

Vol VII - Relatos Gerais e Parciais  
pag 122 à 158

Tema MS-3 — GEOTECNIA E MEIO AMBIENTE: erosão, taludes naturais, rejeitos de mineração, aterros sanitários, preservação de encostas.

## RELATO GERAL

### Geotecnia e meio ambiente: Relato do estado da arte

Tácio M. P. de Campos, PhD, DIC  
Professor Assistente, Depto. de Eng.º Civil, PUC/RJ

#### RESUMO

Neste trabalho procura-se dar uma visão global dos problemas geotécnicos que se enquadram dentro do contexto atual da Geotecnia Ambiental. A partir de uma classificação geral do assunto, as principais atividades e problemas relativos à deteriorização do Meio Ambiente e Geotecnia são mencionados. Procura-se enfatizar os aspectos ou áreas de atuação não usuais e as diferenças de enfoque existentes entre o que é tratado dentro do âmbito da Geotecnia tradicional e dentro do contexto da Geotecnia Ambiental. Maior atenção é dada aos tópicos Estabilidade de Encostas e, principalmente, Estocagem de Resíduos Sólidos.

#### INTRODUÇÃO

A Geotecnia constitui uma ciência de caráter multidisciplinar cujos conhecimentos são utilizados na solução de um amplo espectro de problemas de Engenharia Civil. As soluções de tais problemas apresentam uma característica comum de poderem tanto ser influenciadas quanto afetar condições ambientais locais ou regionais.

De uma forma simplificada, estes dois tipos de efeito presentes no inter-relacionamento entre Geotecnia e Meio Ambiente podem ser visualizados tomando-se como exemplo a área de Engenharia de Barragens. Dentro desta área de atuação da Geotecnia, tanto o projeto da seção do aterro quanto aspectos construtivos do mesmo são afetados por características ambientais tais como condições climáticas locais ou regionais. Por outro lado, a construção da barragem e o preenchimento do reservatório podem introduzir modificações no meio ambiente que propiciem a ocorrência de, por exemplo, escorregamentos de taludes naturais, sismos induzidos e modificações do regime de águas subterrâneas. Exemplos similares da dupla influência do Meio Ambiente podem ser encontrados em outras áreas de atuação da Geotecnia.

Considerando que, de uma maneira geral, o Engenheiro Geotécnico

procura levar em conta eventuais influências do Meio Ambiente nos projetos e obras convencionais, seria impossível, dentro do contexto deste trabalho, procurar rever todos os aspectos que o título Geotecnia - Meio Ambiente possa sugerir. Desta forma, somente aqueles aspectos relacionados ao papel da Geotecnia dentro do contexto de Controle do Meio Ambiente serão aqui considerados.

Tendo em vista ser esta a primeira vez que o tema é tratado em um Congresso Brasileiro, optou-se por uma discussão geral do problema em detrimento de uma revisão detalhada de tópicos específicos. Tal opção foi feita considerando a necessidade de, antes de qualquer particularização, identificar os principais pontos de interesse à geotecnia nacional e, ao mesmo tempo, propiciar uma visão geral do assunto do ponto de vista ambiental, com ênfase nos aspectos que constituem novidade dentro do contexto da Geotecnia tradicional.

Nenhum dos tópicos aqui mencionados é revisto em profundidade. Desta forma, este trabalho não constitui, na verdade, um relato do estado da arte do tema proposto. Procurou-se, entretanto, na medida do possível, relacionar referências ao longo do texto, que tenham recentemente revisto de forma ampla aspectos particulares do assunto geral.

#### GEOTECNIA E CONTROLE AMBIENTAL

O interesse da comunidade geotécnica internacional por problemas relacionados à controle do meio ambiente começou a tomar vulto nas últimas duas décadas, acompanhando o aumento do nível de exigências sociais e os consequentes aspectos éticos e legais ligados à proteção e melhoria da qualidade do meio ambiente.

O assunto foi pela primeira vez abordado, de uma forma mais ampla, no IX ICSMFE realizada em Tokyo (Moh, 1977). Os trabalhos publicados nesta ocasião abrangeram uma vasta gama de problemas, incluindo considerações envolvendo desde, por exemplo, aspectos de geohidrologia e poluição sonora provocada por cravação de estacas até aspectos relativos ao comportamento de engenharia de materiais de rejeitos de diferentes origens.

A diversificação e relativa falta de coerência dos trabalhos apresentados nesse Congresso mostraram a necessidade de se procurar definir melhor o inter-relacionamento entre Geotecnia e Controle ou Impacto Ambiental. Uma primeira contribuição nesta direção foi apresentada por Sembenelli and Ueshita (1981) no X ICSMFE, onde o termo Geotecnia Ambiental foi utilizado como sendo representativo de uma nova área de atuação da Geotecnia.

Numa tentativa de classificar os problemas de interesse, estes autores dividiram suas discussões em áreas envolvendo, de uma forma simplificada, os seguintes aspectos:

- Modificação das propriedades físico-químicas de materiais e reuso de rejeitos;
- Remoção e acumulação de matéria sólida na superfície e em profundidade;
- Extração e estocagem de fluidos na superfície e em profundidade;
- Cidades (desenvolvimentos urbanos e de complexos industriais)

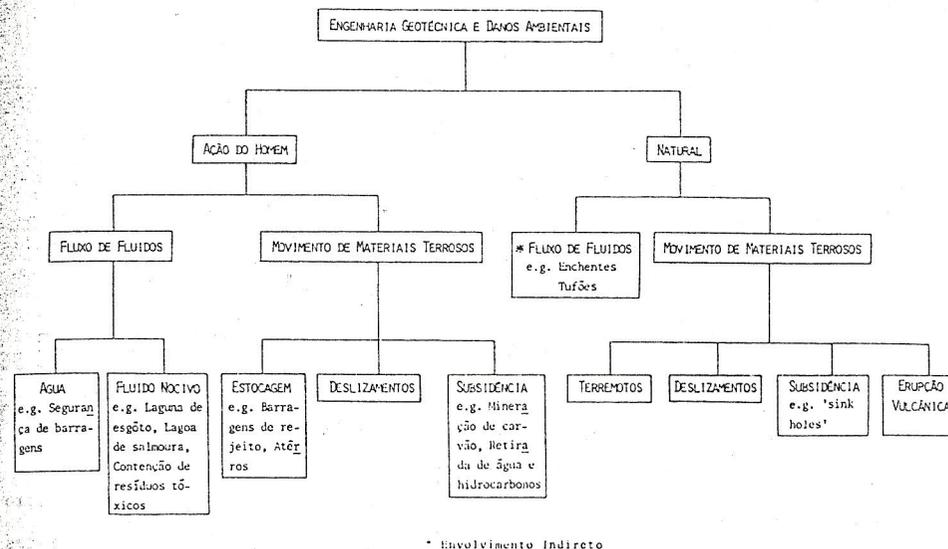


FIGURA 1 : ASSOCIAÇÃO DA ENGENHARIA GEOTÉCNICA COM O RISCO DE OCORRÊNCIA DE DANOS AMBIENTAIS (APUD MORGENSTERN, 1985)

Em suas considerações, Sembenelli e Ueshita (opus cit.) destacam a natureza interdisciplinar dos problemas e recomendam que a Geotecnia Ambiental deva ser encarada como sendo uma ferramenta a ser utilizada basicamente na prevenção ou mitigação de danos ao meio ambiente e não como uma ciência aplicada que aceita e procura solucionar problemas relativamente bem definidos, já existentes ou que possam vir a ocorrer em função de atividades humanas. Considerando-se por exemplo a área de Estabilidade de Encostas, dentro do contexto da Geotecnia Ambiental a preocupação maior estaria na identificação dos prováveis mecanismos de ruptura de uma encosta e na adoção de medidas preventivas para evitar a ocorrência de deslizamento. Já a Geotecnia convencional se preocuparia mais com a estabilização do talude natural já rompido ou em estado de ruptura incipiente.

No XI ICSMFE, Morgenstern (1985) ressaltava algumas deficiências na classificação proposta por Sembenelli e Ueshita (1981) e sugere uma nova classificação dos problemas relacionando Geotecnia e Controle Ambiental.

Na classificação proposta por Morgenstern (1985), reproduzida na Figura 1, foi assumido que o aspecto mais importante a ser considerado na Geotecnia Ambiental estaria relacionado à mitigação ou eliminação de riscos de deteriorização da qualidade do meio ambiente, tomando-se como base problemas ou soluções relacionados a fatores tais como adensamento, estabilidade e percolação. Efeitos de, por exemplo, ruídos provocados por bate-estacas ou por explosões em exploração de pedreiras, assim como problemas de estética não foram considerados como sendo relevantes ao assunto.

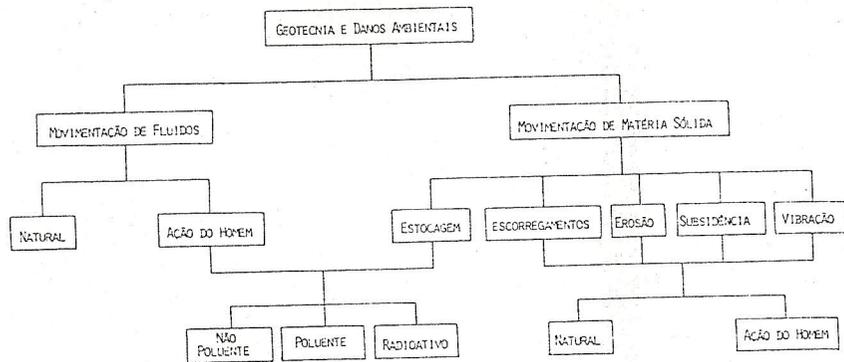


FIGURA 2: RELACIONAMENTO ENTRE GEOTECNIA E MEIO AMBIENTE

Em sua classificação, Morgenstern (opus cit.) parte do princípio da existência de diferenças entre fenômenos naturais e fenômenos oriundos da ação do homem, e subdivide os problemas entre aqueles decorrentes ou que implicam em movimentação de materiais terrosos e em movimentações de fluidos. Nota-se, nesta classificação, tanto uma repetição de classes de problemas geotécnicos, tais como deslizamentos, dentro de cada uma das duas divisões principais, quanto a não consideração de fenômenos tais quais os de erosão ou sismos induzidos dentro das subdivisões adotadas. Nota-se também que a classificação leva em conta somente fatores relativos à movimentação de materiais terrosos, excluindo, desta forma, problemas ambientais ligados, por exemplo, à estocagem de lixo urbanos ou industriais não terrosos.

Levando em conta estas considerações e, ao mesmo tempo, seguindo as proposições básicas de Morgenstern (1985), o relacionamento entre Geotécnica e Danos Ambientais é classificado neste trabalho conforme mostrado na Figura 2.

Na classificação aqui adotada parte-se do princípio de que os problemas e/ou soluções relativos à interação Engenharia Geotécnica - Meio Ambiente estão diretamente relacionados à movimentação de fluidos ou de sólidos, sejam tais movimentações originárias da ação do homem ou de fenômenos naturais.

Tomando-se como base a Figura 2, procura-se, nos itens que se seguem, descrever sumariamente alguns aspectos gerais de problemas ou atividades geotécnicas relacionadas ao controle do meio ambiente, com o objetivo maior de chamar a atenção para os problemas de maior interesse ou não rotineiramente tratados no âmbito usual da engenharia geotécnica.

#### MOVIMENTAÇÃO DE FLUIDOS

Danos ambientais relacionados à movimentação de fluidos são divididos em classes envolvendo ocorrências naturais e oriundas da ação do homem. Conforme indicado no Quadro 1, a interferência humana é subdividida em problemas referentes à movimentação de fluidos não-poluentes, poluentes e radioativos.

MOVIMENTAÇÃO DE FLUIDOS			
NATURAL	ENCHENTES (ENVOLVIMENTO INDIRETO)		
ACÃO DO HOMEM	NAO POLUENTE (ÁGUA)	BARRAGENS	SEGURANÇA EROSÃO MODIFICAÇÕES DO REGIME DE ÁGUAS SUPERFICIAIS E SUBTERRÂNEAS
		BOMBEAMENTO	SUBSIDÊNCIA INTRUSÃO DE ÁGUA SALGADA
	POLUENTES	RETENÇÃO DE FLUIDOS POLUENTES (INDUSTRIAIS, ESGOTOS, ÁGUA SALGADA)	POLUIÇÃO DO SOLO E DO LENÇOL FREÁTICO
		INJEÇÃO DE PRODUTOS QUÍMICOS	
RADIOATIVOS	USINAS NUCLEARES	POLUIÇÃO RADIOATIVA	

QUADRO 1: EXEMPLOS DE ATIVIDADES TÍPICAS E PROBLEMAS RELACIONADOS À MOVIMENTAÇÃO DOS FLUIDOS

Na ausência de tufões e maremotos, as enchentes constituem, no Brasil, o exemplo mais importante de fenômenos naturais relacionados à movimentação de fluidos. O envolvimento da Engenharia Geotécnica na prevenção dos danos decorrentes deste fenômeno é indireto, sendo que projetos e obras associadas ao controle de enchentes não constituem novidade na área de Engenharia de Barragens tradicional.

Estruturas de retenção de água de um modo geral, e outras obras ou atividades que impliquem em modificações do regime de águas superficiais e/ou subterrâneas (e.g., bombeamento, obras de irrigação) são exemplos típicos de empreendimentos humanos relacionados à movimentação de fluidos não poluentes que podem causar danos ambientais (e.g. Sembenelli and Ueshita, 1981, ICOLD, 1985).

À parte as considerações usuais de estabilidade de taludes, vazamentos excessivos pela fundação, ombreiras e/ou corpo de barragens de terra / enrocamento constituem preocupações particularmente relevantes à segurança da obra. Morgenstern (1985) discute alguns importantes aspectos relacionados ao controle / retenção de fluxo d'água pela fundação de barragens. Tal tipo de assunto tem sido motivo de amplos debates no meio geotécnico nacional e internacional e não será aqui considerado.

Não foi encontrada na literatura corrente nenhuma referência sobre aspectos geotécnicos especiais em projetos de irrigação que tenham provocado danos ambientais. Considerando entretanto que tal revisão bibliográfica não foi extensiva, e o grande volume de obras desta natureza presentemente sendo executadas no Brasil, seria recomendável uma investigação mais aprofundada do assunto.

Vale destacar aqui a necessidade de uma avaliação criteriosa dos reflexos que modificações do regime de águas subterrâneas possam ter no meio ambiente tratado em sua forma mais ampla, i.e., considerando o caráter regional do problema. Tal observação é particularmente relevante em projetos onde se prevê a formação de reservatórios d'água em regiões a montante de locais que possuam aquíferos confinados com características especiais (águas termais ou minerais). Estudos detalhados de caráter geológico-geomorfológicos, assim como outros visando averiguar a possibilidade de troca de calor ou ocorrência de difusão entre o aquífero confinado e as águas oriundas da modificação do regime de águas regional são

fundamentais nestas circunstâncias.

Outros aspectos importantes a serem considerados, que envolvem um conhecimento detalhado de características hidrogeológicas locais e regionais, consistem, por exemplo, no estudo da influência de modificações do regime hídrico, induzida pela formação do reservatório em áreas agriculturáveis em bacias adjacentes ou em áreas de solos colapsíveis (elevação do nível d'água).

Dentro do contexto de Geotecnia Ambiental, os problemas mais relevantes e que, de uma certa forma, constituem novidade para a grande maioria dos engenheiros geotécnicos brasileiros, são aqueles relacionados à movimentação de fluidos poluentes e radioativos. Tais fluidos podem tanto ser diretamente oriundos de descartes urbanos ou de plantas industriais e de mineração quanto resultantes de lixiviação de elementos poluentes associados a rejeitos sólidos de tais plantas ou de aterros sanitários.

Nesta relativamente recente área de atuação da engenharia geotécnica, as preocupações básicas estão relacionadas ao projeto e dimensionamento de dispositivos de retenção ou controle de fluxo de poluentes potenciais do lençol freático. Morgenstern (1985) apresenta uma revisão geral do assunto.

Para o dimensionamento das estruturas acima mencionadas é necessária uma avaliação quantitativa do transporte do poluente, sob a forma de soluto, pelo solo.

Uma discussão dos aspectos teóricos relacionados à movimentação de fluidos não miscíveis através do solo (e.g., Bear, 1972) foge aos objetivos do presente trabalho. É interessante, entretanto, mencionar que a movimentação de solutos em um meio poroso, é governada basicamente pelos processos denominados advecção e dispersão hidrodinâmica, e por reações químicas que possam ocorrer na própria solução ou entre o solo e o fluido permeante (reações geoquímicas).

O termo advecção se refere à componente de transporte do soluto ocasionado pelo fluxo de fluido no qual o produto sólido poluente está dissolvido. Solutos geoquimicamente inertes são transportados a uma velocidade igual à velocidade de percolação do fluido contaminado. A parte dos casos onde a velocidade de percolação seja muito baixa, a advecção constitui o mecanismo preponderante de transporte de solutos. (e.g., Goodall and Quigley, 1977; Crooks and Quigley, 1984).

O processo de dispersão hidrodinâmica representa a componente do transporte do soluto responsável pelo espalhamento do poluente no meio poroso. Tal processo se subdivide em dois fenômenos distintos, denominados dispersão mecânica e difusão molecular.

A dispersão mecânica resulta da mistura mecânica oriunda de variações da velocidade de fluxo no meio poroso. Tal variação de velocidade de percolação decorre do escoamento tortuoso do fluido ao longo das interconexões geometricamente complexas dos vazios existentes no solo. A difusão molecular ou osmose ocorre de acordo com a lei de Fick (e.g., Mysels, 1959), ou seja, o movimento de poluentes dissolvidos ocorre em função de diferenças de concentração dos elementos ou substâncias químicas no domínio do fluxo. À baixas velocidades de percolação o processo de dispersão hidrodinâmica é basicamente função da difusão molecular, enquanto que, à altas velocidades, a dispersão mecânica predomina (e.g., Perkins and Johnston, 1963). Gillhan et al (1984) sugerem que para velocidades de percolação inferiores à cerca de  $1.6 \times 10^{-10}$  m/s, o principal mecanismo de transporte do soluto seria a difusão molecular.

VIBRAÇÃO		
NATURAL	TERREMOTOS ERUPÇÃO VULCÂNICA	
	ATIVIDADE	EFEITO
AÇÃO DO HOMEM	ENCHIMENTO DE RESERVATÓRIOS DE BARRAGENS <sup>(1)</sup> MINERAÇÃO SUBTERRÂNEA <sup>(2)</sup> EXTRAÇÃO DE ÁGUA, ÓLEO OU GASES INJEÇÃO DE FLUIDOS SOB PRESSÃO <sup>(3)</sup> EXPLOSÕES (DENSIFICAÇÃO DE AREIAS, <sup>(4)</sup> EXPLORAÇÃO MINERAL, TÚNEIS, EXPERIÊNCIAS NUCLEARES)	SISMICIDADE INDUZIDA
	GRAVAÇÃO DINÂMICA DE ESTACAS <sup>(5)</sup> COMPACTAÇÃO DINÂMICA DE ARGILAS	RECALQUES DIFERENCIAIS, RUPTURAS

(1) VLADUT, T. (1986)  
 (2) WEST BROOK ET AL (1980)  
 (3) RALEIGH ET AL (1972); EVANS, (1966)  
 (4) HRYCIW AND DOWING (1986)  
 (5) SARGSY, R.W. (1986)

QUADRO 2: EXEMPLOS DE ATIVIDADES TÍPICAS E PROBLEMAS RELACIONADOS À VIBRAÇÃO

Técnicas analíticas e/ou numéricas têm sido utilizadas na solução das equações de fluxo, levando em conta os processos de transporte mencionados acima, para diferentes condições de contorno. Análises considerando migração unidimensional, bidimensional e/ou tridimensional do poluente são encontradas na literatura corrente (e.g. Freeze and Cherry, 1979; Rowe and Booker, 1985a, 1985b, 1986; Kupper, 1983a, 1983b).

Finalizando este tópico, é interessante ressaltar que atividades tais como de injeções objetivando estabilização ou impermeabilização de solos devem ser cuidadosamente avaliadas, tendo em vista a possibilidade de poluição a níveis elevados do lençol freático (e.g. Ando and Makita, 1977; Perez and Krizek, 1985; Gouvenot, 1985).

#### MOVIMENTAÇÃO DE SÓLIDOS

Danos ambientais relacionados à movimentação de sólidos são subdivididos em classes envolvendo ações de/ou reações a efeitos de vibração, subsidência, erosão, escorregamentos e estocagem.

#### Vibração

Alguns fenômenos naturais e efeitos de atividades humanas relacionados à vibração ou eventos com alguma componente (ação ou reação) dinâmica, estão descritos no Quadro 2.

Dentre os fenômenos naturais, erupções vulcânicas não constituem motivo de maiores preocupações, tendo em vista a inexistência de vulcões ativos no país. Terremotos têm sido detectados em diferentes regiões do Brasil (e.g. Haberlechner, 1978; ABGE, 1979; Berrocal et al, 1984). Os efeitos, na superfície, destes fenômenos naturais têm sido, em geral, pequenos o suficiente para não provocar danos ambientais de monta.

EROSÃO	
NATURAL (e.g. vossorocas)	INTEMPERISMO FÍSICO, QUÍMICO E BIOLÓGICO AÇÃO DE ÁGUAS (CHUVAS, CORRENTES, ONDAS) E VENTOS
AÇÃO DO HOMEM	DESMATAMENTO ABERTURA DE ESTRADAS MODIFICAÇÕES DO REGIME DE ÁGUA NATURAL (e.g. Barragens) MODIFICAÇÕES DAS PROPRIEDADES DO SOLO (e.g. Uso de Fertilizantes)

**QUADRO 4: EXEMPLOS DE AGENTES NATURAIS E ATIVIDADES HUMANAS RELACIONADAS À EROSIÃO**

### Erosão

O fenômeno de erosão e aspectos ligados à prevenção do mesmo constituem um dos importantes desafios a serem vencidos pela Geotecnia e áreas correlatas no Brasil.

Tal fenômeno, que pode ser tanto natural quanto decorrente da ação do homem, (ver Quadro 4), tem sido responsável por sérios danos ambientais, um exemplo típico sendo as dificuldades encontradas na conservação de solos de áreas agrícolas no Sul do País. Outros efeitos negativos são tão relacionados aos assoreamentos que estão inevitavelmente associados ao fenômeno; aos perigos de deslizamentos catastróficos (corridas) de produtos decorrentes de erosão depositados no sopé ou à meia encosta; a escorregamentos oriundos de descalçamentos da base de taludes ou decorrentes de erosão interna (piping), etc.

Aspectos relativos ao controle de erosão têm sido motivo de recentes discussões no meio geotécnico brasileiro, com a realização de três Simpósios (ABGE 1980, 1981 e 1985) organizados pela Associação Brasileira de Geologia de Engenharia. O assunto foi também recentemente tratado pelo Comitê de Solos Tropicais da Associação Internacional de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações (ABMS, 1985). Resultados de pesquisas desenvolvidas pelo Instituto de Pesquisas Rodoviárias na área de erosão superficial estão resumidos por Fonseca (1981), Ferreira (1981) e Silveira (1981). Fonseca (1985) apresenta uma ampla discussão do fenômeno. Além disso, E. L. Pastore apresentará uma revisão do problema nos debates do tema ao qual se refere este relato. Desta forma, apesar de reconhecer a importância do assunto no que diz respeito ao controle ou conservação do meio ambiente, o mesmo não será revisto neste trabalho.

Vale lembrar entretanto que o aspecto mais importante a ser considerado, dentro do contexto de geotecnia ambiental, consiste na prevenção da ocorrência do fenômeno, o que requer em uma primeira análise, um conhecimento da interação entre os agentes naturais atuantes (ver Quadro 4), do meio físico (e.g. topografia, geologia, hidrologia), e das propriedades geomecânicas e físico-químicas dos materiais envolvidos.

### Escorregamentos

Escorregamentos constituem um dos mais sérios riscos ambientais existentes em regiões montanhosas. Além de fatalidades, custos diretos, tais como perda ou danificação de propriedades, e indiretos, tais como interrupções de produção industrial ou sistemas de transporte, constituem algumas das sérias consequências eventualmente decorrentes destes fe-

ESCORREGAMENTOS		
NATURAL	AGENTES EFETIVOS PREPARATÓRIOS <sup>(1)</sup>	PLUVIOSIDADE EROSÃO PELA ÁGUA OU VENTO CONGELAMENTO E DEGÊLO VARIACÃO DE TEMPERATURA DISSOLUÇÃO QUÍMICA AÇÃO DE FONTES E MANANCIAIS OSCILAÇÃO DE NÍVEL DE LAGOS, MARES E DO LENÇOL FREÁTICO AÇÃO DE ANIMAIS
	AGENTES EFETIVOS IMEDIATOS <sup>(1)</sup>	CHUVA INTENSA FUSÃO DE GÊLO E NEVE EROSÃO SISMOS ONDAS VENTOS
AÇÃO DO HOMEM	DESMATAMENTO SORRECARGA CORTES E EXCAVAÇÕES SUPERFICIAIS E SUBTERRÂNEAS VIBRAÇÕES (e.g. Explosões, Sismos induzidos) MODIFICAÇÕES DO NÍVEL PIEZOMÉTRICO REBAIXAMENTO RÁPIDO POLUIÇÃO ATMOSFÉRICA	

<sup>(1)</sup> GUIDICINI e NIEBLE (1984), PÁG. 51

**QUADRO 5: AGENTES NATURAIS E ATIVIDADES HUMANAS ASSOCIADAS À ESCORREGAMENTOS DE ENCOSTAS**

nômenos naturais ou induzidos direta ou indiretamente pela ação do homem.

Os problemas de escorregamentos de encostas no Brasil são bastante conhecidos, com a deflagração dos movimentos sendo geralmente associada à ocorrência de chuvas (e.g., Barata, 1969; Jones, 1973; da Costa Nunes et al, 1979, 1983; Vargas, 1983).

Assim como as chuvas, conforme indicado no Quadro 5, outros agentes naturais atuando simultânea ou isoladamente, podem ser responsáveis pela ocorrência de escorregamentos. Tais agentes podem, também, induzir ou acelerar processos de instabilização primariamente originários da ação do homem. Um interessante exemplo de problemas de instabilidade de encostas decorrentes de modificações ambientais induzidas pelo homem é encontrado na Serra do Mar nas proximidades de Cubatão. A poluição do ar produzida por indústrias instaladas nesta região do Estado de São Paulo tem provocado o desaparecimento ou prejudicado a manutenção da vegetação natural existente nas encostas desta parte da Serra do Mar. Com o desmatamento, a ação de agentes naturais têm propiciado a ocorrência de escorregamentos aparentemente sem subsequentes interferências do homem. C. Wolle apresentará maiores detalhes deste problema nas discussões referentes ao Tema III do presente Congresso.

Para evitar ou mitigar os efeitos de escorregamentos é necessário conhecer ou identificar os riscos de ocorrência do fenômeno, seja em bases locais ou regionais, e a eventual extensão dos danos decorrentes do movimento de massa. Conforme salientado por Morgenstern (1985), a identificação de riscos de escorregamentos difere da identificação de perigo de ocorrência de escorregamentos. Citando o trabalho de Brabb (1984) que discute o mapeamento de zonas de risco e de zonas potenciais de ocorrência de escorregamentos em escala regional, Morgenstern comenta que, no caso de mapeamento da potencialidade de ocorrência de escorregamentos (hazard

mapping) a preocupação básica consiste em conhecer a distribuição espacial dos escorregamentos e suas características geométricas e estratigráficas, sendo que considerações de equilíbrio estático, por si só, seriam suficientes para uma definição do perigo de ocorrência de escorregamentos. No caso de mapeamento de riscos, (risk mapping) as preocupações seriam indicar a área e/ou população expostas aos danos dos escorregamentos; a vulnerabilidade desta área e/ou população ao deslizamento e as consequências da ocorrência tanto em relação à população quanto às obras civis localizadas na área de influência do fenômeno. Neste caso, um entendimento da cinemática ou características de mobilidade da massa potencialmente instável seria necessária para a avaliação dos riscos envolvidos.

Problemas relativos ao equilíbrio estático de massas de solo e/ou rocha têm sido extensivamente tratados na literatura nacional e internacional. De Campos (1985) apresenta uma revisão do assunto, do ponto de vista de Mecânica dos Solos, salientando a necessidade de se estudar os mecanismos de ruptura associados a escorregamentos em solos tropicais, em particular, solos residuais. Dentro deste contexto, além de considerar informações de origem geológica-geomorfológicas, é importante procurar identificar o grau relativo de influência de fatores tais como ruptura progressiva (e.g., Bjerrum, 1967; Bishop, 1971; Law e Lumb, 1978, e Athanasium, 1980), progressão de frente de saturação (e.g., Morgenstern and de Mattos, 1975) e variações máximas de nível piezométrico (e.g. Brand, 1985). O conhecimento do comportamento tensão-deformação-resistência dos materiais envolvidos levando-se em conta eventuais influências da trajetória de tensões (e.g. aumento de contra pressão com tensões totais constantes em ensaios triaxiais), nível de tensões (ocorrência de envoltórias efetivas de resistência não lineares), nível de deformações (resistência residual) e grau de saturação são relevantes para um melhor entendimento dos mecanismos de ruptura.

No que se refere à métodos de análise, existe uma preferência teórica de se utilizar métodos probabilísticos (e.g. Chowdhury, 1984) em substituição aos métodos determinísticos, os quais se baseiam no conceito extremamente subjetivo da existência de um Fator de Segurança. Na prática, entretanto, tal preferência tem esbarrado na falta de informações ou dados estatisticamente significativos o suficiente para permitir avaliar qual a probabilidade de ocorrência de escorregamentos sob dadas condições geológico-geomorfológicas e climáticas. Assim sendo, a melhor ferramenta disponível no momento parece ser a de se utilizar métodos determinísticos em análises de sensibilidade, onde o grau relativo de importância dos diversos fatores envolvidos no problema são estudados a partir das variações introduzidas pelos mesmos no coeficiente de segurança estimado para um dado conjunto de condições.

Levando em conta aspectos cinemáticos dos escorregamentos, conforme destacado por Morgenstern (1985), as dúvidas ou desconhecimentos existentes são muito maiores do que quando se considera aspectos estáticos do problema, alguns dos quais foram exemplificados acima. Traduzindo as palavras deste autor, o engenheiro geotécnico tem uma grande dificuldade em responder a seguinte questão: Dada uma massa instável de solo e/ou rocha, que porção desta massa se moverá, a que velocidade e quão longe? - Uma resposta a esta importante questão só será possível caso haja um entendimento do(s) mecanismo(s) envolvido(s) no processo de movimentação da massa instável.

Tomando como base um sistema de classificação de movimentos de escorregamentos que envolve, simultaneamente, a conhecida classificação de velocidade de movimentos proposta por Varnes (1978) e uma classificação que procura escalonar o potencial destrutivo de um escorregamento, pro-

posta por Hungr (1981), Morgenstern (op. cit.) discute uma série de hipóteses relativas à mecânica de movimentações lentas e rápidas. A Figura 3 mostra uma reprodução de tal classificação.

Considerando a mecânica de movimentos lentos (velocidades menores que 10 m/ano, classes 5 e 6 na Figura 3) Morgenstern conclui que estudos teóricos não possibilitam um pleno entendimento do problema, sendo necessárias maiores investigações de campo para uma melhor avaliação dos riscos de ocorrência de danos ambientais. Se, do ponto de vista prático, o entendimento da mecânica de movimentos lentos pode parecer ser de interesse exclusivamente acadêmico devido ao baixo potencial destrutivo associado ao fenômeno, o mesmo não acontece com o que se refere à movimentos rápidos (velocidades maiores que 1 m/s, classes 1 e 2 na Figura 3).

Exemplos típicos de escorregamentos catastróficos são os classificados na literatura brasileira como 'Avalanches' (Vargas, 1983), os quais possivelmente estão associados a depósitos de encostas (colúvio, talus) que se movimentam rapidamente, muitas vezes até distâncias apreciáveis, em presença de chuvas intensas. Em sua análise da mecânica de movimentações rápidas, Morgenstern (1985) salienta que hipóteses de liquefação da massa saturada associada a aumento de pressões neutras (e.g. Terzaghi, 1956) não devem ser consideradas, 'à priori', como a única explicação para o processo de transporte em movimentos rápidos de massa. Conceitos envolvendo vibração (e.g. Melosh, 1979, Davies, 1982), ocorrência de colapso de ar (e.g. Krumdieck, 1984), vaporização de fluidos por aumento de temperatura (e.g. Habib, 1975; Voight and Faust, 1982) e aumento de densidade do fluido dos poros (Sassa, 1985) são considerados como sendo merecedores de atenção. Interessantes discussões sobre o assunto podem ser também encontradas em Skermer (1985), Voight et al (1985) e Salt (1985). Hungr et al (1984), com base em experiência no Canadá, apresentam uma análise quantitativa de problemas relacionados à avalanches visando o projeto de medidas de proteção ambiental.

No Brasil existe uma falta generalizada de informações sobre as características de mobilidade (velocidade, aceleração) de escorregamentos rápidos. O conhecimento da velocidade e estrutura interna da massa instável é necessário para o projeto de estruturas visando deter ou defletir o material em movimento. O conhecimento das características de aceleração (e desaceleração) propiciam estimativas de velocidades e deslocamentos máximos, fornecendo subsídios para, p. ex., o dimensionamento de 'bacias' de retenção da massa escorregada, e para uma melhor avaliação do potencial de ocorrência de catástrofes ambientais.

Considerando-se tal falta de informações, e levando-se em conta a existência de correlações diretas entre intensidade de chuvas e escorregamentos de encostas de um modo geral (e.g. Guidicini e Nieble, 1984), a utilização de sistemas de alarme baseados em leituras pluviométricas (e.g. Brand, 1985), em leituras piezométricas (e.g. Pope et al, 1982) ou em medição de deslocamentos (e.g. Cargnel, 1981) constitui um tipo de medida preventiva cujo uso deve ser incentivado.

Finalizando este assunto, vale destacar que independentemente da velocidade de ocorrência do evento, para se ter uma melhor avaliação do potencial de risco de ocorrência de danos ambientais, estudos de caráter regional, envolvendo em particular conhecimentos da área de geomorfologia, devem ser realizados. Para estes estudos, uma ferramenta ainda não explorada no Brasil, e com grande potencial de aplicação, consiste no uso do geoprocessamento de dados obtidos via sensoriamento remoto (e.g., Satélites), utilizando sistemas tais como o de análise geo-ambiental (SAGA) recentemente desenvolvido no Instituto de Geociências da UFRJ (da Silva, 1984). Não se deve negligenciar, também, o enorme potencial

de utilização de aero-foto interpretação na confecção de mapas de risco ou em projetos de urbanização e/ou desenvolvimento industrial em áreas montanhosas. Exemplos da utilização de fotos aéreas preto e branco para avaliar a ocorrência de zonas de risco de escorregamentos são fornecidos, por exemplo, por Brand et al (1982) para o caso de Hong Kong.

#### Estocagem de Matéria Sólida

A estocagem de matéria sólida, representada por rejeitos (resíduos, refugos, estêreis ou descartes) industriais ou de mineração e por lixos urbanos, constitui um dos mais importantes problemas ambientais existentes atualmente no Brasil, tendo em vista tanto os imensos volumes de material anualmente descartados quanto a possibilidade de tal material conter elementos ou substâncias passíveis de provocar sérios danos à qualidade do meio ambiente. Para se ter uma idéia quantitativa do problema, tomar-se-á como exemplo a exploração de carvão mineral no Estado de Santa Catarina.

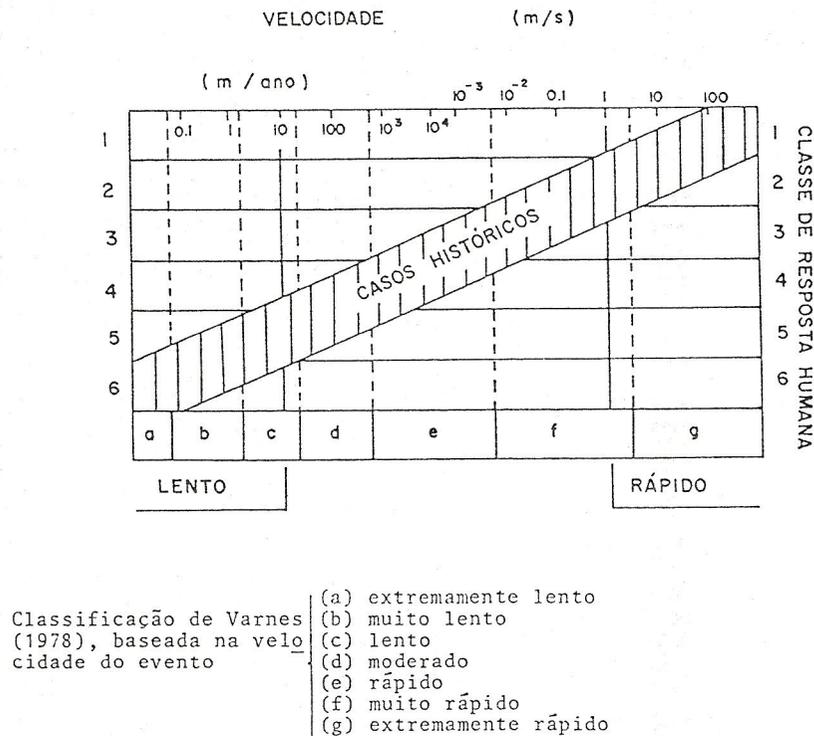
De acordo com Araújo (1984), a produção brasileira de carvão mineral, atualmente concentrada no Sul de Santa Catarina, evoluiu em um período de 10 anos de 6 milhões e 300 mil ton. em 1972 para 19 milhões e 100 mil ton. em 1982, dando origem a 46 milhões de m<sup>3</sup> de rejeitos. Caso o tipo de estocagem e a razão volume de esteril/volume de material minerado continuem inalterados, as reservas carboníferas de Santa Catarina (8.5% das reservas atuais brasileiras) ainda irão gerar 3 bilhões de metros cúbicos de rejeitos até sua exaustão. Isto equivaleria a comprometer cerca de 42.800 hectares de terras cultiváveis mantendo-se uma altura média das pilhas de rejeito de 7 metros. Por similaridade, considerando que o Rio Grande do Sul possui cerca de 90% da reserva brasileira de carvão mineral, existe um potencial de cerca de 32 bilhões de metros cúbicos de esteril a ser estocado neste Estado somente nesta atividade de mineração. Aliando-se a estes assustadores números o elevado potencial poluidor dos rejeitos piritosos originários do beneficiamento do carvão (liberação de ácido sulfúrico nas bacias hidrográficas além de gás sulfídrico e dióxido de enxofre para a atmosfera, Valeriano e Reis, 1985) verifica-se o quão sério pode-se tornar o problema.

Danos ambientais de monta podem ser associados a outras atividades de mineração e industriais, já em desenvolvimento ou a serem proximamente desenvolvidas no Brasil, o que é refletido nas cada vez mais rigorosas exigências de órgãos de controle ou conservação do meio ambiente. O nível de tais exigências aumenta com o grau de periculosidade do rejeito em questão (e dos efluentes associados ao mesmo), ou seja, ocorrência de materiais não-poluentes, poluentes ou radioativos.

Dentro do contexto da Geotecnia Ambiental, as principais atividades e problemas relacionados à estocagem de matéria sólida estão resumidas no Quadro 6.

A divisão do assunto em estocagem de rejeitos não-poluentes, poluentes e radioativos reflete, além de aspectos de responsabilidades ético-profissionais, o nível de exigências legais de organizações de controle ou preservação do meio ambiente, em particular no que se refere à minimização de possibilidades de poluição ou contaminação de águas superficiais ou subterrâneas e poluição do ar.

Nos itens que se seguem são feitos alguns comentários sobre a estocagem de rejeitos sem, entretanto, levar em conta quaisquer aspectos especiais relativos a rejeitos radioativos. Informações sobre particularidades inerentes à disposição de tal tipo de material podem ser encon-



Classificação de Varnes (1978), baseada na velocidade do evento

Classificação de Hungr (1981), baseada no modo como seres humanos afetados poderiam responder ao movimento de massa. Casos históricos em quadrados na zona hachureada.

FIGURA 3 : CLASSIFICAÇÃO DE MOVIMENTOS DE MASSA  
( ADAPTADO DE MORGENSTERN, 1985 )

ESTOCAGEM			
AÇÃO DO HOMEM	NÃO POLUENTE	ESTRUTURAS DE RETENÇÃO OU ESTOCAGEM DE REJEITOS (BARRAGENS OU DIQUES CONVENCIONAIS, BARRAGENS DE REJEITO E ESCAVACOES)	SEGURANÇA POLUIÇÃO DO AR POR POEIRA DIMINUIÇÃO DA QUALIDADE DA ÁGUA POTÁVEL
	POLUENTE (INCLUINDO EFLUENTES LIVIADOS)	ATERROS SANITÁRIOS	SEGURANÇA POLUIÇÃO DO LENÇOL FREÁTICO EMISSÃO DE GASES
		ESTOCAGEM DE REJEITOS FINOS (DIMENSÕES COLÓIDAIS)	SEDIMENTAÇÃO E ADENSAMENTO
	RADIOATIVOS	RECUPERAÇÃO DE ÁREAS DE ESTOCAGEM DE LAMAS (BACIAS DE DECANTAÇÃO) OU DE LIXO	COMPRESSIBILIDADE CAPACIDADE DE CARGA
ESTOCAGEM SUBTERRÂNEA ESPILHAMENTO DE REJEITOS DE MINERAÇÃO DE URÂNIO		CONTAMINAÇÃO RADIOATIVA	

QUADRO 6: EXEMPLOS DE ATIVIDADES TÍPICAS E PROBLEMAS ASSOCIADOS À ESTOCAGEM DE SÓLIDOS

tradas em Martins e Bastos (1978), Côme et al, (1985), Push (1985) e Rahn (1986) entre outros.

#### Estruturas de Retenção de Resíduos

Independentemente do fato do resíduo (ou seu efluente) ser classificado como poluente ou não-poluente (classificação fornecida por órgãos de controle do meio ambiente, função da concentração de metais pesados, pH, reatividade química, teor de substâncias orgânicas etc.) a estocagem pode ser efetuada tanto na superfície do terreno quanto em escavações superficiais ou subterrâneas, sendo a primeira alternativa a mais utilizada no Brasil (e.g., Bush et al, 1982; Cepollina e Ruoppolo, 1984; Nakao et al, 1984).

Considerando especificamente estocagem superficial, as estruturas de retenção de rejeitos industriais ou de mineração podem ser divididas basicamente em dois grupos:

- i) Barragens ou diques tipo convencional
- ii) Aterros soerguidos em etapas

As barragens ou diques tipo convencional são construídos de acordo com projetos e tecnologia usualmente utilizados na área de engenharia de barragens de terra/enrocamento. Tais estruturas constituem uma alternativa em situações onde volumes apreciáveis de água ou efluentes industriais não recirculáveis sejam estocados juntamente com o rejeito sólido.

Os aterros soerguidos em etapas constituem o tipo de estrutura mais utilizada na retenção de resíduos industriais e de mineração, sendo classificados em três grupos, de acordo com o método construtivo:

- i) Aterros soerguidos para montante
- ii) Aterros soerguidos para jusante
- iii) Aterros soerguidos pela linha central

Estas denominações se referem à direção em que a crista do aterro se move, em relação ao dique de contenção inicial, à medida que a estrutura aumenta de altura. A Figura 4 mostra um exemplo de seções soerguidas de acordo com os métodos acima. Nota-se que, para uma mesma altura do aterro, a barragem que envolve maior volume de material é a soerguida para jusante, enquanto que a construída para montante requer maior quantidade de material de construção. Por outro lado, este último tipo de aterro apresenta a desvantagem de ser soerguido sobre uma fundação constituída por material quase sempre não-consolidado.

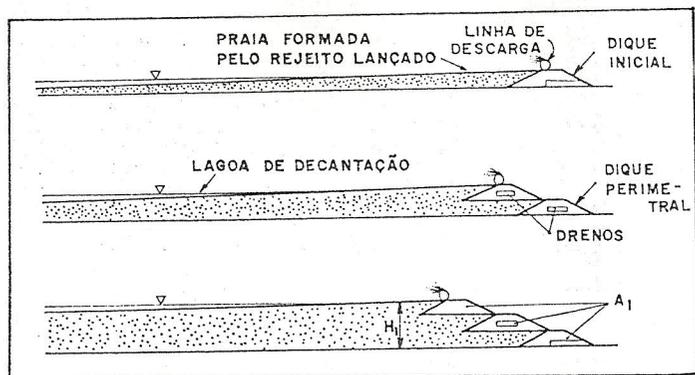
Quando o material empregado na construção dos aterros é o próprio rejeito, as estruturas de retenção dos resíduos são denominadas de barragens de rejeito.

Dependendo do tipo de matéria prima, ou do processo de produção e/ou da forma de transporte, o material lançado no local de disposição pode estar em um estado 'seco' (teor de umidade menor que cerca de 50% a 60%, transporte mecânico) ou em um estado úmido (lama, transporte hidráulico). Independentemente entretanto de seu estado, conforme destacado por Klohn (1981), o material usualmente apresenta propriedades físicas indesejáveis. Por exemplo, eles são altamente susceptíveis a 'piping', apresentam superfícies altamente erodíveis e os resíduos saturados e fofos são susceptíveis à liquefação, logo, passíveis de rupturas catastróficas. Deve-se notar que mesmo no caso do material estar 'seco', para índices de vazios típicos in-situ, o rejeito sólido apresenta usualmente um grau de saturação próximo de 100% (Vick 1983). Para levar em conta tais particularidades, Klohn (1981) sugere que, em resumo, as seguintes considerações devem ser incorporadas ao projeto das barragens de rejeito:

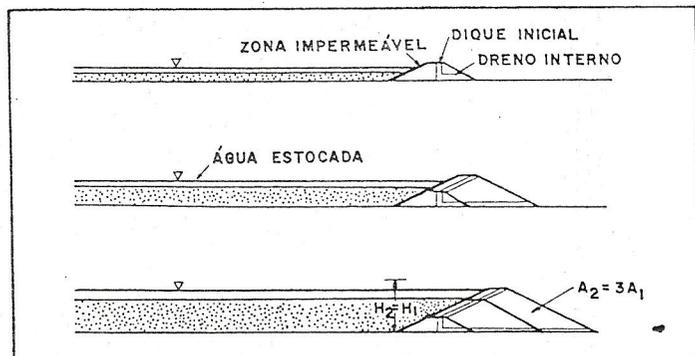
- i) Separação do material em areias e finos (fração que passa na peneira nº 200 = slimes), sendo que somente as areias são utilizadas na construção;
- ii) Controle dos procedimentos de separação da areia (ciclonação, tubo de descarga com saída simples ou múltipla, etc.) para garantir que a areia produzida satisfaça os requerimentos granulométricos e de permeabilidade especificados;
- iii) Instalação de drenos e filtros internos para evitar erosão interna (piping) e abaixar a superfície freática no aterro arenoso;
- iv) Compactação do rejeito arenoso para aumentar sua densidade de modo a evitar liquefação e permitir taludes mais íngremes. Alternativamente, um grau de compactação menor é associado com o uso de taludes mais suaves e a instalação de um sistema interno de drenagem passível de evitar a saturação da areia;
- v) Proteção das superfícies arenosas altamente erodíveis.

É importante lembrar aqui que liquefação em areias pode ocorrer mesmo em condições de carregamento monotônico. Caso o material esteja em um estado fofo in-situ, deformações cisalhantes sob condições não-lineares podem induzir a geração de pressões neutras elevadas, em as pressões efetivas tendendo a zero, em decorrência da tendência à compactação do material. Assim sendo, a possibilidade de liquefação deve ser considerada, mesmo em regiões de baixa atividade sísmica, sempre que as condições do material e velocidade e técnica de adensamento propiciarem a ocorrência de um evento não-drenado.

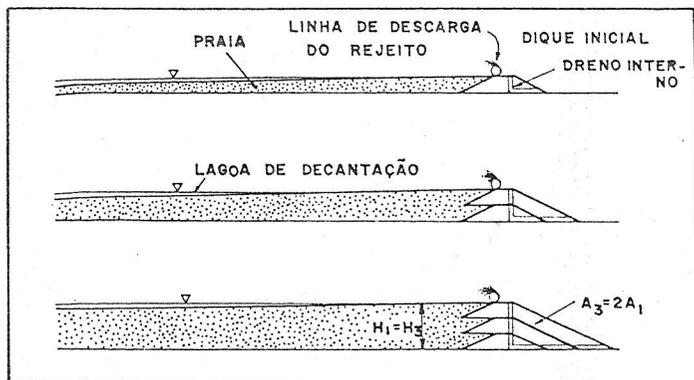
Conforme pode-se apreender dos comentários acima, um grande número de fatores interfere na seleção do tipo apropriado de aterro para atender um dado problema de estocagem. O Quadro 7 apresenta um resumo em grau relativo de influência de alguns destes fatores nas diferentes opções de estocagem de rejeitos aqui referidos.



(a) ALTEAMENTO PARA MONTANTE



(b) ALTEAMENTO PARA JUSANTE



(c) ALTEAMENTO PELA LINHA CENTRAL

FIGURA 4 : TIPOS DE ATÊRROS SOERGUIDOS EM ETAPAS

TIPO DE ESTRUTURA	REQUERIMENTOS RELATIVOS AO REJEITO	REQUERIMENTOS QUANTO A DESCARGA	VIABILIDADE DE ESTOCAR ÁGUA	RESISTÊNCIA A SISMOS	RESTRIÇÃO QUANTO À VELOCIDADE DE SOERGUMENTO	REQUERIMENTOS RELATIVOS AO ATÊRRO	CUSTO RELATIVO DA ESTRUTURA
BARRAGEM E/OU DIQUE TIPO CONVENCIONAL	APLICÁVEL A QUALQUER TIPO DE REJEITO	QUALQUER PROCEDIMENTO DE DESCARGA SE APLICA	BOA	BOA	TODO O ATÊRRO CONSTRUÍDO INICIALMENTE	SOLO NATURAL DE ÁREA DE EMPRESTIMO	ALTO
SOERGUMENTO PARA MONTANTE	PELO MENOS 40% A 60% DE AREIA NO REJEITO COMO UM TODO. DESEJÁVEL LAMA DE BAIXA DENSIDADE PARA PROMOVER SEGREGAÇÃO GRANULOMÉTRICA	NECESSÁRIO DESCARGA PERIFÉRICA E ESPRAIAMENTO BEM CONTROLADO	NÃO SERVE PARA ESTOCAR VOLUME SIGNIFICANTE DE ÁGUA	POBRE EM ÁREAS SISMICAMENTE ATIVAS	DESEJÁVEL VELOCIDADE MENOR QUE 4,5 A 9,0 M/ANO. VELOCIDADE MAIOR QUE 15,0 M/ANO PERIGOSA	SOLO NATURAL OU REJEITO ARENOSO	BAIXO
SOERGUMENTO PARA JUSANTE	APLICÁVEL A QUALQUER TIPO DE REJEITO	VARIÁVEL DE ACÓRDO COM DETALHES DO PROJETO	BOA	BOA	NENHUMA	REJEITOS ARENOSOS SE VELOCIDADE DE PRODUÇÃO É SUFICIENTE OU SOLO NATURAL	ALTO
SOERGUMENTO PELA LINHA CENTRAL	AREIAS OU FINOS DE BAIXA PLASTICIDADE	NECESSÁRIA DESCARGA PERIFÉRICA PELO MENOS DA PRAIA NOMINAL	NÃO RECOMENDADO PARA ESTOCAGEM PERMANENTE. ESTOCAGEM TEMPORÁRIA DE ENCHENTE ACEITÁVEL COM DETALHES APROPRIADOS DE PROJETO	ACEITÁVEL	RESTRIÇÃO DE ALTURA PARA ETAPAS DE SOERGUMENTO INDIVIDUAIS PODEM SE APLICAR	REJEITOS ARENOSOS SE VELOCIDADE DE PRODUÇÃO É SUFICIENTE OU SOLO NATURAL	MODERADO

QUADRO 7: COMPARAÇÃO ENTRE TIPOS DE ATÊRROS DE RESERVATÓRIOS SUPERFICIAIS ( APUD VICK, 1983 )

Comentários detalhados sobre aspectos construtivos e de projeto, com ênfase nas diferenças existentes entre o usualmente considerado na área de Barragens convencional e os problemas específicos de barragens de rejeito, são encontrados em Wilson (1981), Vick (1983) e ICOLD (1982). Bush et al (1982) e Caldwell et al (1983) discutem aspectos particulares relativos à barragens soerguidas pela linha central. Cepollina e Ruoppolo (1984) discutem aspectos construtivos de uma barragem alteada para montante utilizando diques compactados. Abadjiev (1985) sugere modificações no projeto da seção usual do dique inicial em barragens soerguidas à montante de modo a propiciar um maior alteamento neste tipo de estrutura. Nakao et al (1984) comentam sobre o projeto de uma barragem tipo convencional, porém alteada, em etapas, para jusante. Morgenstern (1985) apresenta uma discussão que resume os principais desenvolvimentos recentes relativos à construção de barragens de rejeito.

#### Estruturas de Contrôlo ou Retenção de Fluxo

Da mesma forma que em barragens convencionais, um dos mais importantes aspectos relacionados à segurança de barragens de contenção de rejeitos consiste no projeto e dimensionamento de drenos e filtros. Tais

estruturas são importantes tanto no que se refere à minimização de ocorrência de pressões neutras durante a construção e 'funcionamento' da estrutura quanto na possibilidade de serem também projetadas para direcionar o fluxo de poluentes potenciais do solo de fundação e lençol freático para sistemas de coleta/reciclagem/estocagem dos mesmos.

A parte a necessidade maior de se verificar, através de ensaios de laboratório, a possibilidade do fluido percolante afetar as características de trabalho dos materiais utilizados nos drenos e filtros, (reações químicas propiciando, por exemplo, decomposição/lixiviação em filtros ou entupimento em drenos), o projeto e dimensionamento do sistema de drenagem interna das barragens de retenção de rejeitos segue os mesmos critérios utilizados convencionalmente. Deve-se ressaltar, entretanto, que os sistemas de drenagem nas estruturas de retenção de rejeitos podem apresentar variações geométricas significativas quando comparadas às usualmente encontradas nas barragens convencionais. Tais variações geralmente incluem a utilização de sistemas de drenagem descontinuas, conforme exemplificado na Figura 4a, que se adaptam ao tipo de processo construtivo utilizado.

Um outro importante aspecto referente ao problema de estocagem de rejeitos, já mencionado anteriormente, está relacionado à necessidade de se evitar ou minimizar a contaminação do lençol freático pelo fluido efluente do rejeito através da impermeabilização da área do reservatório. Tal impermeabilização é usualmente realizada utilizando-se um revestimento (liner) constituído por argilas ou misturas areia-bentonita compactadas, ou por membranas sintéticas colocadas na superfície da área de estocagem. Cortinas de lama bentonítica (e.g., Tallard, 1984) ou de concreto plástico (e.g., Adaska and Cavalli, 1984) constituem alternativas para controlar o fluxo de poluentes horizontalmente pelo subsolo. Evans (1986) revê alguns aspectos relativos à esta técnica de 'impermeabilização'.

No caso de efluentes tóxicos, existe uma tendência generalizada dos órgãos de controle do meio ambiente exigirem emissão nula do fluido para fora do reservatório. Fluxo de efluentes não tóxicos é tolerado desde que as águas superficiais ou subterrâneas não sejam deterioradas abaixo dos limites de utilização das mesmas.

Membranas sintéticas têm sido empregadas com uma frequência crescente, em particular no caso de rejeitos tóxicos, tendo em vista que tal material é literalmente impermeável ao fluxo decorrente de gradientes hidráulicos. Deve-se notar aqui que o fluido pode passar através das membranas pela ação de gradientes de pressão parcial ou de vapor e por difusão ou osmose (Poulos, 1964). Entretanto, as quantidades envolvidas podem, em geral, serem consideradas desprezíveis (Morgenstern, 1985). Problemas de instalação ou deteriorização das membranas no campo podem, por sua vez, implicar em vazamentos importantes (e.g., Montagne, 1982).

Revestimentos de argilas compactadas (ou misturas areia-bentonita) apresentam as vantagens de serem usualmente mais baratas que as membranas sintéticas e de envolverem procedimentos construtivos amplamente dominados na prática geotécnica.

Tais revestimentos podem controlar a quantidade de percolação e, através da diluição do efluente na massa d'água local, mitigar efeitos poluentes. Eles podem também retardar tais efeitos por um dado período de tempo, assim como reduzir níveis de concentração de elementos ativos para valores aceitáveis através de reações químicas entre o fluido permeante e o meio poroso.

O conhecimento das características de permeabilidade tanto do rejeito quanto do revestimento, assim como uma previsão dos efeitos de eventuais reações químicas entre o fluido efluente e os materiais do revestimento, drenos e filtros, constituem dados de fundamental importância para o projeto e dimensionamento das estruturas de retenção de rejeitos.

Características de permeabilidade são usualmente determinadas em laboratório a partir de ensaios de carga constante ou variável, em permeômetros de parede rígida (moldes de compactação, e.g., Fontoura et al, 1986, ou células de adensamento) ou de parede flexível (tipo triaxial convencional, e.g., Zimme et al, 1981, Daniel et al, 1984). Boynton and Daniel (1985) discutem a influência que tais tipos de permeômetro podem ter na determinação da condutividade hidráulica de argilas compactadas. Olsen et al, (1985), comentam sobre a utilização do método de vazão controlada (flow-pump method), o qual constitui uma alternativa para determinações de condutividade hidráulica em um menor espaço de tempo e sob valores baixos de gradientes hidráulicos. É interessante mencionar aqui que, por motivos práticos, gradientes elevados (em geral variando de 50 a 300) são usualmente utilizados em laboratório para obter características de permeabilidade de revestimentos argilosos, o que pode levar à obtenção de dados não confiáveis (e.g., Mitchell and Younger, 1967; Dunn and Mitchell, 1984; Carpenter and Stephenson, 1986; Korfiats et al, 1986). É interessante lembrar também que, para materiais de baixa permeabilidade, a lei de Darcy pode não ser válida para valores baixos de gradientes hidráulicos (e.g., Olsen, 1985; Jessberger et al, 1985). Deve-se notar, ainda, que nos ensaios de laboratório, é fundamental que o fluido permeante tenha em média, as mesmas propriedades físico-químicas e concentração de solutos que o fluido existente ou esperado no campo, tendo em vista que tais propriedades podem afetar as características de permeabilidade do material, em particular no caso de argilas compactadas (e.g. Mesri and Olson, 1971; Anderson and Brown, 1981; Olson and Daniel, 1981; ASTM, 1981, 1985; Pavilonisky, 1985; Acar and Ghosh, 1986).

Características de dispersão hidrodinâmica e dados quantitativos sobre efeitos eventuais de reações geoquímicas podem ser obtidos em laboratório a partir de uma interpretação adequada de resultados de ensaios tipo permeabilidade a carga constante, onde variações na concentração de solutos no fluido permeante são determinadas a partir de análises químicas realizadas em amostras do efluente coletadas ao longo do tempo (e.g., Rowe et al, 1985; Korfiats et al, 1986; Nobre, 1986).

Finalizando este item, é interessante ressaltar a importância de, sempre que possível, determinar as características de permeabilidade dos revestimentos argilosos no campo. Daniel (1984) e Day and Daniel (1985), entre outros, apresentam resultados de retro-análises e/ou ensaios de campo onde os valores de condutividade hidráulica dos revestimentos compactados foram de 10 a 1000 vezes maiores que os obtidos a partir de ensaios de laboratório em amostras compactadas e/ou 'indeformadas'. Dunn (1986) discute tal tipo de observação (que, na realidade, não constitui novidade) e sugere, em concordância com a opinião de outros autores (e.g. Vaughan, 1982) que, à parte problemas construtivos, as diferenças de permeabilidade entre campo e laboratório seriam basicamente decorrentes do fato de ser praticamente impossível reproduzir, em laboratório, características de macro-estrutura do material no campo. O uso de amostras 'indeformadas' de pequenas dimensões implicaria, também, na não representatividade do material 'in-situ'.

Informações sobre o projeto de sistemas de drenagem associados aos sistemas de impermeabilização do reservatório podem ser encontradas em EPA (1983) e Cosler and Snow (1984).

## Reservatório ou Bacia de Retenção

Os processos de fabricação ou beneficiamento de produtos metálicos ou não-metálicos geralmente incluem etapas em que a matéria prima é submetida a uma degradação mecânica (e.g., moagem ou trituração) e/ou decomposição química (e.g., adição de ácido sulfúrico). Como consequência, os rejeitos industriais em geral apresentam características granulométricas que, apesar de variáveis de acordo com o tipo de matéria prima e processamento utilizado, possuem diâmetros máximos de grãos com dimensões menores ou em torno do correspondente ao de uma areia média. Tal particularidade está exemplificada na Figura 5, a qual mostra curvas de distribuição granulométrica de alguns rejeitos produzidos no Brasil. Curvas granulométricas correspondentes a outros tipos de rejeito podem ser encontradas em Vick (1983). Tipicamente nos casos de rejeitos de bauxita (alumínio) e de fosfato sob a forma de lama (fertilizantes), os resíduos podem ser extremamente finos, com porcentagens elevadas de partículas de dimensão argila.

Conforme mencionado anteriormente, os rejeitos podem ser transportados para o local de disposição por via seca ou via úmida. No caso específico de via úmida, procedimentos de descarga do material implicam usualmente em segregação das partículas. O material mais grosso eventualmente existente fica depositado próximo ao ponto de descarga, formando praias conforme exemplificado na Figura 4. O material mais fino fica, inicialmente, em suspensão nas bacias de retenção, formando, juntamente com as águas pluviais retidas, lagoas de decantação conforme também exemplificado na Figura 4.

Para o dimensionamento da capacidade de estocagem do reservatório (final e ao longo da vida útil), além de informações sobre as características de balanço hídrico local (precipitação x evaporação), é necessário se ter conhecimento das características de deposição (sedimentação e adensamento) do material, as quais são essencialmente função da granulometria do rejeito transportado por via úmida.

No caso do resíduo ser constituído basicamente por partículas tamanho areia e/ou silte, o material atinge rapidamente seu índice de vazios final, no processo de sedimentação, variações de volume (adensamento) decorrentes da deposição adicional de rejeito sobrejacente, são relativamente pequenas (Carrier III et al, 1983). Uma previsão do comportamento de resíduos com tais características granulométricas é passível de ser obtida a partir de ensaios convencionais de laboratório ou campo, utilizando teorias tradicionais. Desta forma, apesar deste material eventualmente ser susceptível à colapso e liquefação, não existem maiores novidades no que se refere ao dimensionamento do reservatório.

No caso da lama ser formada por sólidos essencialmente finos, como é o caso do rejeito de bauxita na Figura 5, o dimensionamento do reservatório passa a constituir um problema não rotineiro.

O processo de deposição de rejeitos finos inicialmente envolve sedimentação e, a partir do teor de umidade (índice de vazios) correspondente à condição em que a lama passa a ter condições de suportar tensões efetivas, ocorre adensamento sob peso próprio, com variações apreciáveis de volume. Desta forma, o dimensionamento do reservatório requer, 'a priori', o conhecimento de características de sedimentação acopladas às de adensamento sob peso próprio. Deve-se notar aqui que, particularmente em decorrência da elevada concentração de sólidos na lama, o processo de sedimentação não obedece à lei de Stokes (Morgenstern, 1985), sendo

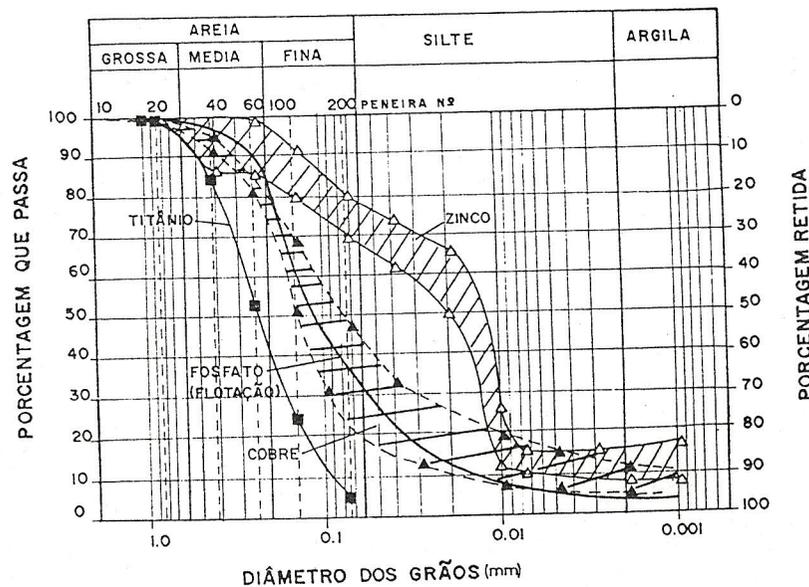
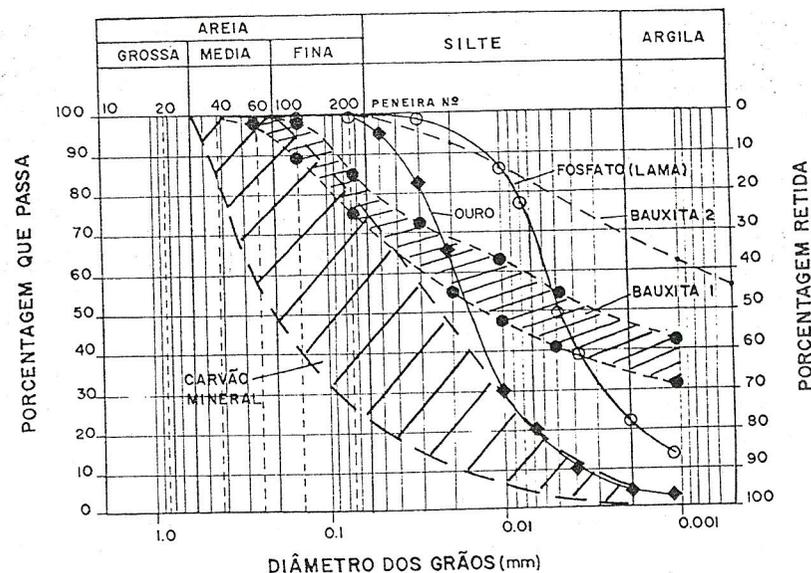


FIGURA 5: CURVAS DE DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DE REJEITOS DE DIFERENTES ORIGENS

governado pelas equações de Kynch (1952). O processo de adensamento, por sua vez, não é governado pela teoria tradicional de Terzaghi, tendo em vista envolver grandes deformações. Para esta condição teorias de deformações finitas não lineares são mais apropriadas (e.g. Gibson et al, 1967, 1981). Um aspecto interessante a ser mencionado é o de que a teoria de adensamento de deformações finitas não lineares é equivalente à teoria de sedimentação de Kynch quando as tensões efetivas tendem a zero (Been, 1980).

Com base nos trabalhos de Gibson et al (opus citad), Koppula and Morgenstern (1982) e Schiffman et al (1984) desenvolvem soluções numéricas que possibilitam, em princípio, uma estimativa acurada da capacidade de estocagem de rejeitos finos. Tais soluções requerem informações sobre a variação da permeabilidade e índice de vazios com o nível de tensões efetivas, as quais podem ser obtidas a partir de ensaios de laboratório. Znidarcic et al (1986) recomendam o uso de ensaios de adensamento não convencionais, do tipo velocidade de deformação constante, (e.g. Smith and Wahls, 1969; Lee, 1981) para a obtenção destas informações experimentais.

Procedimentos simplificados, baseados em ensaios tipo coluna de sedimentação, têm também sido utilizados no dimensionamento de reservatórios de estruturas de retenção de rejeitos essencialmente finos (e.g. Montgomery et al, 1983).

Do ponto de vista ambiental, além de um dimensionamento cuidadoso do reservatório visando a ocupação da menor área possível no processo de estocagem, é de interesse a reintegração de reservatórios desativados ao meio ambiente original. Os maiores problemas aqui estão também relacionados a áreas de estocagem de rejeitos finos, os quais apresentam alta compressibilidade e baixa capacidade de suporte. O fluido existente nos vazios do material pode, além disto, ser perigoso (e.g. pH elevado), o que constitui um outro fator complicador. Holmes and Pindexter (1986) discutem uma série de alternativas passíveis de serem utilizadas na recuperação de tais áreas.

#### Atérros Sanitários

Resíduos urbanos são estocados em escavações ou em depressões (vales) naturais e sob a forma de diques (pilha ou rampa). O termo atérró sanitário é em geral utilizado para qualificar tal estocagem, independentemente da forma de disposição do material.

A construção controlada de atérros sanitários usualmente é realizada utilizando-se o método da célula, onde o resíduo urbano diário é envolvido por camadas protetoras de solo argiloso conforme exemplificado na Figura 6.

Do ponto de vista ambiental, as maiores preocupações associadas à estocagem de lixo dizem respeito à necessidade de se procurar evitar a contaminação do sistema hídrico por efluentes perigosos e a emissão de gases tanto para a atmosfera quanto através do subsolo. Tais gases são usualmente formados pela decomposição da matéria orgânica em meio anaeróbico, sendo mais comum a produção de gás carbônico e metano. (CETESB, 1985). Sob dadas concentrações, o metano torna-se explosivo, o que torna este gás particularmente perigoso.

A emissão de líquidos poluentes pela fundação do atérró é evitada ou controlada utilizando-se as mesmas técnicas referidas anteriormente,

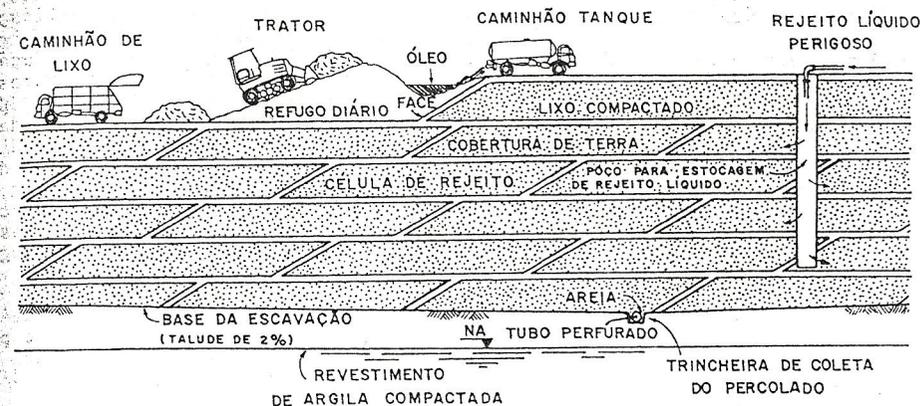


FIGURA 6 : REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DE UM ATÉRRÓ SANITÁRIO CONSTRUÍDO UTILIZANDO-SE O MÉTODO DA CÉLULA, COM DISPOSIÇÃO SIMULTÂNEA DE REJEITOS FLUIDOS PERIGOSOS E ÓLEOS (REPRODUZIDO DE SEMBENELLI AND UESHITA, 1981).

ou seja, utilizando-se revestimentos constituídos por materiais naturais ou sintéticos, aliados a um sistema adequado de drenagem. Vale ressaltar aqui que a permeabilidade de solos argilosos pode aumentar quando o fluido permeante é orgânico (e.g., Anderson, 1982; Fernandez e Quigley, 1985). Desta forma, a utilização de revestimentos de argila compactada deve ser cuidadosamente avaliada quando, como no caso de atérros sanitários, houver a possibilidade de ocorrência de fluxo de substâncias orgânicas.

A emissão de gases para a atmosfera é minimizada utilizando-se um revestimento superior usualmente constituído por argila compactada. Os revestimentos utilizados para reter o fluxo de líquidos poluentes pela fundação servem também de barreiras contra o fluxo de gases. Não se encontrou na bibliografia consultada nenhuma referência sobre estudos do comportamento de solos compactados percolados por gases. Modelos matemáticos desenvolvidos para descrever o fluxo de gases em meios porosos encontram-se descritos em Alzaydi et al (1978), Moore et al (1979) e McOmber et al (1982). Alzaydi (1986) comenta sobre a eficiência de sistemas de controle de fluxo de metano gerado em atérros sanitários.

É interessante notar aqui que, dentro das limitações da bibliografia consultada, não se encontrou nenhuma referência específica sobre projeto e construção de atérros sanitários de um modo geral. Isto sugere que, do ponto de vista geotécnico, a estocagem de resíduos urbanos segue regras próprias, essencialmente empíricas. Curiosamente, em concordância com uma observação de Brand (1981), não se encontrou também nenhuma referência sobre ocorrência de rupturas em corpos de atérros sanitários. Obviamente tal observação não se aplica a casos de disposição desordenada de lixo, em particular no caso de favelas em encostas onde, como por exemplo no Rio de Janeiro, rupturas catastróficas já foram observadas. Casos históricos relatando ruptura pela fundação são eventualmente encontrados (e.g., Dvinoff and Munion, 1986).

Considerando aspectos de recuperação do meio ambiente, do ponto de vista geotécnico, as maiores dificuldades estão associadas à utilização de aterros sanitários, desativados, como fundação de futuras obras civis. O problema maior, neste caso, decorre do fato do material de fundação, altamente heterogêneo, apresentar baixa capacidade de carga e compressibilidade elevada, tanto no que se refere à compressão imediata e/ou por adensamento convencional quanto à compressão secundária. As dificuldades são ainda ampliadas pela possibilidade das propriedades mecânicas (e físicas) do material serem alteradas com o tempo devido à degradação decorrente de reações físico-químicas e biológicas. Em outras palavras, a maior dificuldade em tal tipo de atividade está associada ao desconhecimento generalizado das propriedades de engenharia do material que, neste caso específico, devem ser avaliadas a partir de ensaios de campo (e.g., aterros experimentais).

Nenhuma informação sobre propriedades de engenharia do material de aterros sanitários existentes no Brasil foi conseguida no período de preparação deste trabalho. Alguns poucos dados existentes na literatura internacional encontram-se resumidos em Oweis and Khera (1986).

#### COMENTÁRIOS FINAIS

Procurou-se neste trabalho estabelecer um relacionamento entre Geotécnica e Meio Ambiente a partir de uma classificação envolvendo movimentação de fluidos e de sólidos, decorrentes da ação do homem ou de fenômenos naturais, passíveis de causar danos ao meio ambiente.

Com base nesta classificação, atividades geotécnicas passíveis de provocar degradação na qualidade do meio ambiente, e problemas típicos de interesse geotécnico associados a tais atividades, são enumerados.

A amplitude, diversidade e elevado grau multidisciplinar do tema implicou na necessidade de se dar um tratamento superficial aos assuntos abordados. Dentro deste contexto, procurou-se salientar os aspectos que, de alguma forma, constituem novidade ou não são corriqueiramente tratados na Engenharia Geotécnica. Ao mesmo tempo, procurou-se mencionar referências que tenham recentemente abordado, de uma forma mais ampla, aspectos particulares dos problemas considerados como sendo de maior interesse à geotécnica nacional.

Dentre os assuntos enfocados, deu-se maior ênfase aos tópicos Estabilidade de Encostas e Estocagem de Rejeitos Sólidos.

No que se refere à Estabilidade de Encostas, é evidente que, para se evitar a ocorrência de sérios danos ambientais, é fundamental o conhecimento dos mecanismos de formação e movimentação dos escorregamentos. Em paralelo, a confecção de cartas de risco, de caráter local e regional, constitui uma tarefa urgente a ser cumprida pelo meio geotécnico nacional.

O tópico Estocagem de Rejeitos Sólidos inclui os aspectos menos corriqueiros, do ponto de vista da engenharia geotécnica convencional, e, ao mesmo tempo, de maior impacto, no que se refere às possibilidades imediatas e futuras de deteriorização da qualidade do meio ambiente. A definição do tipo de revestimento a ser utilizado, o dimensionamento da capacidade de estocagem de rejeitos finos e a avaliação quantitativa do transporte de poluentes se incluem entre as áreas de maior interesse atual. A obtenção de parâmetros de projeto, incluindo técnica e tipo de ensaio e representatividade de amostras e fluidos permeantes requerem também atenções especiais. Finalmente, o monitoramento do comportamento das

obras e comparações com as previsões de projeto constituem informações essenciais, não divulgadas ou inexistentes no Brasil.

#### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abadjiev, C.B. (1985) 'Improved upstream construction of tailings dam' 11th ICSMFE (San Francisco), Vol. 3, pp. 1235-1236.
- ABGE (1979) 'Simpósio sobre sismicidade natural e induzida - São Paulo.
- ABGE (1980) 1º Simpósio Sobre o Contrôlo de Erosão - Associação Brasileira de Geologia de Engenharia - Curitiba.
- ABGE (1981) 2º Simpósio Sobre o Contrôlo de Erosão - Associação Brasileira de Geologia de Engenharia - São Paulo.
- ABGE (1985) 3º Simpósio Sobre o Contrôlo de Erosão - Associação Brasileira de Geologia de Engenharia
- ABMS (1985) 'Peculiarities of Geotechnical Behavior of Tropical Lateritic and Saprolitic Soils' Progress Report (1982-1985) - Committee on Tropical Soils of the ISSMFE - Associação Brasileira de Mecânica dos Solos.
- Acar, Y.B. and Ghosn, A.A. (1986) 'Role of activity in hydraulic conductivity of compacted soils permeated with acetone'. Int. Symp. on Environmental Geotechnology, Bethlehem, Pennsylvania, Vol. 1, pp. 403 - 412.
- Adaska, W.S. and Cavalli, N.J. (1984), 'Cement barriers' Proc. Vth Nat. Conf. on Management of Uncontrolled Hazardous Wastes Sites Washington, D.C., Nov. pp. 126 - 130.
- Alzaydi, A.A. (1986) 'Migration and control of a multicomponent gas generated in landfills' Proc. Int. Symp. on Environmental Geotechnology, Bethlehem, Pennsylvania, Vol. 1, pp. 91-101.
- Alzaydi, A.A.; Moore, C.A. and Rai, I.S. (1978) 'Combined pressure and diffusional transition region flow of gases in porous media'. American Institute of Chemical Eng. Journal, Vol. 24, pp. 35-42.
- Anderson, D. (1982) 'Does landfill leachate make clay liners more permeable? Civil Engineering, ASCE, September, pp. 66-68
- Anderson, D. and Brown, K.W. (1981) 'Organic leachate effects on the permeability of clay liners' Proc. Land Disposal of Hazardous Waste, U.S. E.P.A., Philadelphia, pp. 119-130.
- Ando, S. and Makita, M. (1977) "Environmental Impacts on Groundwater by Chemical Grouting" Proc. 9th ICSMFE (Tokyo) Vol. 4.
- Araujo, J.E. de V. (1984) "Carvão Mineral: Aspectos Ambientais" Anais do Simp. Bras. sobre Técnicas Exploratórias Aplicadas à Geologia - Salvador, BA - SGB - Também em: Coletânea de Trabalhos Técnicos sobre Contrôlo Ambiental na Mineração - publ. DNPMP (1985), pp. 39 - 42.
- ASCE (1978) 'Evaluation and prediction of subsidence' Proc. of Int. Conf. in Pensacola, USA, Ed. S. Saxena.

ASTM (1981) 'Permeability and Groundwater Contaminant Transport' ASTM STP 746, 245p.

ASTM (1985) 'Hydraulic Barriers in Soil and Rock' ASTM STP 874, 332p.

Athanasium, C. (1980) "Non Linear Slope Stability Analysis, Proc. Int. Symposium on Landslides, Delhi, V.1, pp. 259 - 262.

Barata, F.E. (1969) "Landslides in the Tropical Region of Rio de Janeiro" Proc. 7th ICSMFE (Mexico), V.2, pp.507-516.

Bear, J. (1972) 'Dynamics of fluids in porous media' American Elsevier, N.Y.

Bear, J. (1979) 'Hydraulics of Groundwater' Mc Graw Hill Inc.

Beck, B.F. (1984) 'Sinkholes: their geology, engineering and environmental impact' Beck, B.F. (ed.), Rotterdam, Netherlands, A.A. Balkema.

Beck, B.F. and Jenkins, D.T. (1986) 'Geotechnical Considerations on Sinkhole Development in Florida' Int. Symp. on Environmental Geotechnology, V.1, Lehigh University, USA, pp. 463 - 472.

Been, K. (1980) 'Stress strain behaviour of a cohesive soil deposited under water' PhD. thesis, Univ. of Oxford, U.K.

Berrocal, J. et al (1984) 'Sismicidade do Brasil' Instituto Astronomia e Geofisico/CNEN, São Paulo, 320p.

Bishop, A.W. (1971) 'The Influence of Progressive Failure on the Method of Stability Analysis' Geotechnique, V. 21, pp. 168 - 172.

Bjerrum, L. (1967) "Progressive Failure in Slopes in Overconsolidated Plastic Clays and Clay-Shale" Terzaghi Lecture, J. ASCE V. 93 - SM5, pp. 3 - 49.

Boynton, S.S. and Daniel, D.E. (1985) "Hydraulic conductivity tests on compacted clay" Journal of Geot. Eng., ASCE, vol. 111, nº 4, pp. 465 - 478.

Brabb, E.E. (1984) "Innovative approaches to landslide hazard and risk mapping" Proc. 4th Int. Symp. on Landslides, Toronto, Vol. 1, pp. 307 - 324.

Brand, E.W. (1981) 'Geotechnical aspects of sanitary landfill' Panel contribution to Session 6 of IX ICSMFE, Stockholm, Vol. 3, pp. 734 - 735.

Brand, E.W. (1985) "Geotechnical Engineering in Tropical Residual Soils" 1st Int. Conf. on Geomechanics in Tropical Lateritic and Saprolitic Soils", Brasília. Vol. 3, pp. 23 - 91.

Brand, E.W., Styles, K.A. and Burnett, A.D. (1982) "Geotechnical land-use maps for planning in Hong Kong" Proc. IV Congress of the Int. Assoc. of Eng. Geology, New Delhi, Vol. 1, pp. 145 - 253.

Bush, R.G., Abrão, P.C. Machado, P.T. e Freitas, A.Z. (1982) "Construção de barragens com rejeitos pouco permeáveis VII CBMSEF, Vol. VI, pp. 333 - 346.

Caldwell, J.A., Dorey, R. and Welsh, J. (1985) "Centreline tailings impoundments" Die Siviele Ingenieur in Suid - Afrika, February, pp. 73 - 95

Caloi, P. (1970) "How Nature Reacts on Human Intervention, Responsibilities of Those Who Cause and Who Interpret Such Reactions" - Pubblicazione nº 433 - Instituto Nazionale Geofisica, Roma (em italiano)

Cargnel, G. (1981) "Système avec ordinateur pour le suivi a distance du risque d'éboulement" 26th Int. Geological Congress - Section 17 - Risques Géologiques - Mouvements de Terrain, Bulletin de Liaison des Lab. des Pouts et Chaussées, Spécial X, pp. 127 - 130.

Carpenter, G.W. and Stephenson, R.W. (1986) "Permeability testing in the triaxial cell" Geotech. Testing Journal, Vol. 9 nº 1, pp. 3-9.

Carrier III, W.D.; Bromwell, L.G. and Samogyi, F. (1983) "Design capacity of sluried mineral waste ponds" Journal of Geot. Eng. ASCE, Vol. 109 nº 5, pp. 699 - 716.

CBGB (1983) "Problemas Ambientais de Reservatórios" Publicação do Comitê Brasileiro de Grandes Barragens, Rio de Janeiro, 39 p.

Cepollina, M. e Ruoppolo, L. (1984) "Barragem de rejeito alteada através de diques de aterro compactado" 4º CBGE, Belo Horizonte, Vol. 1, pp. 227 - 287.

CETESB (1985) "Resíduos Sólidos Industriais" Série ATAS da Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental, São Paulo, Vol. 1, 182 p.

Chowdhury, R.N. (1984) "Recent Developments in Landslide Studies: Probabilistic Methods - State-of-the-Art-Report - Session VII (a), 4th Int. Symposium on Landslides, Toronto, pp. 209 - 228.

Côme B., Johnston, P. and Müller, A. (1985) (ed.) "Design and Instrumentation of In situ experiments in underground laboratories for radioactive waste disposal" A.A. Balkema, Rotterdam, Boston.

Cosler, D.J. and Snow, R.E. (1984) "Leachate collection system performance analysis" Journal of Geot. Eng. ASCE, vol. 110, pp. 1025 - 1041.

Crooks, V.E. and Quigley, R.M. (1984) "Saline leachate migration through clay: a comparative laboratory and field investigation" Canadian Geot. Journal, Vol. 21, nº 2, pp. 349 - 362.

da Costa Nunes, A.J., Brandão, C.A., Dias P.H.V., Fernandes, C.E. de M. (1983) "Landslides due to Intense Tropical Rainfall in Brazil" 7th Pan American CSMFE, V. 1, Vancouver, pp. 291 - 304.

da Costa Nunes, A.J., Fonseca, A.M. da M.C.C. e, Hunt, R.E. (1979) "Landslides of Brazil" in Rockslides and Avalanches Vol. 2, edited by B. Voight, Development in Geotechnical Engineering 14B, Chap.11, pp. 419 - 446.

Daniel, D.E. (1984) "Predicting hydraulic conductivity of clay liners" Journal of Geot. Eng. ASCE vol. 110 nº 2, pp. 285 - 300.

- Daniel, D.E.; Trautwein, S.J.; Boynton, S.S. and Foreman, D. E. (1984) "Permeability testing with flexible - wall permeameters" *Geotechnical Testing Journal*, Vol. 7 nº 3, pp. 113 - 122.
- da Silva, J.X. (1984) "Um sistema de análise geo-ambiental: O SAGA" *Proc. 1º Congresso Brasileiro de Defesa do Meio Ambiente*, Rio de Janeiro, pp. 417 - 419.
- Davies, T.R.H. (1982) "Spreading of rock avalanche debris by mechanical fluidization". *Rock Mechanics* Vol. 15, pp. 9 - 24.
- Day, S.R. and Daniel, D.E. (1985) "Hydraulic conductivity of two prototype clay liners" *Journal of Geot. Eng. ASCE*, vol. 111 nº 8, pp. 957 - 970.
- De Campos, T.M.P. (1985) "Análise de Estabilidade: Métodos, Parâmetros e Pressões Neutras" *Proc. Mesa Redonda sobre Aspectos Geotécnicos de Encostas*, Rio de Janeiro, pp. V.1 - V.37.
- Dunn, J.R. (1986) "Clay liners and barriers - Considerations of compacted clay structure" *Proc. Int. Symp. on Environmental Geotechnology*, Bethlehem, Pennsylvania, Vol. 1, pp. 293 - 302.
- Dunn, R.J. and Mitchell, J.K. (1984) "Fluid conductivity testing of fine-grained soils" *Journal of Geot. Eng. ASCE*, vol. 110 nº 11, pp. 1648 - 1665.
- Dvinoff, A.H. and Munion, D.W. (1986) "Stability failure of a sanitary landfill" *Proc. Int. Symp. on Environmental Geotechnology*, Bethlehem, Pennsylvania, Vol. 1, pp. 25 - 35.
- EPA (1983) "Lining of waste impoundment and disposal facilities" *United States Environmental Protection Agency SW-870*, 448p.
- Evans, M.D. (1966) "Man-Made Earthquakes in Denver" *Geotimer* nº 10, pp. 11 - 17.
- Fernandez, F. and Quigley, R.M. (1985) "Hydraulic conductivity of natural clays permeated with simple liquid hydrocarbons" *Canadian Geotech. Journal*, Vol. 22, pp. 205 - 214.
- Ferreira, C.S. de M. (1981) "Erosão - Investigações de campo e laboratório desenvolvidas pelo Instituto de Pesquisas Rodoviárias" *II Simpósio sobre o Controle de Erosão*, São Paulo, Vol. 1, pp. 203 - 215.
- Fonseca, A.M.M. da C.C. (1981) "Técnicas para previsão, prevenção e contenção de erosão em taludes e encostas" *2º Simpósio sobre Controle de Erosão*, São Paulo, Vol. 1, pp. 217 - 233.
- Fonseca, A.M.M. da C.C. (1985) "Drenagem e Controle de Erosão" *Proc. Mesa Redonda sobre Aspectos Geotécnicos de Encostas*, Rio de Janeiro, pp. IV-2 - IV-25.
- Fontoura, S.A.B.; de Campos, T.M.P.; Leite M.H.S e Montenegro, M.S. (1986) "Características de permeabilidade de um rejeito industrial sólido compactado" *Anais do VIII CBMSEF*, Porto Alegre.
- Freeze, R.A. and Cherry, J.A. (1979) "Groundwater" *Prentice Hall*, Englewood Cliffs, N.J.
- Gama, C.D. e Miotto, J.A. (1983) "Sismicidade Induzida por Barragens do Alto Paraná" *Proc. Simpósio sobre a Geotecnia da Bacia do Alto Paraná*, São Paulo, Vol. II B, p. 409 - 424.
- Ghaboussi, J. et al (1978) "Analysis of Subsidence over Soft Ground Tunnels - Proc. Int. Conf. on Evaluation and Prediction of Subsidence, Pensacola, USA - ASCE.
- Gibson, R.E.; England, G.L. and Hussey, M.J.L. (1967) "The theory of one-dimensional consolidation of saturated clays: I, finite non-linear consolidation of thin homogeneous layers". *Geotechnique*, vol. 17 nº 3, pp. 261 - 273.
- Gibson, R.E.; Schiffman, R.L. and Cargill, K.W. (1981) "The theory of one-dimensional consolidation of saturated clays: II, finite non-linear consolidation of thick homogeneous layers" *Can. Geotech. J.* vol. 18, pp. 280 - 293.
- Gillham, R.W., Robin, M.J.L., Dytynshyn, D.J. and Johnston, H.M. (1984) "Diffusion of nonreactive and reactive solutes through fine-grained barrier materials" *Canadian Geot. Journal*, Vol. 21, pp. 541 - 550.
- Gloc, C.S. (1976) "Land Subsidence Related to Brown Coal Open Cut Operations, Latrobe Walley, Victoria - Proc. 2nd Int. Symp. on Land Subsidence, Anaheim - Int. Ass. of Hydrological Sciences.
- Goodall, D.C. and Quigley, R.M. (1977) "Pollutant migration from two sanitary landfills near Sarnia, Ontario". *Canadian Geot. Journal*, Vol. 14, pp. 223 - 236.
- Gouvenot, D. (1985) "Les injections dans le sol et l'environnement" *Proc. 11th ICSMFE (San Francisco)* Vol. 3, pp. 1249 - 1252.
- Guidicini, G. e Nieble, C.M. (1984) "Estabilidade de Taludes Naturais e de Escavação" *Editora Edgard Blücher Ltda.*
- Haberlehner, H. (1978) "Análise sismotectônica do Brasil - Notas explicativas sobre o mapa sismotectônico do Brasil e regiões correlacionadas" *2º CBGE*, São Paulo, Vol. 1, pp. 297 - 329.
- Habib, P. (1975) "Production of gaseous pore pressure during rock slides", *Rock Mechanics*, Vol. 7, pp. 193 - 197.
- Holmes, G.S. and Pindexter, D.R. (1986) "Reclamation methods for tailing impoundments" *Proc. Int. Symp. on Environmental Geotechnology*, Bethlehem, Pennsylvania, Vol. 1, pp. 334 - 343.
- Hryciw, R.D. and Dowding, C.H. (1986) "Dynamic Pore Pressure and Ground Motion Instrumentation of Blast Densification of Sand" *Int. Symp. on Environmental Geotechnology*, V.1, Lehigh Univ. Bethlehem, pp. 620 - 629.
- Hungr, O. (1981) "Dynamic of Rock Avalanches and Other Types of Slope Movements" *PhD Thesis*, Univ. of Alberta, Canada.
- Hungr, O., Morgan, G.C. and Kellerhals, R. (1984) "Quantitative Analysis of debris torrent hazard for design of remedial measures" *Canadian Geotech. J.* 21, pp. 663 - 677.

- ICOLD (1985) "Dams and the environment. Notes on regional influences" Bulletin n° 50 of International commission on Large Dams 91p.
- Jessberger, H.L.; Ebel, W. and Beine, R.A. (1985) "Bentonite treated colliery spoil for sealing waste disposals" Proc. XI ICSMFE, San Francisco, Vol. 3, pp. 1193 - 1198.
- Jones, F.O. (1973) "Landslides of Rio de Janeiro and the Serra das Araras Escarpment, Brazil" U.S. Geol. Surv. Prof. Paper 697.
- Karlsruud, K. and Sander, L. (1978) "Subsidence Problems Caused by Rock Tunneling in Oslo" - Proc. Int. Conf. on Evaluation and Prediction of Subsidence, Pensacola, USA - ASCE.
- Klohn, E.J. (1981) "The development of current tailing dam design and construction methods" in "Design and Construction of Tailing Dams" ed. by D. Wilson, Colorado School of Mines Press, Golden, Colorado, pp. 1 - 52.
- Koppula, S.D. and Morgenstern, N.R. (1982) "On the consolidation of sedimenting clays" Can. Geotech. J. Vol. 19, pp. 260 - 268.
- Korfiatis, G.P.; Demetropoulos, A.C. and Schuring, J.R. (1986) "Laboratory testing for permeability and dispersibility of cohesive soils" Int. Symp. on Environmental Geotechnology, Bethlehem, Pennsylvania, Vol. 1, pp. 363 - 369.
- Krumdieck, M.A. (1984) "On the mechanics of large landslides" Proc. 4th Int. Symp. on Landslides, Toronto, V. 1, pp. 539 - 544.
- Kupper, J.A. (1983) "Sobre a solução numérica da equação de dispersão bi dimensional" IV Cong. Latino-Americano sobre Métodos Computacionais para Engenharia, Santiago, ou publicação AT 21/83, PUC/RJ.
- Kupper, J.A. (1983) "Seleção de um Método Numérico para a Simulação do Transporte de Poluentes em Águas Subterrâneas" Simp. Luso-Brasileiro sobre Simulação e Modelação em Hidráulica e Recursos Hídricos, Blumenau ou publ. AT 22/83, PUC/RJ.
- Kynch, G.J. (1952) "A theory of sedimentation" Trans. Faraday Soc. vol. 48, pp. 166 - 176.
- Law, K.T. and Lumb, P. (1978) "A Limit Equilibrium Analysis of Progressive Failure in the Stability of Slopes" Can. Geot. J. V.15 n° 1, pp. 113 - 122.
- Lee, K. (1981) "Consolidation with constant rate of deformation" Geotechnique, vol. 31 n° 2, pp. 215 - 229.
- Martins, L.A.M. e Bastos, J.P. de C. (1978) "Disposição de rejeitos radioativos de alta atividade em formações geológicas" 2º CBGE, São Paulo, V. 2, pp. 263 - 272.
- Mc Omer, R.M.; Moore, C.A. and Beath, B.W. (1982) "Field evaluation of methane migration predictions" Can. Geotech. Journal, vol. 19, pp. 239 - 249.
- Melosh, H.J. (1979) "Acoustic Fluidization: A New Geologic Process? J. Geophysical Research, V. 84, pp. 7513 - 7520
- Mesri, G. and Olson, R.E. (1971) "Mechanism controlling the permeability of clays" Clays and Clay Minerals", vol. 19, pp. 151 - 158.
- Mitchell, J.K. and Younger, J.S. (1967) "Abnormalities in hydraulic flow through fine-grained soils" Permeability and Capillarity of Soils, ASTM STP n° 417, pp. 106 - 139.
- Moh, Za-Chieh (1977) "Geotechnical Engineering and Environmental Control" Proc. IX ICSMFE, Tokyo, Vol. 3, pp. 559 - 561.
- Montague, P. (1982) "Hazardous waste landfills: some lessons from New Jersey" Civil Engineering, Vol. 52, pp. 53 - 56.
- Montgomery, R.L.; Thackston, E.L. and Parker, F.L. (1983) "Dredged material sedimentation basin design Journal of Environmental Eng. ASCE, Vol. 109 n° 2, pp. 466 - 484.
- Moore, C.A.; Rai, I.S. and Alzaydi, A.A. (1979) "Methane migration around sanitary landfills" Journal Geot. Eng. ASCE, Vol. 105 n° GT2, pp. 131 - 144.
- Morgenstern, N.R. (1985) "Geotechnical Aspects of Environmental Control" Proc. XI ICSMFE, San Francisco, Vol. I, pp. 155 - 185.
- Morgenstern, N.R. and de Mattos, M.M. (1975) "Stability of Slopes in Residual Soils" Proc. 5th PCSMFE, Buenos Aires, V.3, pp. 367 - 383.
- Mysels, K.J. (1959) "Introduction to Colloid Chemistry Interscience", N.Y.
- Nakao, H.; Mori, R.T. e Oliveira, H.G. de (1984) "Canga, itabirito e solo saprolítico de filito na Barragem de Retenção de Rejeitos de Águas Claras" 4º CBGE, Belo Horizonte, Vol. 1, pp. 288 - 309.
- Nobre, M.M.M. (1986) "Condutividade hidráulica e dispersão hidrodinâmica de rejeitos compactados e revestimentos argilosos" Tese de Mestrado, Deptº de Eng. Civil, PUC/RJ (em andamento)
- Olsen, H.W. (1985) "Osmosis: a cause o apparent deviations from Darcy's law" Can. Geotech. Journal, Vol. 22, pp. 238 - 241.
- Olsen, H.W.; Nichols, R.W. and Rice, T.L. (1985) "Low gradient permeability measurements in a triaxial system" Geotechnique, Vol. 35, n° 2, pp. 145 - 157.
- Olson, R.E. and Daniel, D.E. (1981) "Measurement of the hydraulic conductivity of fine-grained soils" Permeability and Groundwater Contaminant Transport, ASTM STP 746, pp. 18 - 64.
- Oweis, I.S. and Khera, R. (1986) "Criteria for geotechnical construction on sanitary landfills" Proc. Int. Symp. on Environmental Geotechnology, Bethlehem, Pennsylvania, Vol. 1, pp. 197 - 222.
- Pavilonky, V.M. (1985) "Varying permeability of clayey soils linings" Proc. XI ICSMFE, San Francisco, Vol. 3, pp. 1213 - 1216.
- Perez, T. and Krizek, R.J. (1985) "Control of chemical grout injected in seepage domain" Proc. 11th ICSMFE (San Francisco) Vol. 3, pp. 1217 - 1220.

- Perkins, T.K. and Johnston, O.C. (1963) "A review of diffusion and dispersion in porous media" Soc. of Petroleum Eng. Journal, Vol. 3, pp. 70 - 84.
- Poulos, S.J. (1964) "Control of Leakage in the triaxial test" PhD Thesis, Harvard Univ., Cambridge, Massachusetts.
- Pope, R.G., Weeks, R.C. and Chipp, P.N. (1982) "Automatic recording of standpipe piezometers" Proc. 7th Southeast Asian Geotechnical Conference, Hong Kong, Vol. 1, pp. 77 - 89.
- Pusch, R. (1985) "Dense smectite clay used as overpack of deeply buried metal canisters with highly radioactive wastes" Proc. of 119 ICSMFE (San Francisco) Vol. 3, Pp. 1221 - 1228.
- Rahn, P.H. (1986) "Groundwater contamination by radioactive waste" Proc. Int. Symp. on Environmental Geotechnology, Bethlehem, Pennsylvania, Vol. 1, pp. 233 - 246.
- Raleigh, C.B., Healy, J.H. and Bredehoeft, H.D. (1972) "Faulting and Crustal Stress at Raugely, Colorado" Geophysical Monograph N. 16, Washington, D.C., pp. 275 - 284.
- Rowe, R.K. and Booker, J.R. (1985) "1-D Pollutant migration in soils of finite depth" Journal of Geot. Eng. ASCE, Vol. 111, nº 4, pp. 479 - 499.
- Rowe, R.K. and Booker, J.R. (1985) "Two-dimensional pollutant migration in soils of finite depth" Canadian Geot. Journal Vol. 22, pp. 429 - 436.
- Rowe, R.K. and Booker, J.R. (1986) "A finite layer technique for calculating three-dimensional pollutant migration in soil" Geotechnique, Vol. 36 nº 2, pp. 205 - 214.
- Rowe, R.K.; Caers, C.J.; Booker, J.R. and Crooks, V.E. (1985) "Pollutant migration through clay soils" Proc. XI ICSMFE, San Francisco, Vol. 3, pp. 1293 - 1298.
- Salt, G. (1985) "Aspects of landslide mobility" Proc. 11th ICSMFE, San Francisco, V. 3, pp. 1167 - 1172.
- Sarsby, R.W. (1986) "Ground Vibrations from Sheet-Piling Operations" - Int. Symp. on Environmental Geotechnology. V. 1, Lehigh Univ., Bethlehem, pp. 655 - 666.
- Sassa, K. (1985) "The mechanism of debris flow" Proc. 11th ICSMFE, San Francisco, V. 3, pp. 1173 - 1176.
- Schiffman, R.L.; Pane, V. and Gibson, R.E. (1984) "The theory of one-dimensional consolidation of saturated clays: IV, an overview of nonlinear finite strain sedimentation and consolidation". In sedimentation / consolidation models, pp. 1 - 29 (eds. R.N. Yong and F.C. Townsend), New York: ASCE.
- SEMA (1984) "Relatório da qualidade do meio ambiente" ed. Secretaria Especial do Meio Ambiente.
- Sembenelli, P. and Ueshita, K. (1981) "Environmental Geotechnics - State-of-the-Art Report" - Proc. X ICSMFE, Stockholm, Vol. 4, pp. 335 - 394.
- Silveira, J. (1981) "Análise da erosão superficial dos taludes das áreas-teste da BR-116 - 4 anos de medições" Anais do Simpósio Brasileiro de Solos Tropicais em Engenharia, Rio de Janeiro, pp. 724 - 740.
- Singh, M.M. (1978) "Experience with Subsidence due to Mining" - Proc. Int. Conf. on Evaluation and Prediction of Subsidence, Pensacola, USA - ASCE.
- Skermer, N.A. (1985) "Discussion on: Nature and mechanics of the Mount St Helens rockslide avalanche of 18 May 1980" - Geotechnique, Vol. 35 nº 3, pp. 357 - 362.
- Smith, R.E. and Wahls, H.E. (1969) "Consolidation under constant rates of strain" Journal ASCE, vol. 95, nº SM2, pp. 519 - 539.
- Sowers, G.F. (1976) "Mechanisms of Subsidence due to Underground Openings - Transp. Research Record nº 612.
- Tallard, G. (1984) "Slurry trenches for containing hazardous waste" Civil Engineering, Vol. 54, pp. 41 - 45.
- Terzaghi, K. (1956) "Varieties of Submarine Slope Failures" Proc. 8th Texas Conf. on S.M.F.E., Univ. of Texas, Bureau of Eng. Research, Spec. Pub. 29, 49p.
- Valeriano, D. de M. e Reis, J.L. B.C. (1985) "O Uso de Técnicas de Sensoriamento Remoto no Monitoramento Ambiental para Controle da Poluição Causada por Mineração de Carvão no Estado de Santa Catarina" I Cong. Bras. de Mineração, Brasília, D.F., IBRAM - Também em: Coletânea de Trabalhos Técnicos sobre Controle Ambiental na Mineração - Publ. DNP (1985) pp. 359 - 376.
- Vargas, M. (1983) "A Brazilian Experience in Construction and Maintenance of Roads on Tropical Rainy Mountainsides" 7th Panam. Conf. on SMFE, Vancouver, V. 1, pp. 259 - 268.
- Varnes, D.J. (1978) "Slope Movement Types and Processes" in "Landslides: Analysis and Control" ed. by R.L. Schuster and R.J. Krizek, Transportation Research Board, Spec. Report 176, Washington, pp. 11 - 33.
- Vaughan, P.R. (1982) "Design and construction with wet fills" publ. ABMS - SP.
- Vick, S.G. (1983) "Planing, Design and Analysis of Tailing Dams" Wiley Series in Geotechnical Engineering - John Wiley Sons Inc. 369p.
- Vladut, T. (1986) "Dynamic Phenomena Associated with Soil - Porewater Pressure Interaction: Reservoir Induced Seismicity. Int. Symposium on Environmental Geotechnology - Vol. 1, Lehigh University, Bethlehem, pp. 607 - 619.
- Voight, B. and Faust, C. (1982) "Frictional heat and strength loss in some rapid landslides" Geotechnique 32, nº 1, pp. 43 - 54.
- Voight, B., Janda, R.J., Glicken, H. and Douglas, P.M. (1985) - Discussion on: "Nature and Mechanics of the Mount St. Helens rockslide - avalanche of 18 May, 1980". Geotechnique, Vol. 35, nº 3, pp. 362 - 368.

- Westbrook, G.K., Kusnir, N.J., Browit, C.W.A. and Holdsworth, B.K. (1980) "Seismicity Induced by Coal Mining in Stoke-on-Trent, U.K.", Engineering Geology, V. 16 nº 3/4, pp. 225.
- Wilson, D. (1981) (ed.) "Design and construction of tailing dams" Colorado School of Mines Press, Golden, Colorado.
- Zimme, T.F.; Doynow, J.S. and Wardell, J.T. (1981) "Permeability testing of soils for hazardous waste disposal sites" Proc. X ICSMFE, Stockholm, Vol. 2, pp. 403 - 408.
- Znidarcic, D.; Schiffman, R.L.; Pane, V.; Croce, P.; Ko, H.Y. and Olsen, H.W. (1986) "The theory of one dimensional consolidation of saturated clays: part V, constant rate of deformation testing and analysis" - Geotechnique, vol. 36 nº 2, pp. 227 - 237.
- Evans, J.C. (1986) "Slurry trench cutoff walls for waste containment" Proc. Int. Symp. on Environmental Geotechnology, Bethlehem, Pennsylvania, Vol. 1, pp. 303 - 311.

VIII CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA DE FUNDAÇÕES  
P. Alegre: 12 a 16 de outubro de 1986.

## SOBRE A ESTOCAGEM DE RESÍDUOS INDUSTRIAIS E A IMPERMEABILIZAÇÃO DE RESERVATÓRIOS

Edward Barros Pacheco  
Engenheiro da ENGE-RIO, Engenharia e Consultoria S. A., Professor Adjunto da Universidade Federal Fluminense.

### SUMÁRIO

O artigo apresenta uma abordagem geral sobre a estocagem dos resíduos industriais e de mineração, dando maior atenção aos principais enfoques envolvidos no estudo de alternativas para impermeabilização dos reservatórios. São também levantados alguns aspectos merecedores de atenção quanto à forma como são encarados pela maioria dos projetos e, ao final, são sugeridos alguns procedimentos de estudos que deverão favorecer à elaboração de critérios de projetos mais realistas.

### GENERALIDADES

A implantação de um empreendimento industrial ou de mineração, particularmente aqueles envolvendo transformações químicas, exige, nos dias de hoje, um estudo criterioso relativo ao meio ambiente, com objetivo de mostrar ser possível a convivência do empreendimento com as condições ambientais características da região, assegurando a mínima interferência com a fauna e a flora, climatologia, regimes e qualidades das águas superficiais e subterrâneas.

Com tal objetivo, um estudo deste porte envolve diversas disciplinas e, além dos enfoques sócio-econômicos, deve abordar pelo menos os seguintes aspectos:

- . Estudos sobre o meio ambiente: paisagismo, geologia e geotecnologia, hidrologia superficial e subterrânea, climatologia e fauna e flora.

- . Estudo do complexo minerador ou industrial: técnicas, produções, processos químicos, etc.

- . Avaliação das cargas potencialmente poluidoras: efluentes líquidos, emissões gasosas e de material particulado, resíduos sólidos e enquadramento face à legislação vigente.

- . Programa de proteção ambiental: tratamento dos efluentes líquidos, condicionamento das emissões para a atmosfera e condições de estocagem dos resíduos sólidos.

- . Medidas de segurança e controle: técnicas especiais, monitoramento de qualidade das águas superficiais e subterrâneas, e monitoramen