

GEOAMBIENTAL '94

**Seminário sobre Geotecnia de Aterros
para Disposição de Resíduos**

Ênfase em Aterros Sanitários

**Rio de Janeiro
7 e 8 de Abril de 1994**

**COPPE-UFRJ
Local: UFRJ, Centro de Tecnologia, Sala G-122**

**Apoio:
ABMS-Associação Brasileira de Mecânica dos Solos
The British Council**

CONSIDERAÇÕES SOBRE O REVESTIMENTO DE FUNDO DE ÁREAS DE DISPOSIÇÃO DE RESÍDUOS À LUZ DAS RECOMENDAÇÕES INTERNACIONAIS ATUAIS

Luiz Guilherme F. S. de Mello
(EPUSP/FAU-UBC/Vector Engenharia)
Eduardo C. do Val
(FAP-FAAP/Vector Engenharia)

RESUMO

O revestimento do fundo das áreas de disposição de resíduos, efetuados para garantir a minimização do potencial de contaminação do aquífero subjacente vem sendo tratado com grande rigor, tanto a nível nacional, quanto a nível internacional.

Recomendações quanto à espessura mínima e às características físicas do material natural compactado existente são analisadas e é discutida a necessidade da avaliação da compatibilidade química entre o percolado do resíduo e o material de revestimento. Outro aspecto postulado como de relevância é a avaliação da possibilidade de contaminação do aquífero por difusão molecular através do revestimento de fundo. Ensaios de campo e de laboratório vêm sendo recomendados e utilizados rotineiramente para respaldar as definições de projeto dessas áreas de disposição.

A modernidade do assunto gera necessidade de reflexão antes da aplicação direta de conceitos, normas ou recomendações internacionais, sem prévia análise de sua validade em nosso contexto geológico-geomorfológico, assim como em relação à possibilidade de utilização de outros ensaios para a obtenção dos parâmetros desejados.

O trabalho proposto pretende discutir as normas e recomendações locais, à luz daquelas de centros internacionais.

1. INTRODUÇÃO

Uma das importantes questões da área de geotecnica ambiental diz respeito aos estudos das áreas de disposição de resíduos. A solução de disposição dos resíduos não tratados em áreas especialmente estudadas e concebidas é empregada em inúmeras situações, mesmo com o reconhecimento de que esta solução é paliativa, visto que não elimina o problema, e sim o transfere para outra época ou alçada de conhecimento e decisão. (Oweis e Khera, 1990). Tal fato vem gerando críticas cada vez mais contundentes nas sociedades mais desenvolvidas, que passam a pressionar por soluções que reduzam ou eliminam drasticamente o volume e a toxicidade dos resíduos.

Áreas de disposição devem ser projetadas e operadas de maneira a impedir que substâncias contaminantes atinjam a biosfera e a hidrosfera em concentrações inaceitáveis durante sua vida útil e num intervalo de tempo adicional após o encerramento da área, geralmente sugerido com de 30 a 50 anos.

Correntemente são utilizadas três linhas de concepção das áreas de disposição:

- áreas impermeabilizadas ou totalmente drenadas, concebidas de forma a evitar qualquer contato do líquido percolado com as águas subterrâneas,
- áreas em que se admite certa infiltração do percolado, impondo-se fatores limitantes como a profundidade do lençol freático e as características geomecânicas de deformabilidade e hidráulicas dos solos de fundação;
- áreas em que se impõe o contato entre o percolado e o lençol freático, em condição imperiosa de que o lençol freático não atinja cotas inferiores à determinado valor; nestas condições, a subpressão atuante na base da área de disposição gera uma infiltração constante em sentido oposto àquele potencialmente contaminante do aquífero.

A escolha do conceito de área de disposição a utilizar em cada caso deve ser baseada no tipo de resíduo a dispor adequadamente e sua interrelação com o meio físico da região em estudo. Um dos requisitos mais fortes nos estudos de validação de qualquer das opções conceituais existentes é aquele da adequada caracterização geológica, hidrogeológica e geotécnica da área, e do percolado propriamente dito, e a potencial adequação das propriedades geomecânicas do terreno às características do resíduo/percolado em questão.

Para a avaliação rotineira da aceitabilidade de uma área de disposição é essencial um preciso conhecimento dos aquíferos e aquicúlidos da região e suas propriedades hidráulicas, bem como da compressibilidade dos solos e do potencial de se aprimorar sua "impermeabilidade" caso necessário. Considerações particulares quanto à compatibilidade química entre o percolado e o material de fundo da área de disposição, e quanto à relevância do transporte de contaminantes por difusão molecular são também necessárias, e passam a ser requisitadas cada vez mais pelas autoridades fiscalizadoras. Finalmente, a necessidade de se estabelecer garantias relativas à representatividade dos ensaios de comprovação em campo dos quesitos de projeto gera a proposição de novas metodologias.

2. PROPOSIÇÕES LOCAIS

As autoridades locais vêm se empenhando a fundo em subsidiar a profissão com a regulamentação orientativa necessária, e se dispõe de várias normas orientativas, dentre elas as de caracterização e classificação dos resíduos a serem estocados, e de regulamentação de sua disposição. A CETESB - Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental de São Paulo, por exemplo, preconiza o uso das normas NBR 10004, 8418, 10157, os PN 1:603.06.003 e 006 da ABNT, além de sua norma interna CETESB L-1030 para orientar a elaboração e aprovação de projetos relativos a estes tópicos. A primeira dessas normas orienta a classificação dos resíduos em função de sua periculosidade, gerando três classes de resíduos (Perigosos - Classe I, Não Perigosos - Classe II, e Inertes - Classe III), a partir da qual se conceitua os quesitos a serem estudados e incorporados na conceituação da área de disposição em análise.

Essas normas preconizam que um local em estudo para implantação de uma área de disposição deve começar por atender às seguintes restrições:

- distância de 500 metros de conjuntos residenciais,
- distância de 200 metros de corpos d'água superficiais,
- subsolo constituído de material com condutividade hidráulica (coeficiente de permeabilidade) inferior a 10^{-5} cm/s,
- declividade máxima de 20% no terreno, quando da implantação de aterros de resíduos sólidos industriais.

Soma-se a essas recomendações aquela relativa à condição climática desejável, ou mínima, de que um local para implantação de uma área de disposição aparente evaporação média anual excedente à precipitação média anual em 500 mm.

A tabela abaixo, (CETESB, 1993), oferece, de forma simplificada, as orientações postuladas quanto às condições hidrogeológicas desejáveis e mínimas para a implantação de áreas de disposição de resíduos.

Características	Cond. Hidrogeológica Desejável		Cond. Hidrogeológica Mínima	
	Esp. Cam. Insaturada L (m)	Cond. Hidráulica K (cm/s)	Esp. Cam. Insaturada L (m)	Cond. Hidráulica K (cm/s)
Aterro				
Resíduo Classe I	3	10^{-7}	1.5	5×10^{-5}
Resíduo Classe II	3	10^{-6}	1.5	5×10^{-5}

A filosofia dominante em termos de projeto e implantação de aterros para disposição de resíduos é a de adoção de barreiras múltiplas à liberação de poluentes ao meio ambiente. Isso é conseguido mediante associação de barreiras naturalmente disponíveis, tais como uma hidrogeologia favorável e um isolamento com relação a aquíferos aproveitáveis, àquelas artificiais criadas pelo projeto, como a construção de camadas impermeabilizantes e sistemas de coleta e tratamento dos percolados.

A partir da caracterização e classificação dos resíduos, assim como daquelas geográfica, topográfica, hidrogeológica e climatológica do local em estudo, define-se a concepção básica da área de disposição. As figuras 1 a 5 (CETESB, 1993) apresentam esquemas básicos para áreas de disposição de resíduos Classe I e II, tendo-se em consideração as particularidades do local previsto para sua implantação.

Quando do uso de argilas compactadas para compor o sistema de impermeabilização de fundo, estas devem apresentar uma porcentagem maior que 30% passante na peneira #200, apresentar um Limite de Liquidez maior ou igual a 30%, um Índice de Plasticidade maior ou igual a 15%, um pH maior ou igual a 7 e uma condutividade hidráulica (coeficiente de permeabilidade) para material em condição saturada inferior a 10^{-7} cm/s quando compactado. Na eventualidade de uso de geomembranas sintéticas, das quais existem um grande número de produtos no mercado, uma grande série de recomendações relativas ao preparo da área para recebê-las e à sua instalação e controle estão disponíveis. Em particular a norma CETESB L 1030 enfoca o importante tópico de compatibilidade entre a geomembrana e os resíduos a serem estocados.

O uso de geomembranas flexíveis é contemplado nas especificações apresentadas pela CETESB, sendo que inúmeros ensaios de caracterização de suas propriedades estão normalizados pela ABNT. É interessante notar que a praxe local tem requerido uso de geomembranas com espessura de 2 ~~mm~~ mm.

Os aterros para disposição de resíduos sólidos Classe I devem também ter vida útil mínima de 10 anos, ter seu sistema de drenagem superficial projetado para um tempo de recorrência hidrológica de 25 anos, incorporar um sistema duplo de impermeabilização com dreno-testemunha na superfície inferior, e um sistema de coleta e tratamento do percolado.

Nossa experiência em aterros sanitários da Grande São Paulo indica ser necessário englobá-los como receptores de resíduos Classe I, em função da falta de controle em relação aos materiais neles lançados.

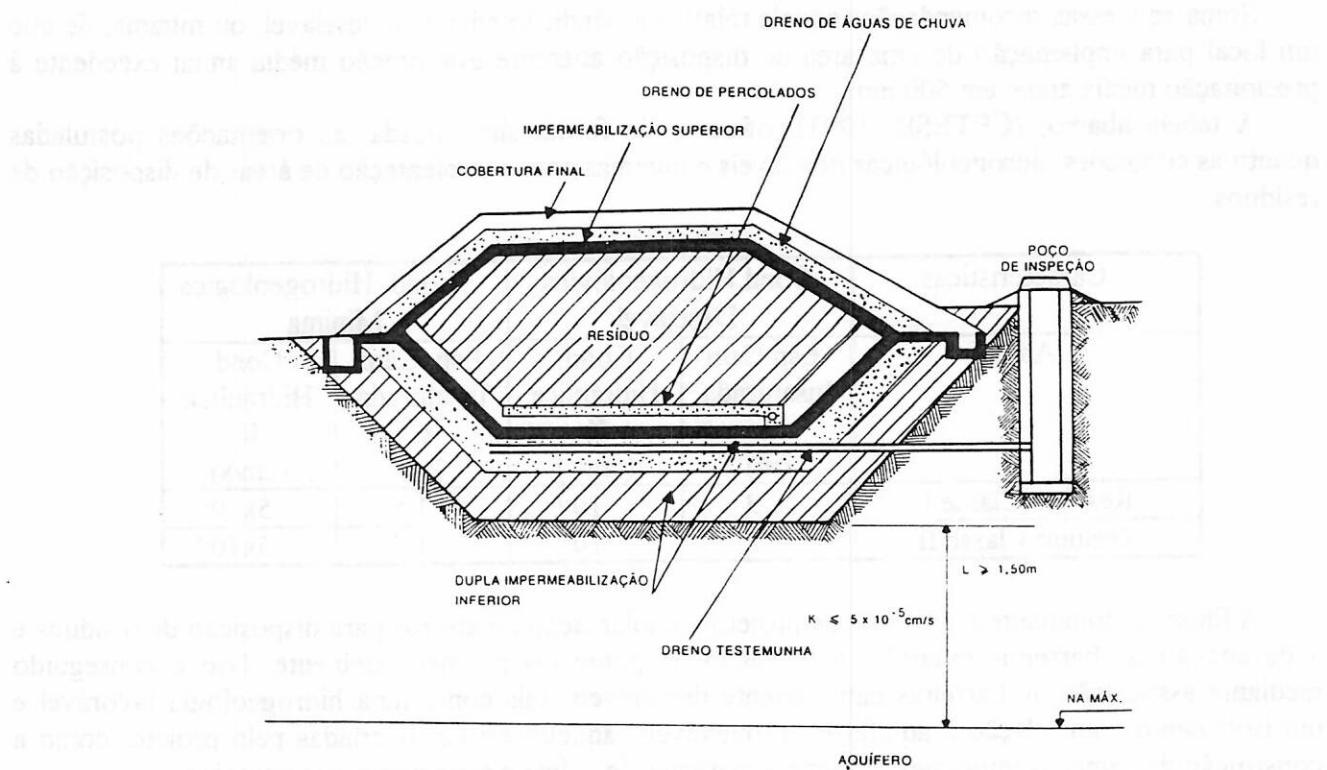


Figura 1 - Esquema de Aterro de Classe I

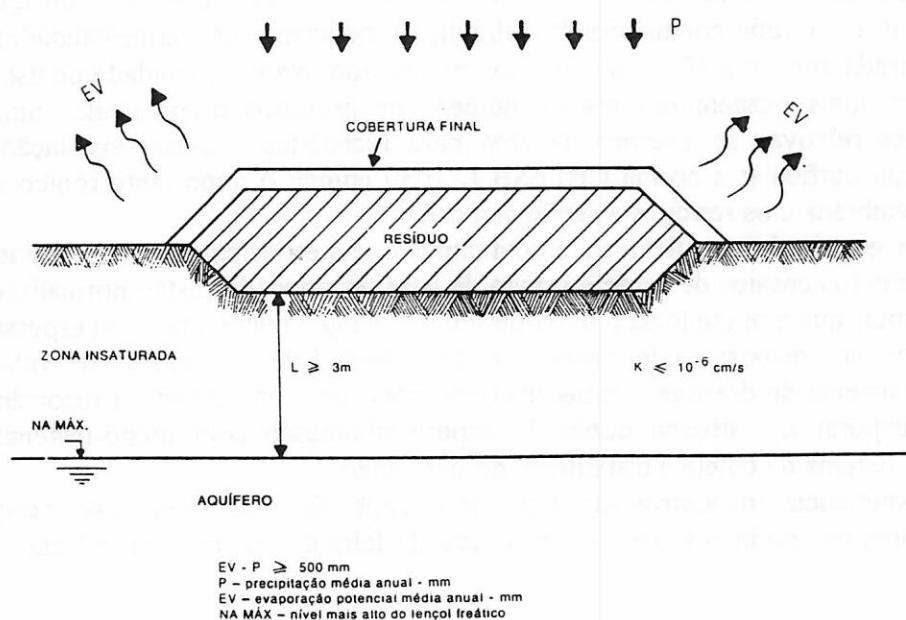


Figura 2 - Esquema de Aterro de Resíduos Classe II - Condições Climáticas e Hidrológicas Favoráveis

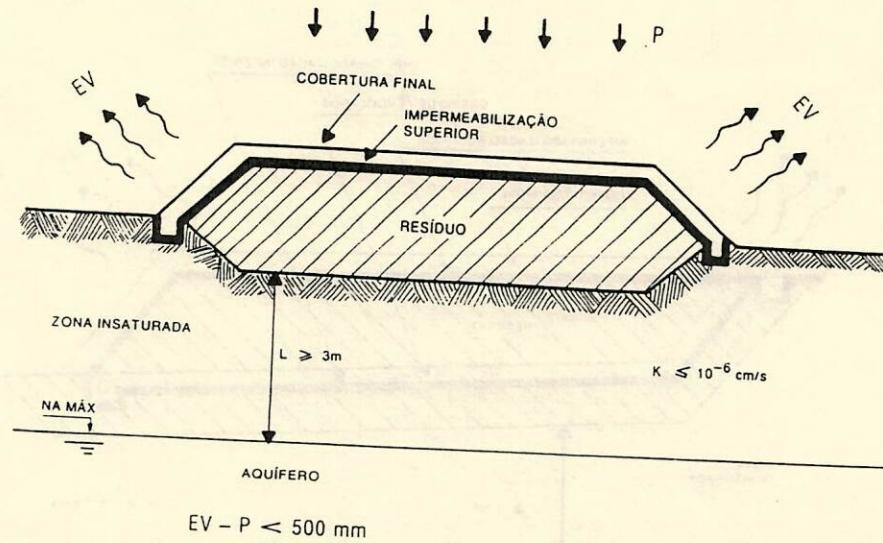


Figura 3 - Esquema de Aterro de Resíduos Classe II - Condições Climáticas Insatisfatórias e Hidrológicas Favoráveis

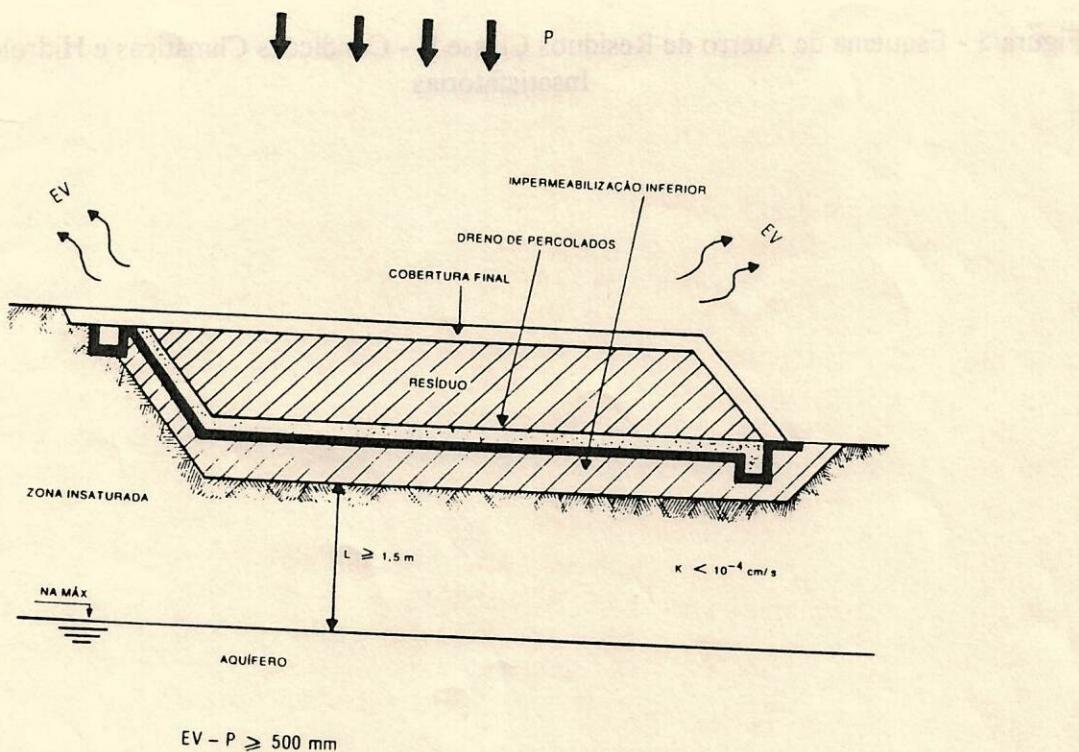


Figura 4 - Esquema de Aterro de Resíduos Classe II - Condições Climáticas Favoráveis e Hidrológicas Insatisfatórias

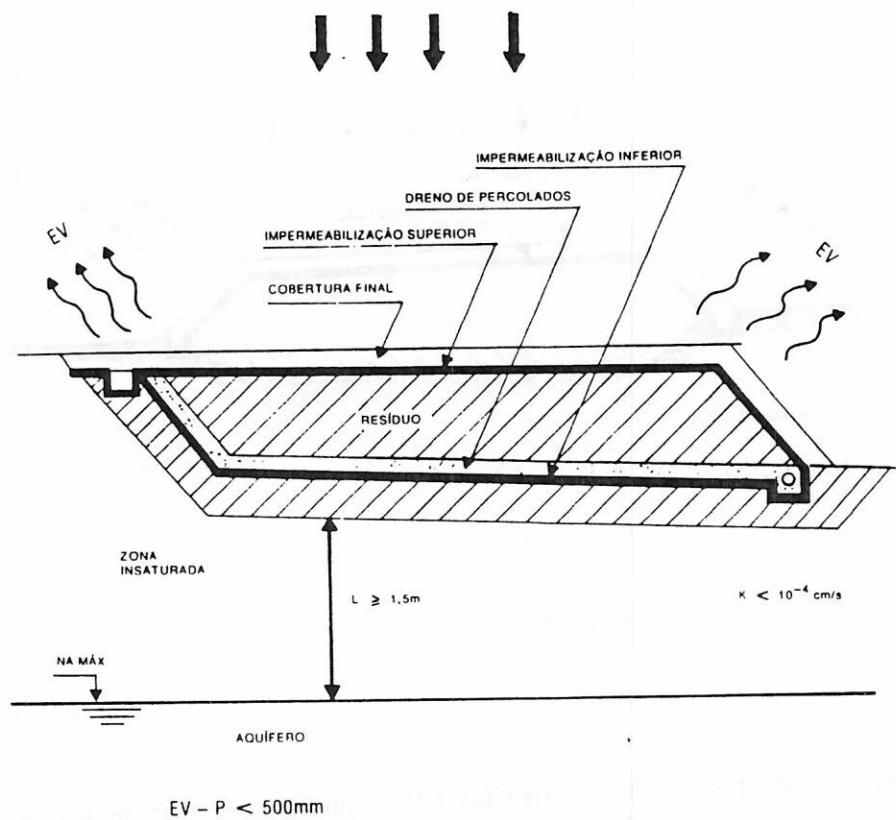


Figura 5 - Esquema de Atérro de Resíduos Classe II - Condições Climáticas e Hidrológicas Insatisfatórias

3. CONSIDERAÇÕES RELATIVAS ÀS RECOMENDAÇÕES INTERNACIONAIS

Não se pretende discutir as normas internacionais existentes. Este trabalho seria de extrema dificuldade em função da dinâmica de atualização que essas normas vêm sofrendo, com a consequente dificuldade de se manter um arquivo atualizado. Entretanto, a filosofia atualmente seguida pelos países europeus e pelos Estados Unidos da América pode ser tentativamente resumida.

O Comitê Técnico Europeu TC 8 - "Geotechnics of Landfills and Contaminated Land" da ISSMFE acaba de apresentar uma revisão de suas recomendações relativas aos tópicos de geotecnica ambiental relevantes ao projeto de áreas de disposição de resíduos. Dentre os itens abrangidos incluem-se as investigações necessárias para a aprovação de uma área para disposição de resíduos. Estas recomendações incluem a avaliação geológica da área em estudo, com ênfase às suas características morfológicas, estruturais e tectônicas, seus aquíferos e características de fluxo, e ao potencial de ocorrência de terremotos ou outras catástrofes naturais na região em questão. Extensa quantidade de estudos adicionais são solicitados ou recomendados, visando conhecer adequadamente a composição e a distribuição dos depósitos de terreno superficial, a estrutura e a seqüência dos materiais basais e a determinação das características hidrogeológicas da região. Detalhes importantes fazem parte dessa etapa de estudos, incluindo a determinação do potencial de solubilidade das rochas e solos naturais ao fluxo tanto de água como dos percolados previstos. A permeabilidade dos estratos de subsolo deve ser determinada em relação ao fluxo de d'água, de percolado e de gases ou de outras soluções agressivas possíveis.

Requisitos básicos conceituais são apresentados para a funcionalidade de cada um dos elementos constantes de um sistema múltiplo de impermeabilização de fundo, assim como do capeamento de um área de disposição. Discussões conceituais detalhadas quanto ao comportamento esperado, no que diz respeito à capacidade de retenção dos poluentes, à deformabilidade aceitável e possibilidade de formação de fissuramento por tração e, finalmente, da compatibilidade entre os materiais e o(s) percolado(s) são apresentadas, sem que valores limitantes mínimos ou máximos sejam estabelecidos. A completa caracterização do percolado é contemplada de forma a garantir sua representatividade.

A modelagem da migração de contaminantes não reativos ou adsorvidos é rotineiramente realizada com base em modelos de cálculo bastante refinados (Shackelford, 1994, Jessberger, 1994, etc.), enquanto que a modelagem do fluxo de poluentes reativos é bastante primária. Reconhecendo que o fluxo do poluente através do revestimento de fundo se dá através de advecção, dispersão, difusão e adsorsão, é recomendado que os parâmetros fundamentais relevantes sejam determinados a partir de ensaios de campo, apesar de mais demorados, uma vez que seus resultados podem ser afetados significativamente pela estrutura do solo, e esta não ser representativa em ensaios de laboratório.

Principalmente no que diz respeito à determinação da condutividade hidráulica do material a ser utilizado no revestimento de fundo, a ETC 8 propõe o uso de ensaios de permeabilidade em células triaxiais, sob pressões isotrópicas de câmara e sob gradientes hidráulicos de 30, em corpos de prova nos quais se percola "água de torneira" da base para o topo. A composição da água e o grau de saturação atingido deve ser determinados em separado. Os testes devem ser continuados até que se atinja condutividade hidráulica constante, em função do tempo ou do volume percolado. Ensaios complementares de permeabilidade ao líquido percolado devem ser realizados de maneira equivalente, e as recomendações propõem percolados típicos caso não se disponha daquele assumível como real.

Ensaios adicionais de avaliação a longo prazo dos efeitos da percolação do líquido gerado pelo resíduo são necessários. Recomenda-se o uso inicial de ensaios de granulometria, de caracterização química dos agentes cimentícios, de verificação da variação das características de plasticidade e de expansividade dos materiais. São recomendados ensaios tidos como especiais, como por exemplo, a determinação da capacidade de troca iônica e catiônica, a análise de difração por Raio X, de absorção

d'água e de identificação do agente cimentício dos materiais que serão utilizados no revestimento de fundo.

É importante ressaltar que esse importante documento, gerado a partir das normas alemãs e válido para toda a Comunidade Européia, não apresenta valores limites para os parâmetros relevantes discutidos, sendo que cada projeto deve propor e apresentar claramente sua linha conceitual de atendimento aos tópicos pertinentes.

Nos Estados Unidos da América, a legislação federal, identificada como RCRA - Resource Conservation and Recovery Act, e administrada em sua aplicação pela EPA - Environmental Protection Agency, preconiza, EPA 89, que resíduos perigosos e domésticos, equivalentes à nossa definição de resíduos Classe I, devem ser depositados em áreas com revestimento duplo em sua base e com sistema de coleta de percolado entre essas duas barreiras artificiais. Toda a área de disposição e suas barreiras devem estar localizadas acima da cota mais elevada prevista para o lençol freático, sem que esta distância seja limitada.

A barreira superior deve ser construída com material que impeça a migração dos resíduos, enquanto a barreira inferior deve ser projetada de maneira a "dificultar" a migração dos resíduos durante a vida útil e o período pós-operacional da área de disposição (aceito como sendo de 30 a 50 anos). A EPA estipula que esta barreira inferior pode ser de solos naturais compactados, desde que com espessuras maiores do que ~1 metro (3 pés), e condutividade hidráulica em condição saturada inferior a 10^{-7} cm/s. A barreira superior, de geomembrana sintética, deve ter espessura mínima de 30 milésimos de polegada. A EPA permite que sejam apresentadas alternativas à obrigatoriedade do uso de sistema de barreiras duplas, sendo imprescindível o uso de pelo menos uma barreira sintética na base das áreas de disposição.

A condutividade hidráulica do sistema de coleta de percolado deve ser de 10^{-2} cm/s.

Nota-se, portanto, que as preocupações e recomendações básicas das sociedades desenvolvidas são similares. Falta-lhes detalhar mais apropriadamente as características necessárias para que um revestimento de fundo funcione adequadamente, de maneira a garantir o atendimento aos quesitos impostos pelas autoridades de cada local. Verifica-se, na bibliografia especializada e nas discussões de aprovação de projetos locais uma tendência ao aumento da preocupação em relação aos tópicos de compatibilidade química entre percolado e sistema de revestimento de fundo, assim como em relação ao processo de transporte de poluentes por difusão molecular em solos de granulação fina.

4. CONCEITUAÇÃO GEOTÉCNICA DO PROJETO DE REVESTIMENTOS DE FUNDO

A segurança de uma área de disposição de resíduos Classe I - Perigosos - está intimamente relacionada com as propriedades do subsolo local, a chamada barreira geológica, e com os selos impermeáveis de fundo e de cobertura das células. A seleção dos elementos impermeabilizantes e o cálculo das dimensões geométricas destes materiais, inclusive sob condição de estabilidade, ou seja, de invariabilidade, a longo prazo, são de grande importância para o sucesso da operação do sistema.

O conceito de barreira múltipla para o revestimento de fundo de uma célula é indiscutível; cada elemento constituinte da barreira deve apresentar segurança em relação à sua função isolada, e em relação à sua interrelação com os demais elementos e a segurança global da barreira. Nesse conceito, a camada argilosa compactada deve ser complementada e tornada permanentemente impermeável com a colocação de uma membrana flexível sintética diretamente sobre ela; a camada permeável posicionada sobre esta também é integrada à barreira de fundo por reduzir o gradiente hidráulico máximo atuante na geomembrana.

Da camada argilosa propriamente dita se requer:

- minimizar, pela escolha do material, sua espessura e critério de compactação, o fluxo e a difusão molecular através dela;
- resistência à erosão e à penetração d'água;
- alta capacidade de adsorção, em função de seus argilo-minerais;
- pequena deformabilidade e boa capacidade de auto-cicatrização, em função de sua plasticidade, a qual, por sua vez, é relacionada com o tipo e teor de argilo-mineral e sua granulometria;
- resistência à percolação d'água, o que depende do teor de minerais expansivos na argila;
- conhecimento a priori da possibilidade de ocorrência de seu inchamento devido a succão por capilaridade de água do subsolo, o que depende das condições hidrogeológicas do local.

Internacionalmente (Shackelford e de Mello, 1993), tem-se postulado parâmetros mínimos para certas propriedades geomecânicas para a camada de revestimento do fundo a serem atendidas no desenvolvimento de projetos, quais sejam:

- condutividade hidráulica menor 10^{-7} cm/s;
- Índice de Plasticidade $12\% < IP < 20\%$;
- porcentagem de material fino, passante na peneira # 200, maior do que 30%;
- espessura mínima de selo argiloso compactado = 1 metro.

Localmente, alguns países chegam a ter restrições ainda mais rigorosas, como, por exemplo, as normas alemãs que preconizam condutividade hidráulica menor que 10^{-8} cm/s, com espessura mínima de 1,5 metro.

Da membrana flexível sintética, (EPA 1989, Richardson e Koerner, 1987) se requer:

- prevenção total de fluxo de fluidos e de gases através dela;
- estabilidade (resistência) química de longo prazo, em função do material utilizado;
- minimização do processo de difusão molecular, o que depende do material utilizado, e da espessura da membrana em combinação com o material argiloso empregado;
- não susceptibilidade a problemas gerados pelos recalques absolutos e diferenciais específicos previstos, em função de seu comportamento tensão-deformação;
- resistência à perfuração, e facilidade de boa soldagem entre diferentes painéis de mantas.

Novamente cabe mencionar as recomendações típicas internacionais:

- espessura mínima variando entre 0,076 cm - 30 mil (EPA), 0,20 cm - 80 mil (norma alemã);
- valores relativos à permeabilidade a gases e a líquidos, densidade, dureza, absorção d'água, módulo de alongamento a 100 e a 300%, tensão e alongamento de ruptura à tração do material propriamente dito e de suas emendas, resistência ao cisalhamento nas interfaces com os demais materiais encontrados no projeto, resistência ao impacto, carga de "rasgamento", envelhecimento, e compatibilidade química, variam entre aqueles sugeridos pela ASTM, DIN, etc.

Idealmente, da interface entre a membrana flexível e a barreira compactada se requer que, nos eventuais pontos de perfuração da manta, o espalhamento lateral do percolado seja minimizado, que se impeça o aparecimento de subpressões neutras significativas, e que se maximize o potencial de auto-cicatrização da referida interface.

As opções de geomembranas flexíveis disponíveis são razoavelmente amplas, incluindo-se entre elas as de PVCs (polivinil), de politileno (de diversas densidades), de borrachas butílicas, compostos betuminados, etc. Em particular, um importante ponto a mencionar diz respeito, à aparente preferência de certas autoridades pelo uso de PAD ou HDPE - Polietileno de Alta Densidade: não se encontra nenhuma justificativa documentada na bibliografia (EPA, 1989; Breitenbach, 1992) para essa preferência. Importante projeto de revestimento de fundo de lagoas de disposição de resíduos na Grande São Paulo optou por apresentar especificações técnicas a serem cumpridas pelo(s) material(is)

sintéticos disponíveis no mercado, sem especificar nenhum tipo particular, cuja opção final será feita por critérios técnicos e econômicos devidamente documentados.

Dentre os tópicos mais discutidos recentemente na conceituação e aprovação de revestimentos de fundo encontram-se aqueles da compatibilidade química entre o percolado e a barreira, e o de "impermeabilidade", ou seja, de atendimento aos critérios de "breakthrough time" - "tempo para atravessar" do poluente na barreira, seja por transporte advectivo, seja por difusão molecular.

4.1 COMPATIBILIDADE QUÍMICA

A compatibilidade química diz respeito à potencial deterioração com o tempo que o(s) material(is) que constituem a barreira impermeável podem sofrer, mesmo em ambientes relativamente inertes. É fundamental antecipar o tipo de percolado a ser produzido nas áreas de disposição e assegurar sua compatibilidade com o(s) revestimento(s) de fundo, ou seja, definir se o percolado ataca a(s) barreira(s), gerando um aumento de sua condutividade hidráulica.

Um problema a ser levado em consideração na escolha do percolado a utilizar nos testes de compatibilidade é relativo ao fato que a composição química do próprio percolado varia com o tempo durante o enchimento da área de disposição e após seu fechamento. Shackelford (1994) discute a importância das características químicas e físicas do(s) percolado(s) a serem utilizados nos ensaios.

Apesar de reconhecida como de fundamental importância, a ponto de se postular sua realização para todos materiais, naturais ou sintéticos de revestimentos de fundo, permanece a questão de quais ensaios de compatibilidade química realizar, considerando-se que até a presente data não existe procedimento normalizado padrão a ser utilizado em tais ensaios.

"Extra-oficialmente", no caso de barreiras de solo compactado, esses ensaios são "rotineiramente" realizados através de testes de permeabilidades efetuados em corpos de prova do material a ser utilizado com percolação de água, a servir como referência, comparativamente àqueles efetuados utilizando-se percolado(s). Esses ensaios são realizados com diversos tipos de permeâmetros, (de parede rígida, em célula triaxial com parede flexível, ou em anel edométrico), apesar das conhecidas dificuldades relativas à representatividade dos resultados deles obtidos. Recentemente, aprimoramentos nas técnicas de ensaios vêm sendo sugeridos e utilizados:

- Daniel et al (1984) descrevem a incorporação de reservatórios a serem instalados no sistema de ensaio, a montante e a jusante do permeâmetro, e seu uso em ensaios de permeabilidade/compatibilidade;
- Jamiolkowski e Manassero (1993) e Schakelford (1994) recomendam o uso de ensaios em permeâmetros de parede flexível com reservatórios intermediários nos quais é estabelecida uma interface por membrana flexível entre a água e o percolado, em concentração constante, em teste, e a necessidade de realizar as medições de condutividade hidráulica somente após fluxo do volume equivalente a 2 vezes o volume de vazios do material em teste, ou até que a variação da condutividade hidráulica com o número de volumes de vazios percolados seja mínima.
- Jessberger e Onnich (1993) propõem um novo equipamento desenvolvido na Alemanha, identificado como permeâmetro DKS com o qual já vêm realizando ensaios de grande valor.

O Comitê Técnico Europeu TC 8 (1993), apresenta recomendações relativas aos procedimentos básicos a serem utilizados na realização dos ensaios de condutividade hidráulica com água e com percolado, indica percolados padrão a serem utilizados caso não se disponha de dados reais daquele a ser encontrado no campo, e recomenda que, além da realização de ensaios comparativos de condutividade hidráulica, sejam realizados ensaios de verificação da variação da curva granulométrica do material da barreira entre sua condição natural, sem uso de defloculante, e na presença do percolado. Recomenda ainda ensaios de caracterização química do agente cimentício do material da

barreira, de avaliação de seu potencial de inchamento após presença do percolado, e de determinação de sua capacidade de troca catiônica, CTC.

É sabido, Shackelford, (1994) e Shackelford e de Mello (1993), que uma boa avaliação do potencial de "incompatibilidade" química entre percolado e solo compactado de barreira pode ser obtida a partir da interpretação criteriosa de ensaios de caracterização (Limites de Atterberg, granulometria por sedimentação, densidade dos grãos, compactação Proctor) realizados segundo as normas convencionais, e com o(s) percolado(s) utilizados como líquido adicionado nas rotinas de ensaio.

Madsen e Mitchell (1989) apresentam extenso conjunto de resultado de pesquisas, a partir das quais concluem, Madsen (1994), que a influência química de poluentes na condutividade hidráulica é significativamente mais pronunciada em situações de barreiras verticais executadas por equipamentos de paredes diafragma, do que em materiais argilo-siltosos compactados, em função da maior mobilidade potencial das partículas, e do potencial de mudanças da estrutura dos materiais de maior umidade. Os efeitos de compostos químicos orgânicos e inorgânicos são discutidos, sendo que a conclusão (temporária) disponível indica que problemas sérios devem ocorrer somente em situações de contacto entre hidrocarbonetos em alta concentração com revestimentos de argilas compactadas sob pequenas pressões de confinamento, ou quando os agentes cimentícios da estrutura da barreira compactada são solúveis ao percolado (caso de solos carbonáticos e percolados ácidos, etc.).

A mesma linha de conceituação deve ser aplicada no caso de uso de geomembranas flexíveis na barreira, devendo ser definida sua durabilidade em ambientes enterrados e sob ação de poluentes. A bibliografia especializada apresenta novas linhas de modelagem de aceleração dos efeitos de longo prazo, conforme Koerner et al (1992).

4.2 DIFUSÃO MOLECULAR

A preocupação quanto ao transporte de poluentes por difusão molecular existe há bastante tempo, sendo objeto inclusive de pesquisa em universidades brasileiras (Nobre, M.M., 1987, de Campos, T.M.P. et al 1991, etc.), sendo pesquisada em inúmeras universidades. Sua importância é tal que este mecanismo de transporte de poluentes domina o comportamento de barreiras construídas com materiais de granulometria fina, ou seja, materiais argilo-siltosos. Inúmeros trabalhos técnicos recentes, mencionados em Shackelford e de Mello (1993), têm enfatizado que quanto menor for a condutividade hidráulica de um material, menos conservadora será uma análise baseada exclusivamente no conhecimento da condutividade hidráulica dos materiais, levando à postulação de que a melhor barreira a um poluente é aquela estudada e construída para controlar seu transporte por difusão molecular.

O TC 8 Europeu apresenta a formulação conceitual de Stokes-Einstein que permitiria estimar o coeficiente de difusão para substâncias inorgânicas em água.

Ensaios de laboratório permitem a determinação do coeficiente de difusão; Shackelford (91) apresenta uma excelente revisão das inúmeras metodologias de ensaio e das soluções analíticas disponíveis para cálculo do coeficiente de difusão de um material. Métodos de saturação prévia das amostras são discutidos, assim como de extração de amostras de contaminantes do solo após o teste de difusão. Importante conclusão apresentada postula significativa variação entre os resultados obtidos em amostras previamente saturadas e naquelas insaturadas (no grau de saturação natural de compactação, da ordem de 85 a 90%), variação esta que chega a atingir 10 a 20 vezes no coeficiente de difusão. Entretanto, por conservadorismo e praticidade, as técnicas de ensaio utilizadas rotineiramente usam amostras saturadas.

As técnicas de laboratório hoje utilizadas com maior frequência, Jamiolkowski e Manassero (1993), são as de uso de células de coluna, com concentração constante ou variável, ou de permeámetros de paredes flexíveis, com reservatórios intermediários iguais àqueles utilizados nos testes de compatibilidade química.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

É importante salientar que o aparente rigor das normas e recomendações (internacionais e nacionais) com relação aos revestimentos de fundo de áreas de disposição de resíduos, é plenamente justificado pelo atual grau de desconhecimento da fenomenologia envolvida, aliado ao elevadíssimo custo dos reparos necessários em caso de insucesso.

O contexto geológico-geomorfológico no qual grande parte de nossas áreas de disposição de resíduos Classe I estão sendo implantadas é abrangente, incluindo terrenos sedimentares quaternários normalmente adensados a terciários fortemente pré-adensados, regiões de saprolitos das mais diferentes origens litológicas, e áreas de diferentes litologias rochosas.

Nota-se que as normas/recomendações locais são baseadas diretamente naquelas internacionais, predominantemente nas da EPA.

A experiência internacional é de grande valia para orientar estudos em certos casos, como, por exemplo, aqueles de materiais terciários pré-adensados, sem que necessariamente possa ser extrapolada diretamente para situações de saprolitos e solos residuais, onde, tanto em sua condição in situ, quanto quando compactados, a estrutura interna do solo será condicionante fundamental de seu comportamento. A relevância da presença de macro poros nos aglomerados de partículas não desagregados durante as atividades de preparo e compactação e de estruturas reliquias da rocha-máter nos materiais naturais subjacentes deve ser pesquisada urgentemente para que os projetos a serem desenvolvidos possam fornecer a segurança que nossa sociedade requer, sem ônus exagerado ou displicência eventualmente causada pela "importação" de resultados de pesquisas realizadas em materiais de outro contexto geológico-geotécnico.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BREITENBACH, A.J. - 1992 - "Geomembrane Liner Evaluation for Heap Leach Pads" - Geotechnical Fabrics Report, novembro;
- CETESB - 1993 - Resíduos Sólidos Industriais - 2^a edição;
- COMITE TÉCNICO EUROPEU TC 8 - 1993 - Geotechnics of Landfill Design and Remedial Works Technical Recommendations - GLR - Editora Ernst & Sohn -2a edição;
- DANIEL, D.E., TRAUTWEIN, S.J., BOYNTON, S.S. E FOREMAN, D.E. - 1984 - "Permeability Testing with Flexible-Wall Permeameters" - Geotechnical Testing Journal, ASTM, vol 7;
- DE CAMPOS, T.M.P. E ELBACHÁ, A.T. - 1991 - "Avaliação do Fator de Retardamento por Adsorção no Transporte de Zinco em Solos Argilosos" - II Simpósio sobre Barragens de Rejeitos e Disposição de Resíduos - REGES'91, Rio de Janeiro;
- EPA - 1989 - Seminar Publication on Requirements for Hazardous Waste Landfills Design, Construction and Closure - EPA/625/4-89/022;
- JAMIOLKOWSKI, M. E MANASSERO, M. - 1993 - Comunicação Pessoal

- JESSBERGER, H.L. - 1991 - "Geotechnical Design of Waste Disposal Sites" - 3rd Internantional Landfill Symposium, Sardegna, Itália;
- JESSBERGER, H.L. E ONNICH K. - 1993 - "Calculations of Pollutant Emissions Through Mineral Liners Based on Laboratory Tests"- 10th International Clay Conference - Adelaide, Austrália;
- JESSBERGER, H.L. - 1994 - "Emerging Problems and Practices in Environment Engineering" - General Report seção 3.1, Anais do 13º Congresso Internacional de Mecanica dos Solos e Engenharia de Fundações, Nova Delhi, Índia, vol. 5;
- KOENER, R.M., LORD, A.E.JR. E HSUAN, Y.H. - 1992 - "Arrhenius Modeling to Predict Geosynthetic Degradation"- Geotextiles and Geomembranes 11;
- MADSEN, F.T. - 1994 - "Clay and Synthetic Liners - Durability Against Pollutants Attack" - Anais do 13º Congresso Internacional de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações, Nova Delhi, Índia;
- MADSEN, F.T. E MITCHELL, J.K. - 1989 - "Chemical Effects on Clay Hydraulic Conductivity and their Determination" - publicação no 135 Mitteilungen des Institutes für Grundbau und Bodenmechanik Eidgenössische Technische Hochschule - Zürich, Suiça;
- NOBRE, M.M. - 1987 - "Estudo Experimental do Transporte de Poluentes em Solos Argilosos Compactados" - Tese de Mestrado - DEC/PUC - Rio de Janeiro;
- OWEIS, I.S. E KHERA, R.P. - 1990 - Geotechnology of Waste Management - Butterworths
- RICHARDSON, G.N. E KOERNER, R.M. - 1987 - "Geosynthetic Design Guidance for Hazardous Waste Landfill Cells and Surface Impoundments" - Harzadous Waste Engineering Research Laboratory, Office of Research and Development, USEPA;
- SHACKELFORD, C.D. - 1991 - "Laboratory Diffusion Testing for Waste Disposal: A Review" - Journal of Contaminant Hydrology, vol 7;
- SHACKELFORD, C.D. E DE MELLO, L.G. - 1993 - General Report de "Clay Liners Design, Testing and Construction" a ser publicado pelo Comite Técnico TC 5 da ISSMFE;
- SHACKELFORD, C.D. - 1994 - "Waste-soil Interactions that Alter Hydraulic Conductivity" - a ser publicado na ASCE JGE.