

MECÂNICA DE ROCHAS E PROTECÇÃO AMBIENTAL*

Rock Mechanics and Environmental Protection

por

C. DINIS DA GAMA**

RESUMO — Um dos problemas mais atractivos e mais difíceis da sociedade contemporânea é a deposição de resíduos tóxicos em condições de segurança permanentes.

Uma vez que o espaço subterrâneo é considerado, na maioria dos países, como a solução menos objectionável para tal armazenamento, a Mecânica de Rochas desempenha um papel importante neste contexto, porque constitui responsabilidade dos cientistas e engenheiros desta especialidade desenvolverem métodos apropriados para a investigação e para a escolha desses locais, para efectuarem o seu projecto e construção com as técnicas mais avançadas, e também para realizarem a observação e o acompanhamento da sua operação e do seu controlo. Contribuições para actividades de regulamentação e para avaliações de segurança dessas instalações, incluindo a sua fiscalização, podem também ser providas por aqueles especialistas.

Dois tópicos importantes foram seleccionados para ilustrar as aplicações de Mecânica de Rochas aos estudos subterrâneos: a estabilidade e a estanquidade, ou seja, o planeamento e o projecto das suas fundações e as análises da percolação de contaminantes em maciços rochosos fracturados.

Com base nas contribuições fornecidas por numerosos especialistas nestes tópicos, incluindo as dos autores de trabalhos para este tema do 7.º Congresso da ISRM, são apresentados conceitos adequados à obtenção da garantia de qualidade no projecto de depósitos subterrâneos de resíduos.

SYNOPSIS — Until the last decade, economic growth was supposed to be limited by the scarcity of earth resources. Today we are understanding that the real constraint is the ability of the environment to absorb waste by-products.

In the pursuit for reliable solutions to the problem of waste storage (of urban, industrial, toxic and radioactive types) appropriate consideration must be attributed to operating and abandoned mines, for a series of advantages.

The geomechanical methods for the long term stability and water containment of those excavations are focussed and several options are discussed in view of their waste storage capabilities.

Furthermore, design concepts for underground mines that in the future will store waste are proposed, because they may provide an additional economic help for the mining industry.

1 — INTRODUÇÃO

De acordo com estatísticas oficiais, os países da Comunidade Económica Europeia produzem anualmente entre 25 e 35 milhões de toneladas de resíduos perigosos. Estimativas mais realistas apontam para um total de 160 milhões de toneladas anuais, só de resíduos tóxicos, aos quais devem somar-se os lixos urbanos, rurais e industriais que cada país produz a ritmos crescentes.

* Versão portuguesa da comunicação apresentada ao 7.º Congresso da Sociedade Internacional de Mecânica das Rochas, Aachen, Setembro de 1991.

** Dep. Eng. Minas, IST, Lisboa.

Por exemplo, na Inglaterra detectou-se que, em média, o lixo é criado à razão de 1 tonelada por pessoa e por ano (Packaging, Maio de 1989). Deste volume, só 6% é reciclado, contra 30% na Alemanha.

Muitos países estão adoptando medidas políticas e económicas para atacarem os problemas ambientais, mas a ordem de grandeza dos custos correspondentes é, por vezes, excessiva. A França publicou o seu Plano Verde (Plan Vert) e a CEE equaciona a criação de uma Agência de Protecção Ambiental semelhante à dos Estados Unidos da América. Na Holanda existe um sentimento colectivo sobre a urgência deste problema, sendo estimado que um programa anti-poliuição custa 3% do PNB, com uma incidência que poderá alcançar 30% a 50% no princípio do próximo século, se nada for feito presentemente.

Os métodos disponíveis para eliminar tais resíduos incluem os aterros sanitários e o armazenamento subterrâneo (50 a 70%), reciclagem (menos de 15%), tratamentos químicos e bacteriológicos (cerca de 8%), incineração (à volta de 8%) e o lançamento nos oceanos (3%).

A ordem de grandeza dos custos unitários envolvidos pode alcançar 2500 dólares por tonelada para eliminação adequada de dioxina num incinerador de alta temperatura, até 350 dólares por tonelada de tinta já usada, ficando a média compreendida entre 270 e 550 dólares por tonelada de resíduos eliminados.

Infelizmente, existe uma tendência global para o aumento da produção de todos os tipos de resíduos, em consequência do crescimento populacional, da elevação dos padrões de vida e da industrialização em geral.

Como a Terra é sempre o destino da maioria dos resíduos criados pela civilização actual, várias consequências negativas são verificadas em quase toda a parte: ocupação de grandes áreas para deposição de lixos, contaminação dos recursos de água superficial e subterrânea e um número crescente de locais destinados a receber os resíduos, com realce para cavidades subterrâneas apropriadas para deposição de lixos tóxicos e radioactivos.

Em relação aos primeiros, verifica-se que aterros sanitários e obras similares estão ocupando áreas rurais a ritmos alarmantes, causando impactos visuais e paisagísticos, por vezes envenenando cursos de água e recursos aquíferos subterrâneos.

A crescente contaminação do nosso líquido mais precioso está a transformá-lo em certas regiões num recurso escasso para o consumo humano, assim como para aplicações agrícolas e industriais. Existem diversas áreas do planeta onde são essenciais as técnicas de reutilização directa da água, a sua purificação em circuito fechado e a própria regeneração de água. Para vários países prevê-se uma deficiência severa de água no séc. XXI, que só pode ser contornada com a aplicação daquelas técnicas, entre outras.

Quanto aos recursos de água subterrânea constata-se a necessidade de implementação de políticas que conduzam à extracção equilibrada a partir de poços que penetrem nos aquíferos, para a utilização de métodos de recarga que conduzam a uma gestão integrada da quantidade e qualidade das águas para consumo, através da realimentação dos aquíferos exauridos e, inversamente, nas épocas secas, proceder à extracção dos poços a fim de aumentar o caudal dos rios. Face às vantagens que oferece o armazenamento subterrâneo da água, em termos de temperatura e de controle de qualidade, aproveitando as vantagens dos fenómenos de filtração natural, torna-se necessário evitar a extracção excessiva dos aquíferos, e por vezes utilizar-se as suas possibilidades de escoamento para desenvolver redes de distribuição mais económicas, incluindo o reabastecimento e a purificação de rios anteriormente degradados.

A poluição das águas subterrâneas é hoje considerada inaceitável em muitos países, onde são impostas pesadas multas aos responsáveis por tal contaminação.

Muitos métodos novos estão sendo estudados e aplicados para a gestão adequada do consumo da água, da sua descontaminação, salientando a necessidade de entender os mecanismos de escoamento das águas, especialmente através de maciços rochosos fracturados.

No que respeita aos depósitos subterrâneos de resíduos sólidos, têm sido desenvolvidos esforços consideráveis, com os correspondentes investimentos, para proporcionar-lhes condições de segurança e isolamento a longo prazo, simultaneamente com o emprego de tecnologias inovadoras para a selecção dos locais, para a escavação das rochas, para métodos de suporte das cavidades e para a previsão da sua estabilidade ao longo do tempo. O desafio imposto pelo armazenamento permanente de lixo radioactivo é certamente uma das maiores contribuições para o progresso deste ramo da Mecânica de Rochas orientado para o meio ambiente.

Em todos estes aspectos da utilização dos recursos de espaço subterrâneo, este ramo da Ciência desempenha um papel importante, desde a respectiva prospecção e planeamento até às fases de projecto e de construção dessas obras. Espera-se que a Mecânica de Rochas Ambiental venha a constituir uma fonte de grandes realizações em termos de pesquisa e de desenvolvimento durante os anos 90, e certamente através do séc XXI.

2 — FUNDAÇÕES DE DEPÓSITOS DE RESÍDUOS

2.1 — A protecção ambiental e o papel dos depósitos de resíduos

A qualidade da vida humana, preservação dos valores ecológicos e os princípios mais elementares da civilização requerem que todos os materiais rejeitados pela Humanidade, especialmente os resíduos tóxicos e os radioactivos, sejam eles resultantes de actividades agrícolas, industriais ou de serviços, devem ser controlados e submetidos a tratamentos subsequentes até que seja encontrado um armazenamento definitivo. Este esforço gigantesco requer a participação de vários tipos de profissionais, capazes de dedicarem o seu conhecimento e experiência na procura de soluções para tal desafio, em termos de economia e de segurança.

A irresponsabilidade de se produzirem grandes quantidades de lixo e deitá-los fora sem ter a preocupação com o seu destino, quer por deitá-los fora ou simplesmente esquecê-los porque outros cuidarão disso, já não é um comportamento aceitável no mundo contemporâneo. Mesmo assim, o volume actual de resíduos não tratados, associado às quantidades de lixo localizadas erradamente, constitui um fardo muito pesado que cada país deve enfrentar, simultaneamente com a gestão dos sub-produtos que diariamente vai criando.

Infelizmente, a atitude de poluir hoje e deixar para outros se preocuparem com isso amanhã é também aquilo que muitos governos têm feito: veja-se, por exemplo, o que acontece com o lixo de alto nível de radioactividade para o qual ainda não existe solução rotineira para o tratar definitivamente.

Muitas comissões têm sido formadas em toda a parte para estabelecer o destino final que devem seguir os resíduos tóxicos, e em geral têm considerado o espaço subterrâneo como o compromisso menos objecionável para a solução a longo prazo deste problema. Mesmo

assim, muitas outras comissões, grupos ecológicos, audições públicas, interesses políticos e muitos outros continuam a atrasar as decisões necessárias para implementar tais soluções. Discussões teóricas sobre efeitos ambientais, sobre o grau de segurança das instalações de armazenamento, sobre o comportamento a longo prazo dos produtos tóxicos enterrados, a maior parte das vezes mantidas por grupos multidisciplinares, estão atrasando ainda mais o destino final desses sub-produtos, que entretanto continuam a poluir a biosfera.

Os custos correspondentes continuam a subir à medida que constrangimentos adicionais são impostos, enquanto novas comissões se criam para discutir o problema.

Tecnicamente falando, a situação parece clara: existem presentemente todas as ferramentas para desenvolver depósitos subterrâneos que podem armazenar indefinidamente resíduos tóxicos longe da biosfera, com tanta segurança quanto os fundos disponíveis permitirem. Mesmo considerando a ocorrência de catástrofes naturais, o projecto e a construção de tais depósitos pode minimizar aqueles efeitos até níveis aceitáveis, em comparação com os riscos envolvidos em qualquer outra estrutura feita pelo homem.

2.2 — Estágios do desenvolvimento de depósitos

As múltiplas tarefas envolvidas na criação de um depósito subterrâneo de lixo tóxico são obviamente o resultado de esforços pluridisciplinares, que numerosos especialistas e grupos de trabalho já têm analisado.

Algumas das abordagens do problema são apresentadas abaixo, nas 3 figuras seguintes.

O conteúdo de cada figura é auto-explicativo, e a sua validade é essencial para qualquer trabalho de desenvolvimento de depósitos.

	FASE CONCEITUAL	FASE DE PROJECTO	FASE DE CONSTRUÇÃO E DE OPERAÇÃO
TIPO DE ANÁLISE	Modelagem simples para definição de objectivos e análise de sensibilidade dos conceitos	Prova de estabilidade geotécnica Modelagem para a análise final de estabilidade	Análise para confirmação do desempenho do sistema (análise de consequências)
ACTIVIDADE GEOTÉCNICA E GEOCIENTÍFICA	Aquisição de dados gerais sobre geoambiente Projecto preliminar de engenharia geológica	Investigação local. Projecto completo das instalações	Avaliação de dados da monitoração sobre a construção e operação. Avaliação geotécnica e optimização do projecto de detalhe
REGULAMENTAÇÃO	Formulação de critérios de aceitabilidade	Relatório sobre a revisão da análise de segurança. Licença de construção	Atribuição da licença definitiva. Controlo e inspecções

Fig. 1 — Fases principais do trabalho para implementação de depósitos (Langer, 1989)

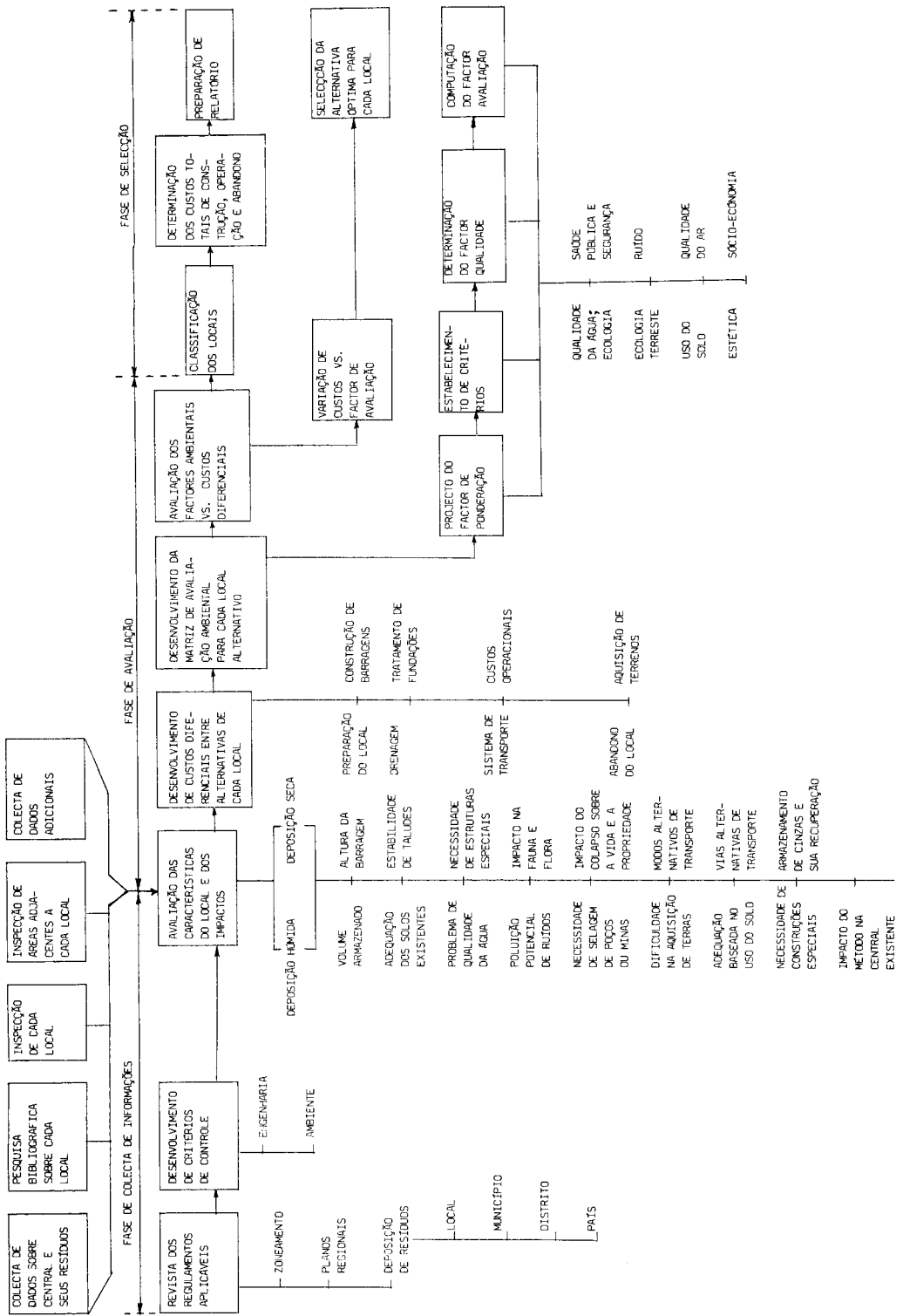


Fig. 2 — Metodologia para selecção de locais de deposição (DiGioia and Gray, 1979)

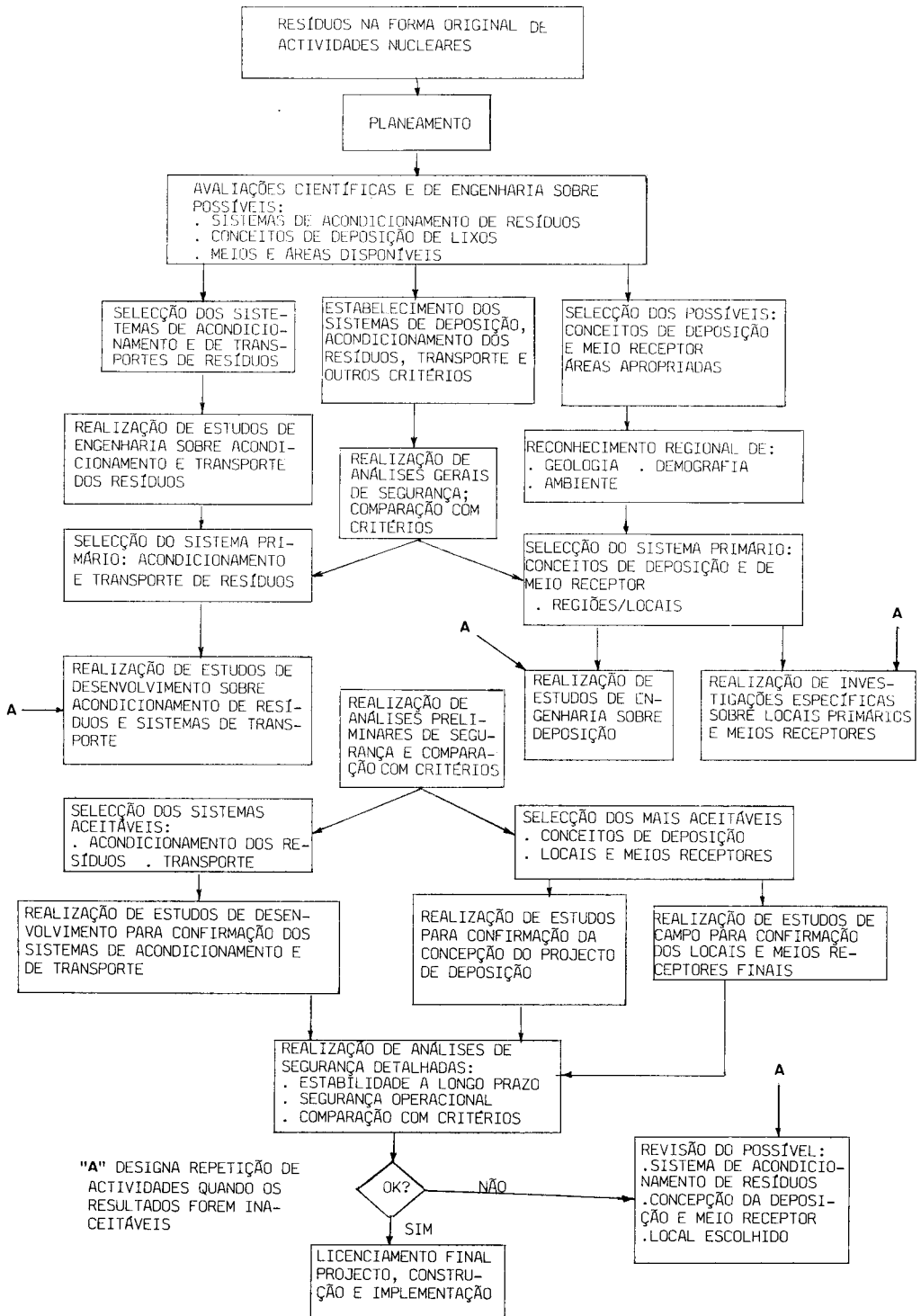


Fig. 3 — Actividades de desenvolvimento da deposição de resíduos (IAEA, 1981)

As etapas necessárias podem ser descritas, de acordo com o IAEA (1989), em nove pontos, como segue:

- a) Projecto preliminar: avaliação dos tipos, características e volumes de resíduos, assim como a espécie de obra de deposição a realizar (superficial ou profunda).
- b) Levantamento da área: identificação de regiões contendo locais-candidatos, que podem ser eliminados após escrutinização de factores de aceitação.
- c) Seleção preliminar dos locais: investigação detalhada de áreas favoráveis para determinar as que são capazes de aceitar locais para depósitos.
- d) Confirmação dos locais: verificação de um ou mais lugares escolhidos que são submetidos a investigações “in situ” pormenorizadas.
- e) Projecto: desenvolvimento de planos para a construção e a operação do depósito, incluindo a preparação do pedido do seu licenciamento.
- f) Construção: execução das obras superficiais e subterrâneas, baseadas no projecto final do local confirmado.
- g) Operação: período de tempo em que é feita a colocação e a selagem dos resíduos, podendo ser simultânea com a abertura de novas escavações até alcançar a capacidade máxima pretendida.
- h) Encerramento: conclusão dos trabalhos de deposição, com estruturas de selagem apropriadas.
- i) Controle subsequente: monitoração da região para detectar danos inadvertentes ao meio ambiente e, no caso de ocorrerem, desenvolver acções correctivas para eliminação desses problemas.

Pelo menos dois tipos de organizações estão presentes neste processo: o grupo de implementação ou proprietário do depósito) e o organismo regulamentador. Em alguns países ambos são agências governamentais, mas é recomendável que sejam efectivamente separados (IAEA, 1989). Outros grupos podem ainda tomar parte nos processos decisórios envolvidos na criação de novos depósitos, tais como representantes de segmentos da população, da comunidade científica, dos interesses económicos, etc. A interacção entre todos estes sectores deve ser coordenada por autoridades governamentais numa escala que dependerá da estrutura legal de cada estado.

2.3 — Contribuições da mecânica de rochas

As propriedades mecânicas das formações geológicas escolhidas para receber resíduos tóxicos devem prover níveis adequados de isolamento ao longo de toda a vida proposta para o depósito. Em particular, são necessárias características que garantam a estabilidade a longo prazo para as rochas que vão rodear as cavidades subterrâneas, incluindo os seus efeitos à superfície, que poderão causar fenómenos de subsidência, especialmente perigosos se se tratar de armazenamentos submarinhos. Também é exigida uma baixa permeabilidade a esses maci-

ços rochosos, com vista a minimizar o risco de contaminação das águas subterrâneas em contacto com as substâncias nocivas.

Como a natureza dos lixos a armazenar desempenha um papel importante para a selecção dos locais de depósito, é essencial determinar "in situ" as propriedades dos maciços rochosos que irão interferir nos requisitos de estabilidade e de estanquidade acima mencionados.

É estabelecida geralmente uma distinção entre as rochas encaixantes das cavidades, como aquelas onde são executadas as escavações e onde será armazenado o lixo, e a rocha do maciço circundante que deverá prover contenção e isolamento, seja para o transporte de contaminantes (por exemplo, radionuclídeos) para a biosfera, seja contra as interferências futuras com a biosfera ou com os seres humanos. O conceito de barreiras (naturais ou construídas) é também utilizado para fornecer protecção de vários tipos contra a dissolução dos resíduos pelas águas subterrâneas e para controlar a libertação de contaminantes através dos terrenos. São exemplos de barreiras construídas os revestimentos impermeabilizantes e os enchimentos dos vazios, complementados com o encapsulamento dos resíduos em recipientes apropriados, e adequadamente localizados no ambiente subterrâneo.

Em relação às formações geológicas que são geralmente escolhidas para rocha encaixante, existem três tipos que podem ser indicados:

a) Rochas cristalinas (ígneas e metamórficas)

Por ocorrerem habitualmente em grandes massas com baixo valor económico, estas rochas são consideradas, em vários países, como as mais apropriadas para fins de depósito de resíduos. As suas propriedades mostram alta resistência mecânica, boa estabilidade química, baixa porosidade e razoável condutividade térmica. O seu principal problema é a presença de descontinuidades de vários tipos (falhas, juntas, fissuras, fendas, etc.) que lhes reduzem a resistência e aumentam a deformabilidade e a permeabilidade, permitindo assim o movimento da água subterrânea com grande variabilidade, tornando difícil a previsão das direcções de escoamento e complicando a modelagem hidrogeológica.

Granitos, basaltos, serpentinites, tufo (cimentados e zeolíticos), assim como formações ferríferas são os tipos mais procurados para tal objectivo (IAEA, 1981).

b) Evaporitos

São um grupo de rochas sedimentares (halito, gesso, anidrite, etc.) resultantes da evaporação de águas salinas e que constituem grandes maciços não perturbados, mostrando estabilidade a longo prazo. Apresentando-se em camadas ou em domas criadas por movimentos diapíricos, estas rochas possuem resistências à compressão relativamente altas, assim como boa condutividade térmica e comportamentos de fluência. São fáceis de escavar e mostram propriedades cicatrizantes para as suas fracturas; contudo os evaporitos são solúveis na água, tornando possível a migração de fluidos através da sua massa, e têm baixa capacidade de absorção, o que pode causar problemas no caso de constituírem rochas encaixantes para armazenamento subterrâneo de resíduos.

c) Outras rochas sedimentares

Formações argilosas, xistosas e similares possuem baixas permeabilidades e solubilidades, boas propriedades absorcivas, mas fraca condutividade térmica e baixa resistência para manter estáveis as escavações.

Por outro lado, os arenitos e as formações quartzosas apresentam altas porosidades e permeabilidades, o que os recomenda para uso de depósitos pouco profundos, ou para rochas encaixantes de armazéns subterrâneos isolados por camadas suprajacentes impermeáveis.

Os calcários não são convenientes face à sua solubilidade na água, que conduz à abertura de canais para a percolação de fluidos, para além da sua baixa resistência devido à habitual existência de fracturas e outras descontinuidades.

É óbvio que não se dispõe de um critério único para seleccionar as formações geológicas capazes de receberem um certo tipo de resíduo tóxico, mas em qualquer caso são necessários ensaios “in situ” para se compatibilizarem com os requisitos de projecto que influem na concepção do depósito, incluindo o seu licenciamento e as obras de construção.

Existe uma interacção entre esses factores, conforme apresenta Bieniawski (1985) e que se reproduz na Fig. 4.

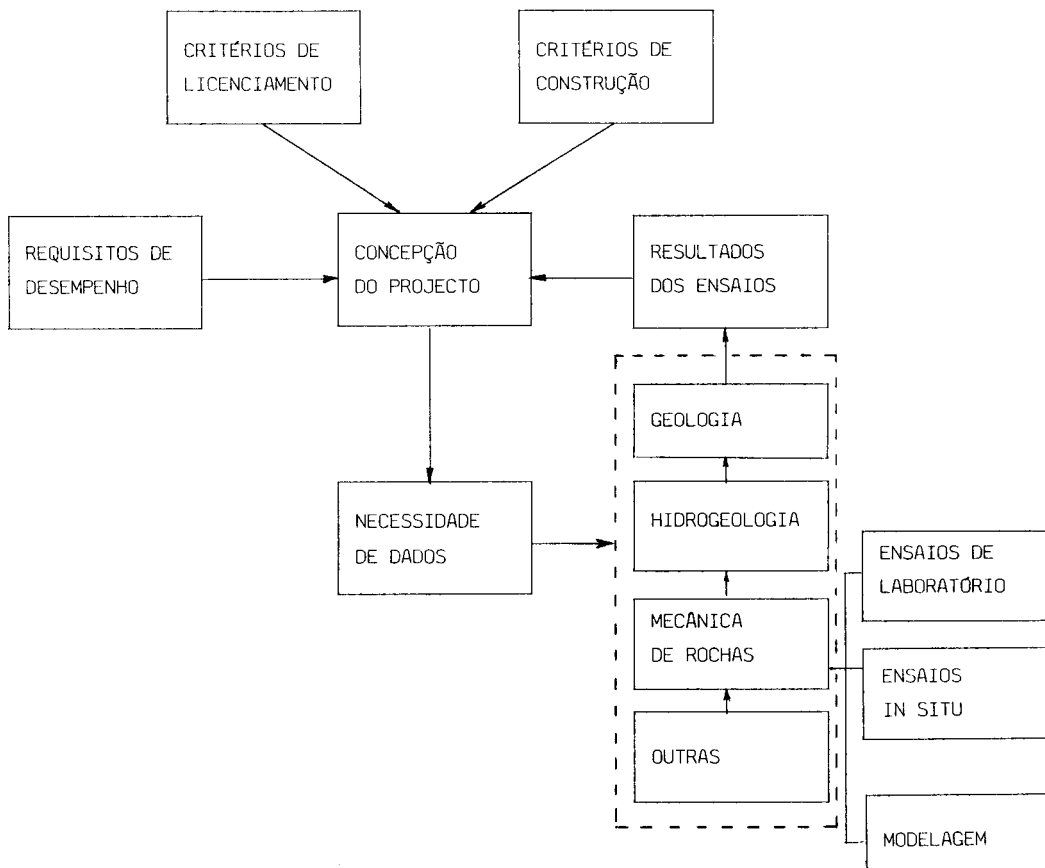


Fig. 4 — Interacção entre os factores geomecânicos, de projecto e de comportamento dos projectos de depósitos

Estima-se que as investigações de Mecânica de Rochas para um novo depósito subterrâneo de lixo de alta radioactividade custam mais de 2 bilhões de dólares, envolvendo a caracterização em poços e galerias de prospecção, incluindo o mapeamento geológico, a monitoração em grande escala, técnicas de escavação rochosa, levantamento de fracturas e avaliações de sistemas de suporte, de controle de fluidos, registo de deformações nas cavidades subterrâneas, comportamento térmico e termo-mecânico, determinação de propriedades dos maciços, medições de tensões “in situ”, avaliações da condutividade hidráulica e da selagem por furos e por poços (Bieniawski, 1985).

Algumas técnicas novas têm sido propostas, tais como o ensaio de grandes blocos, por meio do qual cubos de rocha com 2 m de aresta são isolados das formações circundantes, sendo instrumentados por diversos aparelhos (medidores de tensões com cordas vibrantes, defómetros para furos de sondagem, extensómetros simples e múltiplos, macacos planos, sistemas de registo electro-óptico) de modo a monitorar o estado de tensão e deformação entre secções instrumentais (Hustrulid, 1982).

Muitos outros métodos estão sendo aplicados para a caracterização rigorosa dos comportamentos acoplados (envolvendo propriedades térmicas, hidrológicas, geoquímicas e mecânicas) assim como a sua evolução com o tempo. Espera-se que o acompanhamento cuidadoso dos depósitos existentes ajude a compreender essa complexa interacção de factores, de modo a que a modelagem realística dos maciços possa ser desenvolvida nas etapas de projecto dessa obras.

2.4 — Confiabilidade dos depósitos

Qualquer que seja o tipo de espaço subterrâneo (caverna natural, cavidade aberta por dissolução de evaporitos ou abertura escavada), deverá o depósito apresentar condições de estabilidade durante o tempo previsto para desempenhar as suas funções. O conceito de estabilidade é aqui usado no sentido amplo, incluindo não apenas as cavidades mas também os sistemas de suporte e a rocha circundante, e envolvendo avaliações da ocorrência de grandes deformações e fracturas, que podem perigar a sua capacidade para executar as funções pretendidas através do seu projecto. Para as estruturas resistentes subterrâneas, tais como pilares de rocha e painéis entre escavações adjacentes, é necessário determinar a sua proximidade em relação à rotura sob a acção das cargas transmitidas pelo seu enquadramento (tensões estáticas e dinâmicas, solicitações térmicas, etc.), incluindo os efeitos de alteração dos minerais das rochas e a sua decomposição provocada por fluidos.

Estas avaliações de estabilidade devem ser desenvolvidas durante as fases de construção e de operação da obra, assim como após o seu encerramento, depois de esta se encontrar completamente ocupada por resíduos, devendo incluir resultados da monitoração através de instrumentos adequados, devidamente incorporados nos cálculos de engenharia com o objectivo de determinar factores de segurança, ou probabilidades de colapso.

Deve haver compatibilidade com as previsões ou cenários formulados durante a fase de projecto, quer tenha sido estabelecida por critérios determinísticos ou probabilísticos.

No primeiro caso, as correlações entre os valores admissíveis dos parâmetros geomecânicos (concentrações de tensões, convergência, subsidência, etc.) devem ser efectuadas com respeito aos dados efectivamente medidos, e os seus quocientes fornecem avaliações do relativo grau de segurança que caracteriza o depósito.

Quando é aplicada a metodologia probabilística para fins de projecto, certos eventos que identificam condições de rotura devem ser caracterizados por meio de probabilidades de ocorrência, cada uma das quais relacionada com um certo curso dos acontecimentos. Se estas probabilidades forem estimadas, assim como os custos correspondentes de rotura, é possível avaliar os custos esperados de colapso, os quais constituem um bom suporte para a tomada de decisões, assim como uma ferramenta excelente para a atribuição de conceitos de qualidade à obra em consideração.

O problema da garantia de qualidade em obras de engenharia está na dependência directa da satisfação do consumidor e abrange a implementação de normas existentes, aos níveis nacional e internacional.

Vários graus de qualidade podem ser estabelecidos por meio da Análise Benefício-Custo, se aplicada à obra em apreço.

No caso de um depósito subterrâneo é possível identificar as variações da sua qualidade em função dos correspondentes benefícios, e também dos vários tipos de custos inerentes. Em consequência, pode ser calculada uma relação benefício-custo para cada nível de qualidade (no projecto assim como na construção) que permite assinalar gamas de aceitabilidade, tal como esquematiza a Fig. 5.

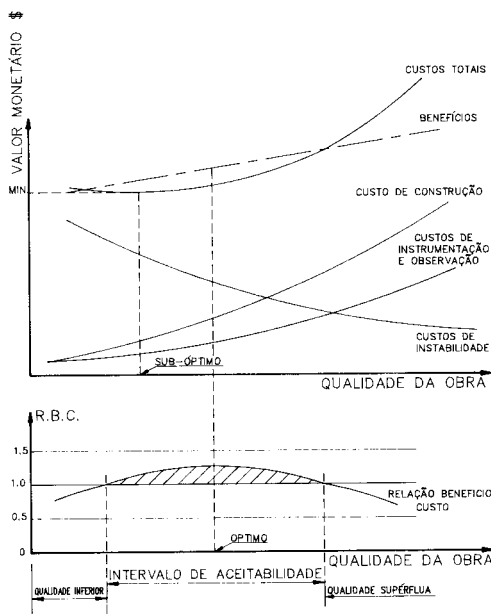


Fig. 5 — Garantia de qualidade para os depósitos subterrâneos

Para além da zona de aceitação geral, em que a relação benefício-custo é maior que um, pode-se definir ainda uma zona de qualidade baixa (ou de projecto inaceitável) e uma outra de qualidade supérflua, em que benefícios adicionais são obtidos através de custos mais elevados.

Estes conceitos gerais de garantia de qualidade podem ser aplicados na concepção e no projecto de depósitos, com a vantagem de indicarem um compromisso óptimo entre os benefícios e os custos, contribuindo assim para a implementação de critérios objectivos de decisão, o que parece aconselhável em problemas desta natureza, que envolvem grande número de variáveis antagónicas.

3 — MIGRAÇÃO DE CONTAMINANTES EM ROCHAS FRACTURADAS

3.1 — Contaminação das águas subterrâneas

As reservas de água subterrânea constituem presentemente uma fonte de preocupação no que se refere ao controle de qualidade da água. Em comparação com as águas superficiais, os aquíferos subterrâneos contêm normalmente proporções maiores de sais minerais devido às reacções químicas com as rochas vizinhas, e tais proporções aumentam com a duração desses contactos, levando a água a tornar-se mais salina em função do tempo e do espaço.

O fluxo de águas subterrâneas naturais tende a transportar todos os minerais em suspensão para os oceanos, mas quando o homem intervém com a criação de locais para depósitos de resíduos, ou simplesmente com a extracção de água, as consequências são geralmente caracterizadas pela deterioração da sua qualidade, seja por aumento de salinidade, seja pela intersecção de qualquer forma de poluição (sólida, líquida ou gasosa).

Os princípios gerais de controle da acção de contaminantes em trabalhos de engenharia são, de acordo com Hartman (1982): prevenção (evitando), remoção (eliminando), supressão (absorvendo), contenção (isolando) e diluição (reduzindo). Estes cinco processos de diminuição dos efeitos de poluentes que são transportados por qualquer fluido são indicados por ordem decrescente de eficiência e por ordem crescente de custos necessários para implementar tal controle.

No que respeita à gestão de resíduos, a primeira regra indica que deve ser evitada a sua produção, mas quando tal não é viável, eles deverão ser eliminados, absorvidos ou isolados sempre que possível, de acordo com as circunstâncias. O seu destino final é sempre a Terra, normalmente o solo e depois o mar, através de um processo que pode levar anos ou décadas.

A situação mais comum de um depósito superficial de resíduos, tal como um aterro sanitário, pode causar diversos tipos de problemas, como se indica a seguir.

A natureza hidrogeológica do terreno afecta a contaminação resultante, como se indica na Fig. 6, e os possíveis trajectos dos poluentes que atingem o ambiente são esquematizados na Fig. 7.

Os efeitos perigosos produzidos pelos poluentes que existem na água podem ser sentidos a vários quilómetros de distância da sua fonte e após vários anos, causando problemas a animais e vegetais, particularmente quando tais efeitos não são monitorados. É recomendada instrumentação adequada nas áreas afectadas, devendo ser implantados critérios para avaliações eficientes dos contaminantes sobre a água subterrânea (Walker, 1974).

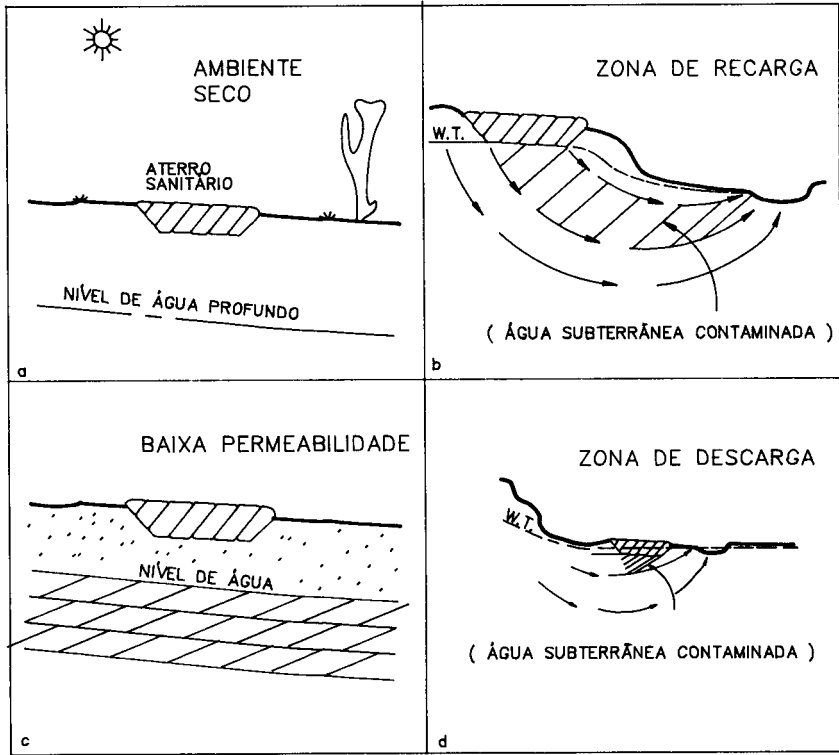


Fig. 6 — Efeitos de contaminação por depósito de resíduos em várias condições hidrogeológicas

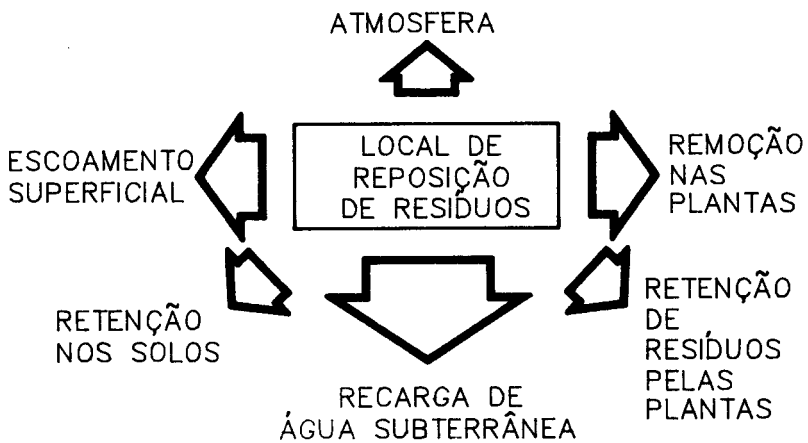


Fig. 7 — Possibilidades de contaminação do ambiente por depósitos de resíduos

Devido à redução das condutividades hidráulicas com a profundidade, assim como as vantagens de trabalhar abaixo do nível do mar, os depósitos de resíduos começaram a ser instalados no subsolo, especialmente quando se trata de produtos de alta toxicidade, tais como radionuclídeos contidos nos lixos de combustíveis nucleares.

A utilização do espaço subterrâneo pode realizar-se por meio de quatro opções, segundo Maury (1985): cavidades escavadas, uso de minas antigas, cavidades abertas por dissolução e em aquíferos.

Sérios problemas podem ocorrer em consequência dessas colocações subterrâneas, designadamente riscos de contaminação da água subterrânea (Fig. 8).

Assim, são necessárias cuidadosas especificações para evitar a contaminação subterrânea, apesar das grandes dificuldades em resolver os problemas de caracterização dos locais, a modelagem matemática das unidades hidroestratigráficas e o comportamento dos fluxos de água e de contaminantes através de maciços rochosos fracturados.

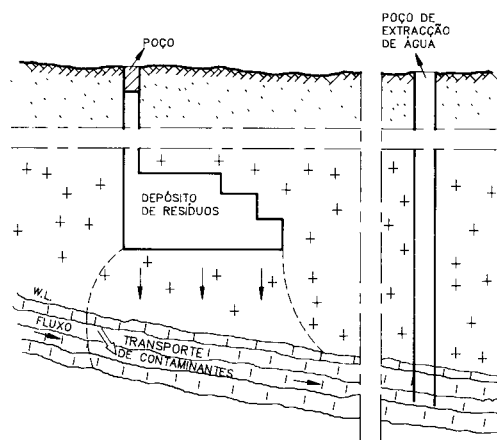


Fig. 8 — Poluição de águas subterrâneas por fugas de resíduos

3.2 — Fluxo das águas subterrâneas em maciços rochosos

3.2.1 — Generalidades

O movimento da água subterrânea é um processo tridimensional, cuja caracterização depende da escala de observação. Para fins de ilustração, considerem-se três escalas: o milímetro, o metro e o quilómetro. No primeiro, a água percorre os vazios de um solo através de trajetórias muito irregulares, as quais se podem considerar contínuas quando examinadas à escala métrica.

O mesmo ocorre num maciço rochoso fracturado: a sua composição descontínua e a tortuosidade do escoamento verificam-se à escala métrica, mas numa escala quilométrica tal fluxo pode ser considerado homogéneo. Assim, é aceitável comparar, em termos de escoamento da água, um solo à escala milimétrica com um maciço rochoso à escala métrica, podendo também um solo à escala métrica ser assemelhado a um maciço rochoso à escala quilométrica.

Em engenharia somos influenciados pela escala das nossas obras, a maior parte das vezes com dimensões da ordem das dezenas de metros, e assim o escoamento da água deve ser estudado de acordo com tais dimensões. Nestas circunstâncias, é geralmente aceite considerarem-se os solos como meios homogéneos e os maciços rochosos como materiais heterogéneos descontínuos, embora o fenómeno físico da percolação seja o mesmo. Mas a situação mudar-se-á se estudarmos, por exemplo, o comportamento hidrogeológico da bacia completa de um rio, onde os maciços são tratados aproximadamente como meios contínuos.

Um segundo aspecto fundamental é a quantidade de informação disponível para caracterizar as formações rochosas, como consequência das dimensões das obras em análise, assim como a sua importância económica relativa, incluindo as consequências previsíveis do seu colapso, ou do seu mau funcionamento ocasional.

Em termos práticos, o problema do escoamento da água em maciços rochosos fracturados só é visto com os seus constrangimentos reais se a escala de observação é compatível e se existirem dados de campo suficientes para caracterizar as suas propriedades com detalhe. Consequentemente, os modelos matemáticos disponíveis para simular este fenómeno dependem daqueles dois requisitos e, além disso, podem modificar-se ao longo dos projectos: nas fases iniciais o maciço rochoso pode ser tratado como meio homogéneo, passando depois a material anisótropo e finalmente para meio de porosidade dupla, desde que haja informação adequada para alimentar os sucessivos modelos.

O objectivo essencial será a definição do modelo mais consistente com uma certa realidade, a qual é simultaneamente verificada e melhorada pelos dados de observação e da instrumentação, antes e depois da obra se completar. Como exemplos desta determinação por fases dos parâmetros hidrogeológicos dos maciços rochosos, citam-se os fornecidos por Williams *et al.* (1986) e também pelo IAEA (1981) — ver Tabela 1.

A caracterização hidrogeológica do local deve ser conduzida de modo a fornecer informações para duas etapas subsequentes: a estrutura de fracturação do maciço rochoso, a matriz dos blocos intactos e as suas principais propriedades, ambas medidas "in situ".

Uma interpretação apropriada deve seguir-se à fase de ensaios, porque as propriedades hidráulicas são geralmente acopladas com os outros fenómenos de transporte, tais como:

- a) Efeitos mecânicos: devido a variações da abertura das fracturas induzidas pela pressão dos fluidos.
- b) Térmicos: como a temperatura influencia os coeficientes de viscosidade dos fluidos, estes por sua vez modificam as velocidades de percolação.
- c) Químicos: como consequência das dissoluções e reacções químicas no interior das fracturas.
- d) Enchimento sólido: quando as partículas sólidas mudam a abertura das fracturas, por vezes fechando-as totalmente.
- e) Biológicos: proliferação de bactérias que podem mudar a geometria das fracturas.

TABELA 1

Dados Necessários para Estudos de Depósitos de Resíduos
(IAEA, 1981)

A — CARACTERIZAÇÃO DE PARÂMETROS QUÍMICOS, FÍSICOS, GEOLÓGICOS E HIDROGEOLÓGICOS

1. Geologia das formações, espessura, profundidade, litologias, mineralogia e estratigrafia
2. Ambiente geológico, incluindo topografia, estrutura, passado geológico, geomorfologia, tectónica e sismicidade
3. Ambiente hidrogeológico (regime hidrológico, incluindo aquíferos e aquícludes, áreas de recarga e de descarga)
4. Ambiente geoquímico (incluindo natureza química da água e das rochas, minerais secundários e propriedades absorventes)
5. Geotecnia e propriedades físicas gerais da rocha encaixante

B — CARACTERIZAÇÃO DO AMBIENTE SUPERFICIAL NATURAL

1. Clima (normal e com eventos ocasionais, tais como enchentes, tornados, etc.)
2. Hidrologia superficial
3. Radiação de fundo
4. Flora e fauna

C — CARACTERIZAÇÃO DA ESTABILIDADE E RESISTÊNCIA DAS FORMAÇÕES GEOLÓGICAS A:

1. Modificações climáticas (glaciação, ciclos de chuva, variações de nível do mar)
2. Actividade geomórfica (erosão, actividade sísmica, falhas, subsidências e subidas do terreno, vulcanismo)
3. Impacto de meteoritos

D — CARACTERIZAÇÃO DAS INTERACÇÕES POTENCIAIS ENTRE OS RESÍDUOS E AS ROCHAS ENCAIXANTES

1. Efeitos térmicos
2. Efeitos de radiação
3. Efeitos hidrológicos
4. Reações químicas (absorção de radionuclídeos, corrosão de contentores e lixo acondicionado, etc.)

E — EFEITOS CRIADOS PELO HOMEM

1. Poços e furos de sondagem pré-existentes, efeitos de escavações
2. Possibilidade de outros eventos produzidos pelo homem que possam afectar segurança de instalações (densidade de tráfego, fogos, explosões, rotura de estruturas como barragens, diques marítimos, etc.)

F — CONSIDERAÇÕES ECONÓMICAS E SOCIAIS E PLANIFICAÇÃO

1. Recursos potenciais
2. Valor e uso do solo
3. Distribuição da população
4. Jurisdição e direitos de propriedade
5. Acessibilidade e serviços
6. Outros impactos ambientais
7. Atitudes da população

3.2.2 — Modelagem matemática

A modelagem matemática, que já é complicada para o fluxo através de fracturas, torna-se mais complexa ainda quando ocorrem outros mecanismos acoplados, que podem influenciar o comportamento real do maciço rochoso, particularmente na vizinhança de lixos tóxicos, em que podem ocorrer fenómenos de transporte.

Muitos trabalhos têm sido produzidos sobre este tema por investigadores de todo o mundo, como se indica na recensão bibliográfica subsequente, complementada pelas contribuições para este Congresso.

A lei de Darcy foi a primeira contribuição para descrever o escoamento da água em maciços rochosos, usando a hipótese aproximada de um comportamento contínuo. Estabelece que a velocidade V de escoamento da água através de um meio poroso e permeável é proporcional ao gradiente hidráulico J (Todd, 1980):

$$V = - K J$$

onde o coeficiente K é a condutividade hidráulica do meio, expressa em unidades de velocidade.

A generalidade dessa lei para três dimensões indica que (Serafim, 1968):

$$V_i = K_{ij} \frac{\partial H}{\partial X_j} \quad (i, j = 1, 2, 3)$$

em que V_i são os componentes do vector velocidade e H o potencial hidráulico, dado por:

$$H = \frac{p}{\gamma} + z$$

onde p é a pressão do fluido, γ o seu peso específico e z a elevação topográfica.

O tensor K_{ij} representa a condutividade hidráulica generalizada do meio, a qual depende das propriedades do fluido e das características das discontinuidades presentes.

Esta lei é válida para baixas velocidades de escoamento, no regime laminar. Para fluxo turbulento o gradiente deve ser elevado a um expoente de valor compreendido entre 1 e 0.5 (Louis, 1974).

Além disso, para escoamentos anisótropos o vector velocidade deixa de ser paralelo ao gradiente, excepto para as três direcções principais, quando K_{ij} assume forma diagonal.

A determinação deste tensor K_{ij} no campo corresponde à caracterização de um elipsóide de condutividades hidráulicas que pode ser obtido através de ensaios Lugeon adequadamente orientados e executados sobre o maciço rochoso em estudo (Louis, 1974). O método de amostragem integral (Rocha e Franciss, 1977) ajuda a estabelecer o referido tensor, por meio da sobreposição de tensores individuais, correspondentes a cada família de fracturas. Outras técnicas, como o teste de registo hidráulico (Andrade, 1988), podem contribuir para o mesmo objectivo.

Nos meios permeáveis contínuos, o fluxo da água subterrânea é governado por um sistema de equações diferenciais, obtido por substituição do vector velocidade na equação da continuidade do escoamento. Resulta assim a conhecida equação do fluxo transitório:

$$K_1 \frac{\partial^2 H}{\partial x_1^2} + K_2 \frac{\partial^2 H}{\partial x_2^2} + K_3 \frac{\partial^2 H}{\partial x_3^2} = S \frac{\partial H}{\partial t}$$

em que S é o armazenamento específico, ou seja, o volume da água libertado pela unidade de volume do maciço rochoso quando o potencial hidráulico se reduz de uma unidade (Todd, 1980).

Para escoamento estacionário desaparece o segundo termo e no caso particular de o mesmo ser homogéneo e isotrópico, a equação simplifica-se para:

$$\frac{\partial^2 H}{\partial x_1^2} + \frac{\partial^2 H}{\partial x_2^2} + \frac{\partial^2 H}{\partial x_3^2} = \nabla^2 H = 0$$

o que traduz a equação de Laplace para o potencial de fluxo.

Em muitas aplicações de Mecânica de Rochas o modelo contínuo não é adequado para representar o comportamento do fluxo de água. Isto porque é necessário tratar as fracturas individualmente como trajectórias do escoamento da água e, assim, as suas propriedades devem entrar em linha de conta. Embora as fracturas assumam muitos tipos e geometrias, o caso mais simples de uma fenda planear de abertura e leva a calcular-se (Wittke, 1990) que o vector de velocidade média é dado por:

$$V_i = -K_f J_i \quad (i = 1, 2)$$

onde J_i é o gradiente hidráulico dentro do plano da fractura e K_f a sua condutividade, expressa por:

$$K_f = \frac{g e^2}{12 \nu}$$

em que ν representa a viscosidade cinemática do fluido. Obviamente, a velocidade média do escoamento por unidade de comprimento da fractura é:

$$Q = K_f e \quad J = \frac{g e^3}{12 \nu} J$$

o que indica uma grande dependência da abertura da fractura, incluindo alta sensibilidade em relação à sua deformabilidade.

Sob uma tensão aplicada σ_n , normal ao plano da fractura, verifica-se que a respectiva abertura se modifica, de acordo com Barton *et al.* (1985), por meio de uma variação linear do tipo

$$e = e_o + \frac{\sigma_n}{K_n}$$

onde e_o é a abertura que ocorre sob uma tensão normal nula e K_n representa a rigidez normal da mesma fractura.

Expressões idênticas para a velocidade da água são válidas quando a fractura está preenchida com solo, usando-se neste caso o seu coeficiente de permeabilidade próprio (Wittke, 1990).

Outras situações particulares, tais como o escoamento em fracturas unidimensionais e fluxos tubulares, encontram-se também desenvolvidas, envolvendo o conceito de atrito, tal como em Hidráulica ao tratar os regimes de escoamento (laminar e turbulento) associado à rugosidade das fracturas. Em muitos outros tipos de maciços rochosos fracturados o escoamento acontece não só pelas descontinuidades mas também através da matriz rochosa, as primeiras caracterizadas por baixa capacidade de armazenamento e alta transmissividade e a segunda geralmente o contrário.

Quando o fluido percolado através da matriz rochosa não é desprezável, como no caso de reservatórios de petróleo explorados em formações rochosas fracturadas, deve ser considerado o meio como de dupla porosidade/permeabilidade, estudado pela primeira vez em 1960 por Barenblatt *et al.*

Estes autores deduziram um sistema de equações que envolve os volumes de fracturas e poros em percentagem do volume total do maciço interessado, assim como a sua compressibilidade e as pressões que actuam sobre ambos os componentes. Existe uma notável semelhança entre tais equações e as expressões da transferência de calor através de meios heterogêneos (Serafim, 1968), o que permite utilizar idênticas soluções matemáticas.

Ainda outras formulações do escoamento da água em maciços compartimentados são possíveis para situações combinadas ou mistas de existência de fracturas individuais e rochas porosas, nas quais as primeiras são homogeneizáveis de modo a simular um contínuo equivalente. A consideração das geometrias de fracturas como exemplos de geometria caótica conduz à aplicação de conceitos da teoria dos fractais, que podem ser usados para avaliar a percolação através de materiais porosos (Voss *et al.*, 1983). Embora esta via seja promissora, ainda não se encontra comprovada a condição essencial de auto-similaridade a várias escalas, para a maioria dos maciços rochosos fracturados.

Todos os diversos modelos propostos são consequência das múltiplas facetas que apresentam os maciços rochosos e seus sistemas de fracturas, e resultam também de não existir uma teoria universalmente válida sobre este tema, nem a apresentação de algoritmos destinados às aplicações de engenharia.

Um conceito muito sugestivo é o chamado Volume Elementar Representativo (VER) proposto por vários autores (por exemplo Bear, 1972). Em relação ao escoamento da água

subterrânea, esse conceito representa o volume mínimo de um certo maciço rochoso fracturado no qual são válidas as leis do fluxo contínuo. Quando se efectuam ensaios de campo, o VER é associado ao volume mínimo de um maciço homogéneo para além do qual os resultados correspondentes são independentes dos volumes ensaiados.

Esta noção é útil para fins práticos porque envolve simplificação acerca das múltiplas discontinuidades existentes na maioria dos maciços, fornecendo uma solução simples para o tratamento de informações relacionadas com o escoamento subsuperficial da água. Embora a analogia do VER seja clara nos casos de maciços muito fracturados ou naqueles em que a presença de discontinuidades é desprezável, para os casos intermédios verifica-se um criticismo justificável. Por exemplo, Jouanna (1989) menciona que o VER é irrealístico quando existem discontinuidades em grande escala, em cujos casos são necessários modelos descontínuos.

Contudo, os requisitos de cada projecto e os dados disponíveis sobre o verdadeiro maciço rochoso são os factores determinantes para o tipo de modelo a escolher. Os mais representativos tipos de analogias são sugeridos na Fig. 9.

3.3 — Migração de contaminantes em maciços rochosos

Os fenómenos de transporte de água subterrânea são mecanismos complexos de acções acopladas, difíceis de caracterizar no campo e ainda mais complicados para simular com recurso a modelos matemáticos. Tais fenómenos são também conhecidos com outras designações (advecção, difusão, migração, dispersão, encañamento, etc.), algumas das quais aplicadas impropriamente.

Com efeito, Neretnieks (1989) reserva a palavra dispersão para representar a variação de velocidades dos materiais transportados em torno da sua velocidade média, e considera ainda o encañamento ("channeling") como o fluxo preferencial através de trajectos mais rápidos, geralmente formados por discontinuidades importantes dos maciços rochosos.

Para além das complexas interacções que podem ocorrer entre a rocha encaixante e o fluido que contém os contaminantes (químicos, térmicos, biológicos, etc.), a atenção é centralizada principalmente sobre substâncias diluídas ou em suspensão que possuem uma certa concentração, variável no tempo e no espaço.

A formulação mais simples deste problema refere-se ao caso de meios porosos contínuos que sofrem a difusão de um soluto com a concentração C : o potencial de fluxo é governado pela equação (Welch *et al.*, 1966):

$$\frac{\partial C}{\partial t} = K_x \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + K_y \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + K_z \frac{\partial^2 C}{\partial z^2}$$

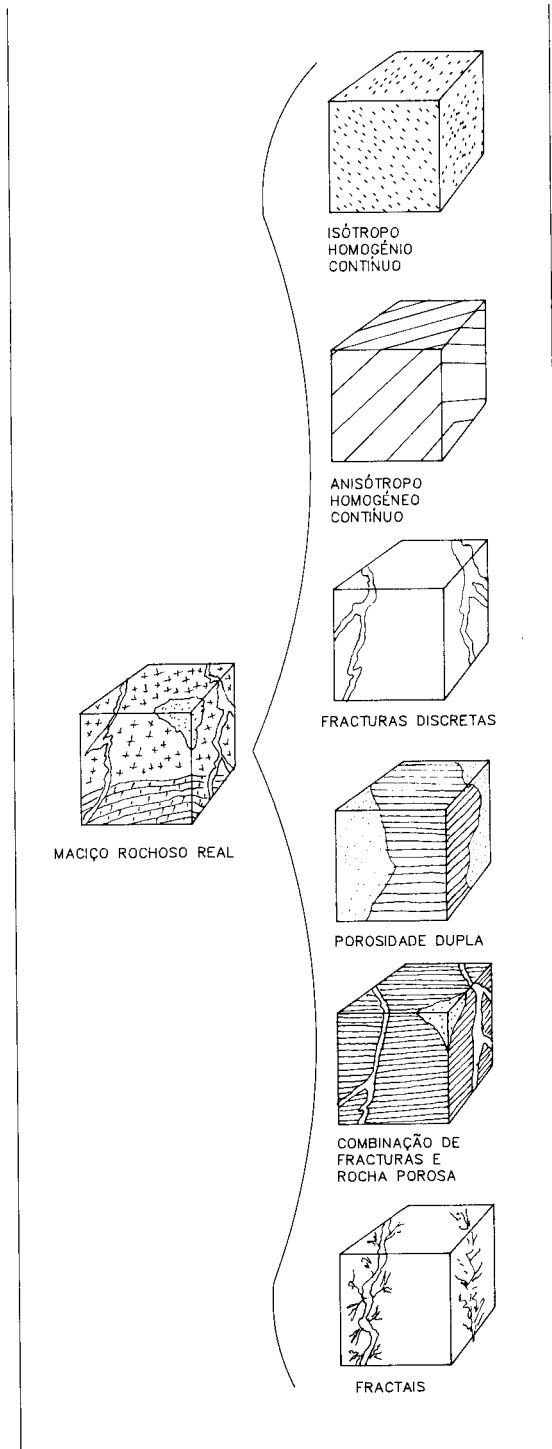


Fig. 9 — Equivalências dos vários modelos teóricos de fluxo da água subterrânea a um dado maciço rochoso

na qual K_x , K_y e K_z representam os coeficientes de difusão ao longo das três direcções do espaço para qualquer meio anisótropo. Tal como os seus equivalentes para o escoamento da água subterrânea, essas equações são facilmente integráveis por métodos numéricos (diferenças finitas, elementos finitos, etc.) desde que as propriedades dos materiais e as condições de fronteira sejam conhecidas.

No que respeita aos maciços rochosos e devido à grande relevância do transporte de radionuclídeos na água subterrânea, verifica-se que o problema despertou a atenção de vários grupos de investigadores. Contribuições iniciais de Tang *et al.* (1981), Rasmusson e Neretnieks (1980) são consideradas como métodos básicos para a solução do transporte difusivo advectivo para fracturas individuais, ou para sistemas de fracturas que não se intersectam. Para redes de fracturas cruzadas, foi proposto por Narasimhan em 1982 um método aproximado, a que se seguiram vários outros, embora cada autor se dedique a um aspecto particular do fenómeno.

Ferreira *et al.* (1991) promoveram uma revisão das formulações existentes para os casos de fractura discreta, de uma ou dupla porosidades, e fornecem um roteiro de programas de elementos finitos que efectuem tais cálculos. Para uma única fractura e usando o critério de Tang *et al.* (1981) a equação é:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{v}{R} \frac{\partial C}{\partial x} - \frac{D}{R} \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + a C + \frac{Q}{R e} = 0$$

onde C é a concentração do soluto, x a coordenada ao longo da fractura, e metade da abertura da fractura, v a velocidade do escoamento, R um factor de retardamento, D um coeficiente de dispersão hidrodinâmico, a uma constante de decaimento radioactivo e Q a perda de material da fractura para a matriz rochosa, devido a difusão molecular.

Para a difusão através da massa rochosa numa direcção perpendicular à fractura, a expressão é:

$$\frac{\partial C}{\partial t} - \frac{D'}{R'} \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} + a C = 0$$

onde D' é o coeficiente de difusão através do material rochoso, R' o seu factor de retardamento e z a coordenada espacial, a qual é válida no domínio de zero até à distância para as próximas fracturas paralelas. O valor de Q é calculado por:

$$Q = \phi D' \frac{\partial C}{\partial z}$$

em que ϕ representa a porosidade da matriz rochosa e, ainda:

$$R = 1 + \frac{K_f}{e} \quad R' = 1 + K_m \frac{\rho e}{\phi}$$

onde K_f e K_m representam, respectivamente, os coeficientes de absorção da fractura e da matriz rochosa, e a semi-abertura da fractura, ρ a densidade da matriz rochosa e ϕ a sua porosidade.

O termo absorção é usado para incluir simultaneamente a adsorção e os mecanismos de troca iónica, indicando que proporção de um dado componente é ligada às superfícies da rocha e quanto se deve à água em equilíbrio (Neretnieks, 1989).

Outros modelos ainda mais sofisticados têm sido propostos: por exemplo, Germain e Frind (1989) estudaram a simulação do transporte advectivo-dispersivo em dois sistemas de fracturas que se intersectam, com mistura nas suas intersecções, incluindo no interior da matriz rochosa, assim como a absorção e o decaimento. Devido a interacções mecânicas as aberturas das fracturas podem variar e o modelo foi aplicado a argilas. Como apontam estes autores, não existe ainda uma solução rigorosa para o problema da advecção-difusão com fracturas que se intersectam, para o fenómeno de transporte em sistemas porosos com fracturas.

Para além destas dificuldades, do ponto de vista teórico, muitos outros obstáculos existem nas aplicações práticas, devido à grande quantidade de dados de "input" necessários ao processamento dos modelos computacionais que tratam deste fenómeno. Embora exemplos de trabalhos de campo sejam citados na bibliografia, como nos casos de Chalk River (Canadá), Sripa 2D e 3D (Suécia), Fannay-Augeres (França), há poucas comprovações de acordo entre a informação proveniente da instrumentação de campo e as previsões desses modelos matemáticos.

Mais investigações parecem ser necessárias para trazer este assunto até ao nível das aplicações de engenharia para fins de projecto e de controle de instalações que emitem contaminantes através de maciços rochosos fracturados. Em termos da metodologia da Mecânica de Rochas, devem ser desenvolvidas técnicas apropriadas para estudos de laboratório e de campo sobre migrações de contaminantes, até à sua completa caracterização "in situ", a fim de se obter dados confiáveis para processamentos de computador e para trabalhos de monitoração, assim como critérios de projecto de depósitos que enfrentem tais contaminações.

4 — CONTRIBUIÇÕES PARA O CONGRESSO

Foi apresentado a este tema um total de 13 trabalhos, três dos quais (da autoria de Amann *et al.*, Nüesch e Schetelig) são relacionados com problemas de fundações para depósitos de resíduos e os restantes dizendo respeito à migração de poluentes em maciços rochosos fracturados. A relativa desproporção destas contribuições parece indicar que o segundo aspecto atrai mais atenção da comunidade geomecânica devido aos novos e desafiantes problemas que suscita, não só em termos de caracterização rigorosa dos meios em que os fenómenos de transporte acontecem, mas também sobre a sua modelagem matemática, envolvendo todas as variáveis e parâmetros que intervêm no processo.

Deve reconhecer-se que alguns dos trabalhos têm poucas relações com a Mecânica de Rochas, especialmente aqueles que incluem técnicas matemáticas peculiares, talvez justificáveis pela natureza interdisciplinar da matéria em análise.

É feita uma breve descrição de cada contribuição, reflectindo as preocupações para encontrar-lhes uma sólida base geomecânica e com o propósito de estimular debates durante a sua apresentação (*).

5 — CONCLUSÕES

A grande responsabilidade envolvida no projecto e na construção de depósitos subterrâneos deve ser partilhada por cientistas e por engenheiros de vários campos de actividade, incluindo especialistas de Mecânica de Rochas, cujo papel é essencial para o sucesso destes empreendimentos. Não apenas a fase de investigações destes projectos, destinadas à selecção apropriada dos locais, mas ainda durante o seu planeamento e execução incluindo as escavações de rochas e o seu reforço estrutural, até à monitoração da operação e do desempenho dessas obras, particularmente sobre os seus impactos ambientais, é de esperar relevantes contribuições da comunidade geomecânica.

A níveis mais elevados, esta comunidade está apta a participar da formulação de estratégias para administração de resíduos, especialmente tóxicos e radioactivos.

No que respeita à estabilidade desses depósitos de resíduos, os conhecimentos envolvidos são típicos de metodologias conhecidas de aplicação da Mecânica de Rochas, existindo processos determinísticos e probabilísticos que podem ser utilizados para avaliação e para garantia de qualidade dos mesmos depósitos. A Fig. 5, já apresentada, indica uma via de alcançar tais propósitos, por meio da análise benefício-custo, fundamentada em avaliações estocásticas da estabilidade.

Outro aspecto abordado relaciona-se com a migração de contaminantes em rochas fracturadas, um tópico de considerável interesse em várias áreas de pesquisa, tais como a engenharia de reservatórios de petróleo, os recursos geotérmicos, a hidrologia de águas subterrâneas e, obviamente, a deposição subterrânea de produtos tóxicos. Embora considerável progresso científico tenha sido alcançado nestas disciplinas, parece ser necessário desenvolver uma maior transferência de conhecimentos entre os seus participantes para benefício de todos os sectores envolvidos. Em particular, nota-se a falta de informação básica sobre conceitos de Mecânica de Rochas respeitantes a fracturas, por exemplo no domínio do desenvolvimento de modelos computacionais.

Talvez seja culpa dos nossos especialistas não disseminar convenientemente informações técnicas e científicas sobre as fracturas em maciços rochosos, que outros possam utilizar eficazmente na sua investigação sectorial, ou talvez seja conveniente participarmos mais frequentemente em esforços multidisciplinares conjuntos.

Os trabalhos apresentados ao tema traduzem aquelas tendências com certa propriedade, com apenas 20% se relacionando com a estabilidade dos depósitos e os restantes mostrando

(*) Face às características do presente artigo, não são incluídas as apreciações aos trabalhos deste tema que constaram do relato original.

pontos de vista especializados a respeito dos problemas de escoamento da água subterrânea e do transporte em meios fracturados. A maioria destas contribuições ligou-se à modelagem matemática dos fenómenos envolvidos, algumas das quais possuíam tentativas de validação por meio de experimentos laboratoriais e de campo.

A complexidade dos sistemas de fracturas reais em maciços rochosos não foi, contudo, abordada convenientemente na maioria dos casos. Além disso, feições mecânicas importantes das fracturas rochosas não participam ainda da grande parte dos modelos computacionais, o que indica ter a via de progresso de passar pela colaboração entre especialistas de diferentes sectores.

Em complemento a esse esforço multidisciplinar, as contribuições da Mecânica de Rochas serão estabelecidas para descrever a caracterização de maciços rochosos considerando os seus comportamentos acoplados (mecânico + térmico + químico + hidrológico, etc.) em conjunto com novas técnicas de monitoração "in situ" e com uma compreensão global das implicações ambientais dos depósitos subterrâneos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANDRADE, R. M. — *Mechanics of flow in fractured rock masses applied to dams*. Engevix, Rio de Janeiro 1988.
- BARENBLATT, G. I.; ZHELTOV, I. P.; KOCHINA, I. N. — *Basic concepts in the theory of seepage of homogeneous liquids in fissured rocks* PMM, 24, No. 5, pp. 852, Moscow 1960.
- BEAR, J. — *Dynamic of fluids in porous media*. American Elsevier Publishing CO., New York 1972.
- BIENIAWSKI, Z. T. — *Design of underground repositories for storage of high level nuclear waste: Role of rock mechanics*. ISRM Symp. Role of Rock Mechanics in Excavations for Mining and Civil Works. Proceedings, pp. 595-604. Zacatecas 1985.
- DIGIOIA, A. M.; GRAY, R. E. — *Power plant solid wastes geotechnical aspects of disposal site selection and design*. Current Geotechnical Practice in Mine Waste Disposal. ASCE, New York 1979.
- FERREIRA, J. C. L.; LEITÃO, T. E. — *Aplicação da modelação estocástica inversa de um modelo de escoamento e de transporte de poluentes em meios fracturados à região de Bagueixe*. Memória N.º 768, LNEC, Lisboa 1991.
- GASPARINI, C. — *The road to Yucca mountain*. World tunnelling, Aug. 1989, pp. 306-309, 1989.
- GERMAIN, D.; FRIND, E. O. — *Modelling of contaminant migration in fracture networks: Effects of matrix diffusion*. Proc. Int. Symp. Contaminant Transport in Groundwater, Stuttgart. Ed. A. Balkema, Rotterdam 1989.
- HARTMAN, H. — *Mine ventilation and air conditioning*. 2nd ed., John Wily & Sons, New York 1982.
- HUSTRULID, W. A. — *Potential host media for a high-level waste repository*. Underground Space, vol. 6, pp. 234-240. 1982.
- I.A.E.A. (International Atomic Energy Agency) — *Underground disposal of radioactive wastes — Basic guidance*. Safety Series No. 54, Vienna 1981.
- I.A.E.A. — *Criteria for underground disposal of solid radioactive wastes*. Safety Series No. 60, Vienna 1983.
- I.A.E.A. — *Guidance for regulation of underground repositories for disposal of radioactive wastes*. Safety Series No. 96, Vienna 1989.
- JOUANNA, P. — *Heat and mass transport in fractured rocks*. Advanced Workshop on Heat and Mass Transport in Fractured Rocks. LNEC, Lisbon 1989.

- LANGER, M. — *Engineering geology and environmental protection*. De Mello Volume, Editorial Blücher, São Paulo 1989.
- LOUIS, C. — *Rock hydraulics*. BRGM, Orléans 1974.
- MAURY, V. — *La Mécanique des roches: une discipline de base pour le stockage souterrain*. ISRM Symp. Role of Rock Mechanics in Excavation for Mining and Civil Works. Proceedings, pp. 553-572. Zacatecas 1985.
- NARASIMHAN, T. N. — *Multidimensional numerical simulation of fluid flow in fractured porous media*. Water Resources Research, vol. 18, no. 4, pp. 1235-1247, 1982.
- NERETNIEKS, I. — *Solute transport in fractured rock: Application to radionuclide waste repositories*. Advanced Workshop on Heat and Mass Transport in Fractured Rocks. LNEC, Lisbon 1989.
- RASMUSSEN, A.; NERETNIEKS, I. — *Exact solution of a model for diffusion in particles and longitudinal dispersion in packed beds*. AIChE Journal, vol. 26, 1980.
- ROCHA, M.; FRANCISS, F. O. — *Determinação da permeabilidade dos maciços rochosos anisotrópicos a partir de amostras integrais*. Geotecnia, vol. 19, pp. 23-56, 1977.
- SERAFIM, J. L. — *Influence of interstitial water on the behaviour of rock masses*. Chapter 3 in Rock Mechanics in Engineering Practice. Ed. Stagg and Zienkiewicz. John Wiley & Sons, London 1968.
- SMITH, M. — *Radioactive waste disposal*. World Tunnelling, Dec. 1988, pp. 270-278, 1988.
- TANG, D. H.; FRIND, E. O.; SUDICKY, E. A. — *Contaminant transport in fractured porous media: Analytical solution for a single fracture*, Water Resources Research, vol. 17, no. 3, pp. 555-564, 1981.
- TODD, D. K. — *Groundwater hydrology* (2nd edition). John Wiley & Sons. New York 1980.
- VOSS, R. F.; LAIBOWITZ, R. B.; ALESSANDRINI, E. I.— *Percolation and fractured properties of thin gold films*. In Mathematics and Physics of Disordered Media, Springer-Verlag, Berlin 1983.
- WALKER, W. — *Monitoring toxic chemical pollution from land disposal sites in humid regions*. Ground Water, vol. 12, no. 4, pp. 213-218, 1974.
- WELCH, J. E.; HARLOW, F. H.; SHANNON, J. P.; DALY, B. J. — *The Mac method: A computing technique for solving viscous incompressible, transient fluid flow problems involving free surfaces*. Report LA-3425, Los Alamos, NM, 146 pp. 1966.
- WILLIAMS, R. E.; WINTER, G. V.; BLOOMSBURG, G. L.; RAINSTON, D. R.— *Mine hidrology*. Society of Mining Engineers of AIME. Littleton, Colorado 1986.
- WITTKE, W.; BOSCH, G. — *Modell zur räumlichen Schadstoffausbreitung im Untergrund*. Vorträge des Seminars Geotechnische Fragestellungen bei Untertagedeponien und Transportvorgängen, Aachen, Okt. 1989.
- WITTKE, W. — *Rock Mechanics. Theory and applications with case histories*. Springer-Verlag, Berlin 1990.