

REPOSITÓRIOS

Carolina Braccini Freire¹, Clédola Cássia Oliveira de Tello²
 Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear – CDTN/CNEN
 Avenida Presidente Antônio Carlos, 6.627, Campus da UFMG, Pampulha CEP 31270-901
 Belo Horizonte, Minas Gerais, MG, Brasil
 cbf@cdtn.br¹, teloc@cdtn.br²

RESUMO

O uso da energia nuclear vem aumentando em todas as áreas. Por isso o gerenciamento do rejeito radioativo está em contínuo desenvolvimento para satisfazer as condições nacionais e internacionais estabelecidas. O objetivo final é garantir que não haja nenhuma contaminação ao público e ao ambiente e que as exposições a doses sejam menores do que os limites estabelecidos pela proteção radiológica. O conceito de multibarreiras para o repositório é reconhecido internacionalmente. Entre os tipos de repositório o mais usado são: próximo a superfície, formações geológicas e os de deposição em cavidades rochosas. Este artigo explica o conceito e os tipos de repositórios e são dados alguns exemplos deles.

Descritores: *Repositório, rejeito radioativo.*

INTRODUÇÃO

A gerência de rejeitos radioativos (GRR) é definida como o conjunto de atividades administrativas e técnicas envolvidas na coleta, segregação, manuseio, tratamento, condicionamento, transporte, armazenamento, controle e deposição do rejeito radioativo [1]. Assim a principal tarefa de um sistema de gerenciamento de rejeitos é fazer com que todas estas atividades sejam realizadas em conformidade com os requisitos nacionais e obrigações internacionais, levando em consideração os fatores econômicos e sócio-políticos envolvidos. A aplicação ótima de tecnologia relacionada à minimização, tratamento, condicionamento e armazenamento ou deposição dos rejeitos é necessária pelos seguintes fatores [2].

ABSTRACT

The use of the nuclear energy is increasing in all areas. Then the radioactive waste management is in continuous development to comply the national and international established requirements. The final objective is to assure that it will not have any contamination of the public or of the environmental, and that the exposition doses will be lower than the radiological protection limits. The multibarrier concept for the repository is international recognize. Among the repository types the most used are: near surface, geological and in deposition in rock cavities. This article explain the concept and the types of repository and gives some examples of them.

Key words: *Repository, radioactive waste.*

- os critérios dos órgãos reguladores para cada etapa da gerência de rejeitos, como transporte, armazenamento e deposição, tornam-se mais restritivos a cada dia;
- a deposição direta próxima à superfície de rejeito radioativo no solo (sem tratamento, imobilização ou embalagem apropriadas) não é aceitável;
- os rejeitos radioativos podem ser dispostos somente em instalações especialmente licenciadas para este fim;
- devido aos custos na deposição de rejeitos, reduzir o seu volume oferece uma grande vantagem econômica e social;
- avanços recentes em várias tecnologias adequadas para a gerência de RR têm tornado sua aplicação (custo/benefício) mais fácil de implementar;

- objetivos ótimos em termos de proteção segura à saúde humana e ao meio ambiente podem ser alcançados, se as tecnologias para a GRR são aplicadas com prudência;
- com a crescente inquietação social relativa ao uso ótimo da terra e com o aumento da oposição do público à colocação de instalações de RR perto de suas localidades, o desenvolvimento de novas instalações é um processo caro, prolongado e difícil.

Devido ao contínuo desenvolvimento da gerência de rejeitos, a indústria nuclear para usos pacíficos é talvez a única indústria, na qual haja realmente a preocupação em reduzir-se a quantidade de rejeito gerado e em tratá-lo adequadamente dentro de padrões nacionais e internacionais. Adicionalmente é mantido pela AIEA um cadastro de todo e qualquer incidente envolvendo a área nuclear. Assim têm-se registros da geração, tratamentos e locais de armazenamento temporário e definitivo de todos os rejeitos gerados na área nuclear. Verifica-se que, em se tratando de produção de energia, a opção nuclear além de necessitar de menor quantidade de combustível e menor área de construção, ainda gera menos rejeito por MW de energia produzido em comparação com outras fontes.

O impacto ambiental causado pela deposição dos rejeitos depende de uma série de fatores, como da qualidade do rejeito tratado, de suas embalagens, das barreiras de engenharia e do sítio selecionado para o repositório, principalmente dos caminhos de liberação dos contaminantes para o meio ambiente. A migração dos radionuclídeos, através dos diversos meios que compõem o sistema de deposição, é considerada a via mais importante para esta liberação [3, 4, 5].

A avaliação do impacto ambiental tem como meta fornecer as premissas para o projeto do repositório e, conseqüentemente, para os critérios de aceitação dos produtos de rejeito que serão armazenados. O objetivo final é assegurar que não haja contaminação do meio ambiente nem dos seres vivos e que os níveis de exposição estejam dentro dos limites das normas de radioproteção. Esta avaliação é feita através de modelos matemáticos, cujos principais parâmetros são os dados de migração dos radionuclídeos nos meios que

compõem o sistema de deposição (produto de rejeito, material de recheio, barreiras de engenharia, sítio) [5, 6, 7].

Internacionalmente tem sido considerado o conceito de barreiras múltiplas para repositórios de rejeitos radioativos. Desta forma as medidas de proteção são fornecidas pela aplicação deste princípio, levando-se em consideração interdependências entre as várias etapas da gerência de rejeitos. As múltiplas barreiras são apontadas como isolamento suficiente do rejeito do meio ambiente e limitação de liberações possíveis dos materiais radioativos, assegurando que falhas ou combinações de falhas, que poderiam levar a significantes conseqüências radiológicas, sejam muito pouco prováveis. Por isto é necessário que haja uma série de "critérios para a aceitação de rejeitos" e que só os produtos que atendam a estes critérios sejam aceitos para a deposição [2].

A Agência Internacional de Energia Atômica (AIEA) engloba entre as barreiras de engenharia as seguintes partes do sistema de deposição: o produto de rejeito, a embalagem e o material tampão ou de recheio [3]. Na tabela 1 são apresentadas estas barreiras, suas funções e exemplos.

As barreiras de engenharia são projetadas para fornecer completo confinamento dos radionuclídeos presentes nos rejeitos por um período predeterminado de algumas centenas a milhares de anos. Depois deste tempo elas podem ser degradadas, permitindo a penetração da água subterrânea no material de rejeito, mudando então sua função para limitadoras da liberação dos radionuclídeos dissolvidos, conforme eles se movem no ambiente geológico.

Para predizer a efetividade das barreiras de engenharia quantitativamente como função do tempo, o projetista precisa de informações sobre suas propriedades físicas e químicas, como também sobre os processos geológicos do sítio que possam mudar essas propriedades.

O primeiro papel do produto de rejeito é restringir a liberação dos radionuclídeos nele contidos. Seus parâmetros mais importantes são: a estabilidade, a distribuição dos radionuclídeos na matriz e a taxa de degradação física e química da matriz [3].

Para os rejeitos de baixo e médio nível (por exemplo: concentrados de evaporador, lamas ou sólidos compactados) é geralmente usada uma matriz de solidificação, como cimento, betume, polímero, na qual eles são incorporados.

O rejeito combustível de baixo nível, como roupa, plástico, papel ou madeira, deve ser preferencialmente incinerado e as cinzas incorporadas em uma matriz, a menos que seja possível estocá-las até que os radionuclídeos decaiam a níveis insignificantes.

Tabela 1: Barreiras de engenharia e suas funções [3].

BARREIRA DE ENGENHARIA	FUNÇÃO	E X E M P L O S	
		ALTO NÍVEL	BAIXO NÍVEL
Produto de Rejeito	Imobilização dos radionuclídeos	Vidro, "synroc", "pellets" de combustível gasto	Cimento, betume e resinas
Embalagem de Rejeito	Contenção	"Canister" de aço, titânio, casco de ferro, cerâmica ou metal-cerâmico, cobre	Tambores de aço
Tampão ou Recheio	Estabilizar as aberturas no subsolo, retardar o acesso da água subterrânea e a liberação ou transporte dos radionuclídeos	Bentonita, mistura de rocha moída, argila Para selar usam--se também resinas, betume e cimento	Areia, solo argila, e concreto

HISTÓRICO

O primeiro depósito de rejeito radioativo do mundo data de 1944, em Oak Ridge, Tennessee, EUA. Este depósito, definido para "vidrarias quebradas ativamente contaminadas ou materiais não suficientemente limpos para serem usados em outros trabalhos", era uma simples trincheira, cheia de rejeitos não condicionados, em um local em Oak Ridge. Propostas similares foram adotadas por outras instalações nucleares e geradoras de rejeito nos Estados Unidos e em outros países [8].

Outra proposta de deposição, que ocorreu entre 1949 e 1982, foi o descarregamento em massa de embalagens de rejeitos de baixo nível em áreas selecionadas do oceano. Descarregamentos foram realizados nos EUA em diferentes locais do Oceano Atlântico e Oceano Pacífico, entre 1946 e meados de 1960. Desde 1970, os EUA não têm realizado mais este tipo de deposição [9]. De 1967 até 1982, as operações foram realizadas juntamente com a Agência de Energia Nuclear – NEA (Nuclear Energy Agency), uma agência especializada da Organização para a Cooperação e o Desenvolvimento Econômico – OECD (Organisation for Economic Co-operation and Development), ou sob sua supervisão, sendo suspensa em 1983, seguindo as ordens da

Convenção de Deposição de Londres - LDC (London Dumping Convention). Não houve um requerimento legal para esta suspensão; a deposição em ambientes continentais foi decidida por participantes de um moratorium voluntário.

Após a suspensão, a LDC designou a AIEA como autoridade internacional competente com relação a deposição marítima do rejeito radioativo, que definiu os tipos de "rejeito de alto nível inadequados para descarregamento em oceano", utilizando bases radiológicas e oceanográficas e para fazer recomendações com referência às condições e métodos para esta atividade. Um documento com recomendações, baseado nos resultados do "Technical Committee Meeting" realizado em Viena, de 30 de agosto a 3 de setembro de 1982, foi então elaborado. Neste documento, incluem-se as necessidades de avaliação ambiental, a descrição das características do rejeito e do local mais apropriado no oceano e a avaliação do impacto da operação do confinamento, requeridas para permitir deposições no oceano de rejeito radioativo [10].

Desde 1993 ficou totalmente proibida a deposição no oceano de qualquer tipo de rejeito radioativo. Esta decisão foi tomada por Partes Contratantes da LDC, não considerando somente o embasamento científico e

técnico, como também as questões sociais e políticas [11].

Durante a história do desenvolvimento dos repositórios, em meados de 1974, outros conceitos de deposição foram examinados incluindo a deposição no espaço, em buracos escavados profundos, abaixo da superfície de geleiras etc. Mas todos estes conceitos foram julgados como impraticáveis ou inseguros [12].

SISTEMAS DE DEPOSIÇÃO

Para eliminar/minimizar o risco do rejeito radioativo, são discutidas duas rotas de ação contrastantes, mas fundamentais:

- Isolamento do rejeito durante o tempo adequado para decaimento dos radionuclídeos até níveis insignificantes e
- Dispersão e diluição dos radionuclídeos no meio ambiente.

Estes dois caminhos de ação são de fato necessários e complementares para o gerenciamento do rejeito radioativo, pois de um lado é impraticável reter e conter toda a radioatividade do rejeito e, de outro, é inaceitável liberar todo ele para o ambiente. Este balanço entre conter e dispersar é complexo. A estratégia escolhida pela indústria nuclear para a grande maioria de seus rejeitos é a de contê-los em repositório, com a vantagem de mantê-los isolados do ambiente [9].

O armazenamento dos rejeitos radioativos pode ser inicial, intermediário, provisório ou definitivo. Segundo a Norma CNEN-NE 6.06 [13], os armazenamentos iniciais são definidos como "armazenagem temporária de rejeitos radioativos no espaço físico da instalação que os tenha gerado". Os depósitos intermediários são aqueles destinados a receber e, eventualmente, acondicionar rejeitos radioativos, objetivando a sua futura reutilização ou remoção para depósito final e os depósitos provisórios são aqueles para receber os rejeitos radioativos provenientes de áreas atingidas por acidentes com materiais radioativos.

O repositório, também designado como depósito final, é o local destinado a receber os rejeitos radioativos, depois de tratados e condicionados, mantendo-os de forma segura, no tempo que se fizer necessário à proteção e segurança do homem e do meio ambiente.

Para isto, a fase de seleção e escolha do local do repositório deve ser bastante criteriosa e cuidadosa, devendo contar com a participação de profissionais de diversas áreas de atuação, tais como hidrologia, geologia, ecologia, biologia, química, física de radiação, meteorologia e engenharia, além de assessoria jurídica, como prevê a Norma 6.06 [13].

O repositório, definido como armazenamento definitivo do rejeito, sem a intenção de removê-lo, receberá rejeitos provenientes de outros depósitos, tais como dos depósitos iniciais, depósitos intermediários e depósitos provisórios. Havendo necessidade, o rejeito poderá ser recuperado, sendo totalmente impossível no caso da liberação para o ambiente.

A deposição é a etapa final do gerenciamento dos rejeitos radioativos incluindo aqueles do ciclo do combustível nuclear e de outros tipos de atividades envolvendo energia nuclear e radioisótopos. Tem sido objeto de muitos programas de P&D, estudos internacionais, publicações e controvérsias entre membros do público e pesquisadores [9].

As práticas de deposição de rejeito incluem um número de opções adotadas em diferentes países. As mais usuais são:

- Deposição próxima à superfície;
- Deposição em formação geológica profunda e
- Deposição em cavernas de profundidade intermediárias.

Um sistema de deposição particular dependerá do tipo de rejeito, das condições do local e da aceitação sócio-política. A disponibilidade do sistema de deposição pode influenciar, mais adiante, a forma do rejeito condicionado e a sua embalagem, além da compatibilidade de um em relação ao outro.

Deposição próxima à superfície

O método mais comum para deposição de rejeito de baixo e médio nível consiste no seu confinamento em profundidade relativamente pequena, usualmente menor do que 20 metros. A colocação pode ser em trincheiras simples ou em estruturas de engenharia.

Segundo a AIEA a opção preferencial para deposição de rejeitos radioativos de meia-vida curta e de baixo e médio nível de radiação são

instalações próximas à superfície. As várias opções para repositórios próximos à superfície podem ser sumariadas em uma série de conceitos genéricos descritos como [14].

- Trincheira coberta – Este é o sistema de deposição mais antigo e simples e consiste em colocar o embalado de rejeito em sua embalagem dentro de trincheiras escavadas, cobrindo-as com o solo. O sucesso desta deposição vai depender da capacidade do sistema de prevenir a mobilização e a migração de radionuclídeos, ou seja, da capacidade de sorção do material do solo. Ele deve ter características adicionais para contribuir na retenção de radionuclídeos no local da deposição. Este sistema foi utilizado no repositório em Drigg, no Reino Unido.
- Galeria Fechada – Este consiste em galerias de concreto, onde são colocadas os embalados de rejeito. Os espaços vazios entre as galerias e a embalagem do rejeito são preenchidos com material de recheio (cimento, argila ou solo) e a galeria fechada pode ser selada com asfalto, por exemplo. A estrutura final é então protegida com uma capa de solo. Exemplo deste conceito de deposição pode ser encontrado no Centro de l'Aube na França, El Cabril na Espanha e Rokkasho-mura no Japão.
- Galeria Cupulada – Este conceito é mais bem caracterizado pelo repositório IRUS "Intrusion Resistant Underground Structure" no Canadá, onde o rejeito é colocado sobre uma camada seca permeável para minimizar o contato da água com o rejeito. A água é canalizada para ser drenada através do piso que é formado por uma mistura de dois leitos de areia, argila e zeólita natural, a fim de reter qualquer radionuclídeo que possa ser liberado juntamente com a água [9]. O depósito é então coberto por um teto de concreto impermeável protegido por uma capa de solo.
- Galeria Aberta – Neste conceito, uma capa pouco permeável é colocada acima das galerias cheias com o objetivo de acomodar alguns sedimentos. A galeria é fechada por uma laje de concreto. Este conceito de galerias foi usado em Drigg, no Reino Unido, como substituto ao de trincheira. É projetado para receber rejeito de baixo nível de radiação, altamente compactado em recipientes

de aço, que então são colocados em galerias de concretos. As galerias consistem em uma base de concreto e paredes com drenagem coberta. Toda a drenagem de dentro ou abaixo da galeria pode ser monitorada independentemente e dirigida para um sistema de gerência da água no local, antes de ser descartada [8].

Uma importante questão com relação à deposição em locais não profundos são os critérios de aceitação do rejeito para minimizar os riscos para os seres humanos e o ambiente. As duas opções básicas utilizadas para a aceitação do rejeito são as definições dos limites de referência e a aprovação dos critérios específicos do local que dependem unicamente das características do sítio e do projeto de instalação [9]. A AIEA estabelece o seguinte critério básico: "Se os controles administrativos são uma parte integrante do sistema de isolamento do rejeito, como no caso do sistema de deposição de baixa profundidade, o rejeito deve decair para níveis aceitáveis de atividade num período de tempo dentro do qual os controles administrativos devem continuar". A proposta da OECD/NEA consiste em estabelecer níveis de referência genéricos e fornece orientação sobre a metodologia que pode ser usada pelas autoridades nacionais para estabelecer critérios de aceitação para o local específico do repositório. Define três tipos de critérios [9].

- Limites na concentração de radionuclídeos no rejeito;
- Limite na atividade total de radionuclídeos que será disposta em uma dada instalação e
- Padrão de desempenho para os embalados de rejeito e embalagem.

A garantia do sucesso do sistema de deposição é determinada pelo desempenho individual de seus componentes, que consistem na qualidade do tratamento do rejeito, na sua embalagem, nas barreiras de engenharia e no meio ao seu redor.

A avaliação dos riscos radiológicos é realizada usando-se modelos matemáticos introduzindo dados experimentais relativos às propriedades e estabilidade das várias barreiras de isolamento e taxas de migração de radionuclídeos para o meio ambiente. Visto que a deposição em baixa profundidade é utilizada apenas

para isótopos de meia-vida curta, os períodos da avaliação de desempenho para estas deposições podem ser muito menores do que para repositórios geológicos profundos [9].

Deposição em formação geológica profunda

Deposição em formações geológicas profundas é considerada, atualmente, a solução mais aceita em todos os países que já apresentam gerenciamento global para rejeitos de alto nível e de meia-vida longa. Dentro do mais recente programa dos últimos cinco anos da Comissão Européia para Deposição de Rejeitos Radioativos, na Conferência Euradwaste [15], concluiu-se que "Deposição em repositórios geológicos de profundidade (>300 metros), estratégia favorável para rejeitos de alto nível de meia-vida longa, é agora possível na Europa" e que "Deposição geológica profunda é tecnicamente possível e pode garantir o isolamento em longo prazo e a proteção à demanda pública".

A proposta da deposição geológica profunda é voltada para rejeitos de alto nível e/ou elemento combustível irradiado. A profundidade é de algumas centenas de metros, mas deve ser suficiente para impedir intrusões voluntárias e involuntárias, além das acidentais. É importante que o local apresente rochas de baixa permeabilidade, que seja seco ou tenha um fluxo muito lento de água subterrânea e que as embalagens apresentem características físico-químicas compatíveis com as instalações de deposição [9].

O tempo necessário para que o rejeito de alto nível e o combustível usado seja isolado da biosfera é uma questão complexa, tem recebido muita atenção e causado extensas discussões. Deve ser pontuado que o conceito de isolamento é relativo e não tem o mesmo significado para todos os tipos de repositórios, além de depender de política nacional e de conceitos de segurança. Adicionalmente alguns radionuclídeos presentes no rejeito têm meia-vida muito longa e seu completo confinamento até decaimento tem ocorrência inatingível para as gerações mais próximas como, por exemplo, o netúnio 237 com 2,2 milhões de anos e o iodo 139 com 17 milhões de anos. Desta forma, uma tentativa de aproximação razoável é o sistema de isolamento baseado na utilização de barreiras complementares que juntas podem restringir o acesso de água subterrânea à embalagem de rejeito, limitar a dissolução da forma do rejeito,

a mobilização do radionuclídeo e sua migração por sorção e outros processos geoquímicos. A idéia consiste no isolamento completo por determinado tempo seguida, posteriormente, pela limitação da taxa de liberação [9].

Em vários países, atualmente, o conceito de deposição geológica está em estágio experimental e demonstrativo. As avaliações detalhadas de risco estão sendo realizadas e os programas de P&D vêm progredindo rapidamente, aumentando o número de resultados e auxiliando na tomada de decisões [9].

O primeiro repositório geológico profundo do mundo, licenciado para rejeitos de meia-vida longa está localizado no remoto deserto de Chihuahuan, Novo México, e entrou em operação em 26 de março de 1999 após vinte anos de estudos científicos. É conhecido pela sigla WIPP (Waste Isolations Pilot Plant) que significa Planta Piloto para Isolamento de Rejeitos. Está localizado a 658 metros abaixo do solo, onde os últimos 300 metros são formados por uma coluna compacta de formação salina, no qual estão estocados os rejeitos. Esta seção de sal apresentada no local evidencia a não-ocorrência de atividades sísmicas e de dissolução [16]. É mostrado na figura 1 um esquema de WIPP.

Por mais de duas décadas, nos EUA, extensos esforços científicos vêm sendo conduzidos em Yucca Mountain, no estado de Nevada, a aproximadamente 160 quilômetros do centro urbano de Las Vegas, para verificar se a instalação de um repositório profundo para combustível irradiado e rejeito de alto nível é favorável neste local. Estes estudos de caracterização do local foram conduzidos para entender os aspectos físicos da montanha e os processos que podem afetar a segurança do repositório. Tem como proposta receber sua primeira remessa de rejeitos nucleares em 2017 [17]. Yucca Mountain (figura 2) está situado acima do nível do lençol d'água, na zona insaturada, formada por acumulações de fragmentos vítreos e cinzas de erupções vulcânicas.

Um outro conceito que também foi investigado é a deposição em solo oceânico que consiste no confinamento de embalagens de rejeito em profundidades de 500 a 2000 metros abaixo do solo. Este conceito apresenta algumas vantagens com relação à deposição geológica continental: a possibilidade de ser um repositório internacional que possa ser operado, em princípio, por uma associação de países interessados e, se acontecer alguma liberação

proveniente do repositório, a diluição ocorrerá diretamente dentro do oceano. Por isso, vários locais foram pesquisados em cooperação de diversos países, principalmente pela França, Japão, Itália, Países Baixos, Suécia, Reino Unido, EUA e pelo Centro de Pesquisa Unido da Comunidade Européia [9].

Progresso significativo na área de gerenciamento de rejeito radioativo tem sido feito em vários países durante os últimos anos [18]. A agência responsável pelos rejeitos radioativos da França (Agence Nationale pour la Gestion des Déchets Radioactifs – ANDRA) já iniciou os trabalhos de caracterização de locais, entre 2004 e 2005, e estima que a fase

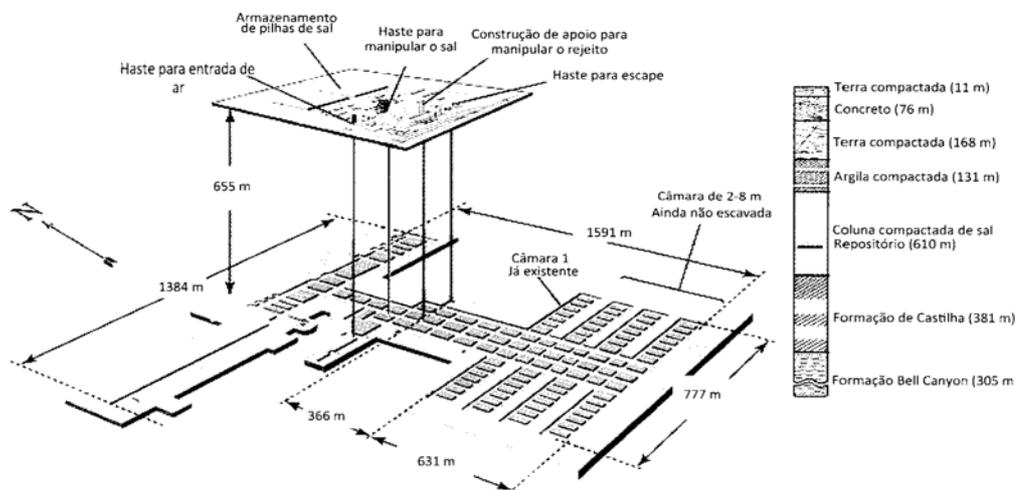
de construção do repositório geológico será iniciada em 2017 e a fase de operação em 2025.

A Agência Regulatória Nuclear da Bulgária iniciou o plano do repositório geológico em 2005, com o desenvolvimento de um conceito de deposição e da caracterização do rejeito e de seu volume, bem como das condições naturais e geológicas do país e em 2015 será tomada a decisão pelo conselho de ministros sobre a construção do repositório geológico nacional [19].

A República Tcheca iniciou suas atividades de seleção do local e preparação de toda a documentação em 1999. A preparação da



FONTE: http://www.zonucleare.com/z_plus/plus_scorie_nucleari_usa/wipp_vista_aerea.htm (a)



FONTE: http://www.nukewatch.org/wipp/WIPP/wipp_schematic.html (b)

Figura 1: (a) Vista aérea e (b) modelo esquemático do repositório de WIPP. (a)

documentação para a licença territorial está planejada para 2027, a documentação para permissão da construção para 2037, a construção do repositório para 2053 e a operação para 2065. Na China, o Beijing Research Institute of Uranium Geology, BRIUG, já iniciou os estudos básicos de seleção do local em 2006 e planeja construir inicialmente um laboratório de pesquisa subterrâneo em 2020 e posteriormente o repositório em meados de 2040 [19].

A Finlândia está bastante adiantada e começou o projeto em 1983 e o local para construção foi selecionado em 2000. A construção do repositório está planejada para 2015 e o início de sua operação para 2020. A Suécia também iniciou seu projeto bem cedo, em 1976. A investigação do local iniciou-se em 2000, a construção do repositório está planejada para

2009 e a deposição começará em 2018 [19].

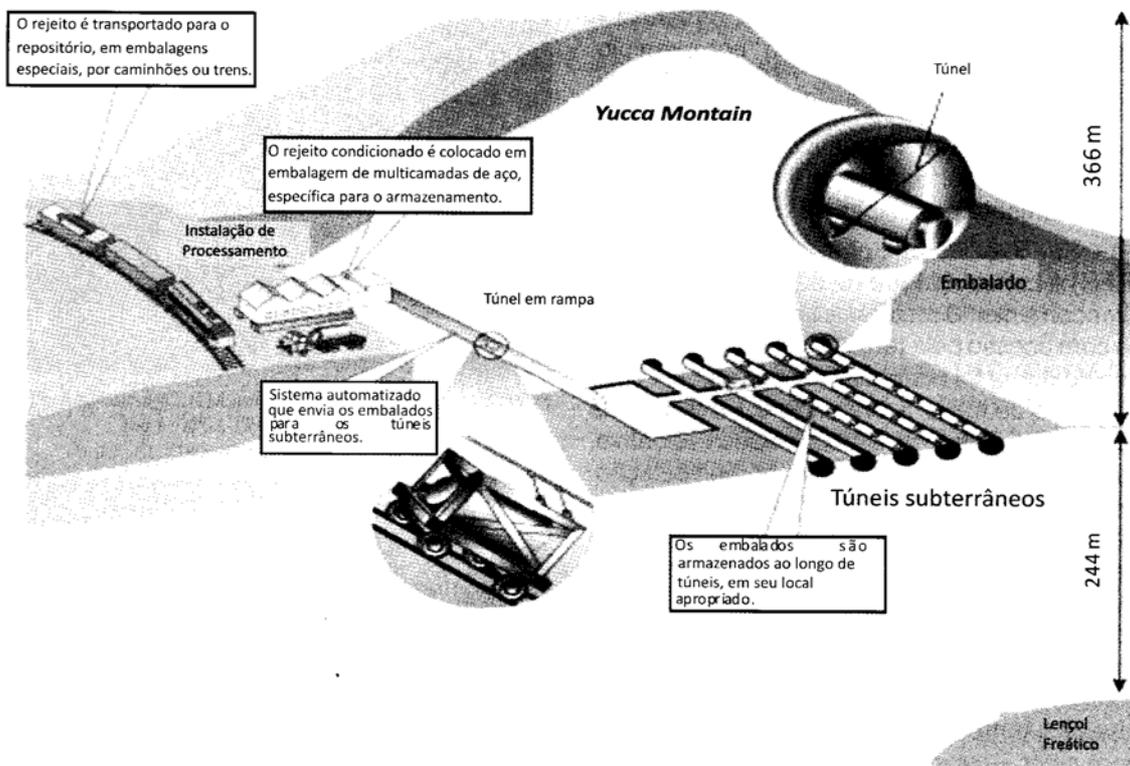
O programa na Índia também está em andamento. Iniciou seu projeto em 2004 com avaliação do local. Estão planejadas a construção e a operação de um repositório piloto entre 2015 e 2025 e a construção de um repositório final entre 2025 e 2035 [19].

Vários outros países têm apresentado experiências difíceis ou grandes atrasos em seus programas. Assim, enquanto muitos países ainda têm um longo caminho para chegar a decisões concretas sobre a implementação de repositórios profundos, outros como a Finlândia e Suécia estão agora próximos da fase de licenciamento. No caso da Suíça, ela planeja começar o licenciamento do sistema do repositório profundo nos próximos anos [18].



FONTE: www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/rwmst3/IAEA-WMDB-ST-3-Part-2.pdf

(a)



FONTE: <http://www.nrc.gov/waste/hlw-disposal/design.html>

(b)

Figura 2: (a) Vista aérea e (b) modelo esquemático de Yucca Mountain.

Deposição em cavernas de profundidade intermediárias

A deposição de rejeito em cavidades rochosas é a colocação do rejeito em diferentes

tipos de cavidades situadas em profundidades variadas. Estas cavidades incluem minas fora de uso, principalmente aquelas escavadas em várias formações geológicas. A princípio, o conceito de deposição em cavidade de rochas é uma aproximação entre as opções comumente chamadas de deposição próxima à superfície, e deposição em formações geológicas profundas. Contudo a profundidade do repositório não é uma especificação essencial, mas a capacidade de receber diferentes tipos de rejeitos é sua mais importante característica. O sistema de deposição em cavidade rochosa pode receber todas as categorias de rejeito, exceto os de alto nível e de meia-vida longa [20].

A mina de sal Asse, localizada na Baixa Saxônia, Alemanha, serviu como uma instalação de pesquisa e desenvolvimento para deposição de todos os tipos de rejeitos. 62 mil embalados com rejeito de baixo nível foram depositados na mina entre 1967 e 1976. Atualmente não estão sendo colocados mais rejeitos no local e a instalação, que vinha sendo utilizada para a realização de experimentos para a avaliação da deposição de rejeitos de alto e médio nível em formação salina, está em processo de fechamento [9]. Na FIG. 03 é mostrada a recuperação de um tambor na

mina de sal Asse, após dez anos, para testes de aquecimento em escala real e demonstração de reversibilidade e de recuperação do rejeito em meio salino.

O conceito de deposição em cavernas de profundidade intermediária também é adota-

do pela República Tcheca, Suíça, Finlândia e Noruega. Na República Tcheca, por exemplo, parte da mina Richard II, de 70 a 80 metros de profundidade, é usada como repositório institucional de rejeito radioativo, principalmente de meia-vida curta. A mina é seca e formada principalmente por calcário e calcário argiloso.

Na Suécia, o Repositório Final Sueco (SFR) é construído em rocha cristalina a aproximadamente 60 metros abaixo do solo oceânico com acesso pela terra. O projeto das cavidades de rocha foi adaptado para diferentes tipos de rejeito de baixo e médio nível, de meia-vida curta, de acordo com seu conteúdo radioativo, sua composição e requisitos de manipulação. As cavernas têm forma de silo de 50 metros de altura com paredes de concreto, utilizando bentonita como material tampão e sistema de ventilação de gás para embalagens de rejeito condicionado com maior nível de atividade. Na Finlândia, Olkiluoto é similar ao SRF, mas tem somente dois silos – um para rejeito de baixo nível e o outro para rejeito de médio nível que gera calor – construído de 60 a 100 metros de profundidade. Rochas trituradas e do próprio local são utilizadas como material de recheio, cujas zonas maiores de fraturas podem ser seladas com concreto [8].

A mina de ferro abandonada de Konrad, na Baixa Saxônia, Alemanha, foi selecionada para construção de um repositório de rejeitos de baixo e médio nível. O espaço da mina para a deposição do rejeito é estimado em aproximadamente 650.000 m³. Apresenta algumas características geológicas que se mostram muito adequadas para a deposição de certos tipos de rejeitos radioativos. Têm sido construídas galerias em vários níveis de profundidade na faixa entre 800 e 1.300 m. A formação consiste, em sua maioria, em sedimentos argilosos com espessura total de algumas centenas de metros. Resultados de investigação indicam que a distância da água subterrânea não será um risco para o repositório [9]. Em 2002 o repositório foi licenciado com bases nas demonstrações de segurança em operações normais, na análise de acidentes e na fase de pós-fechamento. Está praticamente assegurado que a Mina de Konrad estará pronta para a fase operacional aproximadamente no ano de 2013 [19].



FONTE: <http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/rwmst3/IAEA-WMDB-ST-3-Part-4.pdf>

(a)



FONTE: <http://www.marcsteinmetz.com/pages/asse/easse03.html>

(b)

Figura 3: (a) Recuperação de um tambor na Mina Asse (Alemanha) para testes e (b) aspecto dos cristais de sal em suas paredes, a 850 metros abaixo do solo.

CONCLUSÕES

O Brasil tem atualmente 02 reatores nucleares Angra 1 e Angra 2 e um reator, Angra 3, em construção, previsto para entrar em operação em 2014. Além disto a energia nuclear tem sido utilizada amplamente em outras áreas. Portanto, como em todas as outras indústrias, rejeitos são gerados e devem ser adequadamente gerenciados de modo a não trazer possíveis riscos aos seres humanos e ao meio ambiente. A etapa final do GRR é a deposição, cuja a responsabilidade é da Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN) de acordo com suas atribuições definidas na lei federal 7.781 de 27 de junho de 1989 e na lei federal 10.308 de 20 de novembro de 2001 que dis-

põe sobre a seleção de locais, a construção, o licenciamento, a operação, a fiscalização, os custos, a indenização, a responsabilidade civil e as garantias referentes aos depósitos de rejeitos radioativos.

Para a implantação de um repositório são necessários estudos técnicos e operações em diversas áreas do conhecimento, como por exemplo: hidrologia, geologia, corrosão, processos de engenharia, transferência de calor, desempenho do produto de rejeito, meteorologia, proteção radiológica, comportamento humano e modelagem.

A partir das experiências e das experiências vividas por técnicos que conduziram os projetos para repositórios, alguns aspectos são destacados e a seguir.

Nas questões relativas à aceitação do público, é necessário mostrar principalmente à população que vive próximo aos locais candidatos os benefícios que ela poderá ter no caso da seleção desta área. Para a informação do público em geral devem ser elaborados relatórios usando um vocabulário mais simples, com base nos relatórios técnicos.

Por meio da modelagem é possível e necessário selecionar quais os parâmetros mais importantes que devem ser avaliados e identificar quais são os dados que devem ter maior precisão.

É importante lembrar que deve ser prevista a revisão do programa por especialistas externos, tantas vezes quanto possível, para questionamentos e observações, de modo a manter o trabalho na direção correta. Como apresentado neste artigo a construção, a operação e o fechamento de um repositório são tarefas que envolvem conhecimentos e especialistas de diversas áreas. O tempo necessário para que um repositório entre operação, de acordo com experiências internacionais, é de 10 a 20 anos para repositórios de baixo e médio, geralmente de sub-superfície, e de 20 a 40 para aqueles de alto nível (geológicos).

Portanto as discussões para o projeto repositório devem fazer parte do Programa Nuclear Brasileiro e devem contar com as capacidades já formadas no território nacional e buscar formar novas a partir de cursos dentro das áreas afins.

AGRADECIMENTOS

Aos pesquisadores envolvidos. Ao CDTN por dispor suas instalações e prestar serviços. A CNEN pelo auxílio financeiro.

REFERÊNCIAS

- [1] COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR. CNEN-NE-6.05: Gerência de Rejeitos Radioativos em Instalações Radiativas. Rio de Janeiro, 1985.
- [2] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. Review of factors affecting the selection and implementation of waste management technologies. Vienna: IAEA, Aug. 1999, 73p. (IAEA-TECDOC-1096).
- [3] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. Report on radioactive waste disposal. Vienna: IAEA, 1993. (Technical Reports Series No. 149).
- [4] BIRD, G. W. Geochemistry of radioactive wastes disposal. Geoscience Canada, Calgary, v. 6, n.4, p.199-204. s. d.
- [5] SERNE, R. J. et al. Review of geochemical processes and codes for assessment of radionuclide migration potential at commercial LLW sites. Richland: Pacific Northwest Laboratory, 1990, 113 p. (NUREG/CR -- 5548).
- [6] TAPLIN, D., CLARIDGE, F.B. Performance of engineered barriers for low-level waste. Ottawa: Atomic Energy Control Board, 1987, 77 p. (INFO-0274).
- [7] SHIMOOKA, K.; WADACHI, Y. Migration and diffusion of radionuclides in engineered barrier system. In: NEA WORKSHOP ON NEAR-FIELD ASSESSMENT OF REPOSITORIES FOR LOW AND MEDIUM LEVEL RADIOACTIVE WASTE, 1987, Baden, Switzerland. Proceedings... Baden, 1987, p.271-284.
- [8] BONNE, A.; HEINONE, J.; HAN, K. Radioactive waste disposal: Global experience and challenges. IAEA Bulletin, v. 39, n.1, p.33-41, 1997.
- [9] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. Radioactive Waste Management: an IAEA source

- book. Vienna: International Atomic Energy Agency, 1992. 276 p.
- [10] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. Environmental Assessment Methodologies for Sea Dumping of Radioactive Wastes. Vienna: IAEA, 1984-c. (Safety Series, 65)
- [11] SJOEBLOM, K.L.; LINSLEY, G.S. The International Arctic Seas Assessment Project: Progress report. IAEA Bulletins. v. 45, n 01. Disponível em <<http://f40.iaea.org/worldatom/Periodicals/Bulletin/Bull372/sjoebloom.html>> Acesso em 12 dez. 2006.
- [12] ITC - SCHOOL OF UNDERGROUND WASTE STORAGE AND DISPOSAL. Decision Making Stakeholder Involvement in Repository Development. A History of Repository Development, Tengelic, Hungary, 30th May to 3rd June, 2005.(CD-ROM)
- [13] COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR. CNEN-NE-6.06: Seleção e Escolha de Locais para Depósitos de Rejeitos Radioativos. Rio de Janeiro, 1989.
- [14] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. Performance of engineered barrier materials in near surface disposal facilities for radioactive waste. Vienna: IAEA, 2001. 50p. (IAEA-TECDOC-1255)
- [15] EC (2004). Euradwaste'04. Radioactive waste management community policy and research initiatives. Conference Summaries. 6th Commission Conference on the Management and Disposal of Radioactive Wastes. Disponível em <ftp://ftp.cordis.lu/pub/fp6euratom/docs/euradwaste04sum_overview_en.doc> e <ftp://ftp.cordis.lu/pub/fp6-euratom/docs/euradwaste04sum_disposal_en.doc> Acesso em 01 jan 2007.
- [16] WEART, W.D.; REMPE, N.T.; POWERS, D. W. Geotimes: New and Trends in the Geoscience. Alexandria, VA, : American Geological Institute, 1998.
- [17] YUCCA MOUNTAIN; Yucca Mountain Information Office Eureka County. What's news. New Yucca Mountain Time Line. Disponível em <www.yuccamountain.org> Acesso em: 15 set. 2006.
- [18] THEGERSTROM, C., Down to Earth...and below – Sweden's Plans for Nuclear Waste. IAEA Bulletin, v. 46, n.1, p. 36-38, 2004.
- [19] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. Planning and Design of Geological Repositories, Vienna, 25 to 27 September 2006. (CD-ROM)
- [20] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. Site investigations, design, construction, operation, shutdown and surveillance of repositories for low and intermediate level radioactive wastes in rock cavities. Vienna: IAEA, 1984-d. (Safety Series, 62).