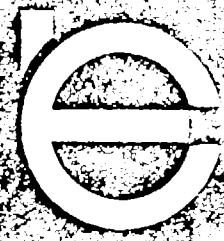


Atas

# 2º Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia



Associação Brasileira de Geologia de Engenharia

VOLUME 2

São Paulo

Novembro

1978

# DISPOSIÇÃO DE REJEITOS RADIOATIVOS DE ALTA ATIVIDADE EM FORMAÇÕES GEOLÓGICAS

GEÓLOGO LUIZ AUGUSTO MILANI MARTINS  
GEÓLOGO JORGE PACHECO DE CARVALHO BASTOS

COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR

## RESUMO

A disposição de rejeitos radioativos de alta atividade é o mais sério problema que a indústria nuclear deve resolver. Das soluções concebidas, a alternativa da disposição de rejeitos em formações geológicas apropriadas tem sido considerada como a mais realística e viável. Neste trabalho são descritos os métodos em estudo para a disposição geológica, assim como critérios, programas e análises que devem orientar a seleção de um local para repositório de rejeitos.

## I - INTRODUÇÃO

As etapas necessárias ao processo de produção de energia de fissão nuclear são conhecidas como ciclo do combustível nuclear. Para a operação de um "Light Water Reactor" (LWR), as etapas e atividades associadas são as seguintes (14):

- Mineração e produção do "yellow cake".....	(*) 792,4 Ci
- Conversão do "yellow cake" a UF <sub>6</sub> .....	113 Ci
- Enriquecimento isotópico .....	13,5 Ci
- Conversão e fabricação do combustível .....	13,5 Ci
- Operação do reator .....	15,2 x 10 <sup>9</sup> Ci
- Armazenamento do combustível usado .....	1,4 x 10 <sup>8</sup> Ci
- Reprocessamento do combustível .....	1,3 x 10 <sup>8</sup> Ci
- Armazenamento temporário do rejeito líquido .....	1,2 x 10 <sup>8</sup> Ci
- Tratamento (solidificação) e disposição final do rejeito de alta atividade .....	~ 10 <sup>8</sup> Ci

Embora hajam riscos ao ambiente e à saúde pública associados às primeiras etapas, aquelas a partir da operação do reator têm muito maior potencial para sérios impactos.

O reprocessamento do combustível permite a recuperação do urânio residual e plutônio para utilização posterior. Em contrapartida produz um rejeito líquido de alta atividade contendo essencialmente todos os produtos de fissão e demais elementos transurânicos.

A importância da execução eficaz da última etapa do ciclo do combustível evidencia-se imediatamente. A disposição de rejeitos radioativos de alta atividade não é apenas um problema técnico, mas também polí

---

(\*) Curie, unidade de atividade. 1 Ci = 3,7 x 10<sup>10</sup> desintegrações nucleares espontâneas por segundo.

tico e filosófico. Além disso a escala de tempo envolvida suscita questões acerca da nossa responsabilidade perante as futuras gerações.

## II - Concepções atuais para disposição de rejeitos radioativos de alta atividade

Disposição de rejeitos designa uma operação definitiva e segura que não supõe a recuperação posterior de rejeitos. É portanto distinta de armazenamento ou estocagem.

Os conceitos para disposição de rejeitos radioativos de alta atividade podem ser agrupados em duas classes gerais:

- Eliminação dos rejeitos da biosfera (transmutação, transporte extra-terrestre)
- Disposição dos rejeitos na Terra (calota polar, fundo do oceano, formações geológicas)

A viabilidade básica tanto da transmutação como da eliminação extraterrestre envolve a identificação de um sistema que forneça segurança adequada, um balanço energético favorável, uma contribuição efetiva à redução do estoque de rejeito a longo prazo e custo razoável. Até o presente nada foi conseguido neste sentido, ao contrário, tem sido sustentado, que o efeito global poderia bem ser um acréscimo de risco em comparação com a disposição do rejeito não particionado em apropriadas formações geológicas profundas (6).

A disposição de rejeitos tanto na calota polar como no fundo dos oceanos ainda que tecnicamente viáveis tem enfrentado objeções filosóficas e é quase certo que acordos internacionais restrinjam a prática a rejeitos de baixo nível de atividade ou a proibam totalmente.

A disposição de rejeitos em formações geológicas soa com a alternativa mais realística e viável. O principal atrativo deste conceito é que muitas formações geológicas têm permanecido estáveis por milhões de anos. Além disso, as formações geológicas oferecem os três requisitos básicos para armazenamento seguro de materiais radioativos: resfriamento, proteção e isolamento. Em um apropriado esquema de disposição a rocha envolvente funcionaria como um dissipador maciço de calor, fornecendo resfriamento. A profundidade de disposição proporcionaria um escudo contra radiação, virtualmente infinito, e a dimensão e integridade das formações rochosas forneceriam isolamento prevenindo o escape de material para a biosfera (4).

Consequentemente muitos países estão realizando ou planejando programas de pesquisa e desenvolvimento com o objetivo de demonstrar a viabilidade de uma formação geológica. Pesquisadores belgas e italianos pesquisam formações argilosas, os alemães ocidentais já utilizam a velha mina de sal de Asse para disposição de rejeitos de baixa e média atividade deste 1967. Os alemães orientais da mesma forma optaram por formações salinas em detrimento de outras possibilidades. Também os holandeses e norte-americanos têm planejado o aproveitamento de formações salinas enquanto as possibilidades de argilas, folhelhos, basaltos e rochas cristalinas vem sendo investigadas nos E.U.A. e Canadá (10).

## III - Disposição de rejeitos em formações geológicas

As alternativas em estudo para disposição de rejeitos líquidos ou sólidos em formações geológicas são:

- Cavidade subterrânea: Este método foi proposto originalmente para formações salinas acamadas mas pode ser aplicado a outros tipos de rocha. Incluem-se nesta alternativa a utilização de minas paralizadas como é o caso da mina de sal de Asse, na Alemanha e velhas minas de ferro

escavadas em granito, na Suécia.

Na mina de Asse, explorada de 1916 a 1964, cerca de 100 câmaras foram abertas para a extração do sal, e correspondem a um sistema com 15 andares que vão desde a profundidade de 490 metros até 800 metros, com um volume total de cerca de 3,5 milhões de metros cúbicos (2).

Para os canadenses (15), o conceito de cavidade subterrânea consistiria de uma rede de túneis, provavelmente em um nível único, a profundidade entre 300 a 2.000 metros. Os rejeitos seriam conduzidos por um poço até um salão subterrâneo e dali distribuídos pelos túneis onde seriam colocados em nichos escavados no piso. A densidade de armazenamento seria determinada pelo calor gerado pelo decaimento e não pelo volume de rejeito. Muitas áreas ainda são carentes de estudo como umidade da mina, tensão térmica, distribuição de temperatura, análises de segurança, técnicas de manuseio do rejeito, taxa de escavação, reaterro e fechamento do poço. Uma vez cheios, os repositórios seriam aterrados e selados.

- Fusão da rocha hospedeira: Este conceito engloba um grande número de alternativas específicas que diferem segundo o tipo e a forma do rejeito, geometria e técnica de colocação, extensão do envolvimento rejeito/rocha, etc. Nenhuma dessas alternativas foram investigadas extensivamente sendo, portanto, baseadas em cálculos preliminares, experimentos e conjecturas.

Em um dos métodos, o rejeito líquido seria injetado numa cavidade subterrânea a cerca de 200 m. de profundidade sob o local da instalação de reprocessamento. O líquido entraria rapidamente em ebulição, devido a energia de decaimento radioativo. Para manter a cavidade a temperaturas e pressões convenientes o sistema seria resfriado à água. O vapor resultante seria recirculado num sistema fechado. Em seguida a um apropriado período de adição de rejeito e contínua evaporação, o conteúdo da cavidade e a rocha envolvente seriam permitidos entrar em fusão, com a interrupção do resfriamento e a obturação dos acessos à cavidade. Finalmente o fundido iria solidificar-se aprisionando permanentemente o resíduo radioativo numa matriz insolúvel. Uma cavidade com cerca de 11m. de raio ou 5.500 m<sup>3</sup> de volume poderia abrigar rejeitos de uma instalação de reprocessamento à taxa de 5 ton/dia durante 25 anos. A fusão duraria por cerca de 65 anos ao fim dos quais o raio máximo de material fundido seria cerca de 96 metros (11).

Outra alternativa seria a colocação do rejeito solidificado em barris em cavidades profundas. Os barris e seu conteúdo se fundiriam em uma esfera de rocha como na opção descrita anteriormente.

O conceito seguinte, chamado "deep rock disposal" (DRD), utiliza apenas um furo de grande diâmetro (0,3 - 3m) e profundidade (2 - 3km), prescindindo da cavidade terminal (12). Os rejeitos sólidos seriam então colocados no fundo do poço e provocariam a fusão da rocha hospedeira. Correntes de convecção provocariam a mistura do rejeito com a rocha. À medida em que a superfície fundida aumentasse e a taxa de aquecimento diminuísse o sistema atingiria um ponto onde as perdas de calor por condução excederiam o calor gerado e a mistura começaria a se solidificar. Após solidificação completa (5-20 anos), o rejeito teria sido substancialmente diluído na rocha e o resultado seria um produto de baixa lixiviabilidade. Após a resolidificação da matriz o topo da cavidade fundida seria selado com vidro de baixo ponto de fusão, e o restante do poço poderia ser enchido com concreto.

- Matriz de furos para injeção: Esta alternativa envolve a injeção de rejeito líquido em aquíferos isolados ou campos petrolíferos esgotados. Nos E.U.A. esta técnica vem sendo aplicada há longo tempo por companhias

de petróleo para reinjetar nos campos petrolíferos a salmora trazida à superfície durante a produção de óleo. Mais recentemente a técnica tem sido usada com maior frequência para a disposição de efluentes industriais e rejeitos radioativos de baixa atividade contendo tritium (9).

- Fraturamento hidráulico por injeção: Este conceito envolve a mistura de rejeito líquido com cimento e outros aditivos para formar uma calda que é injetada no fundo de um poço profundo (200 - 300 m). A formação geológica mais apropriada ao processo é folhelho de baixa permeabilidade com acamadamento aproximadamente horizontal de modo que o fraturamento produzido pela injeção seja também horizontal. Esta técnica é uma operação de rotina para a disposição de líquidos radioativos de atividade média no Oak Ridge National Laboratory - U.S.A. (16).

- Furo profundo: A disposição de rejeitos de alta atividade em furos profundos de até 16 km. tem sido sugerida como método seguro de remoção prolongada de rejeito da biosfera. O método entretanto esbarra em dificuldades técnicas e econômicas.

Qualquer projeto visando a disposição de rejeitos líquidos em formações sedimentares é extremamente delicado, mesmo na hipótese de os rejeitos fundirem a rocha e posteriormente solidificarem-se. Todas as rochas sedimentares apresentam alguma permeabilidade, capacidade de espalhar a água e difundir contaminantes. Parece, portanto, inconcebível que grandes volumes de rejeitos líquidos colocados em uma rocha sedimentar, com excessão talvez de sal, não possam causar contaminação da água subterrânea e contaminação ambiental. As rochas metamórficas não fraturadas e ígneas intrusivas podem ser mais adequadas, a grandes profundidades, à disposição de rejeitos líquidos. Entretanto, fraturamentos podem desenvolver-se como resultado da fusão e expansão da rocha hospedeira e os efeitos do fluxo de água por longos períodos irão requerer aprecação cuidadosa. Parece óbvio também, por razões de segurança, que o transporte em larga escala de rejeitos líquidos de alta atividade deve ser evitado, significando que os rejeitos de alta atividade devem ser solidificados à primeira oportunidade prática.

#### IV - Critérios para seleção de locais para repositório

A seleção de um ambiente geológico para repositório de rejeitos radioativos de alta atividade deve ser baseada em critérios que atestem conclusivamente a capacidade da formação conter os rejeitos por um mínimo de 100.000 anos.

Os ingleses (8) definiram 8 conjuntos de critérios que incluem:

- Litologia e distribuição espacial da formação geológica.
- Características físico-químicas da formação em relação ao rejeito e "containers".
- Condições hidrogeológicas.
- Efeitos de mudança climática.
- Rotas de infiltração para a superfície.
- Viabilidade de engenharia.
- Interação entre os diversos critérios.
- Identificação da faixa de regimes aos quais a área poderá estar sujeita nos 100.000 anos seguintes.

No programa em desenvolvimento pelo Canadá (15), foram considerados tres grupos de fatores:

Fatores locais e ambientais:

- Sismicidade
- População e densidade industrial
- Acesso
- Topografia

- Hidrologia
- Mudanças geológicas a longo prazo como glaciação e oscilação do nível do mar.

Fatores relativos à massa e substância rochosa:

- Homogeneidade e extensão da formação
- Ocorrência e caráter das maiores estruturas
- Existência de descontinuidades
- Composição petrológica e mineralógica
- Propriedades de troca iônica
- Permeabilidade e porosidade
- Valor econômico
- Propriedades térmicas tais como condutividade e expansão
- Propriedades mecânicas como resistência e módulos de elasticidade
- Propriedades físico-químicas
- Resposta à radiação

Fatores legais e políticos:

- Propriedade da terra
- Direitos existentes
- Possíveis conflitos com outras demandas de uso da terra
- Segurança do local
- Propriedade do rejeito
- Propriedade do repositório

Os fatores geológicos críticos são os relacionados à água, permeabilidade e troca iônica porque a única maneira natural concebível de liberação de rejeito para a biosfera é por transporte aquoso via fraturas e falhas principalmente. A água como solvente universal e principal agente geoquímico na parte superior da crosta, pode dissolver e transportar praticamente qualquer rejeito com o qual ela entrar em contato. Por outro lado, a ocorrência e fluxo de água são controlados por características estratigráficas e estruturais de uma área. Basicamente a água subterrânea tem a propriedade de fluir segundo o gradiente hidráulico, de áreas de alta pressão para áreas de baixa pressão, porém a ocorrência de descontinuidades na rocha torna muito complexo o estabelecimento de modelos e direção de fluxo. Uma falha em subsuperfície pode facilitar ou impedir o fluxo de água subterrânea. Falhas profundas podem permitir rápida circulação de água subterrânea para a superfície como pode ser atestado pela ocorrência de fontes termais. Neste raciocínio, áreas sujeitas a atividade sísmica superior à VII na Escala de Mercalli Modificada, devem ser descartadas, pois, podem ter o fluxo de água subterrânea modificado ou reativado por sismos (5).

Portanto, a questão da possibilidade de lixiviação por água subterrânea imporá o principal critério para a seleção de uma formação geológica. Como garantia adicional os rejeitos devem ser dispostos sob forma sólida.

A despeito de todas as restrições, não deve haver dificuldades para se encontrar sítios adequados, pois, o requerimento de área não é grande. Por exemplo, tem sido estimado que menos de 800 hectares seriam necessários para a disposição de todos os rejeitos radioativos gerados pela indústria americana até o fim do século (1).

#### V - Apreciação de alguns tipos litológicos para repositório:

- Rochas sedimentares: As rochas sedimentares granulares são geralmente desfavoráveis a disposição de rejeitos radioativos, devido à elevada permeabilidade.

Sedimentos argilosos apresentam relativamente melhores condições

para alojar rejeitos. O estudo de corpos impermeáveis de argila e folhelhos para esta finalidade não tem recebido a adequada atenção em virtude da maior prioridade dada aos depósitos salinos. A baixa permeabilidade, relativamente alta plasticidade, grande capacidade de troca iônica e ampla distribuição das argilas e folhelhos são fatores favoráveis. As desvantagens são os problemas de mineração, sondagens, presença de fluidos intersticiais, matéria orgânica e minerais instáveis quando aquecidos (13).

Recentemente, a evidência da capacidade dos sedimentos argilosos em conterem os radionuclídeos foi confirmada pela constatação da existência de um reator atômico natural que "operou" há 1,8 bilhões de anos em Oklo, no Gabão. Nesta área, são encontradas mineralizações de urânio em uma camada de arenito contida em folhelho. O conteúdo de U 235 é nitidamente inferior aos valores normais o que só pode ser explicado pelas condições capazes de sustentar uma reação em cadeia que permitiria a fissão deste elemento. Os estudos geoquímicos realizados na área, mostraram que os nuclídeos foram contidos na zona em que se efetivou a reação. Especialmente o Pu 239 decaiu na localização exata de sua geração (6).

Rochas carbonatadas são rochas de alta permeabilidade e atacáveis quimicamente, tornado-se desfavoráveis para a disposição de rejeitos radioativos.

Formações salinas possuem muitas propriedades que as tornam um meio ideal para a disposição de rejeitos radioativos (5):

- Plasticidade natural.
- Alta resistência à compressão.
- Condutividade térmica maior do que qualquer outra rocha.
- Propriedades de proteção contra raios gama, similares às do concreto.
- Porosidade e permeabilidade quase nulas, o que proporciona completo isolamento da biosfera.

Na mina de Asse por exemplo, escavada até 800 metros de profundidade, algumas câmaras que chegam a ter dimensões de 60 metros de comprimento, 45 metros de largura e pé direito de cerca de 15 metros, permanecem autosustentadas em virtude da impermeabilidade e plasticidade do salgema (2). Já a maiores profundidades a capacidade de fluxo da massa salina, pode acarretar problemas sérios para a disposição de rejeitos radioativos. Outro problema a ser avaliado é a alta solubilidade do sal e o constante perigo de os resíduos radioativos serem atingidos pela água subterrânea. Dissolução de formações salinas a pouca profundidade por efeito de águas subterrâneas é um problema comum.

- Rochas metamórficas: As rochas metamórficas são consideradas mais resistentes e menos permeáveis que seus equivalentes sedimentares, sendo no entanto, menos resistentes e mais permeáveis que a maioria das rochas ígneas intrusivas.

Gnaisse é a denominação de tipos litológicos caracterizados pela alternância de bandas de minerais granulares e minerais xistosos. É pois uma rocha heterogênea com propriedades físicas e químicas variáveis. Por causa de sua variabilidade dentro de áreas pequenas o gnaisse demandaria mais estudos que rochas ígneas intrusivas. Gnaisses em geral tem permeabilidade baixa e em profundidade podem ser livres da circulação de água subterrânea. Devido a sua larga distribuição geográfica em áreas tectonicamente estáveis o gnaisse pode reunir condições favoráveis à disposição de rejeitos.

Xistos variam amplamente em mineralogia e genese e portanto em suas propriedades físicas e químicas. Sua adequabilidade para disposição de rejeitos dependerá do tipo litológico em questão.

Filitos e ardósias conservam dos sedimentos originais a grande capacidade de troca iônica. Podem constituir corpos rochosos praticamente impermeáveis especialmente em grandes profundidades.

Anfibolito é uma rocha derivada de basaltos, gabros ou similares. É muito resistente e mais homogênea que o gnaisse, podendo em condições favoráveis ser indicado para repositório de rejeitos.

- Rochas ígneas: As rochas plutônicas apresentam baixa porosidade e permeabilidade, enquanto que as vulcânicas apresentam porosidade e permeabilidade de muito baixa a extremamente alta. As rochas plutônicas entretanto, quando cortadas por sistemas de juntas e fraturas, tornam-se permeáveis ao fluxo da água subterrânea. Existem algumas evidências de que as formações intrusivas mais profundas, possam ser livres da circulação da água subterrânea, pois as fraturas são mantidas fechadas pelo efeito da pressão de carga. Corpos de rocha intrusiva apresentam vantagens adicionais: são relativamente homogêneos em sua composição, desprovidos de interesse econômico em sua parte central e estruturalmente estáveis e resistentes.

Serpentinitos apresentam certas propriedades adequadas à disposição de rejeitos tais como comportamento plástico e capacidade de fluxo a profundidade e temperatura elevadas, o que os torna impermeável. Em adição possuem baixo coeficiente de expansão térmica (17).

Rochas vulcânicas embora sejam quimicamente idênticas a seus equivalentes intrusivos, apresentam propriedades físicas em geral nitidamente diferentes, e mesmo lavas e tufos tendo composições químicas idênticas, diferem enormemente nas propriedades físicas.

Basaltos, pela própria origem, são geralmente fraturados e brechados e apresentam zonas de alta permeabilidade. Certos derrames isolados são entretanto praticamente impermeáveis embora sejam pouco espessos. O estudo dos basaltos de Columbia River, E.U.A., indicou que certas unidades apresentam propriedades químicas e físicas que as tornam adequadas para a disposição de rejeitos (3).

## VI - Programas para seleção de locais

Os E.U.A. estão desenvolvendo um programa denominado National Waste Terminal Storage, sob o patrocínio do Department of Energy, que objetiva a seleção de um repositório Federal para disposição de rejeitos radioativos de alta atividade. O programa é caracterizado por 8 etapas distintas (18):

### 1 - Identificação de formações de interesse

Nesta etapa, é feita primeiramente, uma revisão, baseada apenas no conhecimento geral das propriedades fundamentais do tipo de rocha envolvido.

### 2 - Campanhas de reconhecimento

Tem como finalidade a coleta de todos os dados disponíveis sobre as propriedades e características da formação, relevantes à disposição de rejeitos. Estas informações podem incluir estrutura, estratigrafia, hidrologia, mineralogia e petrologia, recursos naturais e características gerais da superfície. Pequenas regiões serão identificadas para posteriores estudos geológicos de áreas.

### 3 - Testes "in situ"

Simultaneamente aos estudos geológicos de área são conduzidos testes que variarão da simples instalação de aquecedores elétricos em nichos em afloramentos de superfície, até testes extensivamente instrumentados, em cavidades construídas especialmente, na profundidade de uma ins



talação piloto futura.

#### 4 - Estudos geológicos de áreas

Incluem sondagens a uma densidade aproximada de 6 a 10 furos por 1.000 milhas quadradas, mapeamento geológico, estudos hidrológicos, levantamentos geofísicos e estudos geológicos adicionais. Ao final destes estudos, a conveniência da área é revista novamente e caso ainda pareça adequada, serão identificadas uma ou mais locações específicas para investigações mais detalhadas ainda.

#### 5 - Estudos detalhados de confirmação

São destinados a locações específicas de cerca de 2-5 milhas quadradas cada. As investigações envolvem sondagens e testes em cada locação e estudos geológicos específicos suplementares.

#### 6 - Estabelecimento de instalação piloto

Após as revisões adequadas, será selecionado um local e construída uma instalação piloto, para avaliar as operações de manuseio e armazenamento utilizando recipientes reais de rejeito de alta atividade, e para confirmar todos os cálculos de projeto.

#### 7 - Expansão das operações da instalação piloto

Os dados obtidos durante a operação da instalação piloto seriam usados para projetar a expansão das instalações que serão operadas até que tenha sido demonstrado que ela pode receber e armazenar rejeito conforme projetado; que todos os critérios para um repositório federal foram satisfeitos; que não foi encontrada nenhuma anomalia na formação geológica.

#### 8 - Conversão da instalação piloto em Repositório Federal

O programa acima teve dotação orçamentária de US\$ 4,50 milhões em 1976 e US\$ 33,70 milhões em 1977.

O programa da AECL - Atomic Energy of Canadá Limited (15) é similar ao programa americano. Contudo o programa enfatiza o estudo de rochas Pré-Cambrianas do Escudo Canadense. Em linhas gerais as etapas seriam:

1 - Seleção de rochas plutônicas através de trabalhos geológicos existentes, mapas, relatórios e imagens diversas. Cerca de 20 a 30 locais seriam selecionados.

2 - Seleção de cerca de 6 dos locais mais promissores para reconhecimento de campo. Envolve mapeamento e amostragem.

3 - Estudo detalhado dos 3 sítios mais promissores. Envolve mapeamento geológico de detalhe, sondagens, monitoração sísmológica, geofísica regional e estudos hidrológicos e geohidrológicos.

4 - Se a rocha plutônica provar-se aceitável, o sítio mais conveniente será escolhido para ser estudado extensivamente. Esta etapa deve terminar em 1980 quando se decidirá se o sítio em particular é apropriado. Se for, será iniciada a escavação do poço.

Paralelamente a estas etapas de avaliação serão realizados estudos de laboratório e experiências in situ, similares ao programa americano.

O programa canadense completo deverá custar pelo menos US\$ 50 milhões, baseado numa estimativa de 1970. Estima-se que pelo ano 2000 o repositório poderá estar pronto para receber rejeitos radioativos. Esta data coincide com o início das operações de reprocessamento no Canadá.

A constatação de que os programas canadenses e americanos são similares, nos permitiria concluir que um programa brasileiro deverá se

ater também àquelas linhas gerais. É óbvio que o sucesso do Programa Nuclear Brasileiro, particularmente no que se refere a implantação de usina de reprocessamento de combustível, depende grandemente de uma solução segura e satisfatória para o problema da disposição de rejeitos radioativos de alta atividade.

## VII - Predição e avaliação de riscos

O processo de avaliação de risco associado a um sistema tecnológico de disposição de rejeitos em subsuperfície, requer a identificação e caracterização de fatores que possam constituir-se em perigo potencial. Deve ser estabelecida a probabilidade e magnitude dos efeitos de um eventual acidente e também uma metodologia na utilização destas informações para aquilatar o grau de risco no sistema. Smith (14) dedicou especial atenção a este problema.

A despeito da natureza da formação escolhida, a análise de segurança de qualquer esquema de disposição geológica, terá que basear-se em uma convincente demonstração de que os rejeitos serão contidos por um período de pelo menos 100.000 anos. Portanto, qualquer projeto de sistema de disposição geológica deve levar em consideração a ocorrência de alterações geológicas extremas sem qualquer dano à capacidade de confinamento do repositório. Isto requer a capacidade de se estabelecer condições geológicas confiáveis. Como a maioria dos processos geológicos são determinísticos por natureza e as mudanças geológicas, função de inúmeros parâmetros, na prática, a capacidade de se realizar previsões geológicas confiáveis é bastante limitada. Seria possível, talvez, com base nos processos geológicos que ocorreram durante o período Quaternário, estabelecer com relativa segurança as mudanças geológicas máximas que poderão ocorrer durante os próximos 100.000 anos.

A análise de segurança na instalação de um depósito de rejeito radioativo deve levar em consideração também os fatores advindos da ação do próprio homem frente ao meio ambiente, especialmente em futuras gerações. Isto poderia ocorrer de duas formas distintas:

- através de mudanças drásticas dos parâmetros ambientais que afetassem o local de deposição do material radioativo. Ex.: indução de alterações climáticas que facilitassem o processo erosivo ou aumentassem a probabilidade da água subterrânea entrar em contato com o rejeito.
- através de intrusão direta no rejeito. Ex.: possibilidade de a área vir a ser atingida por sondagem ou outra atividade de mineração, acidentalmente, por perda dos registros acerca dos depósitos de rejeitos. Estes riscos caem fora do âmbito da análise científica (6,7).

## VIII - BIBLIOGRAFIA

- 1 - ALFREDSON, P.G. & LEVINS, D.M. Radioactive waste management. AAEC/IP3. 1975. 28 p
- 2 - ARRUDA, P.R. Relatório de visita às minas de sal de Asse, Alemanha, CNEN, 1974.
- 3 - Atlantic Richfield Handford Company. Preliminary feasibility study on storage of radioactive wastes in Columbia River basalts. ARH-SR-137. 1976. 1. 72 p
- 4 - DYNE, P.J. Waste management in Canadian Nuclear Program. AECL/5249. 1975. 19 p
- 5 - EKREN, E.B. et al. Geologic and hydrologic considerations for various concepts of high-level radioactive waste disposal in conterminous United States. U.S.G.S. TID-27188. 1974. 205

- 6 - GERA, F. Radioactive waste disposal in geological formations. IAEA-CN-36/313. 1977. 12 p
- 7 - GERA, F. & JACOBS, D.G. Considerations in the long-term management of high-level radioactive wastes. ORNL-4762. 1972. 151 p
- 8 - GRAY, D.A. et al. Disposal of highly active, solid radioactive wastes into geological formations - Relevant geological criteria for the United Kingdom. Abstract. IGS-76/12. 1976.
- 9 - HILD, W. et al. Deep-well disposal of tritium containing liquid effluents. in Management of Radioactive Wastes from Fuel Reprocessing. Proceedings. Paris. OECD. 1973. 1003-1027.
- 10 - LENNEMANN, W. Management of radioactive wastes from the nuclear fuel cycle. Atomic Energy Review, 1976. 14, (2): 421-429.
- 11 - LEWIS, A.E. et al. Placement and self processing of nuclear fuel reprocessing wastes in deep underground cavities. in management of Radioactive Waste from Fuel Reprocessing. Proceedings. Paris. OECD. 1973. 933-948.
- 12 - LINCOLN, R.C. & SNYDER, A.W. Disposal in continental geologic formations, SAND-76-5568. 1976. 37 p
- 13 - MAREWETHER, E.A. et al. Shale, mudstone, and claystone as potential host rocks for underground emplacement of waste. USGS-4339-5. 1973. 44 p
- 14 - SMITH, C.F. & KASTENBERG, W.E. On risk assessment of high level radioactive waste disposal. Nucl. Eng. Des., 39 (2/3): 293-333.
- 15 - TAMMEMAGI, H.Y. Geological disposal of radioactive wastes - The Canadian Development Program. AECL-5392. 1976. 20 p
- 16 - WEEREN, H.O. An evaluation of waste disposal by shale fracturing. ORNL-TM-5209. 1976. 49 p
- 17 - WENNER, D.B. Geologic feasibility of talc and serpentinite bodies from the Appalachian Mountain region of eastern United States with regard to siting of radioactive-waste repositories. Y/OWI/SUB-4496 /2. 1976. 30 p
- 18 - ZERBY, C.D. & Mc CLAIN, W.C. Waste isolation in geologic formations in the U.S.A. YOWI-7. 1976. 22 p