas técnicas de manejo e operação adotadas durante o período de vida útil do sistema;
- remoção parcial do solo contaminado e colocação de cobertura vegetal, argila ou cobertura sintética;
- remoção parcial do solo contaminado, continuação do tratamento do resíduo e colocação de cobertura vegetal;
- não remoção do solo, continuação do tratamento do resíduo e colocação de cobertura vegetal.

4.4.7. Considerações Finais

Pode-se depreender pelo que foi exposto, que um STRS constitui-se em uma tecnologia de tratamento de resíduos que exige o cumprimento de critérios, sem os quais estará destinado a provocar uma série de problemas ambientais. Entre estes critérios estão a seleção de locais adequados para a implantação do sistema, o estabelecimento de um projeto compatível com o meio e os resíduos a serem tratados e, principalmente, a adoção de um conjunto de práticas compreendidas pelo manejo, que serão decisivas para o sucesso do empreendimento.

A norma PN 1:603.06.002 - Tratamento no Solo (Landfarming) fornece critérios básicos para projeto, implantação e operação destes sistemas.

4.5 OUTROS MÉTODOS DE TRATAMENTO DE RESÍDUOS

A seguir são apresentados alguns dos métodos de tratamento químico usados para modificar as propriedades químicas dos resíduos, para redução do impacto ambiental causado pela sua disposição.

4.5.1 Oxidação

O termo “oxidação” significava, originalmente, uma reação na qual o oxigênio se combinava quimicamente com outra substância.

Com o uso passou a ser associado de maneira mais abrangente a toda reação na qual ocorre transferência de elétrons. A oxidação e a redução sempre ocorrem simultaneamente e o agente oxidante é aquele que ganha elétrons. Os processos de combustão, incineração e oxidação catalítica são processos térmicos de oxidação onde é utilizado o oxigênio.

Um exemplo típico de processo de oxidação é o utilizado para a destruição do cianeto, onde os resíduos aquosos ou lodos são oxidados em meio alcalino de modo a transformar o cianeto em cianato, numa primeira etapa, e em dióxido de carbono e nitrogênio, numa segunda etapa mais enérgica de oxidação. Os agentes oxidantes normalmente empregados nesse processo são o cloro gasoso, o hipoclorito e os peróxidos.

4.5.2 Redução

Ao contrário da oxidação, a redução permite uma diminuição na valência de um elemento. Os principais agentes redutores são: sulfato ferroso, metabissulfito de sódio e dióxido de enxofre. Um exemplo desse processo é a alteração da valência do cromo, que passa de hexavalente, solúvel e tóxico, para trivalente que é insolúvel e de baixa toxicidade. À semelhança do que é feito com o cromo, outros metais pesados como o chumbo e cádmio também podem ser reduzidos para uma forma menos tóxica. Os processos de oxidação e redução geralmente são precedidos ou sucedidos por precipitação e neutralização, onde os metais pesados se concentram na forma de um lodo.

4.5.3 Neutralização

O processo de neutralização tem por objetivo adequar o pH de um resíduo aos padrões legais vigentes de emissão, torná-lo menos agressivo e corrosivo ao meio ambiente ou torná-lo passível de outros processos de tratamento tais como landfarming.

A alteração do pH é conseguida pela adição controlada de reagentes apropriados, ácidos ou básicos. Os agentes ácidos mais comumente utilizados são ácido sulfúrico, clorídrico e nítrico. Os alcalinos incluem soda cáustica, hidróxido de cálcio e carbonatos.

4.5.4. Precipitação

A precipitação é um processo no qual ocorre a formação de partículas sólidas decorrentes de uma alteração na estrutura química de um composto presente em uma solução.

Divide-se em três grupos: precipitação em sais insolúveis exceto hidróxidos, óxidos e carbonatos; precipitação de hidróxidos, óxidos, carbonatos e coagulação e floculação de suspensões coloidais.

Como exemplo do primeiro grupo, pode-se citar a precipitação de fluoretos e sulfatos pela adição de um sal de cálcio a qual é, geralmente, usada para o controle da concentração desses ânions.

Um exemplo do segundo grupo é a precipitação de metais como cobre, ferro, alumínio e cromo, pela adição de calcário ou hidróxido de sódio. Uma aplicação do último grupo é a separação de óleos emulsificados pela ação desses cátions multivalentes e seus hidróxidos.

4.5.5 Troca Iônica

Este método consiste na passagem de um efluente através de um leito de resina cujo objetivo é a troca de certos contaminantes iônicos presentes no efluente por íons menos agressivos presentes na resina. O contaminante é então fixado na resina e o efluente original fica descontaminado, muitas vezes, em um nível tal que pode ser dis-

posto diretamente nas redes de esgoto. A resina poderá ser, eventualmente, regenerada, liberando assim os contaminantes em um volume de líquido muitas vezes menor que o volume do efluente original.

A concentração dos contaminantes em um pequeno volume manuseável é o aspecto mais importante desse método. O líquido concentrado produzido pode frequentemente ser passível de recuperação sob condições nas quais o líquido original não sofreria nenhuma recuperação. Mesmo que a recuperação não seja possível, o transporte desse líquido concentrado até um ponto de disposição terá um custo sensivelmente menor do que aquele referente ao transporte do efluente original.

4.5.6. Recuperação Eletrolítica

É um processo que permite a recuperação de um metal de uma solução. Para tanto é necessário que se estabeleça uma corrente elétrica entre dois eletrodos. O metal a ser recuperado deposita-se no eletrodo negativo. Esse método requer que os resíduos tratados sejam “puros”, isto é, que não existam elementos que interfiram no processo de deposição.

O metal é normalmente recuperado em uma forma diretamente reutilizável e esta técnica tem um grande potencial na recuperação de metais básicos, mesmo com baixa produção, desde que sejam disponíveis equipamentos adequados de alta eficiência econômica.

4.5.7 Extração por Solventes

Este processo consiste na remoção de determinadas substâncias de um resíduo por meio da sua passagem através de um solvente, no qual sejam solúveis. É utilizado principalmente na recuperação de metais como cobre, zinco, urânio e terras raras, presentes nos líquidos oxigenados do processamento de minérios.

Esta técnica pode, teoricamente, ser utilizada para a remoção de qualquer poluente desde que seja utilizado um solvente adequado no qual somente aquele poluente específico seja solúvel e que não existam interferentes. Embora potencialmente viável, não constitui solução para pequenas quantidades.

4.5.8 Flotação

Este processo destina-se a separar sólidos de uma suspensão aquosa e a isolar determinado material sólido presente em um resíduo. Neste último caso, é necessário que se faça uma dispersão do resíduo em meio aquoso.

É normalmente usado para remover hidróxidos metálicos e carbonatos. Para melhorar a eficiência do processo, é necessário aumentar a concentração de sólidos.

4.5.9 Adsorção

A adsorção se baseia na fixação dos átomos, moléculas ou íons de um gás ou líquido na superfície de um sólido. Esta técnica envolve o uso de materiais finamente divididos ou microporosos que apresentem grande área de superfície ativa e sejam adsorventes fortes.

4.5.10. Osmose Reversa

É uma técnica de membrana que separa sólidos dissolvidos em sistemas aquosos, dividindo o fluxo de resíduos em duas partes: água pura que atravessa a membrana e a solução cada vez mais concentrada que é retida. Atualmente, seu principal uso é na purificação de água para a indústria eletrônica.

4.5.11. Eletrodialise

As aplicações desse método não têm sido muito bem sucedidas, mas o processo pode ser usado nos efluentes de tratamentos superficiais de metais como cromação, gravação em metais e galvanização.

O processo consiste no uso de membrana de troca iônica e de uma força motriz eletrolítica.

4.5.12. Ultrafiltração

A ultrafiltração é também um processo de membrana, envolvendo a filtração a nível molecular. As membranas são feitas geralmente de policarbonatos e são capazes de oferecer uma variedade nos diâmetros de poros, fazendo com que a membrana rejeite moléculas com tamanhos maiores. O nível de rejeição também será influenciado pela temperatura e por outras condições como pH, o que pode causar variação na forma da molécula, na rigidez ou no grau de associação. As membranas utilizadas nesse processo são razoavelmente inertes e estáveis.

Os resíduos processados por esse método não devem apresentar variação na composição ou conter materiais que causem danos às membranas. Essas garantias são muito difíceis de serem oferecidas quando se trata de resíduos perigosos.

O método da ultrafiltração pode tratar resíduos de óleos de corte emulsificado e recuperar tintas solúveis em água.

Uma instalação para tratar resíduos de óleo emulsificado consegue recuperar 2 a 3 litros de óleo para 40 a 50 l de emulsão.

No Anexo I são apresentadas as tecnologias de tratamento aplicáveis para alguns tipos de resíduos perigosos.

5. DISPOSIÇÃO FINAL

THE UNIVERSITY OF CHICAGO

Dentre as formas de disposição final de resíduos industriais incluem-se a disposição em aterros sanitários ou industriais, a injeção em poços profundos e a colocação em minas abandonadas.

Neste trabalho será discutida apenas a disposição dos resíduos industriais em aterros, uma vez que as outras formas de disposição final não estão muito difundidas entre nós no presente momento.

Tendo em vista que parte dos técnicos atuantes na área do meio ambiente possuem um conhecimento limitado sobre as propriedades dos solos, conhecimento este indispensável no desenvolvimento de projetos, implantação e operação de aterros de resíduos, optou-se por introduzir neste item uma breve explanação sobre o solo e suas propriedades, bem como sobre as obras de terra.

5.1 PROPRIEDADES DOS SOLOS

O homem possui a tendência natural de utilizar o solo como receptáculo final de seus resíduos.

Desse modo, grande quantidade de resíduos é disposta no solo seja sob a forma de aterros, seja como um fluxo de infiltração.

Nesse sentido, é conveniente apresentar alguns esclarecimentos sobre determinadas propriedades do solo, sobre a formação de aquíferos subterrâneos e sobre a utilização do solo como meio de atenuação de poluentes.

Segundo o Prof. Milton Vargas da Escola Politécnica da USP, o termo solo poderia ser definido, para efeito da Engenharia Civil, como todo o material da crosta terrestre que não oferece resistência intransponível à escavação mecânica e que perde totalmente a resistência em contato permanente com água, e rocha aquele cuja resistência ao desmonte, além de ser permanente, só é vencida por meio de explosivos.

5.1.1. Propriedades Físicas, Físico-Químicas e Classificação

a) Massa específica aparente e aparente seca

Os solos são sistemas constituídos por sólidos, água e ar que idealmente ocupam o mesmo espaço.

O volume do solo (V) seria, então, composto por um volume de sólidos (V_s), um volume de água (V_a) e um volume de ar (V_{ar}).

Define-se então a massa específica aparente como a relação entre o peso total da amostra (P) e seu volume total.

$$\gamma = \frac{P}{V} \text{ (g/cm}^3\text{)}$$

Define-se, também, a massa específica aparente seca como a relação entre o peso de sólidos da amostra (P_{sol}) e o seu volume total.

$$\gamma_s = \frac{P_{sol}}{V} \text{ (g/cm}^3\text{)}$$

a qual, também, pode ser expressa em função da umidade do solo (h) e da massa específica aparente (γ_s).

$$\gamma_s = \frac{\gamma}{1 + \frac{h}{100}} \quad (\text{g/cm}^3)$$

b) Textura, granulometria e forma dos grãos

Os grãos do solo acham-se reunidos de modo a se tocarem entre si deixando espaços vazios, os poros do solo, que são preenchidos com água ou ar. Há, portanto, três fases constituintes dos solos, sólida, líquida e gasosa, conforme demonstra a Figura 5.1.

O tamanho relativo dos grãos do solo que formam a fase sólida é chamado de textura e sua medida, de granulometria. A disposição relativa dos grãos em relação à água intersticial e ao ar da fase gasosa constitui a estrutura do solo. Para o estudo da textura dos solos granulares (areia e pedregulhos), o método usado é o do simples peneiramento, utilizando-se peneiras padronizadas. Para os solos mais finos como argilas e siltes, o peneiramento é impraticável; as peneiras deveriam ter aberturas de malha extremamente pequenas, impossíveis de se obter industrialmente e de se preservar para o uso. Assim, para grãos menores que 0,075 mm, emprega-se o método de análise por sedimentação.

Chama-se análise granulométrica a comparação entre uma curva granulométrica e a escala adotada. Na figura 5.2 são apresentadas algumas escalas granulométricas estabelecidas por organismos nacionais e internacionais. A figura 5.3 apresenta algumas curvas granulométricas típicas de solos brasileiros.

c) Plasticidade e limites de Atterberg

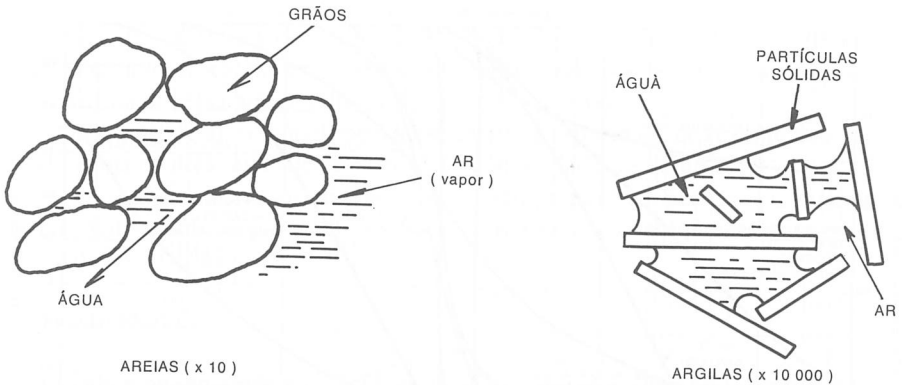
Os solos arenosos são perfeitamente identificáveis por meio de suas curvas granulométricas, isto é, areias ou pedregulhos de iguais curvas granulométricas comportam-se, na prática, de maneira similar.

Entretanto, a experiência mostra que isso não acontece nos solos finos. A forma dos grãos nos solos finos é tão importante na definição do seu comportamento, quanto suas dimensões.

Nas areias, os grãos são arredondados e angulosos. Já nas argilas, os grãos, sendo de minerais cuja estrutura cristalina é complexa, têm forma lamelar, escamosa, filiforme, ou outras ainda mais estranhas.

Sendo estes grãos de espessura média muito pequena, e envolvidos pela água intersticial (a relação entre a área superficial das partículas e seu volume é muito grande), os grãos estarão ligados entre si e à água por forças capilares que lhes emprestam uma resistência intrínseca, chamada coesão.

Uma argila extremamente seca não é moldável plasticamente. Se, entretanto, forem adicionadas progressivamente pequenas quantidades de água, ela vai-se tornando cada vez mais dócil à deformação. A partir de um certo teor de umidade h_1 , o material torna-se plástico, permitindo moldagem por formas diversas, sem variação de volume. Prosseguindo com a adição de água, o corpo torna-se cada vez mais mole até que, ao atingir o teor de umidade h_2 , passará a atuar como líquido viscoso.

Figura 5.1 - Fases Constituintes dos Solos

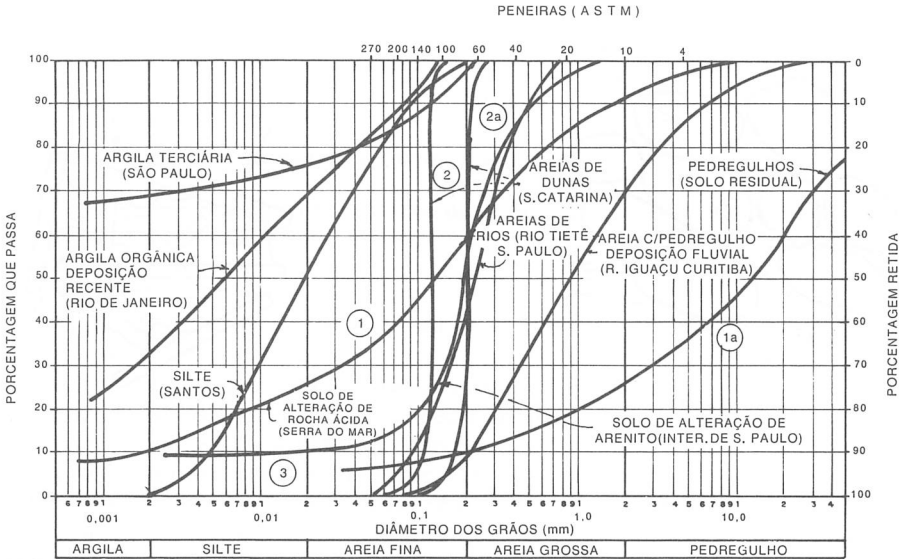
Fonte: Vargas, M. *Introdução à mecânica dos solos*. São Paulo, McGraw-Hill; EDUSP, 1977

Figura 5.2 - Escalas Granulométricas

U.S. Bureau of Salta	Pedregulho	Areia	Silte	Argila	
		1	0,05	0,005	(mm)
Internacional (Atterberg. 1905)	Pedregulho	Areia Grossa	Areia Fina	Silte	Argila
		2	0,2	0,02	0,002 (mm)
M.I.T.(1931)	Pedregulho	Areia	Areia	Silte	Argila
		2	0,6	0,06	0,002 (mm)
A.B.N.T. (1945)	Pedregulho	Areia Grossa	Areia Fina	Silte	Argila
		2	0,4	0,05	0,005 (mm)

Fonte: Vargas, M. *Introdução à mecânica dos solos*. São Paulo, McGraw-Hill; EDUSP, 1977

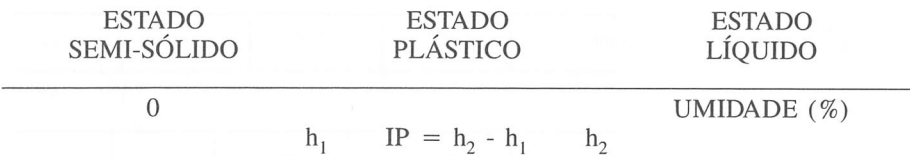
Figura 5.3 - Curvas Granulométricas Típicas



Obs.: Curvas 1 e 1a - Solos bem graduados
 Curvas 2 e 2a - Solos uniformes

A figura 5.4 ilustra os estados físicos dos solos, em função do teor de umidade.

Figura 5.4. - Estados Físicos do Solo em Função da Umidade



Se os valores crescentes da umidade forem representados no sistema linear da figura 5.4, haverá dois limites h_1 e h_2 entre os quais o solo é plástico. Esses limites foram denominados por Atterberg h_1 como limite de plasticidade (LP) e h_2 como limite de Liqueidez - (LL). A diferença entre eles é denominada índice de plasticidade (IP).

d) Natureza mineralógica

Além da umidade, o tipo de material que constitui as argilas e as propriedades coloidais de suas partículas influem na plasticidade e na coesão de um solo.

As espécies mineralógicas que aparecem com mais frequência são as caolinitas, illitas, montmorilonitas, halloysitas, gipsitas e bauxitas. Conforme a composição química dessas espécies, as argilas são mais ou menos plásticas e coesivas.

e) Troca catiônica

Os grãos de argila têm carga elétrica negativa e sobre sua superfície existem cátions adsorvidos, os quais podem ser trocados, isto é, substituídos por outros.

Essa capacidade de troca iônica depende da espécie mineral que constitui a argila. Por exemplo, as caolinitas podem trocar íons na relação de 3 a 10 me/100g; já nas montmorilonitas essa relação chega de 60 a 100 me/100g.

Quanto menor for o grão de argila maior será a capacidade de troca iônica, talvez devido à maior área superficial disponível por unidade de volume.

A troca de um íon adsorvido por outro (por exemplo Na^+ por Ca^{++}), geralmente produz efeitos sobre as propriedades físicas das argilas e conseqüentemente em suas propriedades mecânicas.

f) Atividade

O índice de atividade da fração argilosa de um solo é definido como a relação entre o índice de plasticidade e a porcentagem de argilas (< 2) presentes no mesmo.

$$\text{Assim, } I_a = \frac{\text{IP}}{\% < 2}$$

Este índice serve como indicação da maior ou menor influência das propriedades mineralógicas e químico-coloidais da fração argila nas propriedades mecânicas de um solo.

g) Coesão

A coesão é definida como a propriedade que os solos argilosos têm em manter sua forma, isto é, uma resistência ao cisalhamento inerente aos solos argilosos que pode ser devida a uma ou mais das seguintes causas:

- existência de um cimento natural ligando os grãos do solo (por exemplo: óxidos de ferro hidratados);
- existência de eventuais ligações entre os grãos muito próximos uns dos outros causadas pelas forças de Van Der Waals ou pelo potencial atrativo de natureza coloidal molecular;
- existência de pressões capilares na água intersticial quando o solo sofre pressão de ruptura.

Nesse caso, os grãos tendem a se separar e, como conseqüência, formam-se meniscos capilares entre os grãos que os pressionam uns contra os outros.

h) Estrutura das argilas

Se um solo possui quantidade apreciável de argilas, além de sua textura, outro aspecto importante é a sua estrutura.

A estrutura de um solo depende do arranjo das partículas de argila. Conforme o tipo de íons que é adsorvido na argila, suas partículas podem ser dispersas individualmente ou ser floculadas em unidades estruturais apresentando tamanhos de vários milímetros. A Figura 5.5 mostra esquematicamente a estrutura dos solos argilosos.

Um solo com sua fração argila na condição floculada apresentará uma coesão maior do que o outro na condição dispersa. A condição de a argila ser floculada ou dispersa varia em função da separação das partículas umas das outras pela espessura da camada de cátions adsorvidos em volta de cada partícula. Se as partículas estão bastante juntas, as forças atrativas de Van Der Waals são predominantes e a argila é floculada. Se a camada de cátions adsorvidos é espessa e as partículas são separadas, as forças eletrostáticas de repulsão são predominantes e a argila está dispersa.

As partículas de argila são minerais coloidais negativamente carregados, que podem adsorver cátions (H^+ , Na^+ , NH_4^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , etc.). A superfície da partícula de argila carregada negativamente e a camada adjacente de cátions adsorvidos são chamadas de dupla camada.

Se o cátion predominante na dupla camada for Na^+ , as partículas individuais de argila não estarão próximas porque os íons de Na^+ são cercados por moléculas de água ou são hidratados, produzindo uma espessa dupla camada. A Figura 5.6, mostra um esquema desse sistema.

Para argilas com Na^+ , as forças eletrostáticas repulsivas entre as partículas carregadas negativamente são superiores àquelas atrativas de Van Der Waals, obrigando as partículas a tomarem uma conformação dispersa. Essa dispersão ocorre realmente se 10 a 20% dos cátions adsorvidos forem Na^+ . Solos com argilas “Na” têm uma estrutura pobre, com tendência a se escoarem, possuem baixa permeabilidade, são amorfos e se tornam duros quando secos.

Se os cátions na dupla camada em volta da partícula de argila forem principalmente Ca^{2+} e Mg^{2+} , as partículas estarão muito próximas. Isto porque Ca^{2+} e Mg^{2+} não são hidratados e por isso têm menor tamanho. Também estes cátions são bivalentes produzindo melhor mascaramento das cargas negativas das partículas de argila. Como as forças de Van Der Waals aumentam rapidamente com o decréscimo de distância entre as partículas, as forças atrativas são dominantes e as partículas de argila assumem uma conformação floculada. Um solo com predominância de íons Ca^+ e Mg^{++} , comporta-se como um solo coesivo e tem uma estrutura “boa”. Tais solos são mais permeáveis e friáveis que os com argilas dispersas.

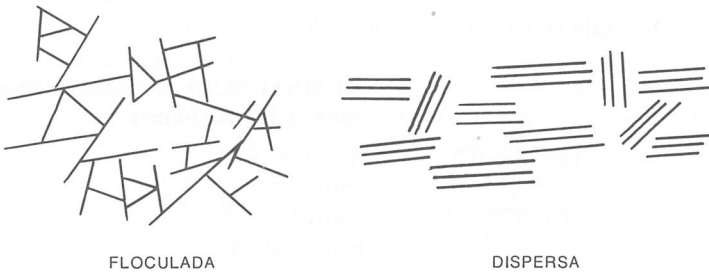
i) Consistência e resitência à compressão simples

A consistência está relacionada com a maior ou menor dureza em que um solo coesivo (argiloso) é encontrado na natureza.

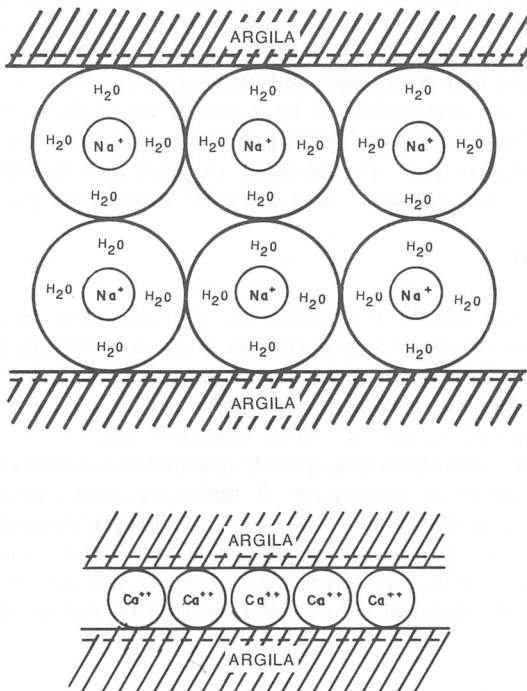
A dureza de um solo argiloso depende diretamente do seu teor de umidade. Define-se, então, o índice de consistência, pela relação entre o limite de liquidez (LL) menos a umidade (h) e o índice de plasticidade (IP).

$$I_c = \frac{LL - h}{IP}$$

Outro meio de se avaliar a consistência é através do ensaio de resistência à compressão simples (kgf/cm^2) que indicará a resistência (Rs) desse solo ao cisalhamento

Figura 5.5 - Estrutura dos Solos

Fonte: Neto, P.P. Castro e outros; Resíduos Sólidos Industriais; Série Atas, CETESB, 1985

Figura 5.6 - Distâncias entre as Partículas de Argila com cátions Na^+ ou Ca^{++} Adsorvidos

Fonte: BOUWER, H. Groundwater hydrology. Tóquio, McGraw-Hill; Kogakusha - 1978

quando se aplica uma força sobre o mesmo. Essa resistência é inversamente proporcional ao teor de umidade do solo.

A tabela 5.1, mostra os tipos de consistência em função do índice de consistência e da resistência à compressão simples.

Tabela 5.1 - Consistência dos Solos Argilosos

CONSISTÊNCIA	Ic	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES (kgf/cm ²)
mole	entre 0 e 0,5	menor 0,5
média	entre 0,5 e 0,75	entre 0,5 e 1,5
rija	entre 0,75 e 1	entre 1,5 e 4
dura		maior que 4

Fonte: Vargas, Milton, *Introdução à Mecânica dos Solos*, São Paulo, Mc Graw - Hill, EDUSP, 1977

j) Contração e resistência seca

Quando um solo argiloso está constantemente submetido a secagem, a água intersticial evapora produzindo um aumento nas forças capilares. Isso implicará uma redução do volume desse solo.

Com o passar do tempo, as tensões de capilaridade podem suplantar a resistência à tração do solo e então aparecem as rachaduras .

A contração é definida como a umidade na qual o solo atinge o mínimo volume, além do qual a argila não pode mais contrair-se.

A resistência seca é uma medida da força atrativa dos colóides do solo. Uma areia ou silte formam torrões facilmente desagregáveis pela simples pressão dos dedos. Isso não ocorre com as argilas, pois, quando secas, os grãos de solo estarão tão perto que as ligações entre si serão efetuadas pelo potencial atrativo das partículas coloidais.

l) Sensibilidade

As argilas, dependendo do modo como são formadas, apresentam uma determinada configuração ou arranjo de suas partículas, o que se denomina estrutura do solo.

A evolução dos solos pode, também, dar origem a um outro tipo de estrutura causada pela lixiviação ou pela deposição eólica sobre a vegetação rasteira formando macroporos. A esse tipo de arranjo se chama macroestrutura.

As argilas que possuem estrutura, quando manipuladas e mantidas à umidade natural, sofrem uma perda de resistência. À maior ou menor perda de resistência convencionou-se denominar sensibilidade, que é medida por meio de dois ensaios de resistência simples, um sobre o material natural e outro sobre o material amolgado.

Define-se, então, o índice de sensibilidade como a relação entre a resistência à compressão simples do material natural (Rs) e a do material amolgado (R's),

$$I_s = \frac{R_s}{R's}$$

Quanto maior for esse índice, mais as argilas sofrem efeitos do amolgamento. Isto é, as argilas sensíveis amolgadas serão mais compressíveis, menos permeáveis e menos coesivas.

m) Porosidade

A porosidade de um solo ou de um material rochoso é a porcentagem do volume total do material ocupada por poros ou interstícios. Esses poros podem ser preenchidos por água, se o material estiver saturado, ou por ar e água, se estiver insaturado.

O processo de determinação se baseia na retirada de uma amostra do solo com volume conhecido V_t , a qual é seca para remover a água (24 h a 105°C) e o peso seco P_s é determinado. Dividindo-se o peso seco pela densidade dos grãos do solo obtém-se o volume da fase sólida V_s . A porosidade é então calculada como:

$$n = \frac{V_t - V_s}{V_t} \times 100.$$

A porosidade de um meio granular com partículas uniformes, esféricas, pode ser calculada como 47,6%, se as esferas forem colocadas em uma rede cúbica, e como 26,0%, se colocadas em uma rede romboédrica.

Materiais uniformes têm uma porosidade maior que aqueles bem distribuídos porque, nestes últimos, as partículas menores ocupam os vazios entre as partículas maiores.

Os solos com uma textura fina tendem a possuir maior porosidade que os solos coesivos.

As variações da porosidade de materiais específicos são as seguintes:

	n (%)
• Siltes e argilas	50-60
• Areia fina	40-50
• Areia média	35-40
• Pedregulhos	20-30
• Areias e Pedregulhos	10-30
• Arenitos	5-30
• Rochas calcárias	10-20

n) Índice de vazios

O índice de vazios é o termo mais comumente usado em mecânica dos solos e expressa o volume de poros de um solo. É definido como a razão entre o volume de vazios V_v e o volume de sólidos V_s . Seu símbolo é, geralmente, e .

$$\text{Assim, } e = \frac{V_v}{V_s}.$$

O valor de e varia de cerca de 0,7, para areias densas e pedregulhos, até 1,3, para argilas não consolidadas.

A relação entre porosidade e o índice de vazios é

$$n = \frac{e}{e + 1} .$$

o) Classificação granulométrica

Para a classificação granulométrica devem ser utilizadas as próprias curvas granulométricas indicando a finura do solo e a forma da curva, ou então, recorrer-se aos diagramas triangulares típicos, conforme a Figura 5.7.

p) Classificação de Casagrande e Classificação Unificada

Uma forma de caracterizar os solos para fins geotécnicos é através da Classificação de Casagrande, a qual evoluiu para a Classificação Unificada.

Esta classificação leva em conta tanto a granulometria dos solos como a sua plasticidade. Os dados mínimos necessários para tal classificação são: curva granulométrica completa, limite de liquidez e índice de plasticidade.

De posse destes dados a classificação poderá ser feita com base na figura 5.8 e tabelas 5.2 e 5.3.

O significado dos símbolos apresentados nas tabelas 5.2 e 5.3 é apresentado a seguir.

Figura 5.7 - Triângulo de Classificação Granulométrica (Bureau of Public Roads)

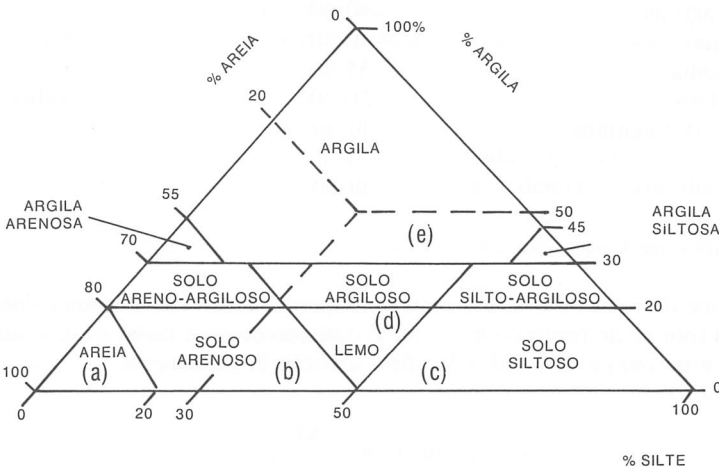
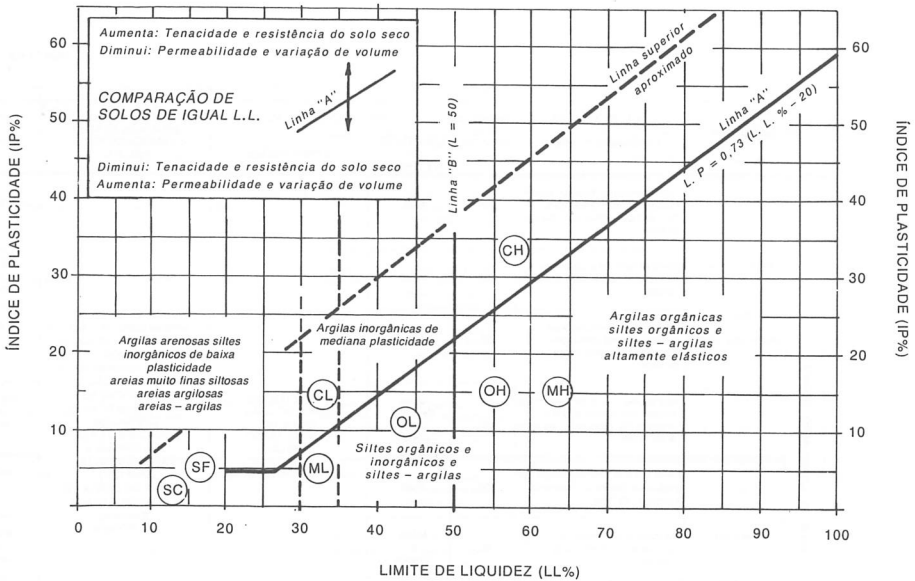


Figura 5.8 - Gráfico de Plasticidade de Casagrande



Fonte: VARGAS, M., *Introdução à mecânica dos solos*. São Paulo. McGraw-Hill; EDUSP, 1977

Primeiramente os solos seriam divididos, segundo sua granulometria, num dos três tipos:

- Solos grossos, sendo aqueles em que, pelo menos, 50% de seus grãos, têm diâmetros superiores a 0,074 mm, ou são retidos na peneira Tyler nº 200;
- Solos finos, sendo aqueles em que, pelo menos, 50% dos seus grãos têm diâmetros inferiores a 0,074 mm ou passam pela peneira Tyler nº 200;
- Turfas, sendo aqueles solos fibrosos e de grande predominância de matéria carbonosa, combustíveis quando secos.

Os solos grossos são divididos em duas classes:

A) Pedregulhos, cujo símbolo é G, quando 50% da parte grossa é retida na peneira Tyler nº 4;

B) Areias, cujo símbolo é S, quando 50% da parte grossa passa pela peneira Tyler nº 4.

TABELA 5.2. -- CLASSIFICAÇÃO DE SOLOS

1		2	3	4		5	6			
				CARACTERIZAÇÃO GERAL						
DIVISÕES GERAIS		GRUPOS DE SOLOS E DESIGNAÇÕES TÍPICAS	SÍMBOLOS DOS GRUPOS (1)	RESISTÊNCIA DO SOLO SECO	OUTROS ENSAIOS	OBSERVAÇÕES ENSAIOS RELATIVOS AO SOLO EM SEU ESTADO NATURAL	ENSAIOS PRINCIPAIS DE CARACTERIZAÇÃO			
SOLOS DE GRANULAÇÃO GROSSA	PEDREGULHOS E SOLOS PEDREGULHOSOS	Pedregulho com misturas, areia - pedregulho bem graduadas. Pequena ou nenhuma proporção de finos.	GW	Nula	GRANULOMETRIA FORMA DO GRÃO EXAME DO LIGANTE, UMIDO E SECO DURABILIDADE DOS GRÃOS	MASSA ESPECÍFICA DO SOLO SECO E ÍNDICE DE VAZIOS GRAU DE COMPACIDADE CIMENTAÇÃO ESTRATIFICAÇÃO E CARACTERÍSTICAS DE DRENAGEM CONDIÇÕES DA ÁGUA SUBTERRÂNEA EXPERIÊNCIAS DE TRÁFEGO PROVAS DE CARGA EM PLACAS DE GRANDE TAMANHO "CALIFÓRNIA"	Análise granulométrica			
		Misturas bem - graduadas de pedregulho - areia, com excelente ligante	GC	Méda			Análise granulométrica Limites de liquidez e plasticidade do ligante			
		Pedregulho e misturas areia - pedregulho mal graduadas. Pouca ou nenhuma proporção de finos	GP	Nula			Análise granulométrica			
		Pedregulho com finos, pedr. muito siltosos, pedregulho argilosos, misturas mal graduadas, de pedra areia, argila	GF	Muito Pequena a Grande			Análise granulométrica Limites de liquidez e plasticidade do ligante (se possível)			
	AREIAS E SOLOS ARENOSOS	Areias e areias pedregulhosas bem graduadas com excelente proporção de finos.	SW	Nula			Análise granulométrica			
		Misturas areia - argila bem graduadas com excelente ligante	SC	Méda a Grande			Análise granulométrica Limites de liquidez e plasticidade do ligante			
		Areias mal graduadas, pouca ou nenhuma proporção de finos.	SP	Nula			Análise granulométrica			
		Areias com finos, areias muito siltosas, areias argilosas, misturas areia - argila mal graduadas	SF	Muito pequena a Grande			Análise granulométrica Limites de liquidez e plasticidade do ligante (se possível)			
	SOLOS DE GRANULAÇÃO FINA CONTENDO POUCO OU NENHUM MATERIAL GROSSO	SOLOS DE GRANULAÇÃO FINA DE BAIXA OU MÉDIA COMPRESSIBILIDADE	Siltos (inorgânicos) e areias finas pó de rocha, areias muito finas argilosas ou siltosas de baixa plasticidade				Muito pequena a média	Amassamento manual e plasticidade	MASSA ESPECÍFICA DO SOLO SECO, TEOR DE UMIDADE E ÍNDICE DE VAZIOS CONSISTÊNCIA DO SOLO INDEFORMADO E AMOLGADO ESTRATIFICAÇÃO, ORIFÍCIOS DE FAZES, FISSURAS DRENAGEM E CONDIÇÕES DA ÁGUA SUBTERRÂNEA EXPERIÊNCIAS DE TRÁFEGO PROVAS DE CARGA EM PLACA DE GRANDE TAMANHO "CALIFÓRNIA" OU ENSAIOS DE COMPRESSÃO	Análise granulométrica Limites de liquidez e plasticidade do ligante (se possível)
			Argilas de plasticidade baixa a média, argilas arenosas, argilas siltosas, argilas magras	CL			Méda a grande	Exame no estado plástico		Limites de liquidez e plasticidade
Siltos orgânicos e misturas silte - argila com matéria orgânica de baixa plasticidade			OL	Pequena a média	Exame no estado plástico, cheiro, cor	Limites de liquidez e plasticidade no estado natural e depois de seco em estufa				
SOLOS DE GRANULAÇÃO FINA DE ELÉVADA COMPRESSIBILIDADE		Solos siltosos e de areia fina, micáceos ou distomíceos, siltos elásticos	MH	Muito pequena a média	Amassamento manual e plasticidade	Análise granulométrica Limites de liquidez e plasticidade do ligante (se possível)				
		Argilas inorgânicas de alta plasticidade, argilas gordas	CH	Grande a muito grande	Exame no estado plástico	Limites de liquidez e plasticidade				
		Argilas orgânicas de média a alta plasticidade	OH	Méda a grande	Exame no estado plástico, cheiro, cor	Limites de liquidez e plasticidade no estado natural e depois de seco em estufa				
SOLOS GÊNICOS		SOLOS LÚFOSOS E OUTROS SOLOS DE PLANTAS ALTAMENTE ORGÂNICOS	P		Facilmente caracterizável	Consistência, textura e teor de umidade natural				

(1) VIDE LEGENDA NO TEXTO

FONTE: VARGAS, M.L.TON. INTRODUÇÃO A MECÂNICA DOS SOLOS. Mc GRAW - HILL, 1981

AÇÚCAR DE SOLOS (A. CASA GRANDE)

	7	8		10	11	12	13	14	15
	QUALIDADE COMO FUNDAÇÃO	QUALIDADE COMO SUPERFÍCIE DE PAVIMENT. PARA CONSTRUÇÃO DE EMERGÊNCIA C/ FREGADOR (C ₂ , C1, 2)		RETRAÇÃO E UMEDECIMENTO	DRENABILIDADE	COMPACTAÇÃO NO CAMPO EQUIPAMENTO	δ s máx. h d	ÍNDICE DE SUPORTE E CALIFORNIA PARA AMOSTRA COMPACTADA	GRUPOS DA CLASSIFICAÇÃO S. P. R. COMPARÁVEIS
ca. e nte	Excelente	Regular a má	Excelente	Quase nenhuma	Excelente	Excelente Trator, equipamento com pneumáticos	δ > 2,00 h < 10	> 50	A-3
ca. e nte	Excelente	Excelente	Excelente	Muito baixa	Praticamente Impermeável	Excelente Pé-de-Carneiro Equipamentos com pneumáticos	δ > 2,08 h < 10	> 40	A-1
ca. e nte	Excelente	Má	Má a regular	Quase nenhuma	Excelente	Boa para excelente Trator, equipamento com pneumáticos	δ > 1,84 h < 12	25-60	A-3
ca. e nte	Boa a Excelente	Má a boa	Regular a boa	Quase nenhuma a baixa	Regular a praticamente impermeável	Boa para excelente Trator, equipamento com pneumáticos Pé-de-Carneiro	δ > 1,92 h < 12	> 20	A-2
ca. e nte	Excelente	Má	Boa	Quase nenhuma	Excelente	Excelente Trator, equipamento com pneumáticos	δ > 1,92 h < 12	20-60	A-3
ca. e nte	Excelente	Excelente	Excelente	Muito baixa	Praticamente impermeável	Excelente Pé-de-Carneiro Equipamento com pneumáticos	δ > 2,00 h < 10	20-60	A-1
ca. e nte	Boa	Má	Má	Quase nenhuma	Excelente	Boa para excelente Trator, equipamento com pneumáticos	δ > 1,60 h < 20	10-30	A-3
ca. e nte	Regular a boa	Má a boa	Má a boa	Quase nenhuma a Média	Regular a praticamente impermeável	Boa para excelente Trator, equipamento c/ pneumático. Polo Pé-de-Carneiro	δ > 1,68 h < 16	8-30	A-2
ca. e nte	Regular a má	Má		Baixa a média	Regular a má	Boa para troca Controle e cuidadoso e essencial rolo pneumático.	δ > 1,60 h < 16	6-25	A-4
ca. e nte	Má	Má		Média	Praticamente impermeável	Fraca para boa Pé-de-Carneiro	δ > 1,60 h < 16	4-15	A-4 A-6 A-7
ca. e nte	Má e muito má	Muito má		Média a elevada	Má	Fraca para má Pé-de-Carneiro	δ > 1,44 h < 25	3-8	A-4 A-7
ca. e nte	Má e muito má	Muito má		Elevada	Regular a má	Má para muito má	δ > 1,60 h < 20	< 7	A-5
ca. e nte	Má a muito má	Muito má		Elevada	praticamente impermeável	Fraca para má Pé-de-Carneiro	δ > 1,44 h < 25	< 6	A-6 A-7
ca. e nte	Muito má	Inútil		Elevada	Praticamente impermeável	Má para muito má	δ > 1,60 h < 20	< 4	A-7 A-8
ca. e nte	Extremamente má	Inútil		Muito elevada	Regular a má	Compactação impraticável			A-8

TABELA 5.3. CLASSIFICAÇÃO UNIFICADA DOS SOLOS

PROCESSO		SIMBOLO DO GRUPO (1)	DESIGNAÇÃO CARACTERÍSTICA			
PROCESSO PARA A IDENTIFICAÇÃO NO CAMPO (excluindo as partículas maiores que 3" baseando-se na estimativa de peso das frações)						
SOLOS DE GRANULAÇÃO GROSSA Mais da metade do material é menor que a abertura da malha # 200	PEDREGULHOS Mais da metade da fração grossa é maior que a # n.º 4	PEDREGULHOS PUROS (pouco ou nenhum fino)	Grãos cobrindo toda escala de granulação com quantidade substancial de todas as partículas intermediárias	G.W.	Pedregulhos bem graduados, misturas de areia e pedregulho com pouco ou nenhum fino	
			Predominância de um tamanho de grão ou granulação falhada (ausência de alguns tamanhos de grão)	G.P.	Pedregulhos mal graduados, misturas de pedregulho e areia com pouco ou nenhum fino	
	AREIAS Mais da metade da fração grossa é menor que a # n.º 4 (Para a classificação visual, a abertura da malha # n.º 4 é equivalente a 5 mm)	PEDREGULHOS COM FINOS (apreciável quantidade de finos)	Finos não plásticos (para proceder a identificação ver M.L.)		G.M.	Pedregulhos siltosos, misturas de pedregulho, areia e silte mal graduados
			Finos plásticos (para proceder a identificação ver C.L.)		G.C.	Pedregulhos argilosos, misturas de pedregulho, areia e argila mal graduados
	AREIA PURA (pouco ou nenhum fino)	Grãos cobrindo toda a escala de granulação com quantidade substancial de todas as partículas intermediárias		S.W.	Areias bem graduadas, areias pedregulhosas, com pouco ou nenhum fino	
		Predominância de um grão ou granulação falhada		S.P.	Areias mal graduadas, areias pedregulhosas, com pouco ou nenhum fino	
	AREIA COM FINOS (apreciável quantidade de finos)	Finos não plásticos (para proceder a identificação ver M.L.)		S.M.	Areias siltosas, misturas mal graduadas de areia e silte	
		Finos plásticos (para proceder a identificação ver C.L.)		S.C.	Areias argilosas, misturas mal graduadas de areia e argila	
	PROCESSO DE IDENTIFICAÇÃO E EXECUTADO SOBRE A FRAÇÃO < N.º 40					
	SOLOS DE GRANULAÇÃO FINA Mais que a metade do material é menor que a abertura da malha # 200. (A abertura da malha # 200 corresponde aproximadamente à menor partícula visível a olho nu)	SILTES E ARGILAS Limites de Liquidez menor que 50	RESISTÊNCIA A SECO (esmagamento pelos dedos)	DILATÂNCIA (sacudindo na palma da mão)	RIGIDEZ (consistência nas proximidades do L.P.)	
Nenhuma a pequena			Rápida a lenta	Nenhuma	M.L.	Siltes inorgânicos e areias muito finas, alteração de rocha, areias finas, siltosas ou argilosas com pequena plasticidade
Média a elevada			Nenhuma a muito lenta	Média	C.L.	Argilas inorgânicas de baixa e média plasticidade, argilas pedregulhosas, argilas arenosas, argilas siltosas, argilas magras
SILTES E ARGILAS Limite de liquidez maior que 50		Pequena a Média	Lenta a nenhuma	Pequena a Média	M.H.	Siltes inorgânicos, micáceos ou diatomáceos, finos, arenosos ou solos siltosos, siltes elásticos
		Elevada e muito elevada	Nenhuma	Elevada	C.H.	Argilas inorgânicas de alta plasticidade, argilas gordas
		Média a elevada	Nenhuma a muito lenta	Pequena a média	O.H.	Argilas orgânicas de média e alta plasticidade
tufas	Facilmente identificáveis pela cor, cheiro, porosidade e frequentemente textura fibrosa			P	Solos com elevado teor de matéria orgânica	

(1) VIDE LEGENDA

FONTE: VARGAS, MILTON: INTRODUÇÃO À MECÂNICA DOS SOLOS, Mc GRAW - HILL, 1981

Tanto os pedregulhos como as areias são divididos em quatro grupos, cada um correspondendo a um certo tipo de distribuição granulométrica. São eles:

- 1) Bem graduados, com poucos ou sem finos sendo solos grossos que exibem curva granulométrica do tipo da curva 1a da figura 5.3 e que tem, no máximo, 10% dos seus grãos passando na peneira Tyler nº 200, designados pelo símbolo W;
- 2) Misturas mal graduadas de pedregulho e/ou areia sem finos, que incluem todas as areias ou pedregulhos que não sejam bem graduados e que apresentem, no máximo, 10% dos seus grãos passando pela peneira Tyler nº 200, designados pelo símbolo P;
- 3) Bem graduados com bom material ligante sendo os solos que exibem curva granulométrica do tipo curva 1 da figura 5.3, porém, com mais de 10% dos seus grãos passando pela peneira Tyler nº 200, designada pelo símbolo C;
- 4) Misturas mal graduadas de pedregulho e/ou areia com siltes ou argilas sendo solos com mais de 10% dos seus grãos passando na peneira Tyler nº 200 e tendo I.P. > 8, com símbolo F.

Por outro lado, os solos finos são divididos em duas classes:

- 1) Pouco compressíveis, sendo materiais cujo ligante (retido na peneira nº 40) tem $LL < 50$, com símbolo L e
- 2) Muito compressíveis, sendo materiais cujo ligante tem $LL > 50$, com símbolo H.

Há uma tendência de se incluir uma classe intermediária, cujo símbolo seria I, dos materiais cujos ligantes tivessem LL entre 30 e 40.

Os solos de ambas as classes seriam classificados em três grupos: o primeiro incluindo solos siltosos, simbolizados por M; o segundo incluindo os siltes ou argilas orgânicas, simbolizados por O e o terceiro, as argilas inorgânicas, simbolizadas por C.

q) Percolação de água nos solos

De forma geral, a água que percola através dos poros do solo é somente uma parte da água intersticial. Essa não só se move sob a ação da gravidade, mas também de pressões externas aplicadas.

Num solo arenoso, tal conceito é nítido porque, sendo os grãos de grande diâmetro, as forças capilares que prendem a água aos grãos são mínimas.

Entretanto, nas argilas tal não se dá. A água que se move por efeito de pressões externas é determinada por condições físico-químicas, isto é, há uma troca de quantidades entre a água adsorvida e a livre. Uma outra dificuldade é que, se o solo não é completamente saturado, a água pode se mover de espaços que ocupa para espaços “vazios”, ou, então, podem existir bolhas de ar que se movem com o movimento da água. Entretanto, para fins práticos, não há um interesse sobre como se processa o escoamento através dos poros, mas sim pelo fluxo resultante do escoamento através de um elemento de solo, cujo volume seja suficientemente grande para representar a totalidade do solo.

Neste caso, vale a lei de Darcy:

$$V = k.i, \text{ onde}$$

V = velocidade do fluxo,

K = coeficiente de permeabilidade e

$$i = \text{gradiente hidráulico}, \frac{dh}{ds}.$$

O coeficiente de permeabilidade é um índice da maior ou menor dificuldade que o solo opõe à percolação da água através dos seus poros. Assim, chama-se de permeabilidade à maior ou menor facilidade com que a percolação da água ocorre através de um solo.

O parâmetro K , melhor definido como condutividade hidráulica, depende principalmente do tamanho e arranjo dos grãos do solo, do índice de vazios, das características do fluido que escoar (densidade e viscosidade) e da temperatura.

Como se supõe que os líquidos que percolam de um aterro são semelhantes à água, nos itens seguintes desse trabalho será mantida a denominação coeficiente de permeabilidade, referindo-se ao índice da percolação de água a 20°C através do solo.

Quando se pretende conhecer o comportamento de um determinado fluido diferente da água será necessário utilizar o valor da condutividade hidráulica específica para este fluido, determinada através da seguinte expressão:

$$K_f = \frac{K_m \mu_m \rho_f}{\rho_m \mu_f}, \text{ onde}$$

K_m = condutividade hidráulica da água obtida através de ensaios padronizados (igual ao coeficiente de permeabilidade);

μ_m = viscosidade absoluta da água;

ρ_m = densidade da água;

ρ_f = densidade do fluido e

μ_f = viscosidade absoluta do fluido.

A condutividade hidráulica pode ser calculada para outras temperaturas como se segue:

$$K_t = \frac{20}{t} K_{20}, \text{ onde}$$

K_t = condutividade hidráulica do fluido na temperatura t ;

K_{20} = condutividade hidráulica do fluido a 20°C;

μ_t = viscosidade absoluta do fluido na temperatura t e

μ_{20} = viscosidade absoluta do fluido a 20°C.

Para efeito ilustrativo são apresentadas a seguir as ordens de magnitude da velocidade de fluxo resultante do escoamento da água através do solo:

- pedregulhos, 100 a 1000m/dia;
- mistura de pedregulho e areia; 5 a 100m/dia;
- areia média, 5 a 20m/dia;
- areia fina, 1 a 5m/dia;
- misturas de areia, argila e pedregulho; 10-3 a 10-1m/dia e
- solos argilosos 10-8 a 10-2m/dia.

O coeficiente de permeabilidade K dos solos pode ser determinado através de processos de medição direta “in loco” ou através da realização de ensaios de permeabilidade em laboratório, com amostras indeformadas extraídas do local em estudo.

A figura 5.9 fornece informações quanto ao coeficiente de permeabilidade de diferentes tipos de solos, bem como sobre a melhor maneira de se determinar estes coeficientes na prática.

r) Módulo de Spangler ou de resistência passiva (E)

É definido como sendo igual à pressão unitária desenvolvida pelo movimento de uma estrutura ou de um bloco do próprio solo, situado a uma distância unitária considerada, em direção à parede ou face do maciço.

s) Empuxo passivo ou pressão passiva do solo (P)

É definido como sendo a reação oferecida pelo maciço de solo, na parede ou face considerada, ao ser solicitado por uma estrutura ou bloco do próprio solo, o qual se move contra ela a partir de uma dada distância unitária, sendo função dos esforços cisalhantes mobilizados e do grau de compactação do material geológico.

5.1.2 Obras de Terra

Os aterros para resíduos domésticos ou industriais são obras de engenharia construídas no solo e muitas de suas estruturas ou partes constituintes são executadas com terra.

Esse trabalho não tem pretensão de ensinar como planejar e avaliar a estabilidade de obras de terra, mas lembrar que alguns aspectos devem ser abordados, pelo menos para salientar sua importância.

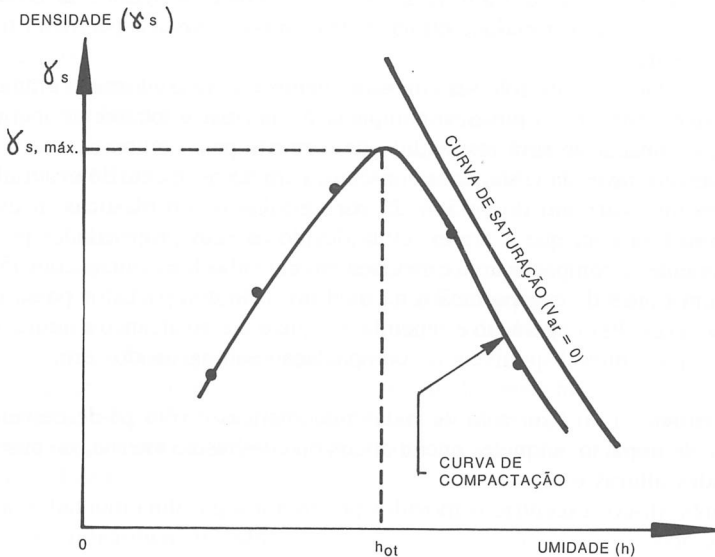
As obras principais que ocorrem em um aterro são: construção de diques de contenção; construção de bermas de equilíbrio; abertura de valas para colocação de tubulações; construção de acessos de terra e construção de camadas de terra compactada para sub-base de impermeabilizações ou sua proteção.

COEFICIENTE DE PERMEABILIDADE K (cm/s) (ESCALA LOGARÍTMICA)

10² 10¹ 1.0 10⁻¹ 10⁻² 10⁻³ 10⁻⁴ 10⁻⁵ 10⁻⁶ 10⁻⁷ 10⁻⁸ 10⁻⁹

DRENAGEM	BOA										MÁ	PRATICAMENTE IMPERMEÁVEL		
TIPO DE SOLO	brita limpa	Areia limpa, areia misturada com brita										Areia muito fina, siltes orgânicos e inorgânicos, mistura de silte arenoso e argila, morenas glaciais, depósitos de argila estratificada etc.		Solo impermeável, por exemplo argila homogênea abaixo da zona de intemperismo
		Solo impermeável modificado por efeito da vegetação e do intemperismo												
DET. DIRETA DE K	Teste direto do solo na sua posição original. Teste de bombeamento. Digno de confiança se conduzido adequadamente. Considerável experiência é necessária.													
	Permeâmetro de carga constante. Pequena experiência é necessária.													
DET. INDIRETA DE K	Permeâmetro de carga variável. Pequena experiência é necessária.													
	Cálculos baseados na distribuição granulométrica. Aplicável somente para areias limpas não coesivas e brita.													
DET. INDIRETA DE K	Permeâmetro de carga variável. Grande experiência é necessária.										Permeâmetro de carga variável. Razoavelmente confiável. É necessária considerável experiência.		Cálculos baseados nos resultados de teste de consolidação. É necessária considerável experiência	
	Permeâmetro de carga variável. Pouco confiável. Grande experiência é necessária.										Permeâmetro de carga variável. Razoavelmente confiável. É necessária considerável experiência.			

Fig. 5.9 — Características de permeabilidade e drenagem dos solos.

Figura 5.10 - Curva de Compactação de Solos

Fonte: Caputo, Homero Pinto; *Mecânica dos solos e suas aplicações; Livros Técnicos e Científicos Editora S.A.; Rio de Janeiro, 1981*

Nas etapas de projeto e operação, os responsáveis pelo aterro devem analisar os seguintes aspectos de mecânica dos solos: compactação de solos; ruptura hidráulica de maciços; compressibilidade, recalques e estabilidade dos taludes de terra.

Compactação de solos

A compactação é o processo que confere densidade, resistência e estabilidade ao solo, permitindo o uso imediato de um aterro.

A maioria dos aterros de terra é hoje construída em camadas horizontais e cada camada é compactada por equipamentos compressores. Sem dúvida é um processo mecânico que, por impacto, vibração ou pressão, aumenta a densidade do solo e, conseqüentemente, sua resistência.

O grau de compactação depende do tipo de solo, da umidade e da energia empregada.

Para um mesmo solo, quanto maior for a energia aplicada para compactação, mais próximos uns dos outros os grãos de solo ficarão. Entretanto, com pequena umidade, aparecerá um atrito grão a grão que dificultará a compactação. Quando a umidade for muito grande, o solo estará saturado e os grãos não oferecerão resistência à com-

pactação, porém, as densidades serão mais baixas porque aparecerá um filme de água entre os grãos.

Por isso, existem ensaios que determinam curvas que correlacionam a massa específica aparente seca com a umidade tal como ilustra a figura 5.10. Essas curvas mostram que existe uma umidade ótima (hot) na qual a massa específica (máx) será a máxima possível.

A compactação de um solo será mais ou menos efetiva conforme a granulometria e plasticidade. Para areias puras, a compactação normal é totalmente ineficiente: o esforço de compactação será respondido unicamente pelo embricamento dos grãos, ou seja, apenas através da vibração se conseguirá um adensamento do material, porque ela causará um rearranjo dos grãos. Já para argilas muito plásticas, o esforço de compactação fará com que a argila reflua devido às suas propriedades plásticas.

Atualmente, a compactação é executada em camadas horizontais com 15 a 30 cm de espessura (antes da compactação) na qual um rolo compactador passa um certo número de vezes. Essa operação é repetida até que o aterro alcance a altura desejada.

Os equipamentos disponíveis de compactação são agrupados em:

- compressores : rolo liso, rolo de rodas pneumáticas e rolo pé-de-carneiro;
- aparelho de impacto: soquetes pneumáticos ou combustão interna, ou pesos caindo de grandes alturas e
- vibradores: discos excêntricos movidos por motor a gasolina montados sobre uma placa de aço.

A compactação deve ser obrigatoriamente controlada porque oferece resistência e estabilidade aos aterros.

O método mais simples e que deve ser empregado em qualquer obra baseia-se em observações de campo e pode ser resumido nos seguintes itens:

- lançamento das camadas com espessura não superior a 30 cm de material fofo, incluindo-se nessa camada a parte superficial fofa da camada anterior (2 a 5 cm); a camada, depois de compactada, não deve apresentar espessura superior a 20 cm; essas espessuras (30 e 20 cm) devem ser constantemente verificadas;
- manutenção manual da umidade do solo próxima à ótima; a correção da umidade pode ser feita por irrigação ou molhagem ou, pelo contrário, por aeração através de arado de discos;
- as camadas a serem compactadas devem ser homogêneas, tanto no que se refere à umidade como ao material em si; essa homogeneização pode ser conseguida com o emprego de arados ou escarificadores;
- o número de passagens do equipamento compactador deve ser tal que a superfície fique lisa quando utilizados rolos lisos ou de pneus, ou então que a passagem do rolo pé-de-carneiro não forme marcas com profundidade superior a 15 cm na superfície; quando a superfície for lisa, ela deve ser escarificada até 5 cm de profundidade, para permitir sua ligação à camada subsequente.

Além dessas recomendações de ordem prática, deve-se garantir que o material seja lançado na umidade ótima com tolerância de mais ou menos 2%. Cada camada deve ser compactada até um grau de compactação de, no mínimo, 95%, e os parâme-

tros de compactação, máx e hot devem ser obtidos através de ensaios normalizados compatíveis com os equipamentos utilizados.

O ensaio de Proctor Normal (ABNT NB33 - Ensaio Normal de Compactação) oferece resultados compatíveis com rolo pé-de-carneiro leve passando 12 vezes em uma camada de 30 cm de solo. Já o ensaio de Proctor modificado é compatível com rolos pé-de-carneiro pesados. Essa compatibilidade está relacionada diretamente com a energia de compactação aplicada em cada um dos ensaios.

O grande problema de controle de qualidade em campo diz respeito à avaliação da umidade de campo e da massa específica aparente seca de campo.

O problema é determinar em uma amostra retirada da camada compactada, abaixo da superfície, seu volume, peso e umidade. O volume é mensurado cravando-se um cilindro (amostrador) de volume conhecido. O peso é obtido diretamente através de balanças em campo. A umidade pode ser medida indiretamente em campo através de aparelhos como o “speedy” (câmara cheia de gás higroscópico que aumenta a pressão interna quando absorve a água do solo), ou então medindo-se a resistividade do solo, ou mesmo, utilizando-se isótopos radioativos.

Com relação a variação de algumas propriedades mecânicas dos solos devido à compactação, a tabela 5.4 seguinte ilustra como se comporta o empuxo passivo (representado pelo módulo Spangler), diante de vários graus de compactação (MP-Proctor modificado).

Ruptura hidráulica de solos

O fenômeno de ruptura hidráulica não é muito comum em aterros, exceto onde o nível do lençol freático tem grande variação e no caso de diques de contenção, onde pode ocorrer.

A ruptura hidráulica refere-se à perda de resistência e estabilidade do solo devido às pressões de percolação de água.

Existem dois tipos principais de ruptura hidráulica.

No primeiro, o solo perde parte ou toda sua resistência devido a perda de peso provocada por um fluxo ascendente de percolação.

Este fenômeno é comum quando se abrem escavações profundas em terrenos arenosos. Quando o nível do lençol freático está alto em relação ao fundo da vala, existe a formação de um fluxo ascendente de água ao fundo da escavação e o solo arenoso, dependendo das condições, perde sua compacidade e resistência, tendo um comportamento de líquido viscoso.

O segundo tipo de ruptura acontece quando existe erosão, isto é, os grãos de solo são arrastados pelas forças do fluxo de percolação. Essa erosão se inicia num ponto de surgência de água e progride para trás, carregando os grãos de solo, resultando na formação de um tubo, interno ao maciço, ao longo da linha de fluxo. Este tipo de erosão é, também, denominado “piping”. De modo geral, as argilas plásticas bem compactadas são muito resistentes a esse fenômeno.

Já os solos não coesivos mal compactados são pouco resistentes e a ruptura será brusca e repentina. No caso dos aterros, o fenômeno de “piping” só ocorrerá quando a superfície do lençol freático interceptar os taludes de jusante ou, então, quando uma linha de fluxo de percolado encontrar uma tubulação de drenagem com superfície de contato não protegida.

Tabela 5.4 - Valores Médios do Módulo de Spangler (E'), para Vários Materiais e Graus de Compactação (M.P >)

TIPOS DE MATERIAL GEOLÓGICO	Fofo des-pejado-sem compactação ($E' = 0$)	Compactação leve com Proctor Mod. < 85 % MP	Compactação moderada, com Proctor - 85-95% MP	Compactação elevada, com Proctor - > 95% MP
COESIVOS (LL < 50) Com alta plasticidade, tipo: CH, MH, CH-MH...	0	0	0	3,50
COESIVOS (LL < 50) Plasticidade média ou nenhuma, tipo: CL, ML, ML-CL, CL-CH, ML-MH, com menos do que 25% de partículas granulares de permeio	3,50	14,00	28,00	70,00
GRANULARES COESIVOS Tipo: GM, GC, SM, SC ou outro tipo qualquer, com mais que 25% de partículas granulares classificadas como: CL, ML, ML-CL, CL-CN ou ML-MH.	7,00	28,00	70,00	140,00
NÃO COESIVOS GW, GP, SW, SP.	7,00	70,00	140,00	210,00
Pedras britadas ..	70,00		210,00	
Concreto	69,00		138,00	

Fonte: Spangler, Merlim G.; Handy, Richard L; Soil Engineering; Iowa State University; Harper & Row Publisher's, New York, USA, 4ª Ed.

Um outro tipo de problema de ruptura hidráulica é a erosão superficial causada pela força de tração (arraste) de uma lâmina de água que escoar sobre o talude inclinado. Essa força é dada como uma função do coeficiente de escoamento superficial, da intensidade da chuva, da velocidade da água, da massa específica da água, da inclinação do talude e da distância do ponto considerado à crista do talude.

A maior ou menor erodibilidade (quantidade de material erodido por unidade de área e de tempo) depende do tipo de solo, isso é, os solos apresentam uma certa resistência à erosão que depende da coesão (nas areias essa resistência é zero ou muito pequena), da umidade, da granulometria e da plasticidade.

Geralmente, os solos mais resistentes à erosão são as argilas plásticas ($IP > 15$) e saturadas (nos aterros essas argilas são aquelas compactadas com umidade superior à umidade ótima).

Compressibilidade e recalques

A compressibilidade é definida aqui como a propriedade dos solos em mudar de forma ou de volume quando submetido a forças externas.

O solo, como é conhecido, constitui-se por uma estrutura granular em cujos interstícios existem ar e água.

Nos solos finos, a compressibilidade é mais elevada do que nos solos grossos porque a estrutura granular é mais ampla e complexa, e os grãos, escamosos ou alongados, sofrem deformações por flexão ou dobramento. Esses solos, quando submetidos a uma pressão externa, sempre estarão sujeitos à compressão. Por outro lado, como a permeabilidade é baixa e a água tem dificuldade de sair dos poros para fora da massa de solo, a estrutura suporta uma parte de pressão exercida, sendo a outra suportada pelo líquido.

Inicialmente, quando um solo fino é submetido à compressão, aparecerá uma pressão neutra na fase líquida, se essa não puder ser imediatamente drenada. Isso significa que parte da pressão aplicada será absorvida no mecanismo de expulsão do líquido presente nos poros do solo. A pressão neutra poderá ser igual à pressão aplicada, se o solo estiver saturado e não existir possibilidade de deformação na estrutura. Nesse caso, não acontece a diminuição do volume dos poros do solo. Com o tempo, a pressão neutra decrescerá na exata medida em que a drenagem for se desenvolvendo. Durante essa diminuição, a pressão aplicada à estrutura do solo vai aumentando e a compressão do solo progredirá até que a pressão neutra se anule completamente. Nessa situação, o solo apresentará resistência total à pressão externa aplicada. Durante o processo, os vazios irão diminuindo e, conseqüentemente, os recalques desenvolvem-se ao longo do tempo.

Existem dois tipos normais de recalque. O primeiro é o recalque por adensamento, onde o índice de vazios se altera e ocorre uma variação de volume (característico de carregamentos permanentes com drenagem de líquidos). O segundo é o imediato, que ocorre sem variação do índice de vazios, isto é, a volume constante, sendo típico das areias e de carregamentos rápidos das camadas de argila, processando-se logo após a aplicação da carga.

Os aterros em sua maioria são construídos sobre solos finos insaturados. Nessa condição, quando submetidas a pressões, por exemplo, a construção de um dique de contenção, as camadas do subsolo estariam sujeitas a um recalque devido à existência de ar e água nos poros. À medida em que esse recalque se desenvolve, o ar vai se comprimindo e os poros diminuem, sendo a pressão transferida para o líquido. Ocorre então uma estabilização do recalque. À medida em que o líquido é drenado, desenvolve-se então o recalque por adensamento, até que a pressão neutra se estabilize em zero.

Quando o subsolo não é homogêneo e as estruturas são extensas, podem ocorrer recalques com diferentes intensidades em vários pontos da estrutura. São os recalques diferenciais e podem levar as estruturas à ruína se não forem considerados no projeto.

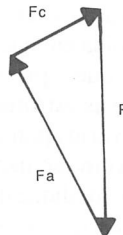
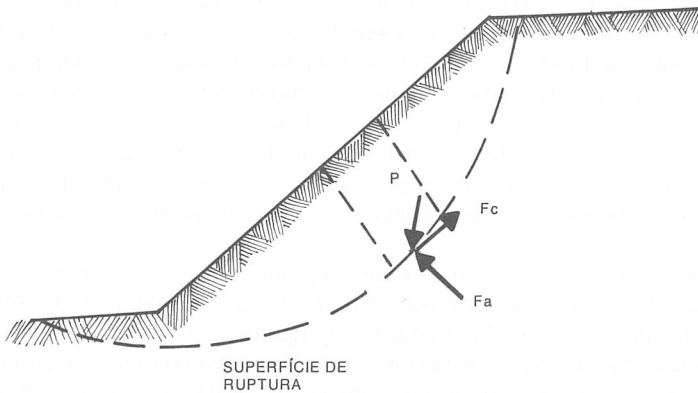
Supondo, por exemplo, que exista, sob um dique de contenção, em um determinado ponto de sua extremidade, uma lente de areia, as camadas de argila ao redor dessa lente serão muito mais facilmente drenadas que as restantes. Por isso, os recalques por adensamento nessa região, serão mais rápidos que nas outras, o que causará a flexão do dique e o aparecimento de trincas e rachaduras na sua estrutura, podendo causar o colapso da obra.

Os recalques, tanto imediatos quanto por adensamento, devem ser avaliados e considerados nos projetos de alguma importância, principalmente quando se prevêem a utilização de estruturas rígidas, impermeabilizações e diques de contenção.

Estabilidade de taludes de terra

Quando uma porção de solo está colocada em um talude, surge sobre a mesma uma força que tenderá a causar a ruptura por cisalhamento segundo uma superfície no seu interior, conforme ilustrado pela figura 5.11. Nessa condição, e se a superfície potencial de ruptura for a indicada na figura 5.11, o peso da porção de solo P será equilibrado pela reação F_a e pela resistência ao cisalhamento F_c .

Figura 5.11 - Estabilidade de Taludes



O que se pretende com esse cálculo de estabilidade é a determinação do ângulo de inclinação do talude no qual ele se mantém em equilíbrio plástico, considerando-se a influência de pressões neutras provenientes de deformações de cisalhamento, adensamento, percolação ou submersão. Esse equilíbrio acontecerá em todos os pontos onde as tensões de cisalhamento forem menores ou iguais às resistências ao cisalhamento. Então, o talude será estável se o seu ângulo de inclinação for menor que o calculado e instável se for maior.

A resistência de cisalhamento será função do tipo de solo, do ângulo de atrito interno e de coesão entre seus grãos e da pressão sobre a superfície de ruptura.

As superfícies de ruptura são planas nos maciços de areia pura (solos não coesivos onde o coeficiente de coesão é zero). Esses maciços só serão estáveis quando o ângulo de inclinação dos taludes for inferior ao ângulo de atrito interno da areia.

Nos taludes de solos argilosos com parâmetros de coesão maior que zero, a superfície de ruptura não será plana e, nesses casos, existem inúmeros métodos para calcular sua estabilidade.

Um fator importante a ser considerado é a influência da água na estabilidade dos taludes. Embora não cause variação no ângulo de atrito, a água pode originar alteração na coesão, o que foi demonstrado por diversos autores. Quanto maior for a saturação de um solo coesivo, menor será sua coesão. Quando se verifica a saturação de um talude, devem-se realizar ensaios para avaliação da resistência ao cisalhamento nessa condição.

A água atuará em um talude segundo as seguintes situações: aparecimento de pressões neutras devido à percolação de águas de chuva represadas ou levantamento do nível do lençol freático; aparecimento de forças e pressões de percolação devido às causas acima e aparecimento de pressões neutras devido ao adensamento, confinamento ou deformações de cisalhamento.

O surgimento de uma rede de fluxo de percolação em um talude diminuirá a resistência de cisalhamento do solo, pois provocará: a diminuição da coesão; o aparecimento de uma força de percolação que tende a empurrar o solo na direção do fluxo e o aparecimento de pressões neutras.

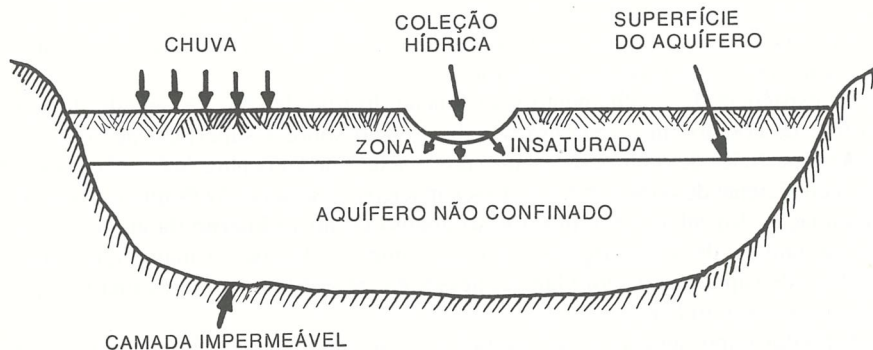
Os solos coesivos permitem a abertura de valas não escoradas devido à sua coesão. A profundidade máxima dessas valas pode atingir de 2 a 4 vezes o valor do parâmetro de coesão C . Contudo, se o solo estiver saturado ou houver um súbito levantamento do nível do lençol freático, as paredes da vala se romperão. Por isso, recomenda-se que toda vala com profundidade superior a 2 m seja escorada.

5.1.3. Aquíferos

Uma formação que contenha água subterrânea e seja suficientemente permeável para transmitir água em quantidade utilizável é chamada de aquífero. O mais comum material de aquífero são areias e pedregulhos não consolidados, que ocorrem em vales aluviais, planícies costeiras, dunas e depósitos glaciais. Arenitos também são um bom material de aquífero.

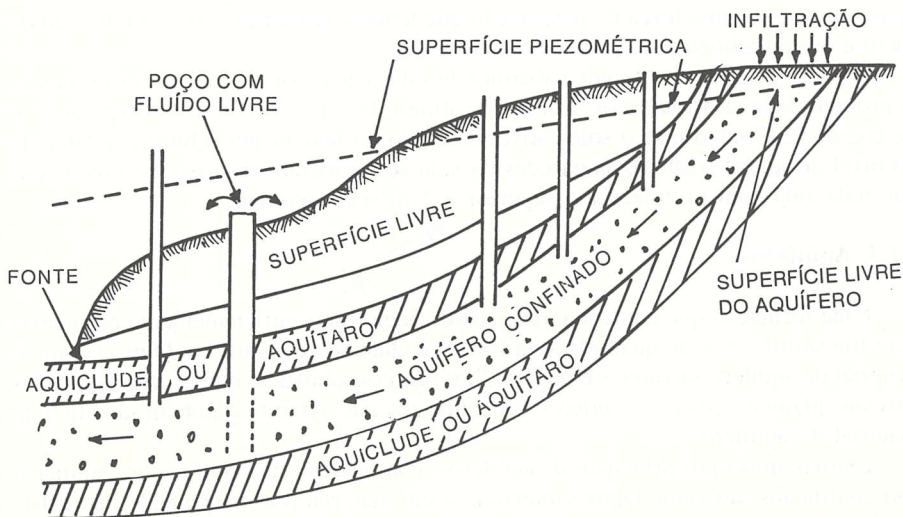
Existem dois tipos principais de aquíferos: confinados e não confinados. Aquíferos não confinados são como lagos subterrâneos em material poroso. Quando não existe argila ou outro material impermeável no topo da camada de água subterrânea então, o nível do lençol pode ser livre para variar. A superfície de um aquífero não confina-

Figura 5.12
- Aquífero não Confinado em um Vale Aluvial



Fonte: Neto, Pedro P. Castro e outros. Resíduos Sólidos Industriais, Série Atas, CETESB, 1985

Figura 5.13
Esquema de um Aquífero Confinado



Fonte: Neto, Pedro P. Castro e outros. Resíduos Sólidos Industriais, Série Atas, CETESB, 1985

do é o lençol freático, o qual é uma superfície onde as pressões da água subterrânea são iguais à pressão atmosférica.

Acima da superfície livre existe uma zona insaturada onde a pressão é menor que a pressão atmosférica por efeito de capilaridade.

O ar nessa região é normalmente contínuo e, então, o aquífero não confinado tende a ser aberto para a atmosfera. A Figura 5.12, mostra um esquema de uma aquífero não confinado.

A fronteira inferior de um aquífero é uma camada muito menos permeável, podendo ser constituída de argilas, outros materiais granulares ou rochas.

A fonte principal de água subterrânea em aquíferos não confinados é a precipitação que infiltrou no solo acima do aquífero, ou diretamente quando cai sobre o solo ou indiretamente através do escoamento superficial e infiltração de rios ou lagos.

Quando a água subterrânea flui de um aquífero não confinado para um poço de bombeamento, a superfície livre sofre uma depressão e o movimento do ar através da zona insaturada obriga a água, que está nos poros, a atingir o lençol freático.

Um aquífero confinado é uma camada de material que contém água confinada entre duas outras camadas de uma material muito menos permeável como, por exemplo, uma camada de areia entre duas camadas de argila. Camadas confinantes essencialmente impermeáveis são chamadas “aquicludes”. Se são suficientemente permeáveis para transmitir água verticalmente de ou para o aquífero confinado, mas não suficientemente permeáveis para permitir um transporte lateral de água, são denominados “aquitards”. Um aquífero limitado por um ou dois aquitards é chamado semi-confinado.

A fonte de água de um aquífero confinado é principalmente a precipitação que eventualmente se move através das camadas confinantes ou que se infiltra no material nas suas zonas de recarga.

Os aquíferos confinados são completamente saturados e não possuem uma superfície livre de água. As condições de pressão em aquíferos confinados são caracterizadas pela superfície piezométrica, a qual é obtida pelo nível de equilíbrio da água em tubos ou piezômetros, penetrantes no aquífero confinado. Se a superfície piezométrica encontra-se acima da camada confinante, o nível estático da água em um poço estará acima do aquífero. Esse poço é chamado, então, de artesiano. Se a superfície piezométrica está acima do nível do solo, os poços nele cravados serão de fluxo livre. As Figuras 5.13 e 5.14 mostram um esquema de aquífero confinado, e aquífero suspenso.

5.1.4 O Solo como Atenuador de Poluição

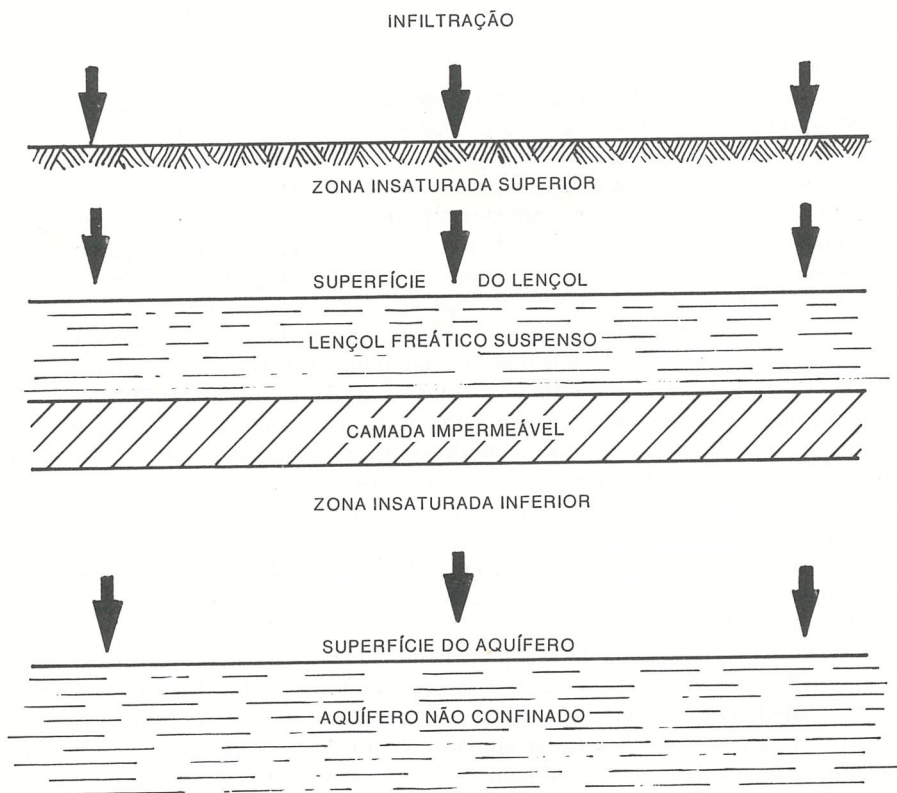
Os principais mecanismos que podem agir como atenuadores da poluição das águas durante seu fluxo abaixo da superfície são:

diluição, tamponamento do pH, precipitação por reação do resíduo com a água ou com sólidos do local, precipitação causada por hidrólise, remoção causada por oxidação-redução, filtração mecânica, volatilização e perda de gases, assimilação ou degradação biológica, decaimento radioativo, filtração em membrana ou adsorção.

Os riscos da disposição indiscriminada de resíduos no solo estão associados principalmente ao transporte desses poluentes pela infiltração dos líquidos percolados. Essa migração é responsável pela contaminação do subsolo e das águas subterrâneas num local de disposição de resíduos.

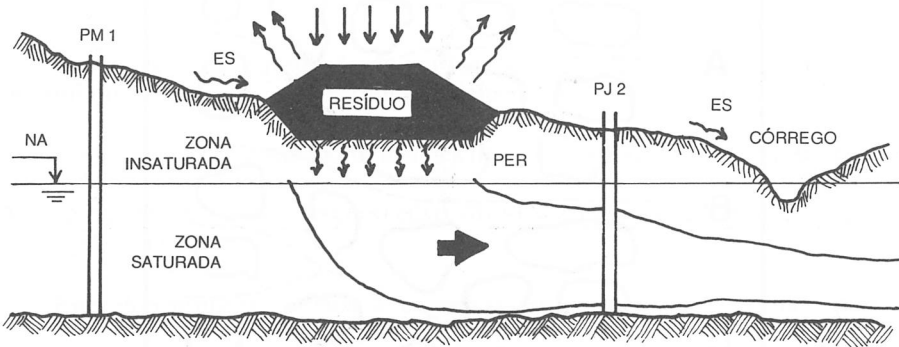
Um esquema típico desse mecanismo é mostrado na figura 5.15.

Figura 5.14 - Lençol Freático Suspenso Devido a Infiltração no Solo com uma Camada Relativamente Impermeável

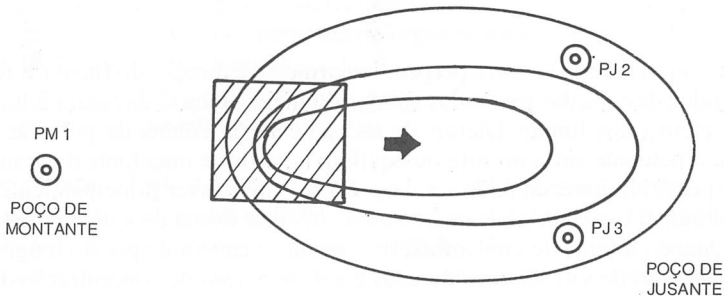


Fonte: Neto, Pedro P. Castro e outros. *Resíduos Sólidos Industriais, Série Atas, CETESB, 1985*

Figura 5.15
Esquema de Disposição Inadequada de Resíduos no Solo.



⊙ PJ 1



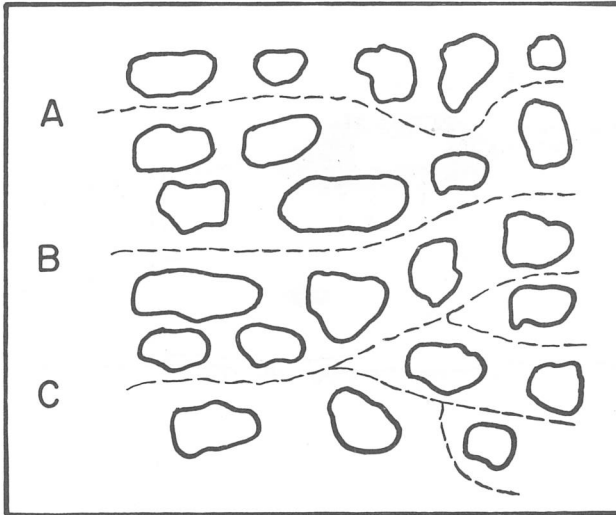
PM 1
⊙
POÇO DE
MONTANTE

POÇO DE
JUSANTE

Ao percolar através do subsolo estas águas contaminadas estão também sujeitas a mecanismos de atenuação dos poluentes nelas contidos através de processos físicos, reações geoquímicas, processos bioquímicos e processos biofísicos.

Entre os processos físicos de atenuação destaca-se a dispersão hidrodinâmica a qual é associada aos fenômenos de transporte da água através do solo. Quando a água contaminada entra no solo ou aquífero, a concentração dos poluentes decresce com o aumento da distância do fluxo. A dispersão longitudinal é causada pelas diferenças de velocidade macroscópicas de cada linha de fluxo de fluido que passa por diferentes caminhos entre os grãos do solo. A Figura 5.16 apresenta um esquema desse fenômeno (linhas A e B).

Figura 5.16
Esquema de Dispersão Hidráulica no Solo



A dispersão transversal ocorre perpendicularmente à direção do fluxo e é resultado dos repetidos desvios das partículas sólidas do meio (linha C da figura 5.16). Essa dispersão é efetiva nos limites laterais de escoamento da coluna de poluente.

Quando o poluente entra no solo ou aquífero a partir de uma fonte de grande extensão, a dispersão transversal pode ser desprezada, vai ocorrer principalmente a dispersão longitudinal causando tipicamente uma curva na forma de s de concentração/dispersão. Quando a fonte de contaminação é pontual, tanto a dispersão longitudinal quanto a transversal devem ser consideradas e a distribuição de concentração dos poluentes ao longo da pluma de contaminação é então uma curva de probabilidade a qual se torna mais achatada e larga à medida que aumenta a distância da fonte.

Outros processos físicos de atenuação que ocorrem no subsolo são a difusão dos contaminantes, a filtração de sólidos suspensos e microorganismos, evaporação e movimento de gases.

As reações geoquímicas que ocorrem tipicamente no subsolo são: reações de solução-precipitação (formação de hidróxidos insolúveis, e de óxidos solúveis), reações ácido-base, reações de óxido-redução, adsorção-dessorção, complexação e que-
lação.

Processos bioquímicos de decomposição orgânica, sínteses celulares e transpiração/respiração também irão ocorrer no subsolo e dependem da ocorrência de condições favoráveis à sobrevivência dos microorganismos.

A distribuição da concentração dos diferentes poluentes depende das suas propriedades. Em contraste com a dispersão hidrodinâmica, que produz a mesma diluição para todos os contaminantes, as outras alterações diferem para várias substâncias.

Devido a isso a concentração de alguns contaminantes é reduzida muito mais rapidamente que a concentração de outros.

A expressão geral que descreve a distribuição da concentração (C) de um contaminante dinâmico em um meio poroso poderá ser escrita da seguinte forma:

$$\frac{dc}{dt} = D(c) - V(c) - B(c) - A(c) - F(c)$$

Esta expressão é o resultado de um balanço de massa e indica a velocidade de acúmulo ou eluição de um determinado poluente ao longo do tempo.

D(c) representa a dispersão hidrodinâmica de água movendo-se em um meio poroso;

V(c) é o termo de movimento convectivo, divergente (v,c), onde V é o vetor da velocidade média.

Estes dois primeiros termos descrevem o transporte de massa do meio poroso.

B(c) representa as funções de biodegradação como: a decomposição de material orgânico, extinção de bactérias e vírus, nitrificação e desnitrificação. A DBO decresce com a distância percorrida no solo sempre que as condições forem favoráveis a uma biodegradação. A contaminação potencial por organismos patogênicos decresce substancialmente com a distância e o tempo de caminhar no solo. A maior parte desses organismos tem uma vida livre muito curta fora de seu habitat natural.

A(c) representa o decaimento radioativo.

F(c) é a função cinética de todas as reações químicas e físico-químicas que alteram a concentração do poluente na água. Entre estas reações está a precipitação de metais, trocas iônicas, adsorção, absorção, etc.

Este termo representa a soma de todas as expressões de velocidades dessas reações. No caso de adsorção a expressão comumente empregada é obtida a partir da equação de Freundlich:

$$x/m = KC^{1/n} \text{ onde}$$

x/m é a quantidade de matéria adsorvida por unidade de meio nas condições de equilíbrio;

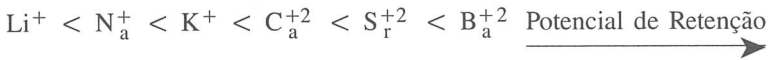
K é o coeficiente de adsorção;

C é a concentração de equilíbrio; e

n é uma constante determinada experimentalmente.

Os íons presentes na solução comportam-se de acordo com sua carga elétrica, ou seja, a maioria dos ânions (cloretos, nitratos, sulfetos, silicatos) deslocam-se e se dispersam na água geralmente com pouco ou nenhum retardamento, enquanto que todos os cátions, em maior ou menor grau, estão sujeitos à troca de íons e a adsorção em

argila e silte. A facilidade relativa da troca é variável e pode ser representada por exemplo, pela série:



sendo o lítio (Li^+) o menos fixado e o bário (Ba^{+2}) o retido com maior vigor.

Depois da decomposição do material orgânico no solo os compostos de nitrogênio aparecem sob a forma de íons de amônio (NH_4^+) ou amônia (NH_3) e nitrato (NO_3^-). Este nitrogênio é absorvido, quando em camadas superficiais, pelas plantas; caso contrário, os principais mecanismos que reduzem sua quantidade no solo são processos químicos e bacteriológicos de transformação (nitrificação e desnitrificação).

Quanto aos metais, os ligantes inorgânicos concorrem com posições de troca iônica em argilas com os cátions livres de chumbo, níquel e cobalto.

A DBO decresce com a distância percorrida no solo. Tal redução é mais efetiva na zona insaturada, podendo atingir, na zona saturada, uma redução de 95% nos 4 primeiros metros de solo.

Os processos biofísicos de transporte, filtração e adsorção dos patogênicos são os principais responsáveis pelo retardamento e redução da concentração de microorganismos nas águas subterrâneas. A distância de percurso a partir da fonte, para que ocorra total remoção dos microorganismos, irá depender do tipo e concentração do microorganismo que está entrando no subsolo, da velocidade da água no subsolo, do tipo de solo e material do aquífero e da suscetibilidade desses microorganismos à extinção causada pela modificação de seu ambiente. A maior parte desses organismos tem vida livre muito curta fora de seu habitat natural.

Em uma areia fina com alto conteúdo de argila, pode-se esperar a redução de coliformes de 2 a 4 ordens de magnitude nos primeiros metros do solo. Os vírus comportam-se, de maneira semelhante, no que diz respeito ao decaimento inicial, porém, tipos mais resistentes podem sobreviver por até 6 meses.

As distâncias de caminamento dos microorganismos vão de alguns metros para solos de textura fina, centenas de metros para materiais arenosos até distâncias da ordem de quilômetros para zonas de rochas fraturadas.

5.2 ATERROS INDUSTRIAIS

O aterro é uma forma de disposição de resíduos no solo que, fundamentada em critérios de engenharia e normas operacionais específicas, garante um confinamento seguro em termos de poluição ambiental e proteção à saúde pública.

A disposição indiscriminada de resíduos no solo pode causar poluição do ar, pela exalação de odores, fumaça, gases tóxicos ou material particulado; poluição das águas superficiais pelo escoamento de líquidos percolados ou carreamento de resíduos pela ação das águas de chuva e poluição do solo e das águas subterrâneas pela infiltração de líquidos percolados.

Estes problemas são eliminados em um aterro pela adoção das seguintes medidas de proteção ambiental:

- localização adequada;
- elaboração de projeto criterioso;

- implantação de infra-estrutura de apoio;
- implantação de obras de controle da poluição e
- adoção de regras operacionais específicas.

Os aterros podem ser denominados aterros sanitários, quando projetados e implantados especialmente para a disposição de resíduos sólidos urbanos, ou aterros industriais, quando projetados e implantados especialmente para a disposição de resíduos sólidos industriais.

Apresentam-se como a forma de destinação de resíduos mais barata e de tecnologia mais conhecida. Entretanto, deve-se sempre ter em mente que esses aterros não servem para disposição de todos os tipos de resíduos.

São passíveis de disposição em aterro os resíduos cujos poluentes neles contidos podem sofrer alguma forma de atenuação no solo, seja por processos de degradação, seja por processos de retenção (filtração, adsorção, troca iônica, etc).

Os resíduos inflamáveis, reativos, oleosos, orgânico-persistentes ou que contêm líquidos livres não devem ser dispostos em aterros.

5.2.1 Seleção de Locais para a Implantação de Aterros

A escolha do local para implantação de aterro deve atender:

- ao planejamento do desenvolvimento econômico, social e urbano da região;
- às diretrizes fixadas para o uso e ocupação do solo;
- à proteção da saúde pública e
- à defesa do meio ambiente.

Os aspectos a serem considerados na seleção de uma área são:

- grau de urbanização e compatibilidade da vizinhança;
- valor comercial do terreno;
- distância do (s) ponto (s) gerador(es) de resíduos;
- condições de acesso;
- caracterização hidrogeológica;
- potencial de contaminação das águas superficiais e subterrâneas e
- localização quanto a mananciais de abastecimento de água.

Dentre as características favoráveis de uma área destacam-se:

- baixa densidade populacional na vizinhança;
- baixo potencial de contaminação das águas subterrâneas e superficiais;
- baixo índice de precipitação pluviométrica;
- alto índice de evapotranspiração e
- subsolo constituído por um depósito extenso e homogêneo de material argiloso insaturado.

As seguintes condições devem ser observadas:

- distância de 500 m de residências;
- distância de 200 m de corpos d'água superficiais;
- subsolo constituído de material granular fino com coeficiente de permeabilidade inferior a 10^{-5} cm/s.

- declividade máxima de 20% no terreno, para implantação de aterros de resíduos sólidos industriais perigosos.

A tabela nº 5.5 fornece uma orientação quanto às condições hidrogeológicas desejáveis e mínimas para implantação de aterros.

Como condição climática desejável de um local para implantação de aterros considera-se aquela em que a evaporação potencial média anual excede a precipitação média anual em 500 mm.

Tabela 5.5
Condições Hidrogeológicas Desejáveis e Mínimas em Aterros

Característica	Condição Hidrogeológica Desejável		Condição Hidrogeológica Mínima	
	Aterro	Espessura da camada insaturada L (m)	Coef. de permeabilidade K (cm/s)	Espessura mínima da camada insaturada L (m)
Resíduos Classe I	3	10^{-7}	1,5	$(1)5 \times 10^{-5(1)}$
Resíduos Classe II	3	10^{-6}	1,5	5×10^{-5}

(1) Conforme NBR 10157 - "Aterros de Resíduos Perigosos - Critérios para Projeto, Construção e Operação."

Para se estabelecer uma sistemática, de seleção de locais para a implantação de aterros, recomenda-se um processo semelhante ao utilizado em planejamento territorial, onde para cada uma das variáveis é feita uma planta (em papel transparente) mapeando a ocorrência, dentro da região em estudo, da variável de interesse. A seguir, a variável é identificada com uma cor determinada e, por meio de uma graduação dessa cor, procura-se atribuir valores de qualidade a essa variável.

Supondo que na área de estudo foram identificados 4 tipos de solos, sendo conhecidos para cada um deles seu teor de argila, índice de plasticidade e permeabilidade. Para efetuar sua análise tem-se os valores da Tabela 5.6.

TABELA 5.6.
Características dos Solos nas Áreas Pesquisadas

Solo	Teor de Argila	Índice de Plasticidade	Permeabilidade
1	56%	20	$7,1 \times 10^{-6}$
2	62%	30	$8,5 \times 10^{-5}$
3	58%	18	$5,1 \times 10^{-5}$
4	30%	15	$6,4 \times 10^{-4}$

Desse modo, pode-se identificar que o tipo de solo mais adequado é o n.º 1 que tem um bom teor de argila, um índice de plasticidade maior igual a 20 unidades e uma permeabilidade de $7,1 \times 10^{-6}$ cm/s, seguido dos n.ºs 2,3 e 4.

A gradação pode ser dada como um índice de qualidade, isto é, quanto melhor o tipo de solo mais intensa é a cor, ou menos intensa se assim for preferido, sendo importante estabelecer-se um único padrão para todas as variáveis.

Depois de concluídas, as plantas devem ser sobrepostas e, conforme o padrão escolhido, as áreas mais escuras (ou claras) representarão as regiões mais adequadas para receber um aterro de resíduos.

Este procedimento revela, via de regra, uma série de áreas igualmente adequadas, entre as quais apenas uma será utilizada. Para a escolha procede-se a uma análise econômica onde serão avaliados os custos do terreno, de implantação de acessos e de transportes. Aquela que apresentar o menor custo total por unidade de massa ou volume de resíduo deve ser a escolhida.

5.2.2 Projeto de Aterros

Os aterros são empreendimentos passíveis de elaboração de EIA.RIMA, conforme Resolução CONAMA 001 de 23/01/86, devendo o estudo ser submetido à apreciação da Secretaria Estadual do Meio Ambiente.

A implantação de um aterro deverá ser realizada de acordo com um projeto criterioso, o qual deve ser submetido à aprovação do O.C.P.A. (Órgão de Controle de Poluição Ambiental), para efeito de obtenção de licenças para instalação e funcionamento.

Atualmente a filosofia dominante em termos de projeto e implantação de aterros é a da adoção de múltiplas barreiras à liberação de poluentes ao meio ambiente, através da associação das barreiras naturalmente disponíveis (hidrogeologia favorável e isolamento com relação a aquíferos aproveitáveis) àquelas criadas pelo homem (construção de camadas impermeabilizantes e sistemas de coleta e tratamento de líquidos percolados).

Além dessas barreiras, devem ser considerados os seguintes elementos:

- preparação dos resíduos para o aterramento: secagem, neutralização, solidificação, fixação química, encapsulamento, precipitação de cianetos etc;
- inspeção e monitoramento freqüente da integridade e do desempenho dos elementos constituintes do aterro e
- monitoramento da qualidade das águas superficiais e subterrâneas no entorno.

Na elaboração de projetos de aterros industriais devem ser observadas as seguintes normas técnicas:

- NBR 10.004. “Resíduos Sólidos - Classificação”
- NBR 8418. “Apresentação de Projetos de Aterros de Resíduos Industriais Perigosos”;
- NBR 10.157. “Aterros de Resíduos Perigosos- Critérios para Projeto, Construção e Operação”;
- PN1:603.06.006. “Aterros de Resíduos não Perigosos, Critérios para Projeto, Construção e Operação”;
- PN 1:63.06-003. Construção de Poços de Monitoramento e Amostragem de Aquífero Freático

- CETESB L 1030. “Membranas Impermeabilizantes e Resíduos - Determinação de Compatibilidade”

Para a elaboração de projeto e implantação de aterro são necessários os seguintes estudos:

a) Caracterização e Classificação dos resíduos

Os resíduos a serem dispostos devem ter suas características físicas, físico-químicas, químicas e infecto-contagiosas muito bem definidas. Esse conhecimento condicionará: a escolha da forma do aterro e dos materiais constituintes (que devem ser compatíveis com os resíduos); o projeto dos sistemas de impermeabilização, de coleta e tratamento de percolados; o sistema de monitoramento; os planos de segurança e a própria operação do aterro.

A classificação dos resíduos deverá ser realizada conforme descrito no Capítulo 1.

b) Caracterização do Local Destinado à Implantação do Aterro

- Caracterização Geográfica

A localização geográfica da área destinada à implantação do aterro deverá ser indicada em mapas ou levantamentos planialtimétricos gerais do Município com relação à indústria(s) geradora(s) do(s) resíduo(s) a ser(em) disposto(s), corpos d'água e mananciais de abastecimento próximos, vias de acesso, núcleos urbanos e demais acidentes de interesse. Estes mapas são usualmente encontrados em escalas 1:10.000, 1:25.000 ou 1:50.000.

- Caracterização Topográfica

É necessária a realização de um levantamento topográfico planialtimétrico da área destinada à implantação do aterro, em escala conveniente (1:500 ou 1:1000, dependendo da superfície e porte do aterro), com curvas de nível de metro em metro e indicação de todos os detalhes significativos do terreno e vizinhança (construções, poços, nascentes de água, etc).

- Caracterização Hidrogeológica

É necessária a realização de prospecções e estudos para caracterização hidrogeológica do local de implantação do aterro, que contemple as seguintes informações:

- definição das camadas constituintes do subsolo;
- determinação da profundidade do lençol freático;
- elaboração de mapas potenciométricos;
- conhecimento da dinâmica, qualidade e importância econômica das águas subterrâneas;
- importância do terreno em termos de recarga de aquíferos, e
- avaliação de riscos de ruptura ou erosão acentuada do terreno de fundação

O tipo ou seqüência de técnicas de investigação a serem empregadas deve ser o necessário e suficiente, conforme julgamento do profissional competente, para objeti-

var as informações de interesse, cabendo ao técnico responsável a justificativa de sua escolha. Podem ser utilizados:

- inspeções de reconhecimento;
- mapeamento detalhado de superfície;
- consulta a cartas ou mapeamentos geológicos locais ou regionais existentes;
- utilização de métodos geofísicos;
- execução de sondagens diretas (a trado, a percussão ou rotativas);
- realização de ensaios "in situ" (resistência à penetração, infiltração, bombeamento, etc.);
- retirada de amostras deformadas ou indeformadas para realização de ensaios de laboratório.

- Caracterização Climatológica

São necessários dados de precipitação pluviométrica, evaporação e direção de ventos predominantes, correspondentes ao maior período de observação possível, bem como o conhecimento do regime de chuvas no local de implantação, através da equação de chuvas.

Uma vez determinadas as características da área e dos resíduos a serem dispostos deve-se proceder à concepção básica do aterro.

Dependendo das características do terreno, bem como da consistência e capacidade de suporte dos resíduos, o aterro poderá ser executado acima da superfície original do terreno ou em trincheiras. Qualquer que seja a concepção adotada deve-se garantir a integridade do aterro no que se refere a recalques, desabamentos, deslizamentos ou erosão dos elementos constituintes e a sua operacionabilidade sob quaisquer condições.

As seguintes condições devem ser observadas nos projetos de aterros para disposição de resíduos sólidos industriais perigosos (Classe I):

- vida útil mínima de 10 anos;
- sistema de drenagem de águas pluviais capaz de suportar uma chuva de pico com 25 anos de período de recorrência;
- implantação de um duplo sistema de impermeabilização com dreno-testemunha na superfície inferior do aterro e
- implantação de um sistema de coleta e tratamento de líquidos percolados.

A figura 5.17 apresenta um esquema para execução de aterro de resíduos perigosos - Classe I.

As figuras 5.18, 5.19, 5.20 e 5.21 apresentam esquemas para aterros de resíduos não perigosos e não inertes - Classe II.

5.2.3 Infra-Estrutura Básica de Aterros

A infra-estrutura básica de um aterro é composta pelos seguintes elementos de apoio à operação:

- cerca, para isolamento da área ao acesso de pessoas e animais;
- placa de sinalização, para identificação do local;

- faixa de proteção sanitária de 5 a 10 m de largura em toda a volta do aterro, destinada ao plantio de arbustos e árvores, formando uma cerca viva para melhorar a estética do local e dificultar a visão do interior da área;
- guarita, para controle da entrada de veículos;

Figura 5.17
Esquema de Aterro de Resíduos Classe I

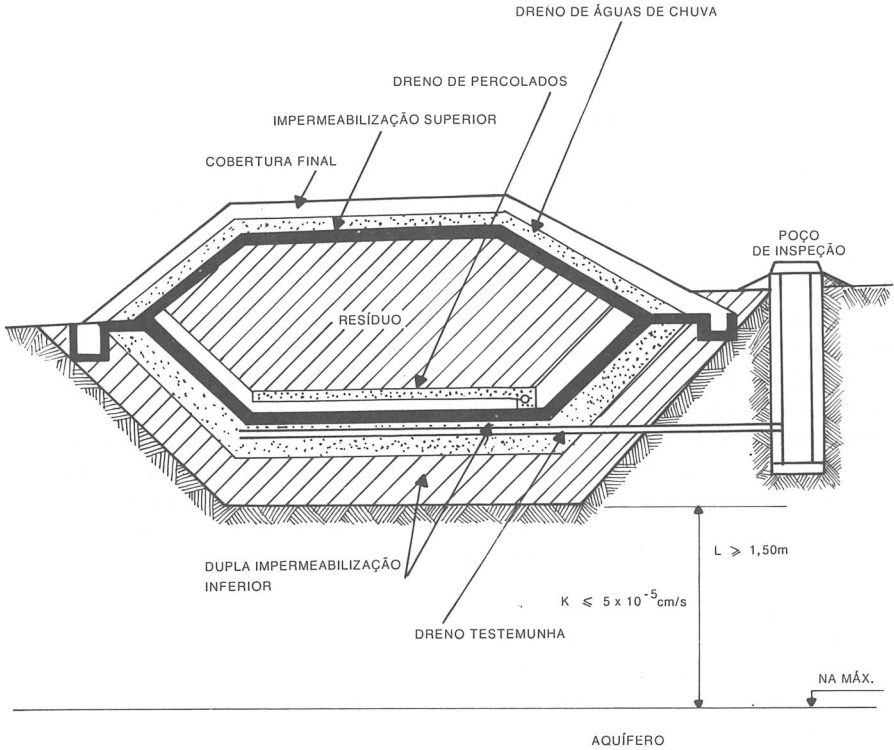
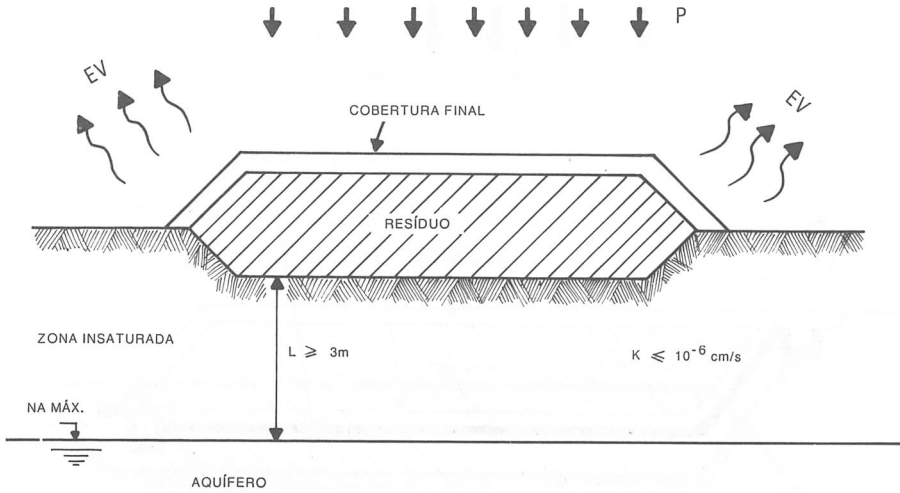


Figura 5.18

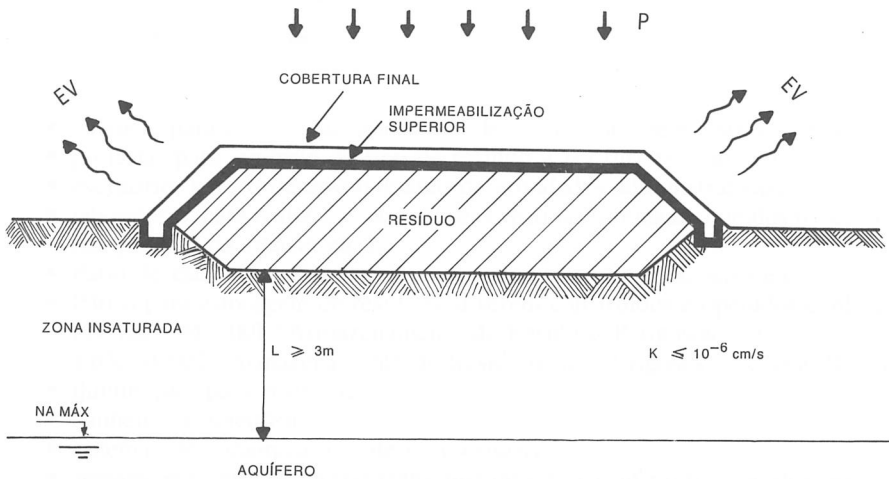
- Esquema de Aterro de Resíduos Classe II - Condições Climáticas e Hidrogeológicas Favoráveis



EV - P \geq 500 mm
 P - precipitação média anual - mm
 EV - evaporação potencial média anual - mm
 NA MÁX - nível mais alto do lençol freático

Figura 5.19

- Esquema de Aterro de Resíduos Classe II - Condições Climáticas Insatisfatórias e Hidrogeológicas Favoráveis



EV - P < 500 mm

Figura 5.20 — Esquema de Aterro de Resíduos Classe II — Condições Climáticas Favoráveis e Hidrogeológicas Insatisfatórias

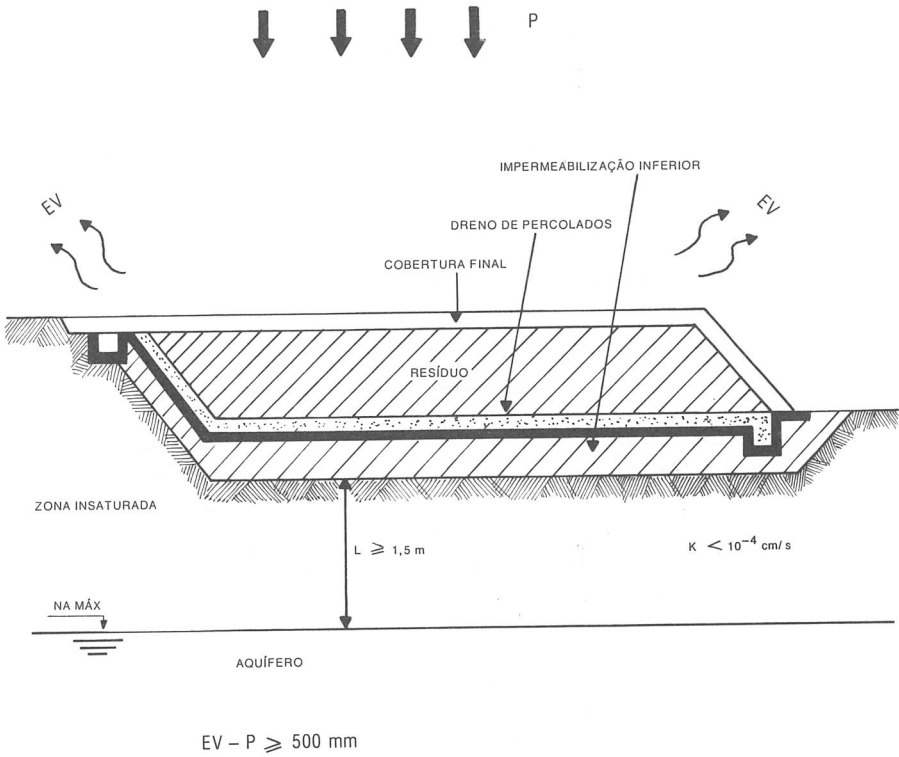
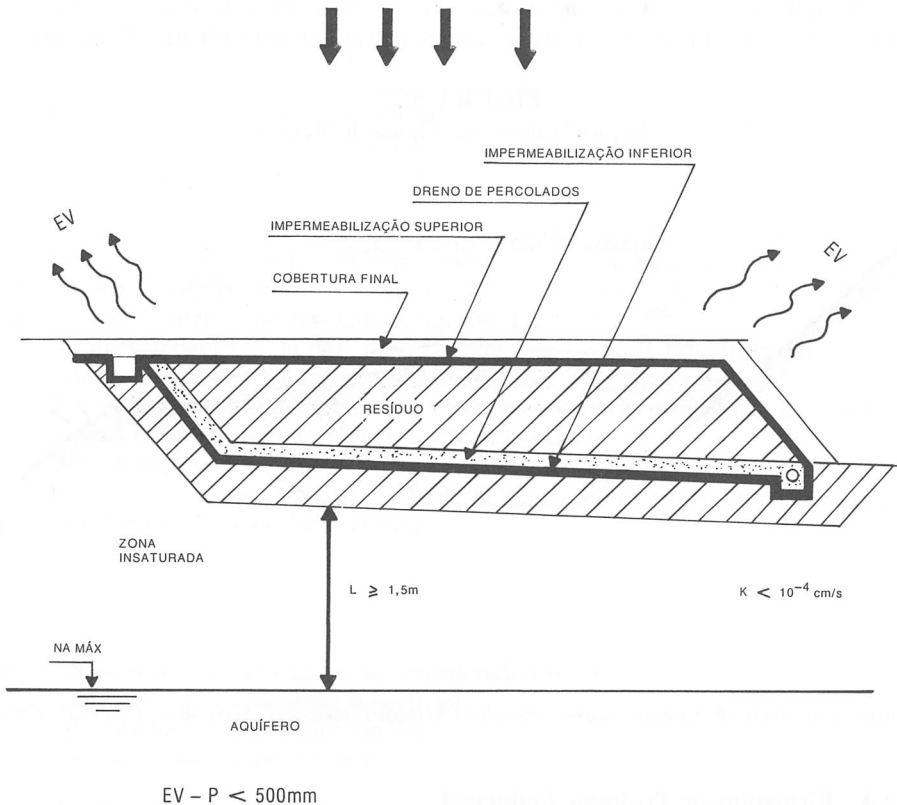


Figura 5.21 — Esquema de Aterro de Resíduos Classe II — Condições Climáticas e Hidrogeológicas Insatisfatórias

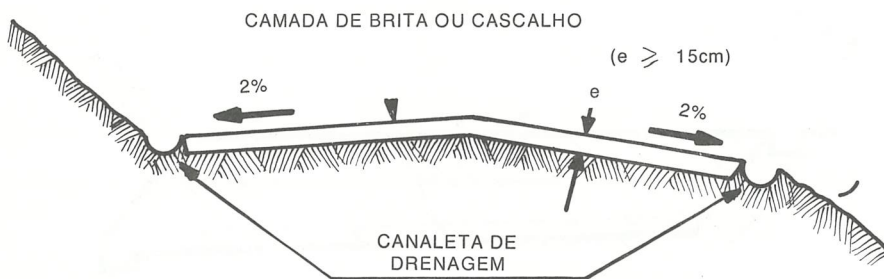


- balança, para controle da quantidade de resíduos a serem dispostos no aterro;
- portaria, para controle do tipo de resíduo a ser disposto no aterro;
- escritório, para o desenvolvimento de atividades administrativas;
- laboratório, para realização de análises expeditas (umidade, líquidos livres, pH, composição qualitativa etc.);
- Pátio de estocagem de materiais, tais como brita, tubos, terra etc;
- Pátios para estocagem de resíduos, a serem construídos e operados conforme PN 1:63. 04 - 001 "Armazenamento de Resíduos Perigosos" - Classe I e PN 1:63. 04-002 "Armazenamento de Resíduos não Perigosos" - Classe II e III;
- iluminação, para operação noturna;
- banheiros e refeitórios e
- sistemas de comunicação interna e externa.
- acessos às frentes de aterramento, que devem permitir o trânsito dos veículos sob quaisquer condições e serem, no mínimo, cascalhados.

A inclinação longitudinal dos acessos deve ser limitada a 15% e a inclinação transversal deve ser limitada a 2%. A seção transversal básica é apresentada na Figura 5.22. As canaletas devem ser dimensionadas do mesmo modo que a rede de drenagem superficial.

A largura do acesso vai variar de acordo com a frequência de utilização, mas geralmente fica em torno de 5 m. Deve-se sempre prever um ou mais pátios de manobra.

FIGURA 5.22
- Seção Transversal Típica de Acesso



Fonte: Neto, Pedro P. Castro e outros. *Resíduos Sólidos Industriais, Série Atas, CETESB, 1985*

5.2.4 - Elementos de Proteção Ambiental

Dentre os elementos de proteção ambiental propriamente ditos incluem-se:

- sistemas de drenagem de águas pluviais;
- sistemas de impermeabilização;
- sistemas de detecção de vazamentos através da impermeabilização;
- sistemas de coleta e tratamento de líquidos percolados;
- sistemas de drenagem de gases;
- cobertura final e
- poços de monitoramento do aquífero.

a) Sistemas de Drenagem de Águas Pluviais

Deverão ser previstos em um aterro:

- sistemas para drenagem das águas que precipitam à montante da área do aterro, evitando o seu escoamento através desta área;

- sistemas para drenagem das águas que precipitam sobre a área do aterro, durante a fase de operação, evitando que elas percolem através dos resíduos e
- sistemas para drenagem das águas que precipitam sobre o aterro concluído, evitando sua infiltração na massa dos resíduos.

A rede de drenagem pode ser:

- provisória, quando sua utilização está relacionada com um curto período de vida do aterro e, nesse caso, pode ser um canal não revestido, ou
- definitiva, quando tem por finalidade interceptar e desviar o escoamento superficial durante e após a vida útil do aterro, devendo ser composto por estruturas revestidas, para evitar problemas de erosão.

As estruturas drenantes devem ser dimensionadas para drenar sob quaisquer circunstâncias, uma chuva de pico com período de retorno de 5 anos para o caso de aterros de resíduos não perigosos (Classe II e III) e com período de retorno de 25 anos, para o caso de aterros de resíduos perigosos (Classe I).

O dimensionamento da rede de drenagem é dependente principalmente do tipo de estrutura drenante e da vazão a ser drenada.

Nos aterros, as estruturas drenantes mais comuns são as meias canas de concreto. Alguns canais podem apresentar seção trapezoidal.

Determinação da vazão a ser drenada

No cálculo de vazão para aterros, pode-se utilizar o método racional, válido para pequenas bacias (área até 50 hectares):

$$Q = c.i.A$$

onde:

Q = vazão a ser drenada na seção considerada (m^3/s);

c = coeficiente de escoamento superficial;

A = área da bacia contribuinte (m^2) e

i = intensidade da chuva crítica (m/s).

O coeficiente de escoamento superficial, no presente caso, pode ser obtido na Tabela 5.7.

A intensidade da chuva crítica é a que causa maior vazão na seção considerada e tem duração igual ao tempo de concentração ($t=tc$), que pode ser calculado por uma das seguintes fórmulas:

$$tc = 5,3 \left(\frac{L}{I} \right)^{1/3} \text{ (em min.)}$$

$$tc = 57 \left(\frac{L^3}{H} \right)^{0,385} \text{ (em min.)}$$

onde:

L = comprimento do talvegue máximo da bacia (km);

H = altura máxima do perfil longitudinal do talvegue máximo (m);

I = declividade média do talvegue máximo (m/m) - $I = \frac{H}{L}$

Tabela 5.7
Valores do Coeficiente de Escoamento Superficial

TIPO DE COBERTURA	SOLO ARENOSO DECLIVIDADE		SOLO ARGILOSO DECLIVIDADE	
	≤ 7%	> 7%	≤ 7%	> 7%
Áreas com matas	0,20	0,25	0,25	0,30
Campos cultivados	0,30	0,35	0,35	0,40
Áreas gramadas	0,30	0,40	0,40	0,50
Solos sem cobertura vegetal	0,30	0,60	0,60	0,70

Para determinação da intensidade da chuva crítica, utiliza-se, entre outras, a seguinte equação:

$$i(tc,T) = \frac{1}{t_c} (0,21 \ln T + 0,52) \times (0,54 t_c^{0,25} - 50) \times P(60,10)$$

onde:

i = intensidade da chuva crítica (mm/min);

t_c = tempo de concentração (min);

T = período de retorno (anos);

$P(60,10)$ = precipitação com duração de 60 minutos e período de retorno de 10 anos (mm), já ocorrida, que tem valores tabelados (Tabela 5.8) para algumas cidades do Brasil.

Para quatro cidades brasileiras foram definidas equações específicas:

São Paulo:

$$i = \frac{1747,9T^{0,181}}{(tc + 15)^{0,89}}$$

Rio de Janeiro:

$$i = \frac{1239T^{0,150}}{(tc + 20)^{0,34}}$$

Curitiba:

$$i = \frac{5950T^{0,217}}{(tc + 26)^{1,15}}$$

Porto Alegre:

$$i = \frac{23}{tc + 24} \quad (p/T = 5 \text{ anos})$$

sendo T em anos, t_c em minutos e i em mm/hora.

Tabela 5.8
Valores de $P_{(60,10)}$ para 80 Localidades Brasileiras

ESTADO	POSTO	CIDADE	$P_{(60,10)}$ mm
Rio Grande do Sul	1	Alegrete	62
	7	Bagé	49
	21	Caxias do Sul	54
	24	Cruz Alta	65
	27	Encruzilhada	48
	35	Iraí	56
	56	Passo Fundo	43
	61	Porto Alegre	64
	68	Rio Grande	68
	71	Santa Maria	62
	73	Sta. Vitória do Palmar	62
	80	S. Luiz Gonzaga	64
	94	Uruguaiana	56
	96	Viamão	37
Santa Catarina	14	Blumenau	72
	29	Florianópolis	70
	77	São Francisco do Sul	65
Paraná	26	Curitiba	68
	37	Jacarezinho	52
	53	Paranaguá	70
São Paulo	60	Ponta Grossa	54
	6	Avaré	64
	42	Lins	52
	59	Piracicaba	58
	74	Santos-Itapema	140
	75	Santos	84
	76	São Carlos	70
	81	São Simão	51
	2	Alto Itatiaia	60
	8	Bangu	68
Rio de Janeiro	16	Cabo Frio	50
	17	Campos	55
	34	Ipanema	72
	38	Jardim Botânico	67
	41	km 47 Rod. Pres. Dutra	78
	48	Niterói	64
	49	Nova Friburgo	60
	57	Petrópolis	76
	58	Pinheiral	64
	63	Praça XV	74
	64	Praça Saens Pena	60
	66	Resende	70
	70	Santa Cruz	57
	89	Teresópolis	66
	95	Vassouras	58
	98	Volta Redonda	67
Espírito Santo	97	Vitória	56
	9	Barbacena	58
Minas Gerais	13	Belo Horizonte	62
	55	Passa Quatro	44
Bahia	83	Sete Lagoas	52
	69	Salvador	60

ESTADO	POSTO	CIDADE	P(60,10) (mm)
Sergipe	5	Aracaju	66
Alagoas	43	Maceió	55
Pernambuco	47	Nazaré	44
	50	Olinda	60
Paraíba	40	João Pessoa	50
	78	São Gonçalo	62
Rio Grande do Norte	46	Natal	58
Ter.Fer.de Noronha	28	Fernando de Noronha	70
Ceará	31	Fortaleza	54
	33	Guaramirangá	54
	65	Quixeramobim	66
Piauí	88	Teresina	90
	10	Barra do Corda	70
Maranhão	79	São Luiz	59
	91	Turiassu	66
	3	Alto Tapajós	80
Pará	12	Belém	62
	84	Soure	86
	85	Taperinha	76
	39	Juaretê	82
	44	Manaus	68
Amazonas	54	Paritins	80
	92	Vaupés	80
Rondônia	62	Porto Alegre	72
Mato Grosso	25	Cuiabá	68
	19	Catalão	60
Goiás	30	Formosa	57
	32	Goiânia	70

Fonte: Pfafstetter, Otto: "Chuvas Intensas no Brasil", Ministério da Viação e Obras Públicas e Departamento Nacional de Obras de Saneamento, 1957.

Dimensionamento do canal

Conhecida a vazão de projeto, o dimensionamento do canal pode ser feito através da seguinte equação:

$$Q = \frac{1}{n} S R_h^{2/3} \cdot i^{1/2}$$

onde:

Q = vazão de projeto (m³/s);

n = coeficiente de rugosidade;

S = seção molhada na área da seção transversal ocupada pelo líquido (m²)

R_h = raio hidráulico da seção (m)

$$R_h = \frac{S}{P} \quad \begin{array}{l} \text{(seção molhada)} \\ \text{(perímetro molhado)} \end{array}$$

i = declividade do canal;

P = perímetro molhado, perímetro da seção ocupada pelo líquido descontando-se a linha de superfície livre.

Os valores do coeficiente de rugosidade n são apresentados na Tabela 5.9.

Tabela 5.9
Coeficientes de Rugosidade

Material do canal	Coefficiente n
Concreto	0,013
Terra	0,025
Brita	0,030

No caso dos canais de seção trapezoidal, a inclinação dos taludes depende do material constituinte, tal como indicado na tabela 5.10.

Tabela 5.10
Inclinação dos Taludes de Seção Trapezoidal

Material do canal	Inclinação dos taludes
Concreto simples	1(V) : 1(H)
Argila rija	1(V) : 1,5(H)
Solo argiloso	
Solo siltoso	1(V) : 2(H)
Solo arenoso	
Cascalho ou brita	
Terra solta	

A velocidade máxima admissível para se evitar erosões é indicada na Tabela 5.11

Tabela 5.11
Velocidade Máxima nos Canais

Superfície do canal	V_m (m/s)
Solo arenoso	0,60
Solo siltoso	0,70
Solo argiloso	0,80
Argila rija	1,00
Cascalho fino	1,20
Pedregulhos e cascalho grosso	1,60
Concreto	3,00

O dimensionamento de canais não é uma tarefa fácil. Por isso, recomenda-se a adoção do seguinte roteiro de cálculo:

- locar em planta as redes de drenagem; determinar os perfis longitudinais e as declividades dos canais; escolher a forma geométrica da seção e calcular a vazão de projeto a ser drenada;
- montar as equações de S, P e R_h em função da forma geométrica da seção (por exemplo: trapezoidal como na figura 5.23) e da altura da lâmina de água (y).
- construir a tabela onde são atribuídos valores para y e calculados os demais, tal como ilustra a figura 5.24;
- construir o gráfico tal como ilustra a figura 5.25;

Figura 5.23 — Canal de Seção Trapezoidal

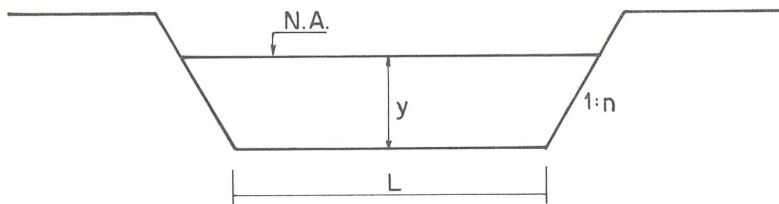
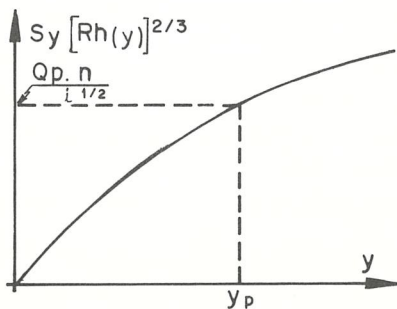


Figura 5.24 — Tabela para Dimensionamento de Drenos de Águas Pluviais

y	$S(y)$	$\bar{P}(y)$	$R_h(y)$	$[R_h(y)]^{2/3}$	$S(y) [R_h(y)]^{2/3}$

Figura 5.25 — Gráficos para Dimensionamento de Drenos de Águas Pluviais



- utilizar os valores anteriormente determinados da vazão de projeto (Q_p), do coeficiente de rugosidade (n) e de declividade do canal (i) para calcular a quantidade:

$$\frac{Q_p \cdot n}{i^{1/2}} ;$$

- que serão numericamente iguais a:

$$S \cdot R_h^{2/3} ,$$

- procurar no gráfico na figura 5.25 esse valor e obter a correspondente altura de projeto da lâmina de água (Y_p) e, conseqüentemente, as dimensões da seção transversal;
- verificar se a velocidade de projeto ($V = Q_p/S$) é menor ou igual à máxima permitida para o material de revestimento do canal; se isso não acontecer, o fundo e as paredes serão erodidos.

b) Sistemas de Impermeabilização

A construção de sistemas de impermeabilização em aterros objetiva impedir a percolação de águas de chuva através da massa de resíduos, após conclusão da operação de aterramento (impermeabilização superior) e garantir um confinamento dos resíduos e líquidos percolados, impedindo a infiltração de poluentes no subsolo e aquíferos adjacentes (impermeabilização inferior).

Um sistema de impermeabilização deve apresentar as seguintes características:

- estanqueidade;
- durabilidade;
- resistência mecânica;
- resistência a intempéries;
- compatibilidade com os resíduos a ser aterrados.

Ao se projetar e implantar um sistema de impermeabilização para um aterro, devem ser considerados os seguintes aspectos:

- preparação de uma base de assentamento estável;
- execução da impermeabilização segundo a melhor tecnologia disponível para cada material empregado;
- execução de uma proteção eficiente contra esforços mecânicos e intempéries.

Dentre os materiais comumente empregados em impermeabilização destacam-se as argilas compactadas e as geomembranas sintéticas como os mais indicados para emprego em aterros industriais.

Impermeabilização com Argilas Compactadas

Um solo argiloso, para ser considerado adequado como impermeabilização de aterros, deve atender às seguintes características:

- ser classificado como CL, CH, SC ou OH, segundo sistema unificado de classificação de solos (ASTM STANDARD D2487-69);
- apresentar uma porcentagem maior do que 30% de partículas passando pela peneira n° 200 da ASTM (Análise Granulométrica por Peneiramento e Sediimentação conforme MB 32/1968 da ABNT);
- apresentar Limite de Liquidez maior ou igual a 30% (Ensaio Limite de Liquidez MB 30/1969 da ABNT);
- apresentar índice de plasticidade maior ou igual a 15;
- apresentar pH maior ou igual a 7 e
- apresentar coeficiente de permeabilidade inferior a 10^{-7} cm/s, quando compactado.

As camadas impermeabilizantes de argila devem ser executadas com controle tecnológico de compactação, com as seguintes características:

- camadas compactadas de no máximo 20 cm de espessura;
- umidade em torno da umidade ótima obtida no ensaio de compactação com Proctor normal;
- densidade de no mínimo 95% da densidade máxima obtida no ensaio de compactação com Proctor normal;
- coeficiente de permeabilidade de, no máximo, 10^{-7} cm/s.

Impermeabilização com Geomembranas Sintéticas

Um grande número de materiais de revestimento sintético, baseado em borracha e plásticos, existe atualmente para servir a diferentes propósitos e condições.

Entre os polímeros atualmente empregados para a confecção de membranas flexíveis incluem-se os seguintes tipos: borracha butílica; borracha da epíclorídrica (ECO); borracha de nitrila; borracha de etileno-propileno (EPDM); cloreto de polivinila (PVC); elastômeros termoplásticos; neopreno (borracha de cloropreno); polietileno de alta densidade; polietileno clorado (CPE); polietileno clorossulfonado (CSPE); poliolefinas elastificadas (ELPO) e terpolímero de etileno-propileno (EPT).

As membranas flexíveis podem ser fabricadas com reforço de textura, através da laminação de um tecido entre camadas do material base. Os materiais de reforço mais comumente utilizados são o náilon, o polipropileno e a fibra de vidro.

Entre as vantagens decorrentes da confecção de uma membrana com reforço de estrutura, incluem-se uma redução potencial da sua espessura total, um aumento de resistência à tração, punção, deformação, deterioração por ozona e percolação, além de um acréscimo de estabilidade dimensional e de capacidade de carga eletrostática estática.

As principais desvantagens das mantas reforçadas são: baixa resistência à ruptura, menor capacidade de ajuste às irregularidades do solo, menor flexibilidade e um aumento de custo em relação às membranas não reforçadas.

As mais importantes vantagens das membranas sintéticas flexíveis para a contenção de resíduos industriais são a capacidade de conter uma grande variedade de fluidos com uma perda mínima por percolação e a relativa facilidade e economia de instalação e manutenção.

As principais desvantagens incluem a relativa vulnerabilidade de algumas delas à ozona e aos raios ultravioleta, quando comparadas com revestimentos rijos, e limitada resistência aos esforços de pressão e tensão de maquinaria pesada.

Além disso, são suscetíveis à laceração, abrasão e punção por objetos cortantes, como aparas metálicas, pedras, raízes de árvores etc.

Alguns materiais são propensos a rachar a temperaturas extremamente baixas e a dilatar e deformar a temperaturas extremamente altas.

Dentre os materiais disponíveis no mercado destacam-se:

- Borracha Butílica;
- Borracha de Etileno-propileno (EPDM);
- Cloreto de Polivinila (PVC);
- Polietileno de alta densidade (HDPE) e
- Polietileno Clorossulfonado (CSPE).

A Tabela 5.12 apresenta as características, vantagens e desvantagens dessas membranas.

Na seleção de uma membrana sintética para um local de disposição de resíduos, o material a ser utilizado deve atender aos seguintes requisitos:

- resistir satisfatoriamente ao ataque de todos os produtos químicos aos quais estará exposto, assim como à ozona, à radiação ultravioleta e aos microrganismos; essas características devem ser comprovadas através de ensaios de laboratório;
- apresentar resistência às intempéries para suportar os ciclos de umedecimento-secação e congelamento-descongelamento;
- apresentar adequada resistência à tração e flexibilidade e alongamento suficientes para suportar os esforços de instalação e de operação, sem apresentar falhas;
- resistir à laceração, abrasão e punção de qualquer material pontiagudo ou cortante que possa estar presente nos resíduos; e
- apresentar facilidade para execução de emendas e reparos em campo, sob quaisquer circunstâncias.

A membrana escolhida deve ter espessura uniforme e ser fornecida por um só fabricante. Quando do seu recebimento no local de disposição, deve ser convenientemente inspecionada, não devendo apresentar defeitos externos visíveis, tais como rasgos, rachaduras, falhas, furos, bolhas, ondulações, beiras serrilhadas ou de corte irregular.

Para determinação da compatibilidade de uma membrana com os resíduos a ser aterrados deve-se utilizar a norma Cetesb L1.030 “Mantas Poliméricas e Resíduos - Determinação da Compatibilidade”.

Pela experiência obtida em outros países, como Estados Unidos e Alemanha, o tipo de geomembrana que tem se mostrado mais adequada para impermeabilização em aterros são as geomembranas de Polietileno de Alta Densidade, por sua resistência mecânica, durabilidade e compatibilidade com uma gama bem variada de resíduos.

Tabela 5.12

Características, Vantagens e Desvantagens de Determinadas Membranas Sintéticas.

MATERIAL	CARACTERÍSTICAS	VANTAGENS	DESvantagens
Borracha butílica	Copolímero de isobutileno com pequenas quantidades de isopreno.	Baixa permeabilidade a vapor d'água e gás; estabilidade térmica; resistência a intemperismo e à ozona; resistência à tração, ruptura e punção.	Baixa resistência a solventes de hidrocarbonetos e óleos de petróleo. Difícil para emendar ou reparar.
Borracha de etileno-propileno (EPDM)	Família de terpolímeros de etileno, propileno e hidrocarbonato não conjugado.	Resistência à ozona, radiação ultravioleta, ao envelhecimento, à abrasão, à ruptura e à absorção e penetração de água; tolerância aos extremos de temperatura. Alta flexibilidade; resistência a concentrações diluídas de ácidos, álcalis, silicatos fosfatos e salmoura.	Não é recomendada para solventes de petróleo e solventes halogenados. Difícil para emendar ou reparar.
Cloreto de polivinila (PVC)	Polímero do monômero de cloreto de vinila.	Resistência à tração, punção, absorção e alongamento; boa resistência a inorgânicos; facilidade para emendar.	É atacada por muitos orgânicos, incluindo hidrocarbonetos, solventes e óleos. Não é recomendada para exposição às intempéries e à radiação ultravioleta.
Poliétileno de alta densidade	Polímero termoplástico baseado em etileno.	Resistência a óleos e solventes; baixa permeabilidade a vapores de água e gás; resistência às intempéries e a altas temperaturas.	Sujeita a rachaduras e à punção. Difícil para manusear em campo.
Poliétileno Clorosulfonado (CSPE)	Família de polímeros resultantes da reação de poliétileno com cloro e dióxido de enxofre.	Resistência à ozona, ultravioleta, intempéries e aos extremos de temperatura; resistência a ácidos e álcalis; resistência à punção; facilidade para emendar.	Baixa resistência à tração Baixa resistência a óleos.

A instalação de uma membrana é tão importante quanto sua seleção e deve sempre ser precedida de um detalhado processo de planejamento, projeto e construção da infraestrutura necessária.

A instalação das mesmas deve ser feita pelos próprios fabricantes ou por empresas por eles autorizadas.

Considerações gerais de planejamento e projeto

Os fatores condicionantes do planejamento e do projeto de estruturas impermeabilizantes à base de membrana sintética são bastante variados, abrangendo desde as condições físicas do local até as características climáticas da região, passando pela geometria da obra que se quer impermeabilizar e pelos resíduos que serão dispostos.

Os principais fatores a se considerar serão abordados a seguir.

Tipo e textura dos solos “in situ”

A determinação da classificação, homogeneidade relativa, características físicas, mecânicas e químicas do solo natural é um aspecto que não pode ser desprezado.

Os solos devem ser submetidos aos testes de limites de Atterberg, granulometria, umidade de retração/inchamento, densidade, resistência, recalque, permeabilidade, conteúdo de matéria orgânica, mineralogia das argilas, capacidade de troca iônica e solubilidade.

Características da sub-base

Um dos componentes mais importantes, comuns a todos os sistemas que empregam membranas, é a sub-base.

Por ser a estrutura de suporte para as membranas, sua qualidade e integridade são fundamentais para um desempenho satisfatório de todo o sistema.

As sub-bases inadequadas são responsáveis ou contribuem para a ocorrência de muitas falhas na instalação de membranas e na operação de aterros.

Uma sub-base adequada deve proporcionar um suporte estável para o material de impermeabilização.

Estabilidade dos materiais

Os materiais utilizados devem apresentar características estáveis sob diferentes condições de carregamento e diferentes condições climáticas, considerando-se as possíveis reações de um dado solo em função das alterações de umidade e resistência e escolha dos ângulos de inclinação dos taludes.

De um modo geral, os taludes com inclinação de 1(V):3(H) mostram-se estáveis e apropriados à colocação de membranas.

Drenagem

Os sistemas de drenagem superficial e subsuperficial devem ser planejados com o objetivo de minimizar danos potenciais à impermeabilização.

Deve ser analisada a possibilidade de ocorrência de gás abaixo da membrana e, neste caso, prever-se um sistema de ventilação adequado.

Geometria do local a ser impermeabilizado

A geometria retangular é mais econômica para se efetuar uma impermeabilização. Lados curvos ou formas irregulares contribuem, normalmente, para um aumento no custo de instalação e de pontos sujeitos a falhas.

Temperatura ambiente

As variações de temperatura, principalmente onde estas são pronunciadas, devem também ser consideradas.

Materiais com grande resistência a fissuras em temperaturas baixas, por exemplo, podem ser ineficientes para regiões onde a temperatura média é elevada.

Vegetação local

A vegetação local pode comprometer a integridade da impermeabilização, face ao seu crescimento ou à geração de gases, devendo ser removida e, em certos casos, proceder-se a uma esterilização do solo com herbicida apropriado.

Largura das bermas de equilíbrio

É determinada pelo seu peso e pela inclinação dos taludes. A largura mínima de topo sugerida é de 3 metros, a fim de permitir um espaço suficiente para a operação de equipamentos, abertura das trincheiras de ancoragem e manutenção e reparos ao longo do tempo.

Entrada e saída de líquidos

Quanto menor o número de elementos que penetram em uma área impermeabilizada, maior será a sua integridade.

Se possível, canalizações de entrada e saída de líquidos devem ser projetadas para passar sobre o topo da obra.

No caso da existência de estruturas atravessando a membrana (tubos, caixas de passagem), deve existir um perfeito selamento em torno das mesmas.

Monitoramento das membranas

A execução de um programa de testes com amostras das membranas é um elemento importante na verificação do desempenho de uma instalação impermeabilizada.

Este programa revelará as condições da membrana e os efeitos dos resíduos sobre suas propriedades físicas ao longo do tempo.

Colocação das membranas

Tanto as membranas quanto todos os equipamentos necessários à sua instalação requerem uma estocagem adequada.

A maioria das membranas é embalada na forma de painéis dobrados ou rolos, que devem ser armazenados protegidos da luz solar, se possível, à sombra.

Recomenda-se garantir que todas as obras necessárias para a colocação dos painéis estejam terminadas antes de movimentá-los do local de armazenamento para o de disposição.

Portanto, antes da instalação dos mesmos em campo, é importante verificar se a sub-base encontra-se compactada e regularizada e não existe água parada sobre a mesma; se o dente de ancoragem foi completado em todo o perímetro da instalação

e removida a terra escavada; se todas as estruturas de concreto foram seladas em seu contorno e se foram executadas todas as estruturas de drenagem.

Freqüentemente, inicia-se a colocação desdobrando-se ou desenrolando-se o painel no sentido do seu comprimento. Em seguida, ele é posicionado no local apropriado, cuidando-se para que seja fixado na posição correta, utilizando-se, para tal, sacos de areia. O próximo passo é a execução das emendas, seguida da ancoragem e da colocação de camada de proteção sobre as membranas.

Emendas de campo

Os painéis devem ser desdobrados ou desenrolados somente o suficiente para sobrepor a emenda nos painéis adjacentes.

Normalmente, recomendam-se sobreposições de 10 a 30 cm.

As emendas de campo constituem um fator crítico na instalação de membranas, sendo absolutamente necessário que o fabricante recomende os procedimentos e os sistemas adesivos a ser empregados ou, de preferência, que execute a instalação da membrana.

A Tabela 5.13 indica o tipo de material recomendado para a emenda das principais membranas.

O fator mais importante para a integridade das emendas, associado ao uso sob as condições de campo, é a compatibilidade entre o sistema adesivo e o material da membrana.

As emendas apresentam melhor desempenho quando executadas a temperaturas superiores a 15°C.

Deve-se garantir que, quando da execução das emendas, as partes a ser coladas se encontrem perfeitamente limpas e secas, pois a presença de sujeira ou material estranho pode alterar as características de cura e colagem do adesivo, diminuindo a resistência da emenda e proporcionando falhas.

Após a colocação do adesivo, torna-se necessária a aplicação de uma pressão sobre a emenda, devendo a membrana estar sobre uma superfície seca, firme e lisa. Muitas vezes, utiliza-se uma tábua por baixo da sobreposição para se obter esta superfície.

Durante a execução das emendas, toda a superfície deve ser lisa e comprimida uniformemente com rolos e os adesivos aplicados e espalhados uniformemente.

A existência de rugas será prejudicial ao desempenho da impermeabilização.

As emendas de campo devem começar do meio do painel para as pontas. Esta técnica reduz ao mínimo a extensão das rugas.

Normalmente, os painéis são colocados de forma que as emendas tenham um sentido perpendicular ao pé da inclinação, o que minimiza a pressão sobre as mesmas.

Ancoragem

Para que a impermeabilização apresente um desempenho satisfatório, é essencial que se execute uma ancoragem adequada da membrana ao longo do perímetro da contenção.

A fixação da membrana verifica-se em geral no topo do dique ou berma, utilizando-se do método de trincheira e aterramento ou através de ancoragem em estrutura de concreto.

O primeiro sistema, devido à sua simplicidade e economia, é o mais utilizado. Outros tipos de ancoragem podem ser projetados dependendo de instruções do fabricante do material, devendo ser evitadas as ancoragens pontuais.

Cobertura de proteção

Normalmente, sobre a impermeabilização com membranas flexíveis, são executadas coberturas de terra que objetivam protegê-las contra danos mecânicos e de exposição ao tempo, assim como atuar como uma camada permeável para drenagem e coleta de lixiviados gerados durante o preenchimento do aterro.

Em geral, esta camada tem uma espessura da ordem de 60 cm, ou mais. Seu dimensionamento é dependente da composição e propriedades da membrana, das condições climáticas, das características dos resíduos a serem confinados, da forma de operação prevista e do grau de proteção do local contra animais e vandalismos.

Estando previsto o tráfego de veículos ou de equipamentos sobre a impermeabilização, será obrigatoriamente necessária a execução desta camada de proteção.

Nos taludes laterais pode ser necessária a execução de uma proteção com materiais compatíveis com a inclinação das mesmas, por exemplo, solo-cimento ou concreto armado. De qualquer forma, a proteção deve ter movimentação equivalente à da membrana e ser executada de forma a não danificá-la.

Controle de qualidade

O estabelecimento de um programa de controle de qualidade é uma parte vital do planejamento, projeto, construção e operação de instalações com impermeabilização com membranas.

Através dele é possível garantir que os materiais usados e os trabalhos executados estejam de acordo com as especificações.

Existem três áreas específicas de controle de qualidade: a sub-base, as emendas e a selagem das penetrações através das membranas.

c) Sistemas de Detecção de Vazamentos através das Camadas de Impermeabilização

Os sistemas de detecção de vazamentos através das camadas de impermeabilização são constituídos por:

- Drenos-Testemunha e
- Poços de inspeção.

Os drenos-testemunha são estruturas drenantes posicionadas sob as camadas de impermeabilização, com o objetivo de detectar possíveis vazamentos através das mesmas, possibilitando a execução de reparos.

As estruturas drenantes mais comumente empregadas para este fim são colchões de areia, como drenos de superfície, e os drenos de brita com tubo guia, como drenos lineares, os quais conduzirão os líquidos provenientes de eventuais vazamentos até poços de inspeção.

O sistema de drenos-testemunha deve ser setorizado, para facilidade de identificação dos pontos onde ocorrem problemas na impermeabilização.

Tabela 5.13
Emendas Recomendadas para Membranas Sintéticas

TIPO DE MEMBRANAS	TIPO DO COMPOSTO	SOLVENTES	ADESIVOS EM SOLUÇÃO	ADESIVOS À BASE DE SOLVENTES	ADESIVOS DE CONTATO	ADESIVOS VULCANIZANTES	FITAS * ADESIVAS	ADESIVOS APLICADOS A QUENTE	AQUECIMENTO DIELÉTRICO
Borracha Butílica	Vulcanizado ou de ligação cruzada				X	X	X		
Borracha de etileno-propileno (EPDM)	Vulcanizado ou de ligação cruzada				X	X	X		
Cloreto de polivinila	Termoplástico	X	X	X	X			X	X
Poliétileno clorossulfonado (CSPE)	Termoplástico	X	X	X	X		X	X	X
Poliétileno de alta densidade	Termoplástico								X

(*) Material utilizado somente em campo

d) Sistemas de Coleta e Tratamento de Líquidos Percolados

Uma das formas de minimização do impacto ambiental causado por um aterro é a coleta e remoção de líquidos percolados.

Esta coleta poderá ser realizada através de drenos de brita com tubo guia, os quais conduzirão os líquidos coletados até caixas de acumulação, de onde serão enviados a um tratamento adequado, por gravidade, bombeamento direto ou em carros-tanque.

Sempre que for previsto em um aterro, um sistema para coleta de líquidos percolados, deverá ser prevista uma forma de tratamento para estes líquidos, não sendo admissível sua descarga em corpos d'água superficiais.

Este tratamento poderá ser realizado em instalações existentes na indústria, em instalações de terceiros ou em instalações especialmente projetadas para o aterro, cujo tipo e capacidade dependerá das características e quantidades de líquidos percolados a ser esperados, podendo incluir: tratamento físico-químico convencional, tratamento biológico ou tratamento avançado (absorção em carvão ativo, stripping etc.)

Nos aterros, as estruturas drenantes subsuperficiais são geralmente constituídas por drenos de brita escavados no solo ou na camada de resíduos, acompanhando o terreno, mas que devem ter uma declividade mínima de 2%.

Para o dimensionamento dessas estruturas é fundamental o conhecimento da vazão a ser drenada e das condicionantes geométricas da própria estrutura.

Vazão a ser drenada

O volume de líquido a ser drenado é uma função da precipitação na área do aterro, da evapotranspiração na área do aterro, da declividade e tipo de cobertura da superfície do aterro, da capacidade da camada superficial do aterro de reter água e de possíveis infiltrações subterrâneas nos drenos.

A vazão a ser drenada pode ser avaliada para os casos mais simples pela seguinte expressão:

$$Q = \frac{1}{t} P.A.K ,$$

onde:

Q = vazão média de líquido percolado (l/s);

P = precipitação média anual (mm);

A = área do aterro (m²);

t = número de segundos em 1 ano (31.536.000 s);

K = coeficiente que depende do grau de compactação do lixo.

O coeficiente K é obtido na Tabela 5.14.

Tabela 5.14 - Coeficiente de Formação de Percolados

Peso específico dos resíduos no aterro	K
0,4 a 0,7 t/m ³	0,25 a 0,5
> 0,7 t/m ³	0,15 a 0,25

Um método mais preciso e obrigatoriamente utilizado para obras de maior responsabilidade é o Método de Balanço de Água, que pretende representar os fenômenos físicos da percolação em um maciço homogêneo constituído por um material poroso.

Da água que precipita sobre o aterro, parte é devolvida à atmosfera pela evapotranspiração, parte esco superficialmente e o restante se infiltra, podendo ficar retida na camada de cobertura ou produzir um fluxo de percolação quando for atingida a saturação desta camada.

A Figura 5.26 mostra o fluxo da água em um aterro de resíduos.

O cálculo do balanço de água é feito computando-se mês a mês, durante o período de um ano, os valores dos parâmetros abaixo indicados.

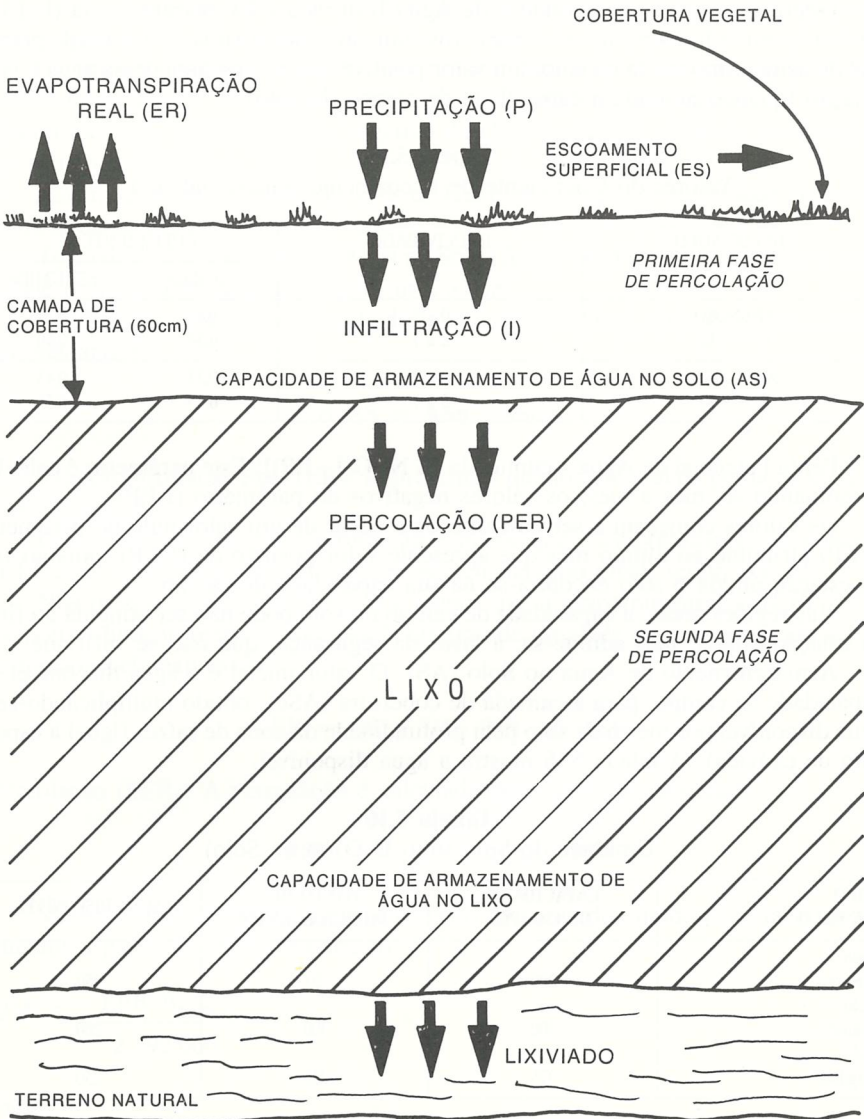
Precipitação (P): Devem ser utilizados valores médios mensais, para o maior número de anos possível de observações.

Evapotranspiração Potencial (EP): Medida obtida através de evaporímetros convencionais. Analogamente, devem ser empregados valores médios mensais para vários anos de observação.

Escoamento Superficial (ES): Os valores médios mensais de escoamento superficial são obtidos aplicando-se o coeficiente de escoamento superficial (C') às médias mensais de precipitação.

$$ES = C'.P, \text{ onde } C' = \alpha . C$$

Figura 5.26 — Fluxo da Água em um Aterro de Resíduos



A Tabela 5.15 mostra os valores considerados.

Infiltração: Os valores médios da infiltração são calculados através da expressão:

$$I = P - ES$$

Diferença entre as Quantidades de Água Infiltrada e Evapotranspirada (I- EP): Pode assumir valores positivos e negativos; um valor negativo significa perda potencial de água armazenada no solo; um valor positivo indica a recarga dessa água e percolação (quando atingida a capacidade de campo do solo).

Tabela 5.15
Valores do Coeficiente de Escoamento Superficial (C')

TIPO DE SOLO	DECLIVIDADE %	COEFICIENTE C'	
		EST.SECA	EST.ÚMIDA
ARENOSO C = 0,30	0 a 2 2 a 7	0,17 0,34	0,34 0,50
ARGILOSO C = 0,40	0 a 2 2 a 7	0,33 0,45	0,43 0,55

Perda Potencial de Água Acumulada [Σ NEG(I - EP)]: Este parâmetro é calculado somando-se, mês a mês, os valores negativos do parâmetro (I-EP).

Os valores começam a ser adicionados a partir de um valor nulo do parâmetro (I-EP) atribuído ao último mês que apresente valor positivo de (I-EP), pois no fim da estação úmida o solo encontra-se na sua capacidade de campo.

Nas regiões secas, a capacidade de campo do solo pode não ser atingida ao final da estação úmida, mas admite-se, a favor da segurança, que isso se verifique.

Armazenamento de Água no Solo (AS): O valor inicial é a água disponível na capacidade de campo, para a camada de cobertura (ASc), obtido multiplicando-se a água disponível por metro de solo pela profundidade da zona de raízes (igual à espessura da camada). A tabela 5.16 mostra a água disponível.

Tabela 5.16
Umidade do Solo (mm H₂O)/m de Solo)

TIPO DE SOLO	CAPACIDADE DE CAMPO	PONTO DE MURCHAMENTO	ÁGUA DISPONÍVEL
Solo Arenoso	200	50	150
Solo Siltoso	300	100	200
Solo Argiloso	375	125	250

Por exemplo: solo argiloso e gramado com zona de raízes de 0,60 m (espessura da camada):

$$ASc = 250 \times 0,60 = 150 \text{ mm}$$

Este valor é atribuído ao último mês que apresente um valor positivo de (I-EP), ou seja, ao último mês da estação úmida.

Para os meses subseqüentes, que apresentam valores negativos de (I-EP), o valor do armazenamento de água no solo (AS) é obtido nas Tabelas 5.17, 5.18 e 5.19, que fornecem as quantidades de água armazenada em função da perda potencial de água acumulada [Σ NEG(I-EP)], para solos com água disponível na capacidade de campo (ASc) igual a 90, 120 e 150 mm.

Os valores positivos de (I-EP), que representam adições na quantidade de água armazenada, devem ser somados aos valores de (AS) no mês anterior, a partir do último mês que apresenta valor negativo de (I-EP), até que se atinja a capacidade de campo.

Assim, qualquer excesso no valor de (AS), em relação à capacidade de campo, transforma-se em fluxo de percolação.

Troca de Armazenamento de Água no Solo (Δ AS): Representa a variação da quantidade de água armazenada no solo, mês a mês.

É a diferença entre a quantidade de água armazenada em um mês e a armazenada no mês anterior.

$$\Delta AS = AS_n - AS_{n-1}$$

Evapotranspiração Real (ER): Representa a quantidade real de perda de água durante dado mês.

Para os meses em que a infiltração é maior que a evapotranspiração potencial (I-EP > 0), a evapotranspiração ocorre no seu máximo nível, sendo que ER = EP.

Nos meses em que a infiltração é menor que a evapotranspiração (I-EP < 0), a evapotranspiração real é condicionada ao grau de umidade do solo, podendo ser determinada pela expressão:

$$ER = EP + [(I - EP) - \Delta AS]$$

Percolação (PER): A percolação é calculada pela seguinte expressão:

$$PER = P - ES - \Delta AS - ER$$

Vazão Mensal (QM): Os valores mensais de vazão de líquido percolado são calculados a partir da expressão abaixo:

$$QM = \frac{PER A_{CONT}}{2.592.000}$$

onde:

QM = vazão mensal de líquido percolado (l/s)

PER = altura mensal percolada (mm)

A_{CONT} = área de contribuição da seção considerada (m²).

A Tabela 5.20 exemplifica a aplicação do método.

Tabela 5.18
 Armazenamento de Água no Solo (AS) em Função da
 Evapotranspiração Potencial Acumulada NEG(I-EP).
 Solo Siltoso (ASc = 120 mm)

NEG(I-EP)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	125	124	123	122	121	120	119	119	117	116
10	115	114	113	112	111	110	109	108	107	106
20	106	105	104	103	102	102	101	100	99	99
30	98	97	95	95	94	94	93	92	91	90
40	90	89	88	87	86	86	85	84	84	83
50	83	82	82	81	80	80	79	79	78	77
60	76	76	75	74	74	73	73	72	72	71
70	70	70	69	69	68	68	67	67	66	65
80	65	64	64	63	63	62	62	61	61	60
90	60	59	59	58	58	57	57	56	56	55
100	55	55	54	54	53	53	53	52	52	51
110	51	51	50	50	49	49	49	48	48	47
120	47	47	46	46	45	45	45	44	44	43
130	43	43	42	42	41	41	41	41	40	40
140	40	40	39	39	39	38	38	38	38	37
150	37	37	36	36	36	35	35	35	35	34
160	34	34	33	33	33	32	32	32	32	31
170	31	31	31	30	30	30	30	30	30	29
180	29	29	29	29	28	28	28	27	27	27
190	26	26	26	26	26	25	25	25	25	25
200	24	24	24	24	24	23	23	23	23	23
210	22	22	22	22	22	22	22	21	21	21
220	21	21	21	21	20	20	20	20	20	20
230	19	19	19	19	19	18	18	18	18	18
240	18	18	17	17	17	17	17	17	17	17
250	16	16	16	16	16	16	16	16	15	15
260	15	15	15	15	15	14	14	14	14	14
270	14	14	14	14	14	13	13	13	13	13
280	13	13	13	13	13	12	12	12	12	12
290	12	12	12	12	12	11	11	11	11	11
300	11	11	11	11	11	10	10	10	10	10
310	10	10	10	10	10	10	10	10	9	9
320	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9
330	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8
340	8	8	8	8	8	7	7	7	7	7
350	7					7				
360	7					6				
370	6					6				
380	6					5				
390	5					5				
400	5					5				
410	4					4				
420	4					4				
430	4					4				
440	3					3				
450	3					3				
460	3					3				
470	3					3				
480	2					2				
490	2					2				

CONTINUAÇÃO

NEG(I-EP)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
500	2					2				
510	2					2				
520	2					2				
530	2					2				
540	2					1				
550	1									
560	1									
570	1									
580	1									
590	1									
600	1									
610	1									
620	1									
630	1									
640	1									

FONTE: Dennis G.; HANLEY, Keith J.; DE GEARE, Truett V.; Use of the Water Balance Method for Predicting Leachate Generation from Solid Waste Disposal Sites, U.S. Environmental Protection Agency Report - SW-168, 1975.

Tabela 5.19
Armazenamento de Água no Solo (AS) em Função da
Evapotranspiração Potencial Acumulada NEG(I-EP).
Solo Argiloso (ASc = 150 mm)

NEG(I-EP)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	150	149	148	147	146	145	144	143	142	141
10	140	139	138	137	136	135	134	133	132	131
20	131	130	129	128	127	127	126	125	124	123
30	122	122	121	120	119	118	117	115	115	114
40	114	113	113	112	111	111	110	109	108	107
50	107	106	106	105	104	103	103	102	101	100
60	100	99	98	97	97	97	96	96	94	93
70	93	92	92	91	90	90	89	89	88	87
80	87	86	86	85	84	84	84	83	83	82
90	82	81	81	80	79	79	78	77	77	76
100	76	76	75	75	74	74	73	72	72	71
110	71	71	70	70	69	69	68	68	67	67
120	66	65	65	65	65	64	64	63	63	62
130	62	62	61	61	60	60	60	59	59	58
140	58	58	57	57	56	56	55	55	54	54
150	54	53	53	53	52	52	52	52	51	51
160	51	51	50	50	50	49	49	48	48	47
170	47	47	47	46	46	46	45	45	45	44
180	44	44	44	43	43	43	42	42	42	41
190	41	41	41	40	40	40	40	39	39	39
200	39	38	38	38	37	37	37	37	36	36
210	36	36	35	35	35	35	35	34	34	34
220	34	34	33	33	33	33	33	32	32	32
230	32	31	31	31	31	31	30	30	30	30

CONTINUA

CONTINUAÇÃO

NEG(I-EP)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
240	30	29	29	29	29	29	28	28	28	28
250	28	27	27	27	27	27	26	26	26	26
260	26	26	25	25	25	25	25	24	24	24
270	24	24	24	23	23	23	23	23	23	23
280	22	22	22	22	22	22	22	22	21	21
290	21	21	21	20	20	20	20	20	20	20
300	20	19	19	19	19	19	19	19	18	18
310	18	18	18	18	18	18	18	17	17	17
320	17	17	17	17	17	17	17	16	16	16
330	16	16	16	16	16	16	16	15	15	15
340	15	15	15	15	15	15	14	14	14	14
350	14	14	14	14	14	14	14	13	13	13
360	13	13	13	13	13	13	13	12	12	12
370	12	12	12	12	12	12	12	12	11	11
380	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11
390	11	11	11	10	10	10	10	10	10	10
400	10	10	10	10	10	10	10	10	9	9
410	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9
420	9	9	9	8	8	8	8	8	8	8
430	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8
440	8	8	8	7	7	7	7	7	7	7
450	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7
460	7	7	7	7	6	6	6	6	6	6
470	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
480	6	6	6	6	6	6	6	6	5	5
490	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
500	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
510	5	5	5	5	5	5	5	5	4	4
520	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
530	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
540	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
550	4	4	4	4	4	4	4	3	3	3
560	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
570	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
580	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
590	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
600	3	3	3	3	3	2	2	2	2	2
610	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
620	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
630	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
640	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
650	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
660	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
670	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
680	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1
690	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
700	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
710	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
720	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
730	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
740	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
750	1					1				
760	1					1				

CONTINUA

CONTINUAÇÃO

NEG(I-EP)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
770	1					1				
780	1					1				
790	1					1				
800	1					1				
810	1					1				
820	1					1				
830	1					1				
840	1					1				

FONTE: FENN, Dennis G. HANLEY, Keith J.; DE GEARE, Truett V.; *Use of the Water Balance Method for Predicting Leachate Generation From Solid Waste Disposal Sites*, U.S. Environmental Protection Agency Report - SW-168, 1975.

Tabela 5.20
Dados do Balanço Hídrico para Aterro Industrial

PARÂMETRO (mm)	MESES												
	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ	ANUAL
EP	96,2	103,2	107,1	61,0	54,8	49,3	65,6	89,7	87,6	101,6	110,5	89,0	1015,6
P	238,0	173,0	135,0	65,7	29,1	47,7	35,2	25,9	60,9	116,1	149,3	225,4	1301,2
C'	0,22	0,22	0,22	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,22	0,22	0,22	-
ES	52,4	38,1	29,7	11,8	5,2	8,6	6,3	4,6	11,0	25,5	32,8	49,6	275,6
I	185,6	134,9	105,3	53,9	23,9	39,1	28,9	21,2	49,9	90,6	116,5	175,8	1025,6
I-EP	+89,4	+31,7	-1,8	-7,1	-30,9	-10,2	-36,7	-68,5	-37,7	-11,0	+6,0	+86,8	+10,0
Σ NEG(I-EP)	-	(0)	-1,8	-8,9	-39,8	-50,0	-86,7	-155,2	-192,9	-203,9	-	-	-
AS	150,0	150,0	148,0	141,0	114,0	107,0	83,0	52,0	40,0	37,0	43,0	129,8	-
Δ AS	20,2	0,0	-2,0	-7,0	-27,0	-7,0	-24,0	-31,0	-12,0	-3,0	+6,0	+86,8	-
ER	96,2	103,2	107,3	60,9	50,9	46,1	52,9	52,2	61,9	93,6	110,5	89,0	924,7
PER	69,2	31,7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100,9

Dimensionamento da rede subsuperficial

O dimensionamento da rede subsuperficial pode ser feito utilizando-se diversas fórmulas. Recomenda-se usar um coeficiente de segurança $C = 1,5$ para a determinação de vazão de projeto, visando com isso compensar a medição imprecisa da vazão, perdas localizadas e as infiltrações não consideradas.

Quando se utilizam drenos com tubos perfurados, o dimensionamento pode ser feito através da fórmula de Manning:

$$Q = \frac{1}{n} \cdot S \cdot R_h^{2/3} \cdot i^{1/2}$$

O roteiro de cálculo para determinação do diâmetro do tubo é semelhante ao apresentado anteriormente.

Entretanto, todos os manuais de hidráulica apresentam tabelas para cálculo do diâmetro, utilizando a expressão:

$$\phi = \left[\frac{Q}{G} \right]^{0,375}$$

onde G = parâmetro tabelado em função da altura da lâmina de água, da declividade do dreno e do tipo de material do tubo.

Exemplo : calcular o diâmetro de um dreno conhecendo-se a vazão a ser drenada ($Q = 7 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$), a declividade ($i = 1\%$), o tipo de material do tubo (ferro fundido, $n = 0,012$) e da altura da lâmina de água ($y = 0,75\phi$).

Nestas condições o diâmetro do tubo é dado por:

$$\phi = \left[\frac{7 \times 10^{-4}}{2,367} \right]^{0,375}, \text{ ou}$$

$$\phi = 0,0475(2'')$$

A figura 5.27 mostra esse tipo de dreno.

Quando se utilizam drenos com seção sem tubo condutor (dreno cego), a Lei de Darcy pode ser utilizada, adotando-se o gradiente hidráulico como sendo igual à declividade do dreno. Para os dados do exemplo anterior e utilizando-se brita nº 3 ($K = 45 \text{ cm/s}$) como meio drenante, tem-se: $Q = K \cdot i \cdot A$, ou

$$A = \frac{Q}{K \cdot i} = \frac{700}{45 \cdot 0,01} = 1.560 \text{ cm}^2 \text{ e,}$$

fixando-se a largura do dreno (L) em 40 cm (mínimo para a descida de um operário na vala), a altura da seção drenante (h) é dada por:

$$h = \frac{A}{L} = \frac{1.560}{40} \approx 40 \text{ cm}.$$

O escoamento em drenos de brita verifica-se, em geral, na faixa de transição entre o regime laminar, onde vale a Lei de Darcy, e o regime turbulento.

Nesta faixa, o número de Reynolds situa-se entre 1 e 3.000 ($1,0 < Re < 3.000$), devendo-se utilizar o modelo determinado por Wilkins.

Equação de Wilkins:

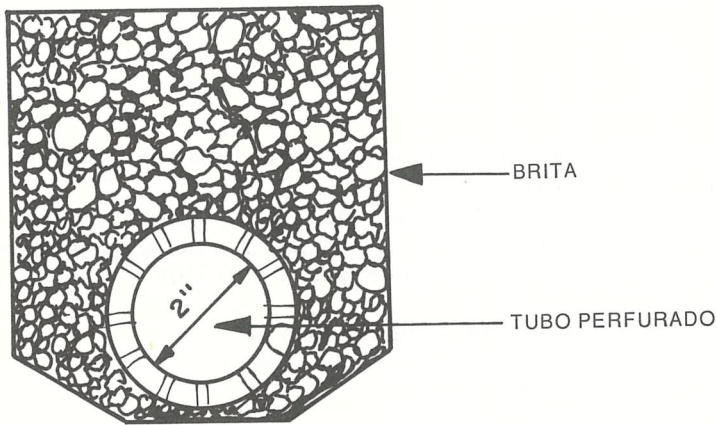
$$V = 52,45 \cdot p \cdot Rh^{0,5} \cdot I^{0,54}, \text{ onde:}$$

V = velocidade média de percolação (cm/s);

I = declividade do dreno (m/m);

Rh = raio hidráulico do meio poroso considerado (cm);

Figura 5.27— Dreno de Percolados



Fonte: Neto, Pedro P. Castro e outros. Resíduos Sólidos Industriais, Série Atas, CETESB, 1985

$$Rh = \frac{p \cdot D_s}{6(1-p)}$$

p = porosidade do meio ($0,40 < p < 0,50$)
 D_s = diâmetro equivalente (cm).

A expressão pode ser escrita, também, da seguinte forma:

$$V = C_v \cdot I^{0,54}$$

onde: $C_v = 52,45 \cdot Rh^{0,5} \cdot p$,

cujos valores são mostrados na Tabela 5.21

Tabela 5.21
 Valores de C_v , para Rochas Britadas

BRITA OU CASCALHO	DIÂMETRO NOMINAL (cm)	EQUIVALENTE	Rh (cm)			Cv (cm/s)		
			P			P		
			0,40	0,45	0,50	0,40	0,45	0,50
2	2,0	1,52	0,17	0,21	0,25	8,63	10,75	13,21
3	2,5	1,91	0,21	0,26	0,32	9,65	12,02	14,77
4	5,0	3,80	0,42	0,52	0,63	13,62	16,98	20,86
5	7,5	5,46	0,61	0,74	0,91	16,33	20,35	25,00

É conveniente calcular o valor do número de Reynolds do escoamento para se verificar se o regime está na faixa de validade da equação de Wilkins ($1,0 < Re < 3.000$), onde

$$Re = \frac{VDs}{6 \cdot \delta \cdot (1 - p)}, \text{ onde}$$

δ = coeficiente de viscosidade cinemática considerado igual a $1,01 \times 10^{-2} \text{ cm}^2/\text{s}$.

e) Drenagem de gases

De modo geral, a formação de gases em aterro de resíduos deve-se à decomposição da matéria orgânica em meio anaeróbico, o que produz principalmente gás carbônico (CO_2) e metano (CH_4) ou, então, a reações entre resíduos incompatíveis inadvertidamente dispostos em conjunto, o que gerará, principalmente, gases tóxicos.

Para o dimensionamento, são necessários os seguintes dados:

- vazão a ser drenada (Q_p);
- declividade do dreno (I), geralmente $I > 2\%$
- material de preenchimento do dreno, geralmente brita 3,4 ou 5.

Conhecido o material, pela tabela obtém-se o valor de C_v e com a declividade do dreno é calculada a velocidade de percolação. Determina-se, então, a seção transversal do dreno (S') pela equação da continuidade:

$$S' = \frac{Q_p}{V}$$

Essa seção é então majorada por um coeficiente de segurança igual a 2,
 $S = 2S'$

Estes gases podem migrar através dos meios porosos que constituem o subsolo, drenos de percolado etc., atingindo, sob condições singulares, redes de esgoto, fossas e poços, causando problemas, uma vez que concentrações de CH_4 entre 5 e 15% são explosivas.

Esta migração é então controlada através da execução de uma rede adequada de drenagem, constituída, via de regra, por drenos verticais colocados em pontos escolhidos no aterro.

Os drenos são formados por tubos perfurados colocados em uma camisa de brita e que atravessam todo o aterro no sentido vertical, desde o solo até a camada superior.

O dimensionamento desses drenos depende da vazão de gás a ser drenada e da própria concepção do aterro.

Não existem, até hoje, modelos de geração comprovados na prática. Por isso, a rede de drenagem vai depender em muito do bom senso da empresa projetista.

Recomenda-se, de um modo geral, que a distância entre os drenos varie entre 30 e 70 m e que, se os gases não forem aproveitados, sejam queimados para lançamento na atmosfera.

Poços de monitoramento do aquífero

Para controlar a qualidade do aquífero no entorno do aterro, deverão ser implantados poços de monitoramento que possibilitem a extração de amostras representativas do mesmo.

São exigidos, pelo menos, 4 poços, sendo localizados um a montante e 3 a jusante do aterro, com relação ao sentido de escoamento das águas subterrâneas.

Estes poços deverão ser construídos conforme PN 1:63.06-003 “Construção de Poços de Monitoramento e Amostragem de Aquífero Freático”.

5.2.5 Gerenciamento e Operação do Aterro

Um aterro deverá ser operado e mantido de forma a minimizar a possibilidade de geração de fogo, explosão, derramamentos, vazamentos ou liberação de substâncias nocivas ao ar, águas superficiais, solo e águas subterrâneas.

Assim, o correto gerenciamento e a operação criteriosa são fundamentais na minimização de possíveis efeitos danosos ao meio ambiente e à saúde pública.

Estas atividades deverão ser executadas por pessoal devidamente treinado, capacitado e conscientizado dos riscos envolvidos com o manuseio e a disposição inadequada dos resíduos que chegam ao aterro.

A operação do aterro deverá ser norteada pelos seguintes elementos:

- plano de registro e controle de recebimento de resíduos;
- plano de amostragem de resíduos;
- plano de segregação de resíduos;
- plano de inspeção e manutenção;
- plano de emergência;
- plano de encerramento e
- plano de monitoramento do aquífero.

a) Plano de Registro e Controle de Recebimento dos Resíduos Dispostos

Todo aterro só poderá receber resíduos cuja disposição for aprovada pelo O.C.P. (Órgão de Controle de Poluição Ambiental), transportados por firmas cadastradas e autorizadas para o transporte do resíduo.

O aterro deverá possuir um registro de sua operação, a ser mantido durante sua vida útil e após fechamento do mesmo.

Este registro deverá conter as seguintes informações:

- descrição e quantidade de cada resíduo recebido;
- data e local de disposição no aterro;
- registro das análises efetuadas no resíduo;
- registro de ocorrências e
- dados referentes ao monitoramento da qualidade das águas superficiais e subterrâneas.

Estas informações servirão também para elaboração de relatório anual a ser enviado ao O.C.P. (Órgão de Controle da Poluição Ambiental), contendo:

- quantidade de resíduos não perigosos recebida no ano e acumulada;
- descrição do tipo, quantidade recebida (no ano e acumulada) e tratamento de cada resíduo perigoso recebido no aterro por gerador e
- dados relativos ao monitoramento das águas superficiais e subterrâneas.

b) Plano de Amostragem de Resíduos

Tendo em vista que só poderão ser recebidos no aterro resíduos aprovados pelo O.C.P. (Orgão de Controle de Poluição Ambiental) é necessário um controle da qualidade dos resíduos que chegam, para certificação de que sua composição e características são aquelas constantes no documento de aprovação.

Este controle poderá ser efetuado através de um plano rotineiro de amostragens e análise dos resíduos, incluindo

- método de amostragem conforme NBR 10.007;
- ensaios a ser realizados;
- métodos de análise;
- frequência das análises;
- características de periculosidade e
- incompatibilidade com outros resíduos.

c) Plano de Segregação de Resíduos

Os resíduos sólidos industriais deverão ser dispostos no aterro de acordo com um plano de segregação elaborado, de forma a evitar que resíduos incompatíveis sejam dispostos num mesmo local, provocando reações indesejáveis, como fogo, explosão, liberação de fumaça ou gases tóxicos, geração de calor ou reação violenta.

A Tabela 5.22, a seguir, apresenta grupos de resíduos incompatíveis, com indicação das reações indesejáveis decorrentes de sua mistura.

Tabela 5.22
Incompatibilidade de Resíduos

GRUPO 1-A	GRUPO 1-B
Lama de acetileno	Lamas ácidas
Líquidos fortemente alcalinos	Soluções ácidas
Líquidos de limpeza alcalinos	Ácidos de bateria
Líquidos alcalinos corrosivos	Líquidos diversos de limpeza
Líquido alcalino de bateria	Eletrólitos ácidos
Águas residuárias alcalinas	Líquidos utilizados para gravação em metais
Lama de cal e outros álcalis corrosivos	Componentes de líquidos de limpeza
Soluções de cal	Banhos de decapagem e outros ácidos corrosivos
Soluções cáusticas gastas	Ácidos gastos
	Mistura de ácidos residuais
	Ácido sulfúrico residual

Efeitos da mistura de resíduos do GRUPO 1-A com os do GRUPO 1-B

Geração de calor, reação violenta

GRUPO 2-A	GRUPO 2-B
Resíduos de asbestos	Solventes de limpeza de componentes eletrônicos
Resíduos de berílio	Explosivos obsoletos
Embalagens vazias contaminadas com pesticidas	Resíduos de petróleo
Resíduos de pesticidas	Resíduos de refinaria
Outras quaisquer substâncias tóxicas	Solventes em geral
	Resíduos de óleo e outros resíduos inflamáveis e explosivos
Efeitos da mistura de resíduos do GRUPO 2-A com os do GRUPO 2-B	Geração de substâncias tóxicas em caso de fogo ou explosão
GRUPO 3-A	GRUPO 3-B
Alumínio	Resíduos do GRUPO 1-A ou 1-B
Berílio	
Cálcio	
Lítio	
Magnésio	
Potássio	
Sódio	
Zinco em pó, outros metais reativos e hidretos metálicos	
Efeitos de mistura de resíduos do GRUPO 3-A com os do GRUPO 3-B	Fogo ou explosão, geração de hidrogênio gasoso inflamável
GRUPO 4-A	GRUPO 4-B
Álcoois	Resíduos concentrados dos GRUPOS 1-A ou 1-B
Soluções aquosas em geral	Cálcio
	Lítio
	Hidretos metálicos
	Potássio
	Sódio
	SO ₂ , Cl ₂ , SOCl ₂ , PCl ₃ , CH ₃ SiCl ₃ e outros
	resíduos reativos com água
Efeitos da mistura de resíduos do GRUPO 4-A com os do GRUPO 4-B	Fogo, explosão ou geração de calor, geração de gases inflamáveis ou tóxicos
GRUPO 5-A	GRUPO 5-B
Álcoois	Resíduos concentrados do GRUPO 1-A ou 1-B
Aldeídos	Resíduos do GRUPO 3-A
Hidrocarbonetos halogenados	
Hidrocarbonetos nitrados e outros compostos orgânicos reativos e solventes	
Hidrocarbonetos insaturados	
Efeitos da mistura de resíduos do GRUPO 5-A com os do GRUPO 5-B	Fogo, explosão ou reação violenta
GRUPO 6-A	GRUPO 6-B
Soluções gastas de cianetos e sulfetos	Resíduos do GRUPO 1-B
Efeitos da mistura de resíduos do GRUPO 6-A com os do GRUPO 6-B	Geração de gás cianídrico ou sulfídrico

GRUPO 7-A	GRUPO 7-B
Cloratos e outros oxidantes fortes	Ácido acético e outros ácidos orgânicos
Cloro	Ácidos minerais concentrados
Cloritos	Resíduos do GRUPO 2-B
Ácido crômico	Resíduos do GRUPO 3-A
Hipocloritos	Resíduos do GRUPO 5-A e outros resíduos combustíveis ou inflamáveis
Nitratos	
Ácido nítrico fumegante	
Percloratos	
Permanganatos	
Peróxidos	
Efeitos da mistura de resíduos do GRUPO 7-A com os do GRUPO 7-B	Fogo, explosão ou reação violenta

Fonte: U.S Environmental Protection Agency, Federal Register, Vol. 43 n.º 243 pág. 59018, U.S.A. monday, december 18, 1978.

d) Plano de Inspeção e Manutenção

O proprietário ou encarregado da operação de um aterro deve inspecionar sistematicamente as instalações que o compõem, de modo a identificar e corrigir eventuais problemas que possam comprometer seu funcionamento ou provocar a ocorrência de acidentes prejudiciais ao meio ambiente e à saúde humana.

Esta inspeção poderá ser realizada de acordo com a seguinte Tabela 5.23

e) Plano de Emergência

Em casos de acidente devem ser tomadas, coordenadamente, medidas que minimizem ou restrinjam os possíveis efeitos danosos decorrentes. Tal seqüência de procedimentos deve estar discriminada em um Plano de Emergência que deve conter:

- informações sobre os possíveis incidentes e ações a ser tomadas;
- indicação das pessoas que atuarão como coordenadores das ações de emergência com telefones e endereços atualizados;
- relação de todos os equipamentos de segurança existentes, incluindo localização, descrição do tipo e emprego, capacidade e forma de utilização;
- organismos e entidades contatáveis em casos de emergência com endereços e telefones atualizados.

O Plano de Emergência deve ser mantido em local de fácil acesso e ser de conhecimento de todo o pessoal envolvido na operação do aterro.

f) Plano de Fechamento e Encerramento

Para minimizar a necessidade de manutenção futura e evitar a liberação de poluentes ao meio ambiente, após encerramento de sua operação, um aterro deve contar com um plano de fechamento que inclua:

Tabela 5.23
Plano de Inspeção e Manutenção

COMPONENTE ESTRUTURA EQUIPAMENTO	POSSÍVEIS FALHAS OU DETERIORAÇÃO	FREQÜÊNCIA DE INSPEÇÃO	AÇÕES CORRETIVAS
CERCA	DANIFICAÇÃO OU REMOÇÃO DE ELEMENTOS	SEMANAL	REPARO OU REPOSIÇÃO
BALANÇA	DANIFICAÇÃO DE COMPONENTES	SEMANAL	REPAROS
ACESSOS INTERNOS	BURACOS, EROSÃO OU EMPOÇAMENTO DE ÁGUA	DIÁRIA	REPAROS
DRENOS DE ÁGUAS PLUVIAIS	DANIFICAÇÃO OU INTERRUPTÃO DA SEÇÃO	SEMANAL	REPAROS
	ASSOREAMENTO OU OBSTRUÇÃO POR TERRA OU RESÍDUOS	SEMANAL	DESOBSTRUÇÃO
POÇOS DE INSPEÇÃO E DRENOS-TESTEMUNHA	DANIFICAÇÃO DA TAMPA	DIÁRIA	EXECUÇÃO DE REPAROS
	REMOÇÃO DA TAMPA	DIÁRIA	REPOSIÇÃO DA TAMPA
	PRESENÇA DE LÍQUIDOS NO SEU INTERIOR	DIÁRIA	VERIFICAÇÃO DA PROCEDÊNCIA DOS LÍQUIDOS E CORREÇÃO DA IRREGULARIDADE
	PRESENÇA DE RESÍDUOS OU MATERIAIS NO ENTORNO	DIÁRIA	REMOÇÃO E LIMPEZA DO ENTORNO
CAMADA DE PROTEÇÃO DA IMPERMEABILIZAÇÃO	DANIFICAÇÃO POR CHUVAS	DIÁRIA	EXECUÇÃO DE REPAROS
	DANIFICAÇÃO POR ESFORÇOS DURANTE O ATERRAMENTO	DIÁRIA	EXECUÇÃO DE REPAROS
TALUDES E OUTRAS SUPERFÍCIES	EROSÃO	SEMANAL	REPOSIÇÃO DE TERRA
	DANIFICAÇÃO DA CAMADA DE PROTEÇÃO	SEMANAL	EXECUÇÃO DE REPAROS
POÇOS DE MONITORAMENTO DE AQUIFERO	DANIFICAÇÃO DA CAIXA OU DA PROTEÇÃO SANITÁRIA	SEMANAL	EXECUÇÃO DE REPAROS
	DIFICULDADE DE ACESSO	SEMANAL	DESOBSTRUÇÃO DO ACESSO

- projeto e construção da cobertura final;
- data aproximada do encerramento;
- usos programados para a área no futuro;
- atividades de manutenção pós-fechamento;

- monitoramento das águas após o término das operações, por um período mínimo de 20 anos e
- previsão de recursos financeiros para custeio das despesas de manutenção pós-fechamento.

Todas as operações para o total encerramento da instalação devem ser realizadas até no máximo 6 meses após o recebimento da última carga de resíduos.

g) Plano de Monitoramento do Aquífero

Um aterro deve ser construído e operado de forma a manter a qualidade das águas subterrâneas.

Tendo em vista o seu uso para o abastecimento público, considera-se que a qualidade a ser preservada é a de potabilidade, conforme legislação vigente.

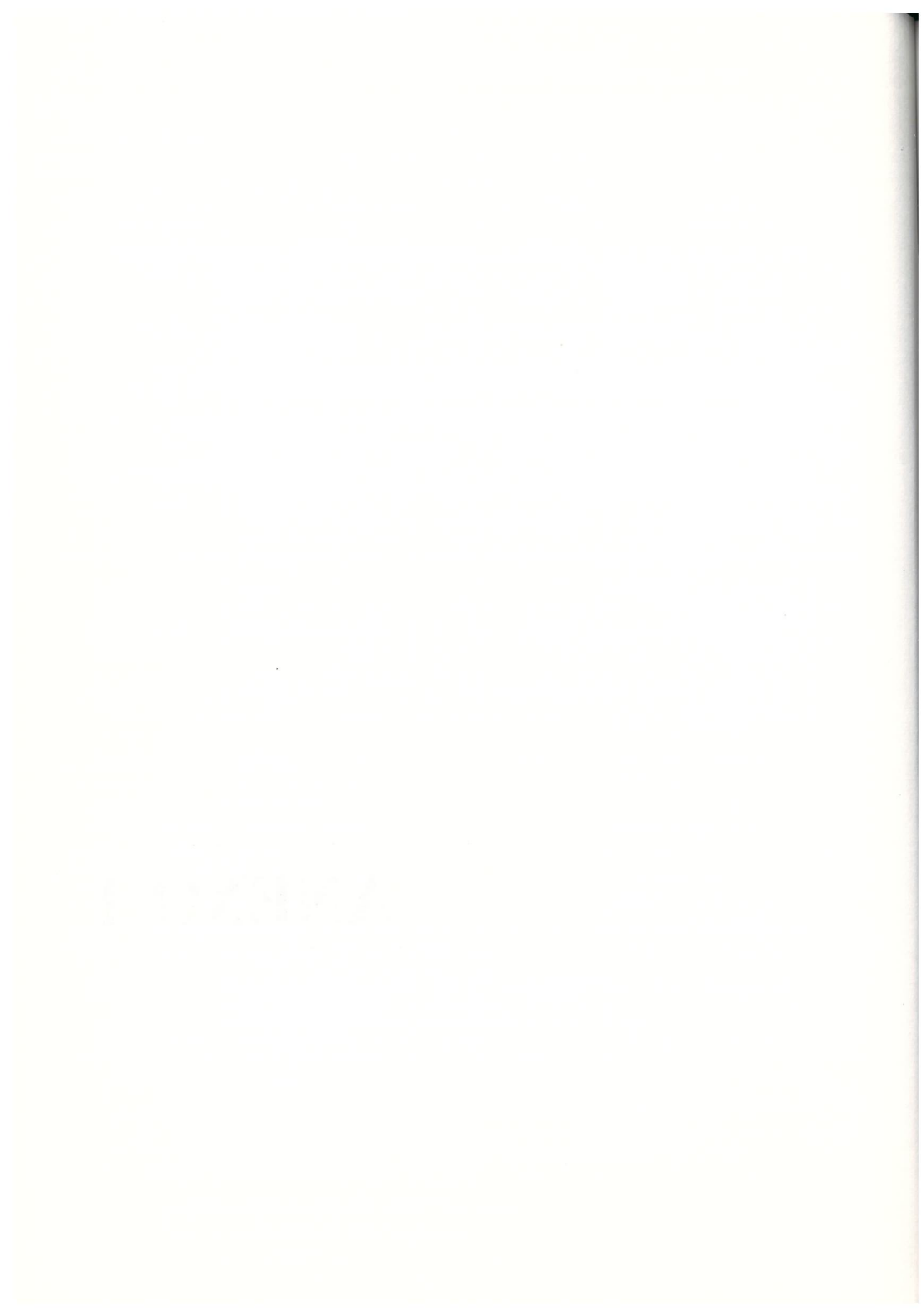
Nos casos em que o aquífero local apresente naturalmente qualquer um dos parâmetros em concentrações superiores às fixadas pela legislação vigente, os padrões a ser mantidos deverão ser os estabelecidos pela CETESB.

O plano de monitoramento deve incluir:

- número de poços;
- localização;
- parâmetros a ser monitorados;
- procedimentos para coleta e preservação da amostra;
- valores naturais para os parâmetros;
- avaliação dos parâmetros monitorados, pelo menos 4 vezes por ano.



ANEXO I



Tratamento e destinação sugeridos para alguns resíduos perigosos

Em virtude da extrema diversidade dos tipos de resíduos perigosos e da grande faixa de variação da concentração de seus constituintes, não existe uma regra geral para determinar qual processo de tratamento ou de disposição final é o mais adequado para um resíduo em especial.

Na escolha de um método de tratamento ou de disposição final será absolutamente necessário conhecer em detalhe as características do resíduo, sua origem, seus constituintes e a faixa de variação desses constituintes.

Os processos de tratamento têm como objetivo submeter o resíduo a reações físicas, químicas ou biológicas para fazer com que o mesmo perca suas características de periculosidade, promover uma redução de volume ou mudança de alguma propriedade física ou química. Todos os métodos, quando aplicados, geram uma quantidade maior ou menor de rejeitos que, dependendo de suas características, deverão ser dispostos em um aterro industrial ou em um aterro sanitário.

Por exemplo, entende-se a incineração como um tratamento físico-químico (oxidação "controlada" a altas temperaturas) que gerará cinzas, pós e lodos dos sistemas de controle de poluição atmosférica, os quais deverão ser dispostos em um aterro industrial. Já um processo de solidificação que reterá os poluentes em uma matriz sólida, produzirá um volume de resíduos muito maior que o original que poderá ser colocado em um aterro sanitário, dependendo do tipo de matriz.

Atualmente, o problema de mais difícil solução diz respeito a resíduos perigosos orgânicos, os quais, em virtude das deficiências de nossos laboratórios, não têm seus constituintes determinados.

Nesses casos, a única indicação que se pode fazer é a incineração em equipamentos com controle de temperatura e tempo de residência, dispondo de controle de poluição atmosférica e de monitoramento de efluentes líquidos e gasosos.

Apenas a título informativo, a tabela apresentada a seguir, relaciona alguns resíduos perigosos e indica alguns métodos sugeridos de tratamento e destinação.

A adoção de qualquer um desses métodos, em um caso específico, deve ser muito bem estudada e discutida com o órgão de controle ambiental.

Os métodos apresentados não são os únicos existentes e, dependendo das características de cada resíduo em particular, podem não ser os mais apropriados, devendo ser encarados com as devidas reservas. Servem, também, como uma primeira possibilidade de tratamento ou de destinação a ser estudada.

TECNOLOGIAS DE TRATAMENTO APLICÁVEIS PARA RESÍDUOS PERIGOSOS DE FONTES ESPECÍFICAS E NÃO ESPECÍFICAS.

INDÚSTRIA	CÓDIGO DO RESÍDUO NBR10.004	DESCRIÇÃO DO RESÍDUO	CONSTITUINTES PERIGOSOS	PRINCIPAL TECNOLOGIA DE TRATAMENTO APLICÁVEL*	TRATAMENTO DESTINAÇÃO OPCIONAIS
Genérica	F001	Os seguintes solventes halogenados, gastos, utilizados em desengraxe: tetracloreto de carbono, tricloroetileno, 1,1,1-tricloroetileno, 1,1,1-tricloroetano, tetracloreto de carbono e fluorcarbonetos clorados, além de lamas provenientes da recuperação destes solventes.	Tetracloreto de carbono, tricloroetileno, 1,1,1-tricloroetileno, 1,1,1-tricloroetano, tetracloreto de carbono, fluorcarbonetos clorados	T 14.3	T01
	F002	Os seguintes solventes halogenados gastos: tetracloreto de carbono, tricloroetileno, 1,1,1-tricloroetileno, 1,1,1-tricloroetano, clorobenzeno, 1,1,2-tricloro-1,2,2-trifluoroetano, ortodichlorobenzeno, trichlorofluorometano e resíduo de fundo da recuperação destes solventes.	Tetracloreto de carbono, tricloroetileno, 1,1,1-tricloroetileno, 1,1,1-tricloroetano, clorobenzeno, 1,1,2-tricloro-1,2,2-trifluoroetano, ortodichlorobenzeno, trichlorofluorometano.	T 14.3	T01
	F003	Os seguintes solventes não halogenados gastos: xileno, acetona, acetato de etila, etilbenzeno, éter etílico, metilacetona n-butílico, ciclohexanona e metanol além de resíduo de fundo de coluna de recuperação destes solventes.	Inflamável	T 14.3	T01
	F004	Os seguintes solventes não halogenados gastos: cresóis e ácido cresílico; nitrobenzeno e resíduo de fundo de coluna da recuperação destes solventes.	Cresóis e ácido cresílico, nitrobenzeno.	T 14.3	T01
	F005	Os seguintes solventes não halogenados gastos: tolueno, metilacetona, dissulfeto de carbono isobutanol, piridina e resíduo de fundo de coluna proveniente da recuperação destes solventes.	Tolueno, metilacetona, dissulfeto de carbono, piridina, isobutanol	T 14.3	T01
	F006	Lodos de tratamento de águas residuárias provenientes de operações de eletrodeposição, exceto os originários dos seguintes processos: (1) anodização do alumínio com ácido sulfúrico; (2) estanhagem de aço carbono; (3) zincagem (bases segregadas) do aço carbono; (4) revestimento de alumínio ou zinco-alumínio no aço carbono; (5) operações de limpeza/extração associadas com revestimentos de estanho, zinco e alumínio do aço carbono; e (6) fresagem e estampagem química de alumínio.	Cádmio, cromo hexavalente, níquel cianeto (complexo)	T07,T10,B03	T10,T08,B03

CONTINUAÇÃO

INDÚSTRIA	CÓDIGO DO RESÍDUO NBR10.004	DESCRIÇÃO DO RESÍDUO	CONSTITUINTES PERIGOSOS	PRINCIPAL TECNOLOGIA DE TRATAMENTO APLICÁVEL*	TRATAMENTO DESTINAÇÃO OPCIONAIS
	F007	Soluções exauridas de banho de tratamento superficial com cianeto proveniente de operações de eletrodeposição (exceto soluções exauridas que contém cianetos provenientes da eletrodeposição de metais preciosos).	Cianeto (Sais)	T07, T10, B03	
	F008	Lodos de fundo de tanque de banhos de tratamento superficial provenientes de operações de eletrodeposição onde os cianetos são utilizados no processo(exceto lodos de banhos de tratamento superficial com metais preciosos por eletrodeposição).	Cianeto (Sais), Metais	T07, T10, B03	
	F009	Soluções exauridas de banhos de extração e limpeza provenientes de operações de eletrodeposição onde os cianetos são utilizados no processo (exceto soluções exauridas dos banhos de extração e limpeza de eletrodeposição com metais preciosos).	Cianeto (Sais), Metais	T07,T10, B03	T14.6
	F010	Lodos de banho de Têmpera provenientes de banhos de óleos das operações de tratamento térmico de metais dos processos,onde são utilizados cianetos (exceto lodos de banho de têmpera no tratamento térmico de metais preciosos).	Cianetos (sais)	T01	T07, T10, B03
	F011	Soluções de cianeto exauridas provenientes da limpeza do cadinho de banho salino das operações de tratamento térmico de metais (exceto soluções exauridas do tratamento térmico de metais preciosos provenientes da limpeza de cadinhos de banhos (salinos).	Cianeto (Sais)	T07,T10,803	
	F012	Lodos de tratamento de águas residuárias provenientes de banhos de têmpera das operações de tratamento térmico de metais dos processos onde os cianetos são utilizados (exceto lodos de tratamento de águas residuárias provenientes de banhos de têmpera no tratamento térmico de metais preciosos).	Cianeto (Complexo)	T07,T10,B03	

CONTINUAÇÃO

INDÚSTRIA	CÓDIGO DO RESÍDUO NBR10.004	DESCRIÇÃO DO RESÍDUO	CONSTITUINTES PERIGOSOS	PRINCIPAL TECNOLOGIA DE TRATAMENTO APLICÁVEL*	TRATAMENTO DESTINAÇÃO OPCIONAIS
	F014	Sedimentos de fundo de lagoa de descarga do tratamento de águas residuárias da cianetação das operações de extração de metais de minérios.	Cianeto (Complexo)	T07,T10,B03	T08, B03
	F015	Soluções exauridas de banhos, que contêm cianeto provenientes das operações de extração de metais de minérios.	Cianeto (Sais)	T07	
	F017	Resíduos e lodos de tinta da pintura industrial	Cádmio, cromo, chumbo, cianeto, tolueno tetracloroetileno	T14.2	T01// T17, T10, B03 T17, B03
	F018	Lodos do sistema de tratamento de águas residuárias da pintura industrial	Cádmio, cromo, chumbo, cianeto, tolueno tetracloroetileno	T14.2	T01 //T17, B03
	F019	Lodos de tratamento de águas residuárias do revestimento do alumínio por conversão química.	Cromo hexavalente, cianeto (complexo)	T10, B03	T07, T10, T17, B03
	F020	Resíduos (exceto águas residuárias e carvão gasto na purificação do ácido clorídrico) da produção ou uso (como reagente, intermediário ou componente) de tri ou tetraclorofenol, ou de intermediários usados para produzir seus biocidas derivados exceto os resíduos da produção de hexacloropreno a partir de 2,4,5 triclorofenol.	Tetra e pentacloro dibenzo-p-dioxinas tetra e pentacloro benzofuranos, tri e tetraclorofenol e ácidos, éteres, amidos e outros sais derivados do clorofenoxi	T01	
	F021	Resíduos da produção ou uso (como reagente, intermediário ou componente) do pentaclorofenol ou de intermediários usados para produzir seus derivados, exceto águas residuárias e carvão gasto na purificação do ácido clorídrico	Penta e hexacloro dibenzo-p-dioxinas penta e hexacloro benzofuranos, pentaclorofenol e seus derivados	T01	
	F022	Resíduos do uso (como reagente, intermediário ou componente) do tetra, penta ou hexaclorobenzeno sob condições alcalinas, exceto águas residuárias e carvão gasto na purificação do ácido clorídrico.	Tetra, penta e hexacloro dibenzo-p-dioxinas, tetra, e hexacloro dibenzofurano		

CONTINUAÇÃO

INDÚSTRIA	CÓDIGO DO RESÍDUO NBR10.004	DESCRIÇÃO DO RESÍDUO	CONSTITUINTES PERIGOSOS	PRINCIPAL TECNOLOGIA DE TRATAMENTO APLICÁVEL*	TRATAMENTO DESTINAÇÃO OPCIONAIS
	F023	Resíduos (exceto águas residuárias e carvão gasto na purificação do ácido clorídrico) da produção de materiais em equipamentos usados previamente para a produção ou uso (como reagente, intermediário ou componente) do tri e tetraclorofenol, exceto resíduos de equipamento usado somente para a produção ou uso de hexacloropreno quando feito a partir de 2,4,5 - triclorofenol.	Tetra e pentacloro dibenzo-dioxina tetra e pentacloro dibenzofuranos, trie tetraclorofenóis e ácidos, éteres, aminas e outros sais derivados do clorofenox.	T01	
	F024	Resíduos da produção de hidrocarbonetos alifáticos clorados que possuam de um a cinco carbonos, utilizando processo de radicais livres catalisados, incluindo, mas não se limitando a resíduos de destilação, fundos de coluna, alcatrões e resíduos de limpeza de reator, exceto os citados no Anexo B - Listagem nº 2	Clorometano, diclorometano, triclorometano, tetracloro de carbono, 1,1- dicloroetano, 1,2- dicloroetano, trans-1,2- dicloroetileno, 1,1-dicloroetileno, 1,1,1 tricloroetano, 1,1,2 - tricloroetano, tricloroetileno, 1,1, 1,2 - tetracloroetano, 1.1.2.2 tetracloroetano, tetracloroetileno, pentacloroetano, tetracloroetileno, pentacloroetano, hexacloroetano, cloreto de alila (3 - cloropreno) dicloropropeno, dicloropropeno, 2 - cloro - 1,3-butadieno, hexacloro - 1,3 butadieno, hexaclorociclopentadieno, hexaclorociclohexano, benzeno, clorobenzeno, diclorobenzeno, 1,2,1 triclorobenzeno, tetraclorobenzeno, pentaclorobenzeno, hexaclorobenzeno, tolueno e naftaleno	T01	
	F026	Resíduos da produção de materiais em equipamentos usados previamente para o uso (como reagente, intermediário ou componente) de tetra, penta ou hexaclorobenzeno sob condições alcalinas, exceto águas residuárias e carvão gasto na purificação de ácido clorídrico.	Tetra, penta e hexaclorodibenzo-p-dióxinas, tetrapenta e hexaclorodibenzo-furanos	T01	

CONTINUAÇÃO

INDÚSTRIA	CÓDIGO DO RESÍDUO NBR10.004	DESCRIÇÃO DO RESÍDUO	CONSTITUINTES PERIGOSOS	PRINCIPAL TECNOLOGIA DE TRATAMENTO APLICÁVEL*	TRATAMENTO DESTINAÇÃO OPCIONAIS
	F027	Resíduos de formulações não usadas contendo tri, tetra ou pentaclorofenol ou aqueles que contêm compostos derivados destes clorofenóis, exceto formulações contendo hexacloropreno sintetizado de 2,4,5 triclórofenol.	Tetra, penta e hexaclorodibenzo-p-dioxina, tetra, penta e hexacloro-dibenzofuranos, tri tetra e pentaclorofenóis e seus ácidos, ésteres, éteres, aminas e outros sais derivados do clorofenoxi	T01	
	F028	Resíduos resultantes da incineração ou tratamento térmico de solo contaminado com resíduos F020, F021, F022, F023, F026 ou F027.	Tetra, penta e hexacloro-dibenzo-p-dioxina, tetra, penta e hexacloro dibenzofuranos, tritetra, e pentaclorofenóis e seus ácidos, ésteres, éteres, aminas e outros sais derivados do clorofenoxi.	B03	
	F030	Óleo usado incluindo os de uso lubrificante (motores, engrenagens e turbinas), com fluido hidráulico (incluindo aquele usado em transmissão), no trabalho com metais (incluindo para corte, polimento, usinagem, estampagem, resfriamento e cobertura) e óleo usado em isolamento ou na refrigeração em que seja contaminado.	Chumbo, arsênio, cádmio, cromo, 1,1,1-tricloroetano, tetracloroetano (percloroetileno), tolueno, naftaleno.	T01	
	F100	Fluídos dielétricos a base de bifenilas policloradas	Bifenilas policloradas, triclorobenzeno.	T01	
Preservação de Madeira	K001	Lodos de sedimentos de fundo do tratamento de águas residuárias de processos de preservação de madeira que utilizam creosoto e/ou pentaclorofenol	Pentaclorofenol, fenol, 2-clorofenol p-cloro-m-cresol, 2,4-dinitrofenol, creosoto, criseno, naftaleno, fluoranteno, benzo(b) fluoranteno, benzo (a) pireno, indeno (1,2,3-c,d) pireno, benzo(a) antraceno, di-benzo(a) antra-ceno, acenaftaleno triclorofenóis, tetraclorofenóis.	T01	
Pigmentos Inorgânicos	K002	Lodo do tratamento de águas residuárias da produção de pigmentos laranja e amarelo de cromo	Cromo hexavalente chumbo	proibir a fabricação	T10, B03

CONTINUAÇÃO

INDÚSTRIA	CÓDIGO DO RESÍDUO NBR10.004	DESCRIÇÃO DO RESÍDUO	CONSTITUINTES PERIGOSOS	PRINCIPAL TECNOLOGIA DE TRATAMENTO APLICÁVEL*	TRATAMENTO DESTINAÇÃO OPCIONAIS
	K003	Lodo do tratamento de águas residuárias da produção de pigmento laranja e molibdato	Cromo hexavalente chumbo	T10, B03	
	K004	Lodo de tratamento de águas residuárias da produção de pigmento amarelo de zinco.	Cromo hexavalente	T10, B03	
	K005	Lodo de tratamento de águas residuárias da produção de pigmento verde de cromo.	Cromo hexavalente chumbo	T10, B03	
	K006	Lodo de tratamento de águas residuárias da produção de pigmento verde de óxido de cromo (anidro e hidratado).	Cromo hexavalente	T10, B03	
	K007	Lodo de tratamento de águas residuárias de pigmento azul de ferro	Cianeto (complexo) cromo hexavalente	proibir a fabricação	T07, T10, B03//T08, B03
	K008	Resíduos de fornos da produção de pigmento verde de óxido de cromo.	Cromo hexavalente	T10, B03	T10, B03
Produtos químicos orgânicos	K009	Resíduos de fundo de destilação da produção de acetaldeído a partir do etileno.	Clorofórmio, formaldeído, cloreto de metileno, cloreto de metila, paraldeído, ácido fórmico	T01	
	K010	Frações de destilação da produção de acetaldeído a partir de etileno.	Clorofórmio, formaldeído, cloreto de metileno, cloreto de metila, paraldeído, ácido fórmico, cloro-acetaldeído	T01	
	K011	Corrente de fundo proveniente do "stripper" de resíduos líquidos na produção de acrilonitrila.	Acrilonitrila, acetonitrila, ácido cianídrico.	T01	T07, T08, B03
	K013	Saída de fundo da coluna de acetonitrila da produção de acrilonitrila.	Ácido cianídrico, acrilonitrila, acetonitrila	T01	
	K014	Resíduo de fundo da coluna de purificação de acetonitrila da produção de acrilonitrila.	Acetonitrila, acrilamida	T01	
	K015	Resíduo de fundo de coluna de destilação de cloreto de benzila	Cloreto de benzila, cloro-benzeno, tolueno, cloreto-de benzilidina	T01	
	K016	Fração pesada ou resíduos de destilação da produção de tetra cloreto de carbono.	Hexaclorobenzeno, hexaclorobutadieno, tetra-cloreto de carbono, hexacloroetano, percloro-etileno.	T01	

CONTINUA

CONTINUAÇÃO

INDÚSTRIA	CÓDIGO DO RESÍDUO NBR10.004	DESCRIÇÃO DO RESÍDUO	CONSTITUINTES PERIGOSOS	PRINCIPAL TECNOLOGIA DE TRATAMENTO APLICÁVEL*	TRATAMENTO DESTINAÇÃO OPCIONAIS
	K017	Resíduo de fundo de coluna de purificação na produção de epícloridrina.	Epícloridrina, cloroéteres [bis <clorometil> éter] e bis (2-cloroetil eter) tricloro-propano, dicloropropanóis	T01	
	K018	Resíduo de fração pesada de coluna de fracionamento da produção de cloreto de etila	1,2-dicloroetano, tricloroetileno, hexaclorobutadieno, hexaclorobenzeno	T01	
	K019	Fração pesada de destilação de dicloroetileno da produção desta substância	Dicloro de etileno, 1,1,1- tri-cloroetano, 1,1,2 tricloroetano, tetracloroetano (1,1,2,2 - tetracloroetano e 1,1,1,2 -tetracloroetano), tricloroetileno, tetracloroetileno,tetracloro de carbono, clorofórmio,cloreto de vinila, cloreto de vinilideno.	T01	
	K020	Fração pesada de destilação de cloreto de vinila da produção de monômero de cloreto de vinila.	Dicloro de etileno, 1,1,1. tri-cloroetano, 1,1,2 tricloroetano,tetracloroetano (1,1,2,2 - tetracloroetano) tricloroetileno,tetracloroetileno tetracloro de carbono, clorofórmio, cloreto de vinila, cloreto de vinilideno	T01	
	K021	Resíduo de catalisador aquoso de antimônio exaurido da produção de fluorometano.	Antimônio,tetra cloreto de carbono e clorofórmio.	T01	
	K022	Resíduos de fundo de destilação com alcatrões de produção de fenol/acetona a partir do cumeno.	Fenol, alcatrões (hidrocarbonetos policíclicos aromáticos).	T01	
	K023	Resíduos leves de destilação da produção de anidrido ftálico a partir do naftaleno.	Anidrido ftálico, anidrido maleico.	T01	
	K024	Resíduos de fundo de destilação da produção de anidrido ftálico a partir do naftaleno.	Anidrido ftálico, 1,4-naftoquinona	T01	
	K025	Resíduos de fundo de destilação da produção de nitrobenzeno pela nitração do benzeno.	Meta-dinitrobenzeno, 2,4 - dinitrotolueno	T01	

CONTINUAÇÃO

INDÚSTRIA	CÓDIGO DO RESÍDUO NBR10.004	DESCRIÇÃO DO RESÍDUO	CONSTITUINTES PERIGOSOS	PRINCIPAL TECNOLOGIA DE TRATAMENTO APLICÁVEL*	TRATAMENTO DESTINAÇÃO OPCIONAIS
	K026	Resíduos de fundo de extrator da produção de metiletilpiridinas.	Paraldeído, piridinas, 2-picolina	T01	
	K027	Resíduos de destilação e centrifugação da produção de tolueno diisocianato.	Tolueno diisocianato, tolueno 2,4-diamina	T01	
	K028	Catalisador exausto do reator de hidrocloração da produção de tricloroetano.	1,1,1 - tricloroetano, cloreto de vinila	T01	
	K029	Resíduo do extrator a vapor da produção de 1,1,1 - tricloroetano	1,2-dicloroetano, 1,1,1 - tricloroetano, cloreto de vinilideno, clorofórmio	T01	
	K030	Resíduos de fundo de coluna ou fração pesada da produção combinada de tricloroetileno e percloroetileno.	Hexaclorobenzeno, hexaclorobutadieno, hexacloroetano, 1,1,1,2-tetracloroetano, 1,1,2,2-tetracloroetano, dicloreto de etileno.	T01	
	K083	Fundo de destilação da produção de anilina.	Anilina, nitrobenzeno, difenilamina, fenilendiamina.	T01	
	K085	Fundos de coluna de destilação ou fracionamento da produção de clorobenzenos.	Benzeno, monoclorobenzeno, diclorobenzeno, triclorobenzeno, tetraclorobenzeno, pentaclorobenzeno, hexaclorobenzeno, cloreto de benzila.	T01	
	K093	Resíduos leves de destilação da produção de anidrido ftálico a partir do ortoxileno.	Anidrido ftálico anidrido maleico	T01	
	K094	Resíduos de fundo de destilação de anidrido ftálico a partir do ortoxileno.	Anidrido ftálico	T01	
	K095	Resíduos de fundo de destilação da produção de 1,1,1 - tricloroetano.	1,1,2 - tricloroetano, 1,1,1,2-tetracloroetano, 1,1,2,2 - tetracloroetano.	T01	
	K096	Fundos de coluna de destilação da fração pesada na produção de 1,1,1 - tricloroetano.	1,2- dicloroetano, 1,1,1-tricloroetano, 1,1,2-tricloroetano	T01	
	K103	Águas residuárias combinadas geradas na produção de nitrobenzenoanilina.	Anilina, nitrobenzeno, definilamina fenilendiamina.	T01	

CONTINUAÇÃO

INDÚSTRIA	CÓDIGO DO RESÍDUO NBR10.004	DESCRIÇÃO DO RESÍDUO	CONSTITUINTES PERIGOSOS	PRINCIPAL TECNOLOGIA DE TRATAMENTO APLICÁVEL*	TRATAMENTO DESTINAÇÃO OPCIONAIS
	K104	Efluente aquoso da limpeza do reator de produto na produção em bateladas de clorobenzeno.	Benzeno, monoclorobenzeno, diclorobenzeno, tetraclorobenzeno, pentaclorobenzeno, hexaclorobenzeno, cloreto de benzila	T01	
	K105	Águas de lavagem da produção de clorobenzeno.	Benzeno, monoclorobenzeno, diclorobenzeno, 2,4,6 - triclorofenol.	T01	
Pesticidas	K031	Subprodutos na forma de sais gerados na produção de MSMA e ácido cacodílico.	Arsênio	T14.7	
	K032	Lodo de estação de tratamento de águas residuárias da produção de clordano.	Hexaclorociclopentadieno	T01	
	K033	Águas residuárias e água do lavador de gases da cloração do ciclo-pentadieno da produção de clordano.	Hexaclorociclopentadieno	T01	
	K034	Resíduos sólidos da filtração de hexaclorociclopentadieno da produção de clordano.	Hexaclorociclopentadieno	T01	
	K035	Lodos do tratamento das águas residuárias geradas na produção de creosoto.	Creosoto,criseno, naftaleno, fluoranteno,benzo(b) fluoranteno, benzo (a) pireno,indeno (1,2,3 c,d) pireno, benzo (a) antraceno, dibenzo (a) antraceno, ace-naftaleno.	T01	
	K036	Resíduos de fundo do processo de recuperação do tolueno por destilação da produção de disulfoton.	Tolueno, ésteres de ácidos fosforoditióico e fosfortiúico	T01	
	K037	Lodos do tratamento de águas residuárias da produção de disulfoton.	Tolueno, ésteres de ácidos fosforoditióico e fosfortiúico.	T01	
	K038	Águas residuárias de lavagem e extração da produção de "phorate"	"Phorate, formaldeído, ésteres de ácidos fosforo ditiúico e fosfortiúico	T01	
	K039	Resíduos de torta da filtração de ácido dietilfosforoditiúico da produção de "phorate".	Ésteres de ácido fosforoditiúico e fosfortiúico	T01	

CONTINUAÇÃO

INDÚSTRIA	CÓDIGO DO RESÍDUO NBR10.004	DESCRIÇÃO DO RESÍDUO	CONSTITUINTES PERIGOSOS	PRINCIPAL TECNOLOGIA DE TRATAMENTO APLICÁVEL*	TRATAMENTO DESTINAÇÃO OPCIONAIS
	K040	Lodo do tratamento de águas residuárias da produção de "phorate".	"Phorate", formaldeído, ésteres de ácidos fosforoditióico e fosforotióico	T01	
	K041	Lodo do tratamento de águas residuárias da produção de toxafeno.	Toxafeno	T01	
	K042	Frações pesadas ou resíduos de destilação do tetraclorobenzeno da produção de 2,4,5 - T.	Hexaclorobenzeno, ortodictlorobenzeno	T01	
	K043	Resíduo de 2,6 - diclorofenol da produção de 2,4 - D.	2,4 - diclorofenol, 2,6 - diclorofenol, 2,4,6-triclorofenol.	T01	
	K097	Descarga do extrator a vácuo do clorador do clordano feita durante a sua produção.	Clordane, heptaclor	T01	
	K098	Águas residuárias do processo, sem tratamento, da produção de toxafeno.	Toxafeno	T01	
	K099	Águas residuárias, sem tratamento, da produção de 2,4 - D.	2,4-diclorofenol, 2,4,6-triclorofenol	T01	
Explosivos	K044	Lodos de tratamento de águas residuárias da manufatura e processamento de explosivos.	Reativo	T09,	
	K045	Carvão gasto no tratamento das águas residuárias, que contém explosivos.	Reativo	T09	
	K046	Lodos de tratamento de águas residuárias da manufatura, formulação e operações de manuseio de compostos iniciadores a base de chumbo.	Chumbo	T09,T10,B03	T01// T08, B03
	K047	Água rosa/vermelha das operações de TNT		T09	T01
Refinação de petróleo	K048	Sobrenadante de separadores tipo DAF, nas indústrias de refino de petróleo.	Cromo hexavalente Chumbo	T01	T18
	K049	Sólidos da emulsão de óleo residual da indústria de refinação de petróleo.	Cromo hexavalente chumbo	T01	T18
	K050	Lodo da limpeza dos tubos dos trocadores de calor da indústria de refinação de petróleo	Cromo hexavalente	T01	T18
	K051	Lodos dos separadores de óleo de Indústrias de refino de petróleo	Cromo hexavalente chumbo	T01	T18

CONTINUA

CONTINUAÇÃO

INDÚSTRIA	CÓDIGO DO RESÍDUO NBR10.004	DESCRIÇÃO DO RESÍDUO	CONSTITUINTES PERIGOSOS	PRINCIPAL TECNOLOGIA DE TRATAMENTO APLICÁVEL*	TRATAMENTO DESTINAÇÃO OPCIONAIS
	K052	Resíduos que contém chumbo de fundo de tanque da indústria de refinação de petróleo.	Chumbo	T01	T18
Ferro e aço	K061	Lodo ou poeira do sistema de controle de emissão de gases da produção de aço primário em fornos elétricos.	Cromo hexavalente, chumbo, cádmio	T10, B03	B03
	K062	Banho de decapagem exaurido das operações de acabamento de aço.	Cromo hexavalente, chumbo	T10, B03	
	K090	Lodos ou poeira do sistema de controle de emissões da produção de ferro-cromo-silício.	Cromo	T10, B03	
	K091	Lodos ou poeira do sistema de controle de emissões da produção de ferro-cromo.	Cromo, chumbo	T10, B03	
	K092	Lodos ou poeira do sistema de controle de emissões de produção ferro-manganês.	Cromo, chumbo	T10, B03	
	K209	Poeira do sistema de controle de emissão de gases nos fornos Cubilot na fundição de ferro.	Cromo, chumbo, cádmio	T10, B03	
Cobre primário	K064	Lodos e lamas do espessamento do "Blow down" ácido na produção de cobre primário.	chumbo, cádmio	T10, B03	
Chumbo primário	K065	Sólidos contidos em reservatórios de sistemas de tratamento de de emissões de fundição de chumbo primário ou retirados destes reservatórios.	Chumbo, Cádmio	T10, B03	
Zinco primário	K066	Lodos do tratamento de águas residuárias ou do "Blow down" ácido na produção de zinco primário.	Chumbo, cádmio	T10, B03	
	K067	Lodos ou lamas calcários de anodos eletrolíticos da produção de zinco primário.	Chumbo, cádmio	T10, B03	
	K068	Resíduo da unidade cádmio (óxido de ferro) na produção de zinco primário.	Chumbo, cádmio	T10, B03	
	K069	Lodo ou poeira do sistema de controle de emissão de gases da fusão de chumbo secundário.	Cromo hexavalente, chumbo, cádmio	T10, B03	

CONTINUAÇÃO

INDÚSTRIA	CÓDIGO DO RESÍDUO NBR10.004	DESCRIÇÃO DO RESÍDUO	CONSTITUINTES PERIGOSOS	PRINCIPAL TECNOLOGIA DE TRATAMENTO APLICÁVEL*	TRATAMENTO DESTINAÇÃO OPCIONAIS
Química Inorgânica	K100	Solução residual da lavagem ácida do lodo ou poeira do sistema de controle de emissão de gases da fusão de chumbo secundário.	Cromo hexavalente, chumbo, cádmio	T10, B03	
	K071	Lama da estação de tratamento dos efluentes do processo de produção de cloro em célula de mercúrio.	Mercúrio	T14.6	T10, B03
	K073	Resíduos de hidrocarbonetos clorados da etapa de purificação do processo de células de diagrama usando anodos de grafita na produção do cloro.	Clorofórmio, tetracloreto de carbono, hexacloreto, tricloroetano, tetracloreto, dicloroetileno, 1,1,2,2-tetracloreto.	T15, T08, B03	
	K074	Lodos de tratamento de águas residuárias na produção de pigmento de TiO2 com minérios que contêm cromo pelo processo de cloretos.	Cromo	T10, B03	
Fabricação de tintas	K106	Lodo de tratamento de águas residuárias do processo de células de mercúrio na produção de cloro	Mercúrio	T14.6	T10, B03
	K078	Resíduo de limpeza com solvente na fabricação de tintas.	Cromo, chumbo	T14.2	T10, B03 // T08, B03// T01
	K079	Resíduo de limpeza com água ou materiais cáusticos na fabricação de tintas.	Chumbo, mercúrio, benzeno, tetracloreto de carbono, cloreto de metileno, tetracloreto, naftaleno, di (2 etil-hexilftalato) di-n-butilftalato tolueno.	14.2	T08, B03// T01
	K081	Lodos de tratamento de águas residuárias da produção de tintas.	Cromo, chumbo, mercúrio, níquel, cloreto de metileno, tolueno.	T08, B03	T01
	K082	Lodo ou poeira do controle de emissões de gases da produção de tintas.	Antimônio, cádmio, cromo, chumbo, níquel, prata, cianetos, fenol, mercúrio, pentaclorofenol, cloreto de vinila, 3,3-diclorobenzideno, naftaleno, di (2etilhexilftalato) di-n-butilftalato, tolueno, tetracloreto de carbono, cloreto de metileno, tricloroetileno.	T14,3	T01//T10,T17, B03//T10, T08, B03

CONTINUAÇÃO

INDÚSTRIA	CÓDIGO DO RESÍDUO NBR10.004	DESCRIÇÃO DO RESÍDUO	CONSTITUINTES PERIGOSOS	PRINCIPAL TECNOLOGIA DE TRATAMENTO APLICÁVEL*	TRATAMENTO DESTINAÇÃO OPCIONAIS
	K086	Lodos e lavagens com solvente, lodos e lavagens alcalinas, ou lodos e lavagens aquosas da limpeza de tubulações e equipamentos usados na formulação de tintas a partir de pigmentos, secantes, sabões e/ou estabilizantes contendo cromo ou chumbo.	Cromo, chumbo	T15, T08, B03	
Produtos farmacêuticos e veterinários	K084	Lodos do tratamento de águas residuárias geradas durante a produção de produtos farmacêuticos veterinários a partir de compostos arsenicais ou organoarsenicais.	Arsênio	T08, B03	
	K101	Resíduos de fundo da destilação de compostos a base de anilina na obtenção de produtos farmacêuticos veterinários de compostos arsenicais ou organoarsenicais.	Arsênio	T08, B03	
	K102	Resíduos do uso de carvão ativo para descoloração na produção de produtos veterinários a base de arsênico e organoarsenicais.	Arsênio	T08	
	K203	Resíduos dos laboratórios de pesquisa de doenças.	Microorganismos patogênicos, toxinas	T01	
	K205	Resíduo de carvão ativo utilizado para descoloração na produção de compostos arsenicais ou organoarsenicais.	Arsênio	T08, B03	
Coqueificação	K060	Lodo calcário que contém amônia do resíduo de fundo das operações de coqueificação.	Cianeto, naftaleno, compostos fenólicos, arsênio	T01	
	K087	Lodo de alcatrão do tanque de decantação utilizado no sistema de tratamento de gases de coqueria.	Fenol, naftaleno	T01	
	K206	Resíduo de lavagem ácida do benzeno, originário da destilação	Benzeno, tolueno, naftaleno, fenol.	T01	
Alumínio primário	K088	Catodos exauridos da redução de alumínio primário.	Cianeto (complexo)	B03	
	K200	Resíduos do desmonte das cubas de redução na produção de alumínio primário.	Cianetos (complexos)	B03	T08, B03
Hospitais	K201	Resíduos em geral	Microorganismos patogênicos, toxinas	T01	

CONTINUAÇÃO

INDÚSTRIA	CÓDIGO DO RESÍDUO NBR10.004	DESCRIÇÃO DO RESÍDUO	CONSTITUINTES PERIGOSOS	PRINCIPAL TECNOLOGIA DE TRATAMENTO APLICÁVEL*	TRATAMENTO DESTINAÇÃO OPCIONAIS
Laboratórios de análises clínicas	K202	Resíduos oriundos do processamento de análises.	Microorganismos patogênicos, toxinas	T01	
Institutos de pesquisas	K204	Resíduos dos laboratórios de doenças.	Microorganismos patogênicos, toxinas	T01	
Re-refino de óleo	K207	Borra ácida originada do re-refino de óleos usados.	Chumbo, arsênio, cádmio, 1,1,1-tricloroetano, tricloroeteno (percloroetileno), tolueno, naftaleno	T01	
	K208	Borra neutra do re-refino de óleos usados	Chumbo, arsênio, cádmio, cromo, 1,1,1-tricloroetano, tricloroeteno, (tetracloroeteno (percloroetileno) tolueno, naftaleno	T01	

* Estas tecnologias são aplicáveis aos resíduos caracterizados pela descrição apresentada e não necessariamente às águas residuárias de tais processos

LEGENDA:

B03 ATERRO INDUSTRIAL
T01 INCINERAÇÃO
T07 OXIDAÇÃO DE CIANETOS
T08 ESTABILIZAÇÃO QUÍMICA
T10 ESTABILIZAÇÃO DE METAIS
T12 NEUTRALIZAÇÃO

T14.1 RECUPERAÇÃO DE MERCÚRIO
T14.2 RECUPERAÇÃO DE TINTAS
T14.3 RECUPERAÇÃO DE SOLVENTES
T14.4 RECUPERAÇÃO DE ÓLEOS
T14.6 RECUPERAÇÃO DE METAIS
T15 TRATAMENTO BIOLÓGICO
T17 SECAGEM
T18 LANDFARMING

THE UNIVERSITY OF CHICAGO
DEPARTMENT OF CHEMISTRY
5800 S. UNIVERSITY AVENUE
CHICAGO, ILLINOIS 60637

RECEIVED
MAY 15 1964

TO THE DIRECTOR
FROM THE DEPARTMENT OF CHEMISTRY

RE: [Illegible]

DATE: [Illegible]

[Illegible]

[Illegible]

**REFERÊNCIAS
BIBLIOGRÁFICAS**

THE UNIVERSITY OF CHICAGO
LIBRARY

- ANDERSEN, J.R. & DORNSBUSH, J.N. Influence of sanitary landfill on ground water quality. *Journal of American Water Works Association*. New York, 59 (4): 457-70. 1977.
- ARIMA, Y. Considerações básicas para encapsulamento de lodos perigosos. *Revista PPM, Japão* (4) - 1977.
- ATLAS, R.M. (1984). *Petroleum Microbiology*. Macmillan Publishers Co., New York. 692p.
- AWARE, Inc. *Process design techniques for industrial waste treatment*. Nashville, Enviro Press, 1974.
- BAILIE, R.C. *Fluid bed reactors in solid waste treatment*. Virginia, West Virginia University, 1971.
- BATSTONE, R; SMITH, J. E & WILSM, D. *The Safe Disposal of Hazardous Wastes*, World Bank Technical Paper Number 93, Washington, DC, The World Bank, 1989.
- BERNARDES JR.; C. et alii. *Classificação de Resíduos Sólidos Industriais*. São Paulo, CETESB, 1983. 23 p. (Trab. apres. no Cong. Bras. Eng. Sanit. e Amb., 12. (Camburiú, 1973)
- BERNARDES JR.; C. et alii. *Incineração de Resíduos Perigosos*, Rio de Janeiro - Dez 1988
- BOUWER, H. *Ground water hidrology*. Tokio, McGraw-Hill; Kogakusha, 1977.
- BROWN, K.W. (1986). *Monitoring the unsaturated zone*. In: *Land treatment. A hazardous waste management alternative*. Loehr, R.C. & Malina Jr., J.F. (ed.). US.EPA, The University of Texas, Austin. pp. 171-185.
- BUGHER, R. *Solid Waste research needs*. Chigago, Health Service, 1962.
- CASARINI, D.C.P.; Cunha R.C. de A.; Sato, M.I.Z.; Sanches; P.S. (1990). *Evaluation of toxicity test procedure to define loading rates in a land treatment system*. IAWPRC International Seminar on Industrial Residuals Management. Salvador, Bahia, Brazil, November, 7-9.
- CETESB. (1988). *Resíduos sólidos industriais. Tratamento no solo - Procedimento*. Norma LI0.101. CETESB, São Paulo, 11p.
- CETESB, São Paulo. *Encapsulamento de Resíduos Argilosos*. São Paulo, 1978.
- CETESB, São Paulo. *Resíduos contendo cianeto*. São Paulo, 1978. 109p.
- *Disposição em aterros*. São Paulo, 1981.
- *Drenagem em aterros sanitários*. São Paulo, 1979. 66 p.
- *Guia prático nº 1 - codisposição dos resíduos industriais*. São Paulo, 1970. 2v.
- COPE, F. et alii. *Use of liners for containment at hazardous waste landfills*. *Pollution engineering, Barrington*, 16(3): 22.32, 1984.
- CULLINANE, M. John, Jr et alii. *Handbook for stabilization/ solidification of hazardous waste*. Mississippi. EPA.1986.
- DAGUE, R.R. et alii. *Anaerobic activated sludge*. *Journal of the water pollution Control Federation*. Colorado, 38 (2): 220-6, 1986.
- DIBBLE, J.T. and Bartha, R. (1979). *The effect of environmental parameters on the biodegradation of oil sludge*. *Applied and Environmental Microbiology*, 37:729-739.
- ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. *Methods of solid wastes testing* Cincinnati, 1973.
- FAIR, G.M. *Waste disposal: preventive medicine and public health*. 9. ed. New York, 1965.

- FIELD, JR.; T. & LINDSEY, A.W. Landfill disposal of hazardous waters; a review of literature and know approaches. Washington, EPA, 1975. 36 p.
- FULLER, W.H. (1986). Site selection fundamentals for land treatment. In: Land Treatment. A Hazardous Waste Management Alternative. Loehr, R.C. and Malina Jr., J.F. (ed.). US.EPA, The University of Texas, Austin. pp. 86-99.
- GOMES, D.C.; Cunha, R.C. de A.; Gloeden, E. (1990). Evaluation of a petroleum refinery land treatment unit using unsaturated zone monitoring data. IAWPRC International Seminar on Industrial Residuals Management. Salvador, Bahia, Brazil, November, 7-9.
- GESWEIN, A.J. liners for land disposal sites: an assessment report on solid waste management Cincinnati, EPA, 1975.
- GOLUEKE, C. G. Biological reation in solid Waste recovery systems. Compost Science Journal of Waste Recycling Texas, 15 (3): 2-6, 1974.
- GUIDINCI, G & NIEBLE, C. M. Estabilidade de taludes naturais e de escavação. São Paulo, EDUSP, 1976.
- GURNAHAM, C. F. Principles of industrial waste treatment. New York, John Willey & Sons, 1955
- HANKS, T. G Solid Waste: disease relationship. Cincinnati, 1967.
- HAXO, H.E. et alii. Liner materiais exposed to hazardous and toxic sludges. Cincinnati, Environmental Research. 1977.
- HUEPER, W. C. Carcinogenes in the human environmental. Archives Pathology, Chicago, (71): 237-67, 1961.
- HUEPER, W.C. & PAYNE, W.W. Carcinogenic effect of adsorbates of raw and finshed. Water supplies. American J. of Clin. Pathology, (39): 475-81, 1963.
- JAPAN ENVIRONMENTAL SANITATION CENTER. Guide to disposal of industrial waste. Kawasaki, 1978.
- KINCANNON, C.B. Oil waste disposal by soil cultivation process. Washington, EPA, 1972.
- KOOL, I. V. Refuse disposal in the Rotterdam Industrial Area. Hans der Technik, Vorttogsver Pfentlichunger, 1972.
- LEPSCH, I. F. Solos, formação e conservação. São Paulo. Melhoramentos, 1976. (Série Prima - n° 31)
- LUBOWITZ, H. R. et alii. Development of a polyneric Cementing and encapsulating process for managing hazardous wastes. Vicksburg.
- MCARTY, P. L. Anaerobic waste treatment fundamentals. Process Design Public Works, 1964. (Parte 4).
- MALONE, PHILIP G. et alii. Guide to the disposal of chemically stabilized and solidified waste. Mississipi. EPA. 1972.
- MATRECON. Inc. Linning of waste impoundment and disposal facilities. Cincinnati, EPA, 1980. 385 p.
- MATTHEWS, J.E. (1987). Evaluation of toxicity test procedure for screening treatability potential of waste in soil. Toxicity Assessment: An International Quartely, 2:265-281.
- MERLIM G. SPANGLER & RICHARD L. HANDY, Soil Engineering Iowa State University - 4ª Edição Harper & Row, Publishers New York, USA.
- MATHEUS, P.J. & BENTLEY, J. Characterization, colletiction treatment and final disposal of toxic sludges, São Paulo, CETESB PROCOP, 1983. v.

- METCALF, Leonard & EDDY, H.P. Wastewater engineering. New York, McGraw-Hill; 1974. 782 p.
- MOSEY, F.E. & HUGNES, D. A. The toxicity of heavy metal ions to anaerobic digestion. Journal of the Institute of Water Pollution Control (1) 1975.
- MOSEY, F.E. Anaerobic biological treatment of food industry waste waters. Journal of the Institute of Water Pollution Control. 80(2) 1981.
- NUMERON, N.L. Liquid waste of industry: theories, practices and treatment. Addison-Wesley, Reading Mass, 1971.
- PARIZEK, R.R. and Lane, B.E. (1970). Soil-water sampling using pan and deep pressure-vacuum lysimeters. Journal of Hydrology, 11:1-21.
- PARR, J.F. et alii. Composting sewage for land application. Agriculture and environment, 1978.
- PIRES, MARIA C. , Study of stabilization of phenol and chlorinated phenol by clay and charcoal in a cement based process. Tese de Mestrado, Universidade de Londres, Inglaterra, 1987.
- POHLAND, F. G. & CHOSH, S. Development in anaerobic stabilization of organic wastes. The two-Phase Concept. Environmental Letters. 1(14), 1971.
- RANZINI, G. Manual de levantamento de solos. 2.ed. São Paulo, Edgard Blusher, 1969.
- ROCHA, A. A. Aspectos epidemiológicos e poluidores, vetores sumeiros percolados. Revista DAE. 42 (128): 63-68, mar. 1982.
- RUOCCO JR. J. et alii. Metodologia de amostragem de lixo. São Paulo. CETESB, 1978. (Trab. apres. no Congresso Pan-Americano de Limpeza Pública). São Paulo, 1978.
- RYAN, J.R.; Hanson, M.L. & Loehr, R.C. Land treatment practices in the petroleum industry. In: Land treatment: A hazardous waste management alternative. R.C. Loehr & J.F. Malina Jr. (ed), Water Resources Symposium Number Thirteen, The University of Texas at Austin, pp. 319-345, 1986.
- SHELF. G. et alii. Combined Treatment and disposal.
- SHULTZ, D. W. & MICHEAS JR.; M.P. Placement procedures for various impoundment liners. Solid waste management, July., 1982.
- SIMS, R.C. (1986). Loading rates and frequencies for land treatment systems. In: Land Treatment. A Hazardous Waste Management Alternative. Loehr, R.C. and Malina Jr., J.F. (ed.). US.EPA, The University of Texas, Austin. pp. 151-170.
- STEWART, W. S. State of the Art Study of land impoundment techniques. New Jersey. Research and Engineering.
- SUMNER, S. et alii. Refuse disposal. London, Her Majesty Stationery Office, 1971.
- SWISS FEDERAL INSTITUTE FOR WATER SUPPLY. Methods of sampling and analysis of solid wastes. Duberdorf, 1970.
- T.BONNER, B.DESAI, J FULLENKAMP et alli Hazardous Waste Incineration Engineering - Monsanto Research Corporation, New Jersey, U.S.A. - 1981
- THEISEN, H. et alii. Solid wastes engineering principles and management issues. Tokio, McGraw-Hill Kogakusha, 1977.
- US.EPA. (1983). Hazardous Waste Land Treatment. EPA SW-874, Washington, 692p.
- US.EPA. (1984). Permit Guidance Manual on Unsaturated Zone Monitoring for Hazardous Waste Land Treatment Units. EPA/530-SW64-016, Washington, 99p.
- US.EPA. (1986). Permit Guidance Manual on Hazardous Waste Land Treatment Demonstrations. Final Version. EPA, Washington. 200p.

- US.EPA. (1987). Guidance Manual on Hazardous Waste Land Treatment. Closure/Post-Closure. EPA 40CFR Part 265. Interin Final, Washington. 38p.
- VAN KLEECH, L.W. Safety and sanitary landfill Public Works, (90): 113, 1959
- VARGAS, M. Introdução à mecânica dos solos. São Paulo, EDUSP, 1977
- WOLFE, H.R. et alii Health hazard of discharged pesticides containers. Archives of Environmental Health. Chicago, (3): 531-7, 1961.



IMPRESSÃO
IMPRENSA OFICIAL
DO ESTADO S.A. IMESP

Rua da Mooca, 1921 — Fone: 291-3344
Vendas, ramais: 257 e 325
Telex: 011-34557 — DOSP
Caixa Postal: 8231 — São Paulo
C.G.C. (M.F.) N.º 48.066.047/0001-84



GOVERNO DE SÃO PAULO
CONSTRUINDO UM FUTURO MELHOR

Entrada: / /
Indicação: Doação -
Aquisição:
Preço:
Tombado em : 12/12/1993

**CETESB - Companhia
Ambiental do Estado de São
Paulo**

Biblioteca

Se este livro não for devolvido dentro
do prazo regulamentar, o leitor ficará su-
jeito às penalidades do regulamento
da biblioteca

O prazo poderá ser prorrogado se
não houver pedido para este livro.

