

SÉRIE GESTÃO E PLANEJAMENTO AMBIENTAL

**Análise de risco aplicada à gestão de rejeitos: uma
revisão aplicada aos depósitos de rejeitos radioativos
próximos à superfície**

PRESIDÊNCIA DA REPÚBLICA

Luiz Inácio Lula da Silva

José Alencar Gomes da Silva

Vice-Presidente

Sergio Machado Rezende

Ministro da Ciência e Tecnologia

Luiz Antonio Rodrigues Elias

Secretário-Executivo

Luiz Fernando Schettino

Subsecretário de Coordenação das Unidades de Pesquisa

CETEM – CENTRO DE TECNOLOGIA MINERAL

Adão Benvindo da Luz

Diretor do CETEM

Ronaldo Luiz Correa dos Santos

Coordenador de Processos Metalúrgicos e Ambientais

Zuleica Carmen Castilhos

Coordenadora de Planejamento, Acompanhamento e Avaliação

João Alves Sampaio

Coordenador de Processos Minerais

Antônio Rodrigues Campos

Coordenador de Apoio à Micro e Pequena Empresa

Arnaldo Alcover Neto

Coordenador de Análises Minerais

José da Silva Pessanha

Coordenador de Administração

SÉRIE GESTÃO E PLANEJAMENTO AMBIENTAL

ISSN 1808-0863

ISBN 978-85-61121-20-4

SGPA - 09

Coleção Artigos Técnicos nº 6

Análise de risco aplicada à gestão de rejeitos: uma revisão aplicada aos depósitos de rejeitos radioativos próximos à superfície

Laís Alencar de Aguiar

D.Sc. em Engenharia Nuclear pela UFRJ

Paulo Sérgio Moreira Soares

D.Sc. em Tecnologia de Processos Químicos e
Bioquímicos pela UFRJ

Paulo Fernando Ferreira Frutuoso e Melo

D.Sc. em Engenharia Nuclear pela UFRJ

Antonio Carlos Marques Alvim

D.Sc. em Engenharia Nuclear pela UFRJ

CETEM/MCT

2007

SÉRIE GESTÃO E PLANEJAMENTO AMBIENTAL

Paulo Sérgio Moreira Soares

Editor

Roberto de Barros Emery Trindade

Subeditor

CONSELHO EDITORIAL

Ronaldo Luiz Correa dos Santos (CETEM), Maria Dionísia C. dos Santos (CETEM), Olavo Barbosa Filho (PUC-RJ), Afonso Rodrigues Aquino (USP - IPEN/CNEN - SP), Josimar Ribeiro de Almeida (UFRJ).

A Série Gestão e Planejamento Ambiental tem como objetivo principal difundir trabalhos realizados no CETEM, ou em parceria com colaboradores externos, assim como trabalhos independentes considerados relevantes na área de gestão e planejamento ambiental e temas correlatos.

O conteúdo desse trabalho é de responsabilidade exclusiva do(s) autor(es).

Jackson de Figueiredo Neto

Coordenação Editorial

Vera Lúcia Espírito Santo Souza

Programação Visual

Priscila Machado Dutra

Editoração Eletrônica

Andrezza Milheiro da Silva

Revisão

Thatyana Pimentel Rodrigo de Freitas

Revisão de Provas

Aguiar, Laís Alencar

Análise de risco aplicada à gestão de rejeitos: uma revisão aplicada aos depósitos de rejeitos radioativos próximos à superfície / Laís Alencar de Aguiar et al. – Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2008:it.

48p. (Série Gestão e Planejamento Ambiental, 09)

1. Gestão ambiental. 2. Rejeitos radioativos. 3. Resíduos industriais. I. Centro de Tecnologia Mineral. II. Soares, Paulo Sérgio M. III. Melo, Paulo Fernando F. F. IV. Alvim, Antonio Carlos M. V. Título. VI. Série

SUMÁRIO

RESUMO	7
ABSTRACT	8
1 INTRODUÇÃO	9
2 DEPÓSITOS DE REJEITO RADIOATIVO PRÓXIMO À SUPERFÍCIE	10
3 ABORDAGEM BASEADA NO RISCO	17
4 AVALIAÇÃO DE SEGURANÇA E DE RISCO EM REPOSITÓRIOS PRÓXIMOS À SUPERFÍCIE	22
4.1 Abordagem múltiplas barreiras	25
5 DOCUMENTAÇÃO DE INSTITUIÇÕES RESPONSÁVEIS PELO GERENCIAMENTO DE REJEITO RADIOATIVO	30
6 TRABALHOS ACADÊMICOS NACIONAIS SELECIONADOS SOBRE O GERENCIAMENTO DE REJEITO RADIOATIVO	34
7 CONSIDERAÇÕES FINAIS	36

RESUMO

O trabalho apresenta uma revisão crítica de modelos de avaliação de riscos para a deposição de rejeitos radioativos em depósitos próximos à superfície. Rejeitos radioativos são resultantes da geração de energia nuclear e do uso de material radioativo na indústria, pesquisa científica e medicina. Estes rejeitos emitem radiação ionizante e representam perigo potencial para a saúde humana e o meio ambiente. Em geral, rejeitos adequados à deposição em repositórios próximos à superfície são aqueles contendo radionuclídeos de meia vida curta e radionuclídeos de meia vida longa em baixa concentração. O isolamento do rejeito de forma segura e efetiva depende do desempenho integrado do sistema de deposição. A contribuição relativa dos diferentes componentes do sistema para a segurança do repositório variará dependendo do tipo de deposição, da condição do sítio e do tempo desde o fechamento. A estratégia adotada para o gerenciamento de rejeito radioativo deve incluir medidas que garantam a proteção da saúde humana e do meio ambiente em consonância com os princípios e exigências internacionais para gerenciamento de rejeitos radioativos e radioproteção. A avaliação de riscos de deposição deve ser parte integrante desta estratégia de gerenciamento.

Palavras-chave

avaliação de riscos, depósito de rejeitos, rejeitos radioativos

ABSTRACT

The study presents a critical review on models for risk assessment of radioactive wastes in deposits near the surface. Radioactive wastes result of the nuclear energy generation and of the use of radioactive material in the industry, medicine and scientific research. These wastes emit ionizing radiation and represent potential hazard the human life and to the environment. Generally, wastes that are suitable for near surface deposition are those of short half - life or those of long half - life and low concentration. The proper containment of wastes in a safe and effective way depends on the adequate performance of the deposition system. The contribution of different components of the system to the safety of the deposit will vary according to the type of deposition, the site characteristics and the period of time after closure of the deposit. The management strategy for radioactive wastes must include precautions aiming to protect the human health and the environmental, according to the principles and international demands of the radioactive wastes management and radioprotection. The risk assessment must be part of this management strategy.

Keywords

risk assessment, waste deposits, radioactive wastes

1 | INTRODUÇÃO

Rejeito radioativo é resultado inerente à geração de energia nuclear e ao uso de material radioativo na indústria, pesquisa científica e medicina. Este tipo de rejeito, por emitir radiação ionizante, representa perigo potencial tanto para a saúde humana como para o meio ambiente. Por isto, deve ser gerenciado para reduzir os riscos associados a níveis aceitáveis/toleráveis (IAEA, 1999a, 1999b).

Rejeitos de pequena e média atividade, embora contenham somente uma fração pequena da atividade total produzida em escala mundial, representam mais que 90% do volume total de rejeito radioativo (IAEA, 2002a).

A busca e implementação de soluções viáveis para o gerenciamento seguro do rejeito radioativo, incluindo sua deposição, é um dever da geração presente. A esta cabe implementar práticas ambientalmente sustentáveis que contribuam para reduzir os custos ambientais e de saúde pública e o ônus econômico imposto às gerações futuras.

A Comissão Nacional de Energia Atômica – CNEN adota em suas normas o termo deposição, para designar a colocação de rejeitos radioativos em instalações licenciadas pelas autoridades competentes, sem a intenção de removê-los (CNEN, 1985b, 1988a, 2002). Alguns países utilizam o termo para incluir descargas de efluentes para o meio ambiente (IAEA, 2003a). O sistema de deposição tem como objetivos isolar o rejeito, controlar liberações de radionuclídeos evitando que alcancem o ambiente externo e mitigar as consequências de quaisquer destas liberações para meio o ambiente.

2 | DEPÓSITOS DE REJEITO RADIOATIVO PRÓXIMO À SUPERFÍCIE

A deposição próxima à superfície inclui as seguintes alternativas: (a) deposição em estruturas de engenharia no solo, (b) deposição em trincheiras simples a poucos metros de profundidade, (c) deposição em cripta de concreto e (d) deposição em cavernas em rochas a várias dezenas de metros abaixo da superfície. Em contraste, o termo deposição geológica é geralmente usado para descrever deposição em profundidades de centenas de metros (IAEA, 1999a, 1999b, 2002a, 2003a, 2003c, 2004b).

Em geral, rejeitos adequados à deposição em repositórios próximos à superfície são aqueles contendo radionuclídeos de meia vida curta e radionuclídeos de meia vida longa em baixa concentração (IAEA, 1999a). De acordo com a Agência Internacional de Energia Atômica – AIEA, o termo vida longa refere-se a radionuclídeos com meia-vida, usualmente maior que 30 anos e o termo vida curta se refere àqueles com meia vida de no máximo 30 anos, entre outros, o Cs-137, Sr-90, Kr-85 e o H-3 (IAEA, 2004b).

Repositórios próximos à superfície, tanto para rejeitos de baixo como de médio nível de radioatividade, oriundos de plantas nucleares, são utilizados em muitos países, onde apresentam boa aceitação, tanto politicamente quanto pela opinião pública (LACOSTE, 2000). Para isto, são utilizadas combinações de restrições (de engenharia, de monitoramento e de controle institucional) empregadas para repositórios de radionuclídeos de vida longa. Tais restrições objetivam manter baixos os riscos associados com a migração de radionuclídeo e a intrusão humana.

Existem mais de 80 repositórios próximos à superfície em todo o mundo (IAEA, 2002a). Dentre os países que realizam este

tipo de deposição para os rejeitos de baixo e médio nível de atividade estão: Reino Unido (Drigg), França (La Mancha e Centre de L'Aubee), Canadá (IRUS), Japão (ROKKASHO), Espanha (El Cabril), Suécia (Oskarshamn), EUA (Barnwell) e República Tcheca (Dukovany). O status quo sobre repositórios para a deposição de rejeitos de baixo e médio nível de atividade no mundo pode ser encontrado na Tabela 5 da IAEA (2004b).

O Brasil possui um repositório próximo à superfície, fechado. Trata-se do Repositório de Abadia de Goiás, que foi especialmente projetado e construído para receber os rejeitos radioativos provenientes do acidente de Goiânia, envolvendo uma fonte de Cs-137.

A Agência Internacional de Energia Atômica (IAEA, 1999a, 2002a) associa três fases ao tempo de vida de um Repositório próximo à superfície: fase pré-operacional (período de estudo de localização, projeto e construção), fase operacional (período de operação e fechamento) e fase pós-fechamento (qualquer atividade após o fechamento).

De acordo com IAEA (1999a, 1999b), a deposição próxima à superfície requer uma supervisão contínua do local por um período após o fechamento do repositório (fase pós-fechamento). Neste período, a supervisão é um importante fator de segurança devido à existência de controles institucionais. Estes controles são classificados em controle ativo (vigilância, monitoração, manutenção e remediação) e controle passivo (controle do uso da terra e manutenção de registros). A segurança em longo prazo de repositórios próximos à superfície será alcançada pela combinação de características favoráveis do sítio, aspectos do projeto de engenharia, forma apropriada do rejeito, procedimentos operacionais e controle institucional (IAEA, 1999a).

Na fase pós-fechamento, a duração deste controle institucional pode ser de poucas centenas de anos. Um dos critérios utilizados é considerar o tempo de controle institucional igual a dez meias-vidas de radionuclídeos, tais como Cs-137 e Sr-90, o que corresponde a um período de 300 anos. Tais radionuclídeos são considerados de meias-vidas curtas, importantes em rejeitos de pequena e média atividade (IAEA, 2002a).

O isolamento do rejeito de forma segura e efetiva depende do desempenho integrado do sistema de deposição. A contribuição relativa dos diferentes componentes do sistema para a segurança do repositório variará dependendo do tipo de deposição, da condição do sítio e do tempo desde o fechamento. Por esta razão, o requisito de aceitação do rejeito e o projeto das barreiras de engenharia são usualmente determinados especificamente para cada sítio e arranjo de deposição. Pela mesma razão, o requisito em pauta deve ser estabelecido com base na avaliação de segurança específica do sítio (IAEA, 1999a).

Os repositórios são projetados para operar combinando princípios de isolamento e contenção, considerando a longevidade da radioatividade dos rejeitos. A contenção envolve várias barreiras, das quais se espera que sejam capazes de conter o rejeito num período inicial, principalmente porque a atividade dos radionuclídeos de meia-vida curta é ainda alta (BRAGG e GERA, 2000). Apesar de os autores comentarem sobre a contenção do rejeito pelas barreiras num período inicial, não há informações sobre a extensão deste período.

A segurança do sistema de deposição é determinada pelo desempenho de seus componentes individuais, forma e contenção do rejeito, barreiras de engenharia e barreiras naturais (ambiente hospedeiro). O material de preenchimento (backfill),

as barreiras e as coberturas são projetados para desempenharem papel na prevenção de infiltração de água e de liberação de radionuclídeo do repositório para a biosfera.

Entre os vários mecanismos pelos quais os radionuclídeos podem migrar ou ser expostos ao contato com o homem, podem ser citados: infiltração de água de superfície, intrusão de água subterrânea, subsequente migração de água contaminada, intrusão inadvertida e escape de gás radioativo, Figura 1. As barreiras de engenharia podem ser usadas como obstrução física e/ou química para prevenir ou retardar o movimento (migração) dos radionuclídeos.

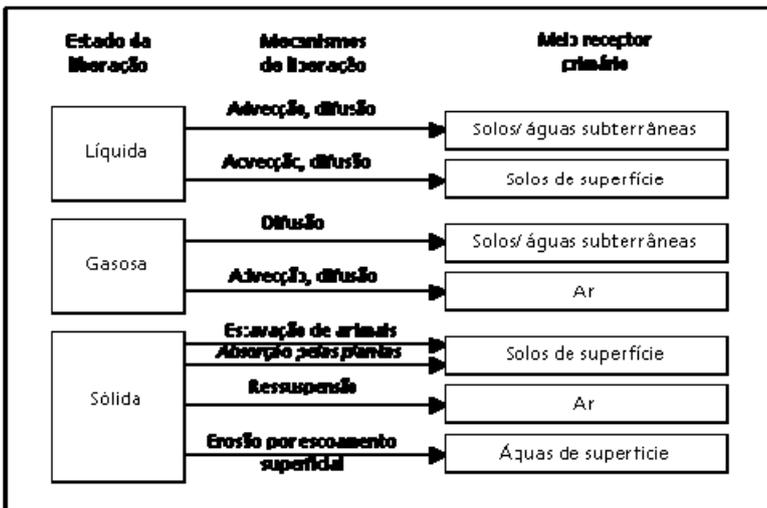


Figura 1. Mecanismos de liberação de radionuclídeos para a biosfera (IAEA, 2004b).

O tempo de vida do sistema de barreiras de engenharia usado para conter o rejeito radioativo afeta significativamente a confiabilidade do repositório, pois a confiabilidade é uma função decrescente com o tempo, aproximando-se de zero quando o tempo tende ao infinito. Para contenção de rejeito de alta ativi-

dade, segundo Ananda e Singh (1999), dois tipos de projetos são considerados para sistema de barreiras de engenharia: sistema de barreira simples e sistema de barreiras múltiplas.

A avaliação de risco do repositório pode fornecer informações importantes para a escolha das barreiras. O crucial para esta escolha é a escala de tempo na qual a barreira deve funcionar. Segundo a AIEA (IAEA, 2001b), pode ser da ordem de centenas de anos.

Antes da construção de qualquer repositório, deverá ser realizada uma avaliação de segurança sistemática tanto para o período de operação, como para a fase de pós-fechamento (IAEA, 1999a). Esta avaliação é um processo iterativo. Assim, serão necessárias outras avaliações durante as fases pré-operacional, operacional e pós-fechamento, levando em conta os resultados obtidos da experiência e do monitoramento.

A avaliação de segurança na fase pós-fechamento geralmente é realizada para fornecer confiança ao governo, ao órgão regulador, ao público em geral e aos profissionais da área técnico-científica. Seu objetivo é demonstrar que a instalação está localizada e construída para garantir a segurança das pessoas e para a proteção do meio ambiente por um longo período de tempo.

A avaliação de segurança é um procedimento de avaliação de desempenho do sistema de deposição e, em particular, dos seus potenciais efeitos radiológicos na saúde humana e no meio ambiente (IAEA, 2003a). Os impactos radiológicos potenciais após o fechamento do repositório podem ser oriundos de processos graduais, como, por exemplo, degradação das barreiras e de eventos discretos que afetam o isolamento do rejeito.

Como resultado de degradação progressiva das barreiras, pode ocorrer pequena liberação e transporte pela água subterrânea de frações remanescentes do material radioativo originalmente contido no rejeito. Esta consideração, geralmente, é utilizada para representar a evolução normal de um sistema de deposição (BRAGG e GERA, 2000). Dlouhý (1986), em seu estudo, verificou que a migração de radionuclídeo através da água subterrânea é o caminho que apresenta maior probabilidade de ocorrência.

Deve-se mostrar que o repositório deverá ser robusto e capaz de resistir aos efeitos de vários possíveis eventos e falhas. A robustez poderá ser alcançada por meio da implementação de técnica fundamentada e de princípios gerenciais que tendam a eliminar ou mitigar os efeitos das incertezas. No entanto, devido às incertezas inerentes à predição de eventos futuros, a garantia absoluta de atendimento aos critérios de segurança não poderá ser alcançada (IAEA, 1999a).

Segundo Lewis (1996), projeto robusto é aquele em que as características de desempenho são bastante insensíveis a variações no processo de fabricação, à variabilidade em condições ambientais de operação e à deterioração com o envelhecimento.

Quando se considera a liberação líquida (Figura 1), a quantidade de água que entra no repositório e a quantidade de água que contacta o rejeito são elementos importantes na avaliação de segurança. A AIEA (IAEA, 2002a, 2004b) classifica este cenário de infiltração de água como cenário de evolução normal ou cenário de referência, e a CNEN - Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN, 1991) cita-o como um dos mecanismos de transporte mais significativos de liberação de radionuclídeos.

O gerenciamento de rejeito radioativo deve implementar medidas que garantirão a proteção da saúde humana e do meio ambiente, em consonância com os princípios e exigências internacionais para gerenciamento de rejeitos radioativos e radioproteção. O gerenciamento deve cobrir todas as fases do repositório que envolvam ou possam resultar exposições a radiações.

Na fase operacional, os requisitos para proteção radiológica e segurança de trabalhadores e da população são similares àqueles aplicáveis a instalações nas quais se manuseiam materiais radioativos. Para a fase de pós-fechamento, a segurança radiológica é estabelecida na forma de critérios de dose ou critério de risco ou ambos (IAEA, 1999a, 1999b).

Critérios de segurança para a fase de pós-fechamento devem prover o Princípio de Proteção de Gerações Futuras (IAEA, 1995a). Nessa fase, radionuclídeos podem ser liberados do repositório para o meio externo por um longo período de tempo. A taxa de liberação dependerá de eventos e processos que têm probabilidades de ocorrência associadas. Somado a isto, as condições futuras da biosfera, inevitavelmente, introduzirão incertezas que dificultarão a aplicação de padrões baseados unicamente em limitação de dose (IAEA, 1999a).

3 | ABORDAGEM BASEADA NO RISCO

Por este conjunto de razões, critérios de segurança para alguns cenários devem levar em conta a probabilidade de ocorrência ou incertezas do evento. Por exemplo, se for assumida a ocorrência de intrusão humana dentro do repositório, a dose recebida excederá a dose limite. Contudo, a probabilidade de ocorrência deverá ser mantida baixa, por meio da escolha adequada do local e/ou do controle institucional (IAEA, 1999a).

A dose limite de 1mSv/a para o público de todas as fontes controladas é baseada nas recomendações da Comissão Internacional de Proteção Radiológica (ICRP- *International Commission on Radiological Protection*). Esse organismo estabeleceu coeficientes de risco para exposição a níveis baixos de radiação ionizante, que representam a possibilidade de contrair um efeito deletério à saúde humana induzido por radiação (p. ex., câncer fatal) por unidade de dose.

Aplica-se, então, o conceito de risco (IAEA, 1999a): produto entre a probabilidade de receber a dose e a probabilidade que a dose alcançará efeitos deletérios à saúde (sic).

$$Risco = P.F_D.E \quad (1)$$

onde,

P é a probabilidade de ocorrência do cenário,

F_D é o coeficiente de risco (Sv^{-1}), e

E é a taxa de dose associada ao cenário (Sv/a),

Cabe ressaltar que em outras áreas diferentes da Análise Probabilística de Segurança, p. ex., risco ecológico, risco à saúde humana, o termo probabilidade é usado indiscriminadamente no lugar de frequência e o termo risco é usado para designar

tão somente as consequências. A prática usual, nestas áreas, não utiliza a probabilidade de ocorrência do cenário/evento para o cálculo do risco. Quando é utilizada, o evento é considerado certo.

O risco para uma pessoa presente na vizinhança de um perigo, considerando a natureza do dano e o período de tempo em que este pode acontecer, é conhecido como risco individual. Já o risco para um determinado número ou agrupamento de pessoas expostas aos danos decorrentes de um ou mais cenários acidentais é conhecido como risco social (CETESB, 1994 e 2003). Essa forma de expressão do risco (risco social) foi originalmente desenvolvida para a indústria nuclear e hoje é bastante utilizada na indústria de processos.

A apresentação do risco individual normalmente é feita por meio de curvas de iso-risco (contornos de risco individual), uma vez que estas possibilitam visualizar a distribuição geográfica do risco em diferentes regiões. Assim, o contorno de um determinado nível de risco individual deverá representar a frequência esperada de um evento capaz de causar um dano num local específico. A apresentação do risco social deverá ser feita através da curva F-N, obtida por meio da plotagem dos dados de frequência acumulada do evento final e seus respectivos efeitos, representados em termos de número de vítimas fatais.

Para a Agência de Proteção Ambiental Norte Americana (EPA, 1994), o modelo de risco de câncer define a relação entre a dose de radiação e a subsequente mortalidade (ou morbidez) atribuída à dose, e o risco atribuível pode ser definido como a probabilidade de morte de câncer causado pela exposição à radiação.

Para um coeficiente de risco (F_D) de $5.10^{-2} \text{ Sv}^{-1}$ de contrair câncer fatal pela exposição a baixas doses de radiação, para uma população de todas as idades e para um evento certo ($P = 1$), e tendo como dose limite o valor de 1mSv/a , o risco de contrair um câncer fatal induzido por radiação é 5.10^{-2} a^{-1} .

A ICRP tem recomendado que o valor de dose limite seja de $0,3 \text{ mSv}$ por ano, ao invés do valor 1mSv/a anteriormente estabelecido. Então, para as mesmas condições, o risco seria menor, $1,5.10^{-5}/\text{ano}$. Muitos países já vêm adotando o limite de risco individual mais baixo de 4.10^{-5} por ano para impacto radiológico de um repositório, equivalendo a uma dose efetiva anual menor que 1mSv (IAEA, 2004b).

Além dos eventos prováveis, os eventos improváveis, ou seja, com baixas probabilidades associadas, também devem ser considerados conforme recomenda a AIEA. Contudo, o órgão regulador decidirá se a abordagem baseada em risco será utilizada ou se a probabilidade de ocorrência e a dose resultante serão consideradas separadamente. Segundo a AIEA (IAEA, 2003c), os requisitos de segurança na fase pós-fechamento são expressos em termos de dose de radiação ou de risco.

Segundo a Instrução Técnica da CNEN (CNEN-IT-01/91), para o repositório de Abadia de Goiás (CNEN, 1991), os cálculos de riscos individuais devem ser feitos usando:

- a) o fator de conversão de $0,02\text{Sv}^{-1}$;
- b) a probabilidade do cenário de exposição; e
- c) uma das duas modalidades para a dose equivalente efetiva comprometida:
 - por ano de exposição, calculada por meio da análise determinística dos caminhos críticos; ou

- a média aritmética da dose equivalente efetiva comprometida por ano de exposição, obtida a partir da distribuição de doses individuais em 1 ano, calculada por meio de análise probabilística.

Segundo a AIEA (IAEA, 1999a), as vantagens da avaliação de um evento ou cenário baseada no risco são: levar em conta tanto as probabilidades quanto as consequências; prover uma base para comparar os efeitos de diferentes cenários em termos de significância e integrar os efeitos de todos os tipos de cenários. As desvantagens incluem: o conceito de risco não é facilmente entendido; a atribuição de valores para a probabilidade é uma tarefa difícil; e pessoas tenderem a dar maior importância se as doses forem elevadas, mesmo que a probabilidade de ocorrência seja muito baixa.

Em particular, o julgamento das pessoas acerca de atividades perigosas é sensível, não somente à frequência estatística, como também a fatores tais como: a familiaridade com essas atividades; seus potenciais catastróficos (em termos de lesão a um número significativo de pessoas); suas capacidades de gerar pânico ou ansiedade; suas possibilidades de gerar efeitos retardados (ou latentes), assim como o grau de controle pessoal dos indivíduos em relação a essas atividades (CROSS, 1998; WAKEFIELD *et al.*, 2001; WEBER, 2001; SLOVIC e WEBER, 2002; BICKERSTAFF, 2004).

A partir dos estudos realizados, de modo geral, pode-se dizer que:

- os riscos impostos ou involuntários são vistos como muito mais severos do que aqueles voluntários;
- os riscos que estão sob controle da sociedade (cidadãos) são mais facilmente aceitos do que aqueles que estão ape-

nas sob o controle do governo, o que gera insegurança e desconfiança da sociedade com relação às autoridades;

- é relevante a avaliação de impactos sobre as gerações futuras;
- é valorizado o potencial catastrófico;
- deve-se considerar a igualdade, no sentido de que aqueles que estão sujeitos aos riscos também usufruam dos benefícios advindos da sujeição a esses riscos;
- a percepção de riscos é afetada também pela credibilidade da fonte de informação sobre o risco anunciado.

4 | AVALIAÇÃO DE SEGURANÇA E DE RISCO EM REPOSITÓRIOS PRÓXIMOS À SUPERFÍCIE

Segundo a AIEA (IAEA 2004b), a avaliação de riscos de deposição de rejeitos radioativos pode ser realizada por análises determinística e/ou probabilística. Na análise determinística é realizada uma simulação do comportamento do sistema utilizando grupos de parâmetros, eventos e aspectos, metodologia da IAEA (2004b, 2004c), que utiliza como base as *FEP – Features, Events and Processes*. Já na análise probabilística, os valores dos parâmetros, eventos e aspectos são representados por uma distribuição de probabilidade, cujos resultados serão representados também por uma distribuição (sic). Cabe ressaltar que esta é a visão que os profissionais da área de radioproteção têm com relação à análise probabilística.

Vários estudos para avaliação de riscos para deposição de rejeitos radioativos têm sido realizados desde a década de 70. Entre outras referências, podem ser citadas Bertozzi *et al.* (1978), Pritzker e Gassman (1980), Chang e Cho (1984), Malbrain (1984), Kim, T.W. *et al.* (1988), Garrick (2002) e Cohen (2003) para rejeitos radioativos de alta atividade e Cohen (1984), Kim, P.O. *et al.* (1988), Han *et al.* (1991), Krishnamoorthy *et al.* (1991), Kim e Kim (1993), Vieno e Nordman (1998), Nair e Krishnamoorthy (1999), Little e Penfold (2003) e Ene (2004) para rejeitos de baixa e média atividade. Cada trabalho aborda, de maneira singular, toda ou parte da avaliação de segurança ou avaliação de desempenho ou avaliação de risco, quer seja por modelos determinísticos quer seja por modelagem probabilística.

Cohen (1984) desenvolveu uma avaliação probabilística genérica de risco para o cálculo de número esperado de mortes entre o público, devido ao escape de radioatividade de um sistema de deposição (*burial grounds*) de rejeito radioativo de baixo nível oriundo da geração de energia nuclear. Neste caso,

o foco foi a probabilidade de ingestão humana. Não há discussão sobre barreiras do repositório, pois o modelo de deposição escolhido não apresenta o conceito de múltiplas barreiras.

O tema referente às incertezas envolvidas no processo de corrosão de embalagens de rejeitos radioativos de alta atividade foi abordado por diversos autores. Entre eles, podem ser citados: Sutcliffe (1984), que utilizou a distribuição de probabilidade na forma de um histograma para representar as incertezas; e Budhi *et al* (1986), que desenvolveram uma modelagem probabilística de liberação de radionuclídeos do embalado, cuja ideia central são as incertezas tanto nos parâmetros de transporte dos radionuclídeos quanto na natureza aleatória das falhas do contêiner na estimação das taxas de liberação.

Análises de incertezas também foram realizadas por Song e Lee (1989, 1992). Em 1989, aplicou-se o método de confiabilidade de primeira ordem (FORM – *First Order Reliability Method*) para o problema de corrosão de embalagens de rejeito radioativo de alta atividade, para prover a avaliação quantitativa de incertezas envolvidas. Em 1992, ampliaram o estudo, considerando também a modelagem do transporte difusivo do radionuclídeo no material de preenchimento (*backfill*) e a taxa acumulada de liberação para o ambiente, obtida pela modelagem do transporte do radionuclídeo na geosfera para repositórios geológicos.

Uma modelagem de confiabilidade para embalagens de rejeito radioativo de alta atividade foi desenvolvida por Chesnut (1993) e por Ananda (1994): Chesnut (1993) trabalhou com o tempo para falhar de um único embalado, bem como para embalados múltiplos e Ananda (1994) utilizou a abordagem condicional para falha do embalado pela temperatura elevada do rejeito de alta atividade. Ananda (1999) ampliou a abordagem

condicional para embalados múltiplos, mais precisamente, para duas barreiras. Para embalagens de rejeitos de baixa e média atividade, Aguiar *et al* (2005a) discutiram a confiabilidade para grande número de embalagens. A discussão foi baseada na utilização da distribuição de probabilidade que melhor representasse o tempo para a falha das embalagens. As conclusões do estudo conduziram à necessidade de emprego de um sistema mais complexo, de múltiplas barreiras de engenharia, necessárias à retenção mais confiável do material radioativo.

Rechard (2000) apresentou um histórico sobre avaliação de desempenho de uma planta-piloto para a deposição de rejeito contaminado com radioisótopos transurânicos. Garrick (2002) discutiu a utilização de avaliação de risco para avaliar instalações de deposição de rejeitos radioativos e não radioativos nos Estados Unidos. Cabe ressaltar que o autor definiu avaliação de risco como avaliação de segurança baseada em risco, a qual denominou avaliação de desempenho.

Cohen (2003) propôs uma análise de risco probabilística para um sítio médio (média das propriedades dos sítios) dos Estados Unidos para um repositório de rejeito radioativo de alta atividade. Segundo o autor, o resultado pode ser interpretado como resultado médio de uma análise probabilística de segurança para um número grande de sítios selecionados aleatoriamente. Ewing *et al.* (2004) fazem comentários dos pontos que discordam no artigo de Cohen (2003) e, na mesma edição do periódico, Cohen (2004) responde aos comentários de Ewing *et al.* (2004).

Lemos (2003) utilizou lógica difusa (*fuzzy logic*) como metodologia complementar para a análise e interpretação de dados para repositório de rejeito radioativo de pequeno e médio nível de atividade aplicado ao Repositório de Abadia de Goiás. Os

parâmetros considerados foram a caracterização do inventário radioativo, a taxa de degradação do concreto, a taxa de degradação dos contêineres e a migração dos radionuclídeos.

Aguiar *et al.* (2005b) estimaram a probabilidade de liberação de radionuclídeos através da água infiltrada no repositório de rejeitos radioativos de baixa e média atividades gerados pela Central Nuclear Almirante Álvaro Alberto. O repositório foi dividido em 2 subsistemas: subsistema 1 constituído pelas barreiras contra a infiltração de água (material de preenchimento e embalagem) e subsistema 2 constituído pelas barreiras contra o produto da lixiviação do radionuclídeo até a biosfera (matriz e geosfera). O repositório foi considerado um sistema cujos componentes (barreiras) trabalham em paralelo ¹ ativo ². O estudo foi conduzido com base na técnica de Análise Probabilística de Segurança (APS) para o período de controle institucional (fase pós-fechamento).

4.1 | Abordagem Múltiplas Barreiras

A deposição próxima à superfície objetiva isolar o rejeito do meio ambiente acessível ao homem durante um período suficientemente longo para permitir o decaimento substancial dos radionuclídeos de meias-vidas mais curtas e, em longo prazo, limitar liberações dos radionuclídeos remanescentes. O conceito de múltiplas barreiras é empregado para alcançar estes objetivos onde a forma do rejeito (matriz), as barreiras de engenharia e o sítio (geosfera) contribuirão para o isolamento dos radionuclídeos. O conceito de múltiplas barreiras vem sendo

¹ barreiras em paralelo: a falha do sistema somente ocorre quando todas as barreiras falham

² paralelo ativo: as barreiras operam todas ao mesmo tempo

desenvolvido tanto para a deposição próxima à superfície, como para a geológica (IAEA, 2002a).

Pritzker e Gassmann (1980) desenvolveram um método baseado em modelos simplificados de confiabilidade para estimar os riscos de liberação de radionuclídeos de um repositório subterrâneo de rejeito radioativo de alta atividade. O repositório é tratado como um conjunto de barreiras (material de preenchimento, contêiner, matriz de rejeito e geosfera). Definiram risco como o produto de todas as probabilidades de falha do sistema de barreiras decorrentes de todos possíveis eventos iniciadores, pelo inventário a ser liberado, isto é, taxa de descarga provável de uma radionuclídeo para a área receptora em função do tempo. Assumiram a água como sendo o único meio de transporte para o radionuclídeo, o tempo para falhar de cada barreira foi considerado uma variável aleatória com distribuição exponencial, e para o modelo da falha do repositório, o mesmo foi considerado sistema redundante em reserva.

Cho *et al.* (1992) desenvolveram uma metodologia probabilística de avaliação de segurança para um repositório de rejeito radioativo de alta atividade usando um método de análise de confiabilidade de sistemas baseado em modelos mecanicistas, cujo foco foi o de análise de incertezas nos modelos e nos parâmetros utilizados. Dividiram o sistema repositório em 4 barreiras (contêiner, matriz de rejeito, material de preenchimento e geosfera) e assumiram distribuições específicas para o tempo de falha para cada barreira. Para o modelo da falha do repositório, o mesmo foi considerado sistema que opera de forma sequencial e seus componentes são independentes. Assumiram que o risco do repositório é avaliado com base na quantidade de radionuclídeo liberado (taxa de liberação) para a biosfera.

Kim *et al.* (1993) desenvolveram um modelo composto para a avaliação de risco para um repositório (*shallow land burial*) de rejeito radioativo de baixo nível de atividade para o cenário de intrusão de água. Tal modelo é composto por termo-fonte, modelos para a falha do repositório, para a geosfera, para a biosfera e modelo de efeitos-dose para a saúde humana. E estimaram o risco em termos de taxa de morte por câncer. O repositório foi dividido em barreiras (material de preenchimento, contêiner, matriz de rejeito e geosfera), cujo tempo para falhar seguiu uma distribuição própria baseada na distribuição exponencial e o sistema, para o modelo da falha, também foi considerado em operação sequencial.

Nair e Krishnamoorthy (1999) desenvolveram um modelo de avaliação probabilística de segurança para a avaliação de desempenho para repositórios próximos à superfície para rejeitos radioativos de baixo nível de atividade. O modelo é composto por termo fonte, falha do repositório, transporte na geosfera e avaliação radiológica. Ênfase foi dada à migração de radionuclídeos do sistema de deposição através da geosfera e biosfera e à dose de radiação resultante, bem como o risco para o membro do grupo crítico, baseado nas taxas de falhas das barreiras (cobertura, contêiner, matriz, material de preenchimento, fundo e geosfera). Assumiram que as barreiras são redundantes em reserva e que as falhas iniciadas por infiltração de água possuem tempos de ocorrência que seguem uma distribuição exponencial.

As referências pesquisadas até a presente data evidenciam o interesse em se modelar o comportamento de deposição de rejeitos radioativos, quer sejam de alta atividade, quer sejam de pequena e média atividades. Outro ponto importante é a utilização de métodos probabilísticos para se levar em conta as diversas incertezas envolvidas. Nota-se que a maioria das

referências encontradas é do final da década de 80 e início da década de 90. Uma hipótese plausível para este fato é que este período é contemporâneo dos estudos iniciais realizados para os repositórios atualmente em operação.

Os trabalhos desenvolvidos por Pritzker e Gassmann (1980), Cho *et al.* (1992), Kim *et al.* (1993) e Nair e Krishnamoorthy (1999) abordam mais diretamente o tema desta publicação. Por esta razão, efetuar-se-ão comentários pertinentes e analíticos.

Todos os quatro trabalhos consideram o repositório constituído de barreiras redundantes que operam sequencialmente, cujos componentes são independentes. O cenário de falha do sistema é infiltração de água.

Para Pritzker e Gassmann (1980) e Nair e Krishnamoorthy (1999), os tempos de falha para cada barreira são iguais e seguem uma distribuição exponencial. Para Cho *et al.* (1992) cada barreira segue uma distribuição específica. Kim *et al.* (1993) estabeleceram uma função densidade de probabilidade de falha para cada barreira tendo como base a distribuição exponencial, porém, ao ser integrada de zero a infinito, não fornece o valor unitário como resultado (condição para ser uma função densidade de probabilidade). Todos os quatro adotaram a mesma função densidade de probabilidade para o sistema repositório, e essa função é dada por uma integral de convolução³, que representa sequência temporal das falhas das barreiras.

³ convolução é um operador matemático que, a partir de duas funções, produz uma terceira. Integral de convolução é a integral do produto de uma das funções com uma cópia revertida e deslocada da outra. A função resultante depende do valor deste deslocamento.

Pritzker e Gassmann (1980) e Cho *et al.* (1992) trabalharam com repositório de rejeitos radioativos de alta atividade e definiram risco com base na quantidade de radionuclídeos liberados do repositório para o meio ambiente. Kim *et al.* (1993) e Nair e Krishnamoorthy (1999) trabalharam com repositório de rejeitos radioativos de baixo nível de atividade e desenvolveram uma avaliação de risco para esses com base em taxa de dose anual. Porém estes dois trabalhos (KIM *et al.*, 1993 e Nair e Krishnamoorthy, 1999) que calcularam o risco, o fizeram multiplicando a dose pelo fator de risco, não utilizaram a probabilidade de falha, conforme definição de risco apresentada na Equação 1.

Pritzker e Gassmann (1980), Cho *et al.* (1992), Kim *et al.* (1993) e Nair e Krishnamoorthy (1999) fizeram uso do produto entre a atividade (Bq) e a função densidade de probabilidade de falha (dada pela integral de convolução) do sistema (1/a). Porém Pritzker e Gassmann (1980) e KIM *et al.* (1993) o definiram como sendo risco, já Cho *et al.* (1992) e Nair e Krishnamoorthy (1999), como sendo a taxa de liberação de radionuclídeo (Bq/a), denominação, de fato, mais apropriada por se tratar de uma taxa, e não de risco.

Previamente, sistemas de múltiplas barreiras eram encarados como grupos de barreiras individuais independentes que trabalhavam sequencialmente (PRITZKER e GASSMANN, 1980; CHO *et al.*, 1992; KIM *et al.*, 1993; NAIR e KRISHNAMOORTHY, 1999). Porém, esse conceito é agora visto de maneira mais integrada e sinérgica, como barreiras complementares que operam simultaneamente e em conjunto umas com as outras (IAEA, 2002a).

5 | DOCUMENTAÇÃO DE INSTITUIÇÕES RESPONSÁVEIS PELO GERENCIAMENTO DE REJEITO RADIOATIVO

Quanto aos documentos da Agência Internacional de Energia Atômica, que abordam o gerenciamento de rejeito radioativo, citam-se: IAEA (1994, 1995a, 1995b, 2001d). Os documentos que abordam a avaliação de desempenho para Repositórios Próximos à Superfície são:

- IAEA (1999b) provê recomendações de como encontrar os requisitos necessários à avaliação de segurança para a deposição de rejeitos radioativos próximos à superfície;
- IAEA (2004b, 2004c) - apresentam uma análise das metodologias comumente utilizadas na avaliação de segurança para instalações de deposição próximo à superfície;
- IAEA (1999a) - reúne os requisitos básicos que a experiência internacional tem mostrado serem necessários para garantir a segurança de repositórios próximo à superfície;
- IAEA (2002a) - discute as bases técnicas e científicas para a deposição de rejeitos radioativos de baixo e médio nível de atividade; e
- IAEA (2001c) - faz considerações técnicas no projeto de instalações de deposição próximo à superfície de rejeitos radioativos para garantir a segurança em longo prazo.

Com relação aos documentos da AIEA que tratam do comportamento do sistema, aqueles que atendem ao critério da pertinência precípua são:

- IAEA (2003d) - provê considerações sobre o desenvolvimento de repositórios próximos à superfície para rejeitos radioativos;

- IAEA (1996) - aborda os requisitos e métodos para a aceitabilidade de embalados de rejeitos de baixo e médio nível de atividade;
- IAEA (2004) - apresenta uma revisão, baseada na experiência internacional, sobre o comportamento de embalados de rejeitos radioativos de baixa e média atividade sujeitos às condições de um repositório em longo prazo;
- IAEA (2001b) - apresenta o desempenho das barreiras de engenharia para instalações de deposição de rejeitos próximas à superfície, com base nos repositórios existentes no mundo; e
- IAEA (2003c) - apresenta uma abordagem para estabelecer critérios de aceitabilidade de rejeitos radiológicos usando metodologias de avaliação de segurança, e ilustra com o estabelecimento de limites de atividade de rejeito radioativo de instalações de deposição próxima à superfície.

Entre os documentos da NIREX – United Kingdom Nirex Limited, os que abordam avaliação de segurança probabilística para repositórios são:

- NIREX (2001) - apresenta uma avaliação de segurança probabilística para a fase de operação de um repositório genérico de rejeitos radioativos de baixo e médio nível de atividade, cujo propósito é prover uma indicação quantitativa dos riscos radiológicos para os trabalhadores bem como para o público em geral;
- NIREX (1994) - apresenta sucintamente uma avaliação de desempenho de um repositório geológico, para a deposição de rejeitos radioativos de baixo e médio nível de atividade, cujo enfoque é a avaliação de segurança probabilística;

- NIREX (1987) - trata de uma avaliação radiológica preliminar do projeto de um repositório próximo à superfície utilizando modelos de avaliação probabilística de segurança. Ressalta-se que esse último não foi disponibilizado, devido à natureza comercial do conteúdo.

As normas aplicáveis ao gerenciamento de rejeito radioativos da Comissão de Nacional de Energia Nuclear são:

- CNEN (1980) - estabelece informações e requisitos mínimos exigidos pela CNEN para a emissão do Certificado de Aprovação do relatório de Análise de Segurança de sistemas de barragem de rejeitos contendo radionuclídeos;
- CNEN (1988a) - estabelece as diretrizes básicas de radioproteção, abrangendo os princípios, limites, obrigações e controles básicos para a proteção do Homem e do seu meio ambiente contra possíveis efeitos indevidos causados pela radiação ionizante;
- CNEN (1988b) - estabelece requisitos, com relação ao transporte de materiais radioativos, de radioproteção e segurança, a fim de garantir um nível adequado de controle da eventual exposição de pessoas, bens e meio ambiente à radiação ionizante, compreendendo, entre outros, a seleção do tipo de embalado e requisitos de seu projeto;
- CNEN (1998) - estabelece o processo relativo ao Licenciamento de Instalações Radioativas. O processo se aplica às atividades relacionadas com a localização, construção, operação e modificações de instalações radioativas;
- CNEN (1985a) - estabelece critérios gerais e requisitos básicos relativos à Gerência de Rejeitos Radioativos nas instalações radioativas sujeitas ao licenciamento da CNEN, conforme Norma NE – 6.02 (CNEN, 1998);

- CNEN (1985b) - estabelece os requisitos mínimos aplicáveis ao processo de seleção e escolha de locais para depósitos finais ou intermediários ou provisórios de rejeitos de baixos e médio níveis de radiação, objetivando a garantia do confinamento seguro desses rejeitos pelo tempo que se fizer necessário à proteção e segurança do Homem e do Meio Ambiente;
- CNEN (2002) - estabelece critérios para aceitação de rejeitos radioativos de baixo e médio níveis de radiação para a deposição segura em repositório, a fim de assegurar a proteção dos trabalhadores, da população e do meio ambiente contra os efeitos nocivos das radiações ionizantes;
- Além das normas aludidas, a CNEN (1991) também pode ser utilizada como referência. Trata-se de uma Instrução Técnica, objetivando especificamente a orientação ao atendimento de requisitos mínimos de radioproteção e segurança exigidos pela CNEN para a deposição final dos rejeitos radioativos armazenados em Abadia de Goiás, decorrentes da violação de uma fonte de Cs-137, em setembro de 1987, em Goiânia (GO).

6 | TRABALHOS ACADÊMICOS NACIONAIS SELECIONADOS SOBRE O GERENCIAMENTO DE REJEITO RADIOATIVO

Santos (1979) realizou um levantamento da quantidade de rejeitos radioativos a serem gerados no Programa Nuclear Brasileiro. Com relação a rejeitos radioativos de alta atividade, Mattos (1981) realizou uma análise preliminar sobre a deposição desses rejeitos em formações geológicas existentes no Estado de São Paulo e Martins (2004) estudou uma metodologia para seleção de locais para a deposição de rejeitos de alta atividade.

Enokihara (1983) abordou o armazenamento de rejeitos enfatizando a deposição em rochas para rejeitos radioativos oriundos dos institutos de pesquisa, hospitais, indústrias e agriculturas. Raduan (1994) apresentou os requisitos ambientais para repositórios de superfície e Vieira de Sá (2001) propôs um modelo para a simulação da liberação de radionuclídeos de repositórios de rejeitos radioativos. Marumo (1997) estudou a durabilidade do concreto, avaliando a difusão de cloretos e o ataque por sulfatos em pastas e argamassas de cimento portland comum, que são utilizados para a construção de repositórios de rejeitos radioativos.

Branco (2002) desenvolveu dois modelos probabilísticos de simulação do transporte de radionuclídeos na água subterrânea (meio poroso saturado) de repositórios de rejeitos radioativos e realizou uma avaliação de incertezas da modelagem. Aguiar (2006) propôs uma metodologia, com base em abordagem determinística e probabilística (Cadeias de Markov) para avaliar os riscos de fatalidade de câncer associados à liberação líquida de depósito de rejeito radioativo próximo à superfície na fase pós-fechamento. Devido à localização do referido repositório, litoral fluminense, as vias de exposição

consideradas neste último trabalho foram a ingestão de peixes e crustáceos marinhos contaminados e o contato com sedimentos de praia contaminados.

7 | CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir da revisão realizada, constata-se grande variedade na utilização dos termos mais comuns da área de análise probabilística de segurança, quais sejam: avaliação, análise e risco. Desta forma, propõe-se as seguintes definições no âmbito do tema abordado no presente trabalho.

Risco: uma medida de dano ao homem, degradação ambiental ou perda econômica em termos de probabilidade de ocorrência do evento e da magnitude da perda ou do dano associado ao evento (AIChE, 2000).

Análise de Risco: processo de estimativa qualitativa e/ou quantitativa do risco, baseado em conhecimento *Ad hoc*, experiência operacional, diagnose de engenharia e técnicas matemáticas (adaptado de AIChE, 2000).

Avaliação de Risco: processo pelo qual os resultados na análise de risco são comparados com padrões com o objetivo de tomar decisões estratégicas (AIChE, 2000).

Avaliação de Segurança: avaliação do impacto do evento na segurança do sistema como um todo e seus potenciais efeitos do impacto na saúde humana e no meio ambiente (IAEA, 2003a).

Avaliação de Desempenho: avaliação do desempenho do sistema ou subsistema operacional de uma instalação planejada ou autorizada e suas implicações para a proteção e segurança. Difere da avaliação de segurança, pois pode ser aplicada em partes da instalação, e não necessariamente requer a avaliação dos impactos (IAEA, 2003a).

Nas definições acima, o termo análise sugere mais estritamente um processo que tem como principal objetivo o entendimento de um tema. Por outro lado, a realização de uma

avaliação implica no estabelecimento de juízo de valor sobre o tema analisado. Segundo essas considerações, diversos tipos de análises podem ser usadas como ferramentas para realizar uma avaliação.

A partir das definições empregadas, pode-se afirmar que a avaliação de risco é parte integrante da avaliação de segurança.

A utilização de técnicas avançadas para a análise de riscos proporciona aos órgãos reguladores e às instituições que utilizam materiais radioativos a possibilidade de, em conjunto, adotarem soluções integradas para o gerenciamento destes materiais. Na prática, estas técnicas propiciam as condições para a previsão da ocorrência de problemas operacionais nas instalações, proporcionando assim os subsídios necessários para definir alternativas de gerenciamento que compatibilizem requisitos ambientais e de segurança com a utilização de materiais radioativos.

Há diversas fontes de incertezas envolvidas em avaliações de segurança de repositórios. Além das incertezas introduzidas nestas avaliações como consequência da utilização de modelos para representar sistemas reais, há também as incertezas envolvidas na previsão das ações humanas no futuro e as limitações na previsão da evolução das condições físicas do repositório e seu ambiente, a longo prazo. Devido a estas incertezas, torna-se importante a modelagem probabilística como ferramenta de tomada de decisão, quando o repositório estiver ainda na fase de projeto. Além da magnitude da exposição que poderá ocorrer, segundo Song e Lee (1992), é preciso considerar também a probabilidade de que os vários receptores potenciais recebam diferentes níveis de dose anual.

A base para avaliação de desempenho do sistema de deposição é o entendimento da sua evolução gradual. A segurança em longo prazo do sistema de deposição de rejeitos radioativos pode ser demonstrada somente por modelagem preditiva da liberação, migração e comportamento do radionuclídeo no meio ambiente. E essas modelagens, inevitavelmente, estarão sujeitas a diversas incertezas; não somente incertezas sobre as taxas que influenciarão o meio ambiente no futuro, mas também sobre quando os eventos de liberação ocorrerão.

Ao avaliar o risco por meio do produto da probabilidade (frequência) de ocorrência do evento (cenário) pelo valor da consequência a ele associada, e não somente fazê-lo levando em conta as consequências de ocorrência do evento (prática comum quando não é realizada uma APS), é possível efetivamente intervir para reduzir a probabilidade de ocorrência deste evento.

Os riscos podem ser reduzidos por medidas de prevenção (atuação para minimizar a probabilidade/frequência de ocorrência do evento/cenário) ou de proteção (atuação para minimizar as consequências associadas ao evento/cenário). Tais medidas devem fazer parte de um Programa de Gerenciamento de Risco (PGR).

As ações de gerenciamento de rejeito radioativo compreendem medidas que garantem a proteção da saúde humana e do meio ambiente, em consonância com os princípios e exigências internacionais, e devem cobrir todas as fases da operação do repositório que possam resultar em exposição a radiações.

BIBLIOGRAFIA

- AGUIAR, L.A.; ALVES, A. S.; PASSOS, E. M; FRUTUOSO E MELO, P.F. Confiabilidade de embalados de rejeitos radioativos em repositórios próximos à superfície. Anais do ENAN / International Nuclear Atlantic Conference (INAC 2005). Santos – SP, 2005a.
- AGUIAR, L.A.; ALVES, A. S.; PASSOS, E. M; FRUTUOSO E MELO, P.F. Probabilidade de liberação líquida de radionuclídeos de um Repositório próximo à superfície. Anais do ENAN / International Nuclear Atlantic Conference (INAC 2005). Santos – SP, 2005b.
- AGUIAR, L.A.; Avaliação de risco de um repositório próximo à superfície na fase pós-fechamento em cenário de liberação de radionuclídeos por infiltração de água. Tese de Doutorado, COPPE/UFRJ, 2006.
- AICHe. Guidelines for Chemical Process Quantitative Risk Analysis (2nd Edition). Center for Chemical Process Safety/AICHe, 2000.
- ANANDA, Malwane M. A. & SINGH, Ashok K., Performance assessment of multiple engineered barrier systems. Applied Mathematics and Computation, 102, 1999.
- ANANDA, M. M. A., reliability modeling of engineered barrier systems for nuclear waste: a conditional approach. Microelectronics Reliability, vol 34, n 7, 1994.
- BERTOZZI, G., D'ALESSANDRO, M., GIRARDI, F., and VANASSI, M. Safety assessment of radioactive disposal into geological formation. EUR-5901, Commission of the European Community, Luxemburg, (1978).
- BICKERSTAFF, K., Risk perception research: socio-cultural perspectives on the public experience of air pollution. Environmental International, vol 30, 2004.
- BRAGG,K.; GERA, F., Assessing approaches, safety issues in the disposal of solid radioactive waste. IAEA Bulletin, 42, mar 2000.
- BRANCO, O. E. A., Avaliação de incertezas da modelagem do transporte de radionuclídeos no subsolo de repositórios de rejeitos radioativos. Tese de Doutorado, COPPE/UFRJ, 2002.
- BUDHI, S.; ESLINGER, P. W. & BACA, R. G., probabilistic modeling of radionuclide release at the waste package subsystem boundary of a repository in Basalt, Nuclear Technology, vol 75, 1986.

- COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL (CETESB). Manual de Orientação para a Elaboração de Estudos de Análise de Riscos. São Paulo: Cetesb, 1994.
- COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL (CETESB). Manual de Orientação para a Elaboração de Estudos de Análise de Riscos. São Paulo: Cetesb, 2003.
- CHANG, S. H. and CHO, W. J. Risk analysis of radioactive waste repository based on the time-dependent hazard rate. *Radioactive Waste Management and the Nuclear Fuel Cycle* 5:63 (1984).
- CHESNUT, D. A., Demands placed on waste package performance testing and modeling by some general results of reliability analysis, *Nuclear Technology*, v 104, Nov. 1993
- CHO, Won-Jin; CHANG, Soon-Heung & PARK, Hum-Hwee, Uncertainty analysis of safety assessment for high-level radioactive waste repository, *Waste Management*, v 12, 1992
- COHEN, B. L. A generic probabilistic risk assessment for low level waste burial grounds. *Nuclear and Chemical Waste Management* 5:39 (1984).
- COHEN, B. L., Probabilistic risk analysis for high-level radioactive waste repository. *Risk Analysis*, Vol. 23, No. 5, 2003.
- COHEN, Bernard L., Response to the comments by Ewing, Palenik, and Konikow. *Risk Analysis*, Vol. 24, No. 6, 2004.
- COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR, Seleção e Escolha para Locais de Depósitos de Rejeitos Radioativos, CNEN-NE-6.06, CNEN, Rio de Janeiro, 1985b.
- COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR, Diretrizes Básicas de Radioproteção, CNEN-NE-3.01, CNEN, Rio de Janeiro, 1988a.
- COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR, Radioproteção e segurança para deposição final dos rejeitos radioativos armazenados em Abadia de Goiás, Projeto de Instrução Técnica, CNEN-IT-01/91, CNEN, Rio de Janeiro, 1991.
- COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR, Critérios de Aceitação para Deposição de Rejeitos Radioativos de Baixo e Médio Níveis de Radiação, CNEN-NE-6.09, CNEN, Rio de Janeiro, 2002.

- COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR, Gerencia de Rejeitos Radioativos em Instalações Rdaioativas, CNEN-NE-6.05, CNEN, Rio de Janeiro, 1985a.
- COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR, Licenciamento de Instalações Radiativas Posição Regulatória 6.02 / 001, CNEN-NE-6.02, CNEN, Rio de Janeiro, 1998.
- COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR, Segurança de Sistemas de Barragem de Rejeitos Contendo Radionuclídeos, CNEN-NE-1.10, CNEN, Rio de Janeiro, 1980.
- COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR, Transporte de materiais radioativos, CNEN-NE-5.01, CNEN, Rio de Janeiro, 1988b.
- CROSS, F. B., facts and values in risk assessment. *Reliability Engineering and System Safety*, vol 59, 1998.
- DLOUHÝ, Z. Safety aspects of radioactive waste disposal in Czechoslovakia, *Proceedings of a Symposium – Sitting, Densin and Construction of Underground Repositories for Radioactive Waste*, IEAE-SM-289/11, Hancorver, 1986.
- ENE, Daniela, Test Case of the Long Term Preliminary Performance Assessment for the L&IL Radioactive Waste Repository Baita Bihor, Romania, ICRS-10/RPS Madeira, 2004
- ENOKIHARA, C. T., Armazenamento de rejeitos radioativos no Brasil com ênfase especial em rochas. Dissertação de Mestrado, IPEN/USP, 1983.
- EPA, Estimating Radiogenic cancer risks. U.S. Environmental Protection Agency. EPA 402-R-93-076. Washington, 1994.
- EWING, R. C.; PALENIK, C. S. & KONIKOW, L. F. Comment on 'probabilistic risk analysis for a hight-level radioactive waste repository' by B. L. Cohen. *Risk Analysis*, Vol. 24, No. 6, 2004.
- GARRICK, John B., The use of risk assessment to evaluate waste disposal facilities in the United States of America, *Safety Science* 40, 135–151, 2002.
- Han, K. W., CHO, W. J., KANG, C. H., and KIM, C. H. Genetic safety assessment for LLW repository. *Proceedings of the 1991 Joint International Waste Management Conference* 1:107 (1991).

- INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Classification of radioactive waste, A safety Guide, Safety Series n0 111-G-1.1, may 1994.
- INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Considerations in the development of near surface repositories for radioactive waste, Technical Reports Series no. 417, aug 2003d.
- INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Performance of engineered barrier materials in near surface disposal facilities for radioactive waste, TECDOC - 1255, IAEA, Vienna, 2001b.
- INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Requirements for the safe management of radioactive waste; TECDOC-853, dec 1995b.
- INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, The principles of radioactive waste management, Safety Series No. 111-F, IAEA, Vienna, 1995a.
- INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Handling and processing of radioactive waste from nuclear applications,. Technical reports series 402, 2001d.
- INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Long term behaviour of low and intermediate level waste packages under repository conditions, TECDOC –1397, jun 2004.
- INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Near surface disposal of radioactive waste, Safety Standars Series No. WS-R-1, IAEA, Vienna, 1999a.
- INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Safety assessment for near surface disposal of radioactive waste, Safety Guide No. WS-G-1.1, IAEA, Vienna, 1999b.
- INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Scientific and technical basis for the near surface disposal of low and intermediate level waste, Thechnical Reports Series No. 412, IAEA, Vienna, 2002a.
- INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Radioactive waste management glossary, IAEA, Vienna, 2003a.
- INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Derivation of activity limits for the disposal of radioactive waste in near surface disposal facilitie. TECDOC no.1380, dec 2003c.

- INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Safety assessment methodologies for near surface disposal facilities, results of a coordinated research project. Volume 1 – Review and enhancement of safety assessment approaches and tools, IAEA, Vienna, 2004b.
- INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Safety assessment methodologies for near surface disposal facilities, results of a coordinated research project. Volume 2 – test cases, IAEA, Vienna, 2004c.
- INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Performance of engineered barrier materials in near surface disposal facilities for radioactive waste, TECDOC - 1255, IAEA, Vienna, 2001b.
- INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, The principles of radioactive waste management, Safety Series No. 111-F, IAEA, Vienna, 1995a.
- INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Technical considerations in the design of near surface disposal facilities for radioactive waste, TECDOC-1256, nov 2001c.
- KIM, P. O., CHO, W. J., and CHANG, S. H. Probabilistic safety assessment of low level waste disposal system. *Radioactive Waste Management and the Nuclear Fuel Cycle* 10:253 (1988).
- KIM, T. W., CHANG, S. H., and LEE, B. H. Uncertainty and sensitivity analyses in evaluating risk of high level waste repository. *Radioactive Waste Management and the Nuclear Fuel Cycle* 10:321, 1988.
- KIM, Y. N.; KIM, J. K. & KIM, T. W., Risk assessment for shallow land burial of low level radioactive waste, *Waste management*, v 13, n 8, 1993
- KRISHNAMOORTHY, T. M., NAIR, R. N., SARMA, T. P., and PILLAI, K. C. Models for shallow land disposal of low and intermediate level radwastes. *Proceedings of the 1991 Joint International Waste Management Conference* 1:127, 1991.
- LACOSTE, A. C., Safety issues in the near surface disposal of radioactive waste, international conference on the safety of radioactive waste management, Spain, 2000. [GOV/INF/2000/8-GC(44)/INF/5, IAEA – may 2000]

- LEMOS, F. L; et al., Safety Assessment of low and intermediate levels radioactive waste facilities using fuzzy logic: a case example. IEEE International Conference on Industrial Informatics INDIN 2003, Banff – Alberta – Canadá, ago 2003.
- LEWIS, E.E. Introduction to reliability engineering. John Wiley & Sons Inc. 2nd ed. 1996.
- LITTLE, R.H. & PENFOLD, J.S.S., Document Title: Preliminary Safety Assessment of Concepts for a Permanent Waste Repository at the Western Waste Management Facility Bruce Site: Summary Report, Quintessa Limited, Ontario - Canada, march 2003.
- MALBRAIN, C. M. Risk assessment and the regulation of high level waste repository. Doctoral dissertation, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge (1984).
- MARTINS, V. B., Estudo de uma metodologia para seleção de locais para disposição final dos rejeitos radioativos das usinas nucleares brasileiras. Dissertação de Mestrado, COPPE/UFRJ, 2004.
- MARUMO, J. T., Difusão de cloretos e ataque por sulfatos em pastas e argamassas de cimento portland. Dissertação de Mestrado, IPEN/USP, 1997.
- MATTOS, L. A. T. de, Análise preliminar sobre disposição de rejeitos radioativos de alta atividade em formações geológicas do Estado de São Paulo. Dissertação de Mestrado, IPEN/USP, 1981.
- NAIR, R.N. & KRISHNAMOORTHY T.M., Probabilistic safety assessment model for near surface radioactive waste disposal facilities, Environmental Modelling & Software 14, 447–460, 1999
- NIREX, Generic repository studies: - probabilistic safety assessment. United Kingdom, 2001.
- NIREX, Nirex near-surface repository project: preliminary radiological assessment: probabilistic safety assessment modelling. United Kingdom, 1987.
- NIREX, Post-closure performance assessment: probabilistic safety assessment; overview. United Kingdom, 1994.
- PRITZKER, A. and GASSMANN, J. Application of simplified reliability methods for risk assessment of nuclear waste repository. Nuclear Technology 48:289 (1980).

- RADUAN, R. N., Requisitos ambientais para disposição final de rejeitos radioativos em repositórios de superfície. Dissertação de Mestrado, IPEN/USP, 1994.
- RECHARD, R. P., Historical background on performance assessment for the Waste Isolation pilot Plant. *Reliability Engineering & System Safety*, vol 69, 2000.
- SANTOS, J. M. E., Análise quantitativa dos rejeitos radioativos a serem gerados no Programa Nuclear Brasileiro. Dissertação de Mestrado, Instituto de Estudos Avançados /USP, 1979.
- SLOVIC, P. & WEBER, E., Perception of risk posed by extreme events. Conference "Risk Management Strategies in an Uncertain World". New York, 2002.
- SONG, J. S. & LEE, K. J., Stochastic analysis of radioactive waste package performance using first-order reliability method. *Waste management*, vol 9, 1989.
- SONG, J. S. & LEE, K. J., System performance assessment of final repository for radioactive wastes using first-order reliability method. *Waste management*, vol 12, 1992.
- SUTCLIFFE, W. G., Uncertainty Analysis: an illustration from nuclear waste package development. *Nuclear and Chemical Waste Management* vol 5 (1984).
- VIEIRA DE SÁ, B.L., Modelo simplificado para simulação da liberação de radionuclídeos de repositórios de rejeitos radioativos. Dissertação de Mestrado, IPEN/USP, 2001.
- VIENO, T. & NORDMAN, H., VLJ Repository safety analysis. Report TVO – 1/98, Finland, July 1998.
- WAKEFIELD, S.; ELLIOTT, S.; COLE, D. & EYLES, J., Environmental risk and (re)action: air quality, health, and civic involvement in an urban industrial. *Health & Place*, vol 7, 2001.
- WEBER, O., Perception of environmental risk of company sites. *Journal of Environmental Psychology*, vol 21, 2001.

SÉRIES CETEM

As Séries Monográficas do CETEM são o principal material de divulgação da produção científica realizada no Centro. Até o final do ano de 2006, já foram publicados, eletronicamente e/ou impressos em papel, cerca de 200 títulos, distribuídos entre as seis séries atualmente em circulação: Rochas e Minerais Industriais (SRMI), Tecnologia Mineral (STM), Tecnologia Ambiental (STA), Estudos e Documentos (SED), Gestão e Planejamento Ambiental (SGPA) e Inovação e Qualidade (SIQ). A Série Iniciação Científica consiste numa publicação eletrônica anual.

A lista das publicações poderá ser consultada em nossa *homepage*. As obras estão disponíveis em texto completo para *download*. Visite-nos em <http://www.cetem.gov.br/series>.

Últimos números da Série Gestão e Planejamento Ambiental

SGPA-08 - **Acumulação de Mercúrio em Tucunaráes da Amazônia.** Ysrael Marrero Vera, Roberto José de Carvalho, Zuleica Carmen Castilhos e Maria Josefina Reyna Kurtz. 2007.

SGPA-07 - **Metodologia de Aplicação do Geoprocessamento na Avaliação da Contaminação de Metal Pesado em Solo: Estudo de Caso em Área Confinada de Indústria.** Luzia Alice Ferreira de Moraes, Ronaldo Luiz Correa dos Santos e Luis Gonzaga dos Santos Sobral, 2006.

SGPA-06 - **Avaliação do Uso do Solo no Entorno da UHE de Porto Primavera Utilizando o Geoprocessamento e Sensoriamento Remoto.** Luzia Alice Ferreira de Moraes, Ronaldo Luiz Correa dos Santos, Edvard Elias de Souza Filho e Luis Gonzaga dos Santos Sobral, 2006.

INFORMAÇÕES GERAIS

CETEM – Centro de Tecnologia Mineral

Avenida Pedro Calmon, 900 – Cidade Universitária

21941-908 – Rio de Janeiro – RJ

Geral: (21) 3867-7222 - Biblioteca: (21) 3865-7218 ou 3865-7233

Telefax: (21) 2260-2837

E-mail: biblioteca@cetem.gov.br

Homepage: <http://www.cetem.gov.br>

NOVAS PUBLICAÇÕES

Se você se interessar por um número maior de exemplares ou outro título de uma das nossas publicações, entre em contato com a nossa biblioteca no endereço acima.

Solicita-se permuta.

We ask for interchange.