



**Deposição Geológica de Rejeitos Radioativos:
Formações Geológicas e Diretrizes no Contexto do Programa Nuclear Brasileiro**
Geological Disposal of Radioactive Wastes:
Geological Formations and Guidelines in the Context of the Brazilian Nuclear Program

Paulo Fernando Laval Heilbron Filho¹; Corbiniano Silva²; Rex Nazaré Alves⁴;
Jesus Salvador Pérez Guerrero¹; Ana Maria Xavier¹;
Monica da Costa Pereira Laval Heilbron³ & Claudio de Morisson Valeriano³

¹ *Comissão Nacional de Energia Nuclear; Coordenação de Rejeitos
Rua General Severiano, 90. Botafogo, 22290-901, Rio de Janeiro, RJ, Brasil*

² *Universidade Federal do Rio de Janeiro, Programa de Engenharia Civil
Av. Athos da Silveira Ramos, 149, Centro de Tecnologia - Bloco B, Sala 101, Ilha do Fundão, 21941-909, Rio de Janeiro, RJ, Brasil*

³ *Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Faculdade de Geologia
Rua São Francisco Xavier, 524, Maracanã, 20550-013, Rio de Janeiro, RJ, Brasil*

⁴ *Instituto Militar de Engenharia*

Praça General Tibúrcio, 80, CEP 22.290-270, Rio de Janeiro, Brasil

E-mails: paulo@cnen.gov.br; corbiniano@gmail.com; rexnazare@ime.eb.br;

jperez@cnen.gov.br; axavier@cnen.gov.br; monica.heilbron@gmail.com; valeriano.claudio@gmail.com

Recebido em: 20/03/2019 Aprovado em: 13/05/2019

DOI: http://dx.doi.org/10.11137/2019_3_339_360

Resumo

O problema relacionado à deposição segura dos rejeitos radioativos, sobretudo aqueles de alto nível de radiação, caso do combustível nuclear usado dos reatores do Complexo Nuclear de Angra dos Reis, no estado do Rio de Janeiro, é ainda um gargalo no Brasil. No mundo inteiro, a principal solução para manter em definitivo e em segurança esses materiais perigosos é o repositório geológico. Ambientes geológicos adequados, entretanto, relacionam-se a tipos de rochas específicas. Neste artigo, a importância dos depósitos geológicos como depósitos finais de rejeitos radioativos de alto nível de radiação é abordada, apontando as principais formações geológicas para o seu confinamento, bem como as diretrizes gerais relacionadas a esses depósitos finais, incluindo os requisitos de segurança e proteção radiológica aplicáveis ao projeto estrutural, à construção, à operação, ao encerramento, às salvaguardas e à garantia da qualidade. São, também, apresentados os principais aspectos a serem levados em consideração para o projeto e construção de um depósito geológico no Brasil.

Palavras-chave: Rejeitos radioativos de alto nível de radiação; repositórios geológicos; formações geológicas; requisitos de segurança e proteção radiológica

Abstract

The problem related to the safe disposal of radioactive waste, especially high-level waste, such as the spent fuel from the reactors of the Angra dos Reis Nuclear Complex, in the state of Rio de Janeiro, is still a bottleneck in Brazil. Worldwide, the main solution to permanently and safely confine these hazardous materials is the geological repository or disposal facility. Adequate geological environments, however, are related to specific rock types. In this article, the importance of geological repositories as final disposal facilities for high-level waste is tackled, pointing out the main geological formations for their confinement, as well as the general guidelines related to these final disposal facilities, including safety and radiation protection requirements applicable to structural design, construction, operation, closure, safeguards and quality assurance. The main aspects to be taken into account for the design and construction of a geological repository in Brazil are, also, presented.

Keywords: High-level radioactive waste; geological repositories; geological formations; safety and radiation protection requirements

1 Introdução

As primeiras discussões sobre soluções para o armazenamento seguro e o gerenciamento dos rejeitos radioativos de alto nível de radiação surgiram em 1955, quando a Comissão de Energia Atômica dos Estados Unidos da América (EUA) solicitou que a Academia Nacional de Ciências americana (*National Academy of Sciences*) considerasse as possibilidades de descarte desses rejeitos, pedido que levou a uma conferência em Princeton, em 1955, e ao subsequente relatório, *The Disposal of Radioactive Waste on Land* (NAS-NRC, 1957), que esteve entre as primeiras análises técnicas da opção de deposição geológica, e marcou o início de um esforço de quatro décadas do governo dos EUA (NRC, 1999). Em 1978, os princípios básicos desse relatório foram reafirmados (NAS – NRC, 1978), sendo posteriormente incorporados em Ewing *et al.* (2016) e IAEA (2003). Bredehoeft *et al.* (1978) identificou o que seria necessário para a deposição segura de rejeitos radioativos, cujo artigo destacou a importância e existência dos diferentes tipos de rejeitos, os desafios que envolvem a caracterização de um local adequado para a deposição de cada um deles e até mesmo a possibilidade de perturbações causadas por determinados tipos de rejeitos em alguns tipos de formações geológicas, bem como os prazos em que o isolamento geológico é necessário. Em 1988, o Conselho de Administração de Resíduos Radioativos convocou uma sessão de estudos com especialistas dos Estados Unidos e do exterior para discutir políticas e programas dos EUA para administrar o combustível irradiado e os resíduos de alto nível do país. O relatório *Rethinking High-Level Radioactive Waste Disposal* (NRC, 1990) reafirmou a deposição geológica profunda como a melhor opção para descartar os rejeitos radioativos de alto nível de radiação (HLW) e forneceu uma ampla avaliação dos desafios técnicos e políticos para o desenvolvimento de um repositório para sua deposição, destacando o forte consenso mundial de que a melhor e mais segura opção de longo prazo para lidar com esses rejeitos é o isolamento geológico, amplamente documentado por organismos internacionais, tendo como exemplos os Pareceres Coletivos publicados pela Agência de Energia Nuclear (NEA) da Organização para Cooperação e Desenvolvimento Econômico,

juntamente com a Agência Internacional de Energia Atômica e União Européia (NEA, 1991).

Como os rejeitos radioativos de alto nível retem níveis potencialmente perigosos de radioatividade por centenas de milhares de anos, a deposição geológica tem sido a solução preferida desde o início pela maioria dos países com programa nuclear avançado. Muitas maneiras engenhosas e alternativas de depositar parte ou a totalidade do inventário dos rejeitos radioativos foram propostas e estudadas pelos americanos, mas a deposição geológica continua sendo a única opção segura e de longo prazo para os rejeitos de alto nível de radiação. Programas de repositórios estão em andamento ou planejados em vários outros países, principalmente na Bélgica, Canadá, Finlândia, França, Alemanha, Japão, Suécia, Suíça e Reino Unido, entre outros.

O relatório do Comitê de Gerenciamento de Rejeitos Radioativos do Reino Unido (CoRWM, 2006) fornece uma análise abrangente de várias alternativas de deposição dos rejeitos de alto nível. As nações nucleares da Europa Ocidental e de outras regiões também começaram a planejar a deposição geológica para os rejeitos de alto nível no final dos anos 70 e 80. A maioria dos países interage com a International Atomic Energy Agency (IAEA), que estabeleceu requisitos de segurança para a deposição de rejeitos radioativos (IAEA, 2011a) e orientação sobre como as instalações de deposição geológica devem ser desenvolvidas (IAEA, 2011b). Uma história de dez programas nacionais sobre o assunto foi publicada pela Nuclear Waste Technical Review Board (2015) e, em parte, é resumida em Metlay (2016).

Neste contexto está o parque nuclear brasileiro, que produz uma quantidade significativa de rejeitos de baixo, médio e alto nível de radioatividade, fruto das diversas atividades que são desenvolvidas, especialmente aquelas associadas à produção de energia elétrica, através do Complexo Nuclear de Angra dos Reis, no estado do Rio de Janeiro e os oriundos das diversas aplicações da energia nuclear nas áreas médica, industrial e de pesquisa. A preocupação com o destino final desses rejeitos tem sido um importante tema para o setor nuclear do país,

sendo necessário encontrar alternativas viáveis, visando a deposição definitiva e segura desse material perigoso. Os rejeitos radioativos, principalmente aqueles classificados como de alto nível de radiação são, potencialmente, uma ameaça à capacidade de preservar recursos naturais importantes e proteger os seres humanos no longo prazo, razão pela qual devem ser isolados completamente da biosfera. Tal questão constitui-se num gargalo do setor nuclear no Brasil, fator que destaca a importância da urgente realização de estudos e pesquisas, visando encontrar meios e alternativas para a seleção e escolha de locais adequados para a construção de depósitos finais para os rejeitos radioativos produzidos no contexto do programa nuclear brasileiro como um todo.

O presente trabalho busca, no âmbito da deposição geológica dos rejeitos radioativos de alto nível de radiação, identificar as principais formações geológicas enquanto ambientes propícios para servirem de repositórios dos rejeitos gerados, de acordo com a experiência e especificidades consolidadas e amplamente divulgadas pela literatura internacional. Posteriormente, em contribuição ao planejamento e gerenciamento de tais práticas, diretrizes gerais são apresentadas com vistas aos diversos requisitos de segurança e proteção radiológica aplicáveis ao projeto, operação, encerramento, salvaguardas e garantia da qualidade dos repositórios geológicos. De tal modo, o trabalho contribui para fomentar tal discussão, suas especificidades e importância para o programa nuclear brasileiro, visando a elaboração do arcabouço normativo necessário, até hoje inexistente, no que diz respeito à deposição segura dos rejeitos radioativos de alto nível de radiação no Brasil.

2 Objeto Principal do Estudo

2.1 Os Rejeitos Radioativos

Os rejeitos radioativos surgem durante o processo de geração de energia nuclear, bem como em outros campos relacionados à aplicação dessa energia na área de defesa e nas áreas médicas, industriais e de pesquisa, e, se não forem corretamente gerenciados, emitem radiações que podem ser prejudiciais aos seres humanos e outros organismos, devendo ser isolados da biosfera pelo tempo que se fizer necessário. De acordo com suas características radiológicas,

os rejeitos devem ser depositados conforme especificado na tabela (IAEA, 2009).

Tipo de Rejeito	Características	Opção de Deposição
1. Isento	Níveis de atividade igual ou inferior aos limites de isenção que foram baseados em uma dose anual para os membros do público inferior a 0,01 mSv.	Sem restrição radiológica.
2. Baixo e Médio Níveis (L & ILW)	Níveis de atividade superior ao limite de isenção e geração de calor inferior ou da ordem 2 kW/m ³ .	Depósitos próximo à superfície ou geológicos.
2.1. Vida Curta (L)	Concentração de emissores alfa de meia vida longa restrita (radionuclídeos igual ou inferior a 4000 Bq/g sendo que a média de todos os radionuclídeos no embalado inferior a 400 Bq/g).	Depósitos geológicos.
2.2. Vida Longa (ILW)	Concentração de radionuclídeos emissores alfa superiores aos valores anteriores	Depósitos geológicos.
3. Alto Nível (HLW)	Geração de calor superior a 2kW/m ³ e concentração de radionuclídeos emissores alfa superiores as estabelecidas para os rejeitos de meia vida curta (item 2.1)	Depósitos geológicos.

Tabela 1 Classificação dos rejeitos radioativos (IAEA, 2009).

As principais instalações brasileiras que geram rejeitos radioativos são: a) Duas usinas nucleares em operação (Angra dos Reis - RJ); b) Duas minas de urânio: uma mina fora de operação (Poços de Caldas - MG), com enorme passivo ambiental; outra em Caetité – BA, em operação; c) Um complexo industrial (FCN - Fábrica de Combustível Nuclear) para a produção de elementos combustíveis de reatores nucleares brasileiros, em Resende – RJ; d) Quatro reatores de pesquisa: São Paulo: 2; Belo Horizonte: 1; e Rio de Janeiro: 1; e) Instalações de ciclo do combustível em escala piloto, incluindo uma usina para a conversão de urânio em UF₆, outra para enriquecimento de urânio e várias outras que pertencem à Marinha; f) Aproximadamente 3500 instalações médicas, industriais e de pesquisa que usam fontes e equipamentos radioativos (sem incluir raios X); g) Uma instalação industrial que foi utilizada no passado para o processamento de areias monazíticas; e h) Instalações com materiais radioativos NORM (fosfatos, zirconita, petróleo, tantalita, columbita, etc).

Segundo a IAEA (2009), alguns rejeitos requerem a deposição geológica profunda para evitar problemas ao meio ambiente e à sociedade. Entre esses rejeitos, destacam-se aqueles envolvidos no ciclo do combustível nuclear, incluindo o combustível irradiado usado no processo de geração de energia, e demais rejeitos classificados como de alto nível, os quais, devido aos seus produtos de fissão altamente radioativos, ou a presença de emissores alfa de meia-vida longa (maior do que aproximadamente 30 anos) em grande quantidade/concentração, devem ser manuseados e armazenados com cuidado. Como a única maneira pela qual eles se tornam inofensivos é através do decaimento radioativo e tendo em vista as meias-vidas longas envolvidas (de dezenas a centenas de milhares de anos), os rejeitos devem ser completamente isolados da biosfera, única maneira de fornecer proteção adequada ao público por um longo período de tempo (Heilbron Filho *et al.* 2018).

A deposição geológica de rejeitos de alto nível de radiação, segundo Chapman (2006), IAEA (2009) e Heilbron Filho *et al.* (2018), é tipicamente uma opção de gestão final para os rejeitos de alto nível e para os rejeitos de nível intermediário de vida longa, categorias que possuem um conteúdo significativo de radionuclídeos emissores alfa com meia-vida de milhares, dezenas e centenas de milhares de anos (Tabela 2).

2.2 Os Depósitos Geológicos

O termo “deposição geológica», segundo IAEA (2011), refere-se à deposição de rejeitos radioativos sólidos numa instalação localizada no

subsolo, a grandes profundidades, em uma formação geológica estável, de modo a proporcionar uma contenção em longo prazo dos rejeitos e o seu isolamento da biosfera por milhares de anos.

Os objetivos da deposição geológica, segundo IAEA (2006), são: 1. Confinamento dos rejeitos até que a maior parte da radioatividade, e especialmente a associada a radionuclídeos de meia-vida mais curta, tenha decaído; 2. Isolamento dos rejeitos da biosfera e redução substancial da probabilidade de intrusão humana inadvertida nos depósitos; 3. Retardamento de qualquer migração significativa de radionuclídeos para a biosfera até um determinado tempo no futuro distante, quando grande parte da radioatividade terá decaído; 4. Garantia de que quaisquer níveis de concentração de radionuclídeos que eventualmente atinjam a biosfera sejam tais que possíveis impactos radiológicos no futuro sejam aceitáveis.

O isolamento em definitivo dos rejeitos radioativos em repositórios geológicos é um consenso mundial entre as principais agências e instituições do setor nuclear, com diversas publicações, entre diretrizes, normas, relatórios e documentos elaborados: IAEA (1977; 1981; 1983; 1987; 1989; 1994; 2003; 2006; 2009; 2011), ENSI (2018), CNSC (2018), DECC (2014), NUMO (2015), OECD-NEA (2016), EPRI (2010), NWMO (2016) e CNEN (2014); entre outras publicações relevantes: Bredehoeft *et al.* (1978), Apted & Ahn (2010; 2017), Ewing & von Hippel (2009), Ewing *et al.* (2016), Silva *et al.* (2015), Witherspoon & Bodvarsson (2001; 2006) e Yardley (2014). A tabela 3 mostra os países que adotam esta solução.

Produtos de Fissão e Ativação	Radionuclídeo		Meia-vida (anos)	Actínido transurânico e radionuclídeos das cadeias naturais de decaimento do U-eTh	Radionuclídeo		Meia-vida (anos)
	Carbono-14	¹⁴ C	5.700		Rádio-226	²²⁶ Ra	1.600
	Cloro-36	³⁶ Cl	300.000		Tório-230	²³⁰ Th	77.000
	Níquel-59	⁵⁹ Ni	75.000		Tório-232	²³² Th	14.000.000.000
	Selênio-79	⁷⁹ Se	65.000		Protactínio-231	²³¹ Pa	33.000
	Nióbio-94	⁹⁴ Nb	20.000		Urânio-234	²³⁴ U	240.000
	Tecnécio-99	⁹⁹ Tc	210.000		Urânio-235	²³⁵ U	700.000.000
	Estanho-126	¹²⁶ Sn	100.000		Urânio-238	²³⁸ U	4.500.000.000
	Iodo-129	¹²⁹ I	16.000.000		Neptúnio-237	²³⁷ Np	2.100.000
	Césio-135	¹³⁵ Cs	2.300.000		Plutônio-239	²³⁹ Pu	24.000
					Americío-241	²⁴¹ Am	430

Tabela 2
Radionuclídeos em rejeitos de meia-vida longa.

Deposição Geológica de Rejeitos Radioativos: Formações Geológicas e Diretrizes no Contexto do Programa Nuclear Brasileiro

Paulo Fernando Lavalle Heilbron Filho; Corbiniano Silva; Rex Nazaré Alves;
Jesus Salvador Pérez Guerrero; Ana Maria Xavier; Monica da Costa Pereira Lavalle Heilbron & Claudio de Morisson Valeriano

Formação Geológica		País / Tipo de Rejeito / Profundidade (m) / Situação do repositório	
Rochas Cristalinas	Granito	Canadá/L, ILW & HLW/420/1990 – 2006 Finlândia/HLW/437/Construção Japão/HLW/1000/Construção Coréia/L/80/Operação (2006) Suécia/HLW/450/Operação (1995)	Suécia/L & ILW/50/Operação (1988) Suécia/HLW/450/Licença (2011) Suíça/HLW/450/Operação (1984) Finlândia/L & ILW/120/Operação (1998) Argentina/HLW/-/Discussão
	Tonalito	Finlândia/L & ILW/60 – 100/Operação (1992)	
Formações Argilosas	Argilas	Bélgica/L & ILW/223/Operação (1982) Bélgica/HLW/~225/Discussão Canadá/L & ILW/680/Licença (2011)	Alemanha/L&ILW/800/Construção Japão/ HLW/500/Construção
	Argilito	França/L, ILW & HLW/500/Licença (2018) Suíça/ HLW/-/Localização	Suíça/L & ILW/300/Operação (1996)
Rochas Salinas		Alemanha/L & ILW/630/ fechado (1998) Alemanha/HLW/-/Proposta, em espera	Reino Unido/ILW/-/Discussão EUA/Rejeito transurânico/655/ Operação (1999)
Tufo Vulcânico	Ignimbrito	EUA/L/50/1997 – 2008	EUA/HLW/200 – 300/Proposta, cancelada (2010)
Low Level Waste (LLW); Low and Intermediate Level Waste (L&ILW);Intermediate level Waste (ILW); High Level Waste (HLW)			

Tabela 3 Países que adotam o conceito de deposição geológica para rejeitos radioativos.

3 Materiais e Métodos

Em termos metodológicos, o trabalho incorporou as principais referências bibliográficas da literatura internacional, sobretudo aquelas produzidas pela IAEA, que são os principais documentos de referência acerca do tema; a Lei de Rejeitos (Lei 10.308, de 20/11/2001), os quais dispõem sobre a seleção de locais, construção, licenciamento, operação, fiscalização, custos, indenização, responsabilidade civil e as garantias referentes aos depósitos de rejeitos radioativos, e apontam sobre a necessidade de se iniciar os estudos para a seleção de depósitos

geológicos no Brasil; além de outras referências internacionais importantes. A análise desses documentos contribuiu para (i) a identificação das principais formações geológicas utilizadas para tal fim; (ii) a elaboração das diretrizes gerais que integram as principais ações com vistas à análise de segurança e proteção radiológica dos depósitos geológicos; (iii) a sugestão de elaboração das normas necessárias para a deposição geológica por parte da Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN), até então não existentes. O fluxograma da figura 1 sintetiza a metodologia adotada.

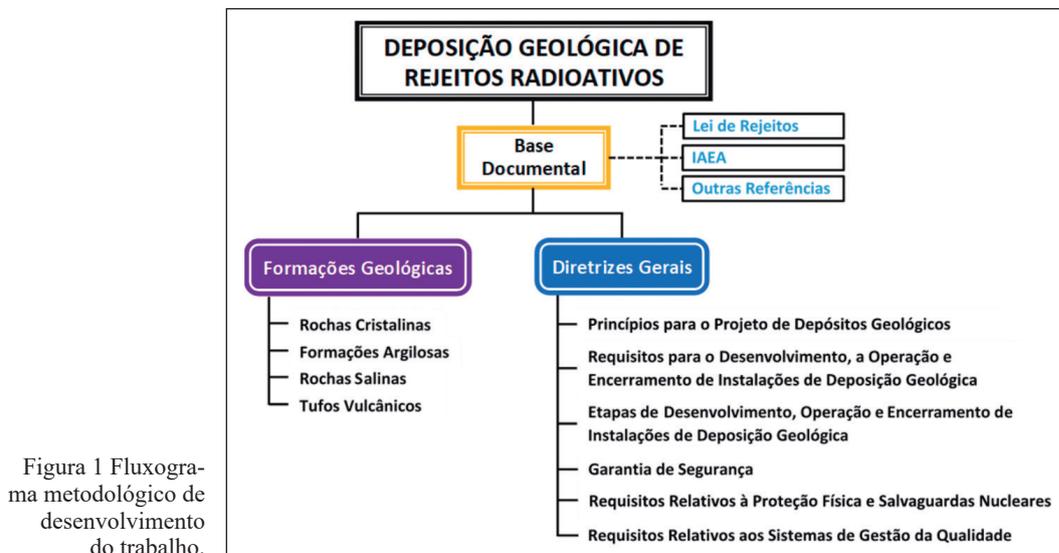


Figura 1 Fluxograma metodológico de desenvolvimento do trabalho.

4 Resultados e Discussão

Os resultados fundamentais do estudo incluem, no contexto geológico, as principais formações geológicas que são as mais propícias para receberem os rejeitos radioativos enquanto repositório geológico e, no contexto da deposição geológica, as principais diretrizes, considerando os requisitos de projeto, construção, operação, encerramento, salvaguardas, gestão da qualidade e garantia de segurança, aplicáveis a esses tipos de depósitos.

4.1 Principais Formações Geológicas

Diversas referências supracitadas, além de Enokihara (1983), apontam como única alternativa viável para a deposição segura dos rejeitos de alto nível de radiação o armazenamento em formações geológicas profundas, sobretudo pelo fato de que muitas formações geológicas permanecem estáveis por milhões de anos. Além disso, essas formações mantêm três requisitos básicos que são críticos para a deposição segura de materiais radioativos: a) Resfriamento (a rocha atua como um dissipador de calor); b) Proteção (a profundidade de deposição fornece blindagem adequada contra radiação); e c) Isolamento (o tamanho e a integridade das formações evitam que o rejeito escape para a biosfera).

De acordo com Roxburgh (1987), as rochas ideais para serem utilizadas como repositório geológico devem apresentar as seguintes características: i) Propriedades hidrogeológicas que minimizem a exposição do material armazenado ao movimento da água subterrânea; ii) Propriedades geoquímicas e mineralógicas que possibilitem a retenção e/ou o retardamento da migração dos radionuclídeos liberados no caso de falha das barreiras de engenharia, antes que estes alcancem a biosfera; iii) Propriedades termoquímicas que possibilitem que a rocha suporte a carga térmica oriunda do material depositado sem sofrer danos estruturais que afetem sua capacidade de isolamento do material depositado; iv) Resistência estrutural e estabilidade suficientes para garantir que a integridade física do repositório não será comprometida durante o período operacional.

Em diferentes níveis, diversos tipos de rochas apresentam tais características, existindo um conjun-

to de referências que as consideram como adequadas para a deposição geológica, entre as quais: IAEA (1977, 2003, 2009); Bredehoeft *et al.* (1978); OECD-NEA (2000a; 2000b); NDA (2017); Krauskopf (1988); Roxburgh (1987); NWMO (2016).

Considerando os aspectos geológicos e sua respectiva importância para o armazenamento seguro de rejeitos radioativos, IAEA (2009) observou que: 1. Rochas duras (granitos, por exemplo) são efetivamente autossuficientes, e são necessárias apenas pequenas medidas de engenharia e manutenção para evitar a falência das paredes rochosas no depósito de células e pontos de acesso; 2. As formações rochosas argilosas na França, Canadá e Suíça são sedimentos altamente consolidados e possuem alta resistência mecânica, dependendo da estrutura e da rocha mineralógica. No entanto, podem apresentar comportamento plástico que, apesar de reduzir o número de fraturas na rocha, também pode causar danos nas áreas de escavação do repositório.

A segurança de um repositório geológico, de acordo com a IAEA (2009), baseia-se nos conceitos de defesa em profundidade e isolamento que são fornecidos pelos efeitos combinados da utilização de múltiplas barreiras artificiais e naturais.

As formações geológicas mais favoráveis para a deposição dos rejeitos nucleares, segundo seus tipos geológicos são: rochas alcalinas, graníticas e básicas; granitóides, granulitos, gnaisses e migmatitos; e evaporitos. (IAEA, 1977; Martins, 2009). Krauskopf (1988) considerou ainda as rochas salinas, rochas cristalinas, folhelhos e argilas, tufos vulcânicos e basaltos; e Bredehoeft *et al.* (1978) incluiu folhelhos, rochas cristalinas (granitos), anidritos e rochas salinas.

No que diz respeito à litologia, sobretudo em relação à segurança de longo prazo associada aos rejeitos radioativos, Martins (2009) destacou que as áreas cristalinas, compostas principalmente por rochas metamórficas e magmáticas ou ígneas (entre as quais alcalinas, graníticas e básicas), são avaliadas como aquelas mais propícias para um depósito geológico, apesar das variações que elas possuem quanto à resistência, estabilidade, homogeneidade, composição química, entre outros fatores, razão pela

qual nem todas as rochas classificadas são adequadas para a construção de repositórios. Um dos maiores problemas quanto ao seu uso enquanto repositório geológico é a presença de falhas e/ou fraturas que formam zonas de fraqueza na rocha e podem representar caminhos preferenciais de migração para os radionuclídeos atingirem a biosfera.

Foi considerada como principais formações geológicas a classificação adotada pela IAEA (1977; 2003), cujas principais características e, sobretudo, as vantagens e desvantagens em relação ao objetivo

de servirem como repositório geológico de rejeitos radioativos são apresentados na tabela 4.

4.2 Diretrizes Gerais para a Deposição Geológica

No contexto das instruções e normas gerais relacionadas à deposição geológica, são abordados a seguir os principais aspectos pertinentes, com ênfase nos requisitos sobre o projeto estrutural, garantia de segurança, operação, encerramento, salvaguardas nucleares e garantia da qualidade dos repositórios. A figura 2 mostra o fluxograma com a estrutura e respectivas ações relacionadas.

Formação Geológica	Tipos de Rochas	VANTAGENS	DESVANTAGENS
Rochas Cristalinas	Granito Gnaiss	Rocha de comportamento elástico sem qualquer quantidade de plasticidade no curto prazo; a resistência à compressão de granitos médios do tamanho de grãos é de 1500 a 2200 kgf / cm ² . Há algumas águas subterrâneas presentes em formações de granito, embora existam boas indicações de que em algumas regiões tais formações rochosas cristalinas, particularmente a uma profundidade significativa, podem estar livres de água subterrânea em circulação; em várias formações de granito, o desgaste de rochas ao longo de fraturas produz minerais caracterizados por boa capacidade de sorção; este ponto deve ser considerado no estudo de segurança e pode ser um fator para restringir a mobilidade de muitos radionuclídeos; gnaisses são coerentes e impermeáveis	Rocha fraturada; Fluxo de águas subterrâneas em fraturas expostas; Possibilidade de algum fluxo em fraturas; Contraste de força ao longo dos contatos. Possíveis fraturas. (Šostarić & Neubauer, 2012).
Formações Argilosas	Argilas fortemente consolidadas: Argilito, Lamito	Possuem certo grau de plasticidade e são livres de água subterrânea circulante; Boa plasticidade; Permeabilidade baixa; As formações de sedimentos argilosos são muito numerosas em todo o mundo; os minerais argilosos são insolúveis na água subterrânea em circulação; A maioria dos minerais de argila apresenta boas características de sorção; O folhelho fornece características de plasticidade, impermeabilidade e sorção. O calcário proporciona melhor capacidade de mineração, transferência de calor e geoquímica; calcários e dolomitos normalmente não possuem plasticidade adequada nem impedem a circulação das águas subterrâneas.	Os fluidos de poros e os minerais hidratados podem ter um efeito indesejável na contenção dos rejeitos; A condutividade térmica dos sedimentos argilosos é cerca de três a quatro vezes menor do que a de rochas salinas; os efeitos térmicos na vizinhança dos contentores podem modificar não só a plasticidade das formações, mas também as capacidades de absorção de alguns minerais argilosos; pode ser difícil de escavar adequadamente em uma formação argilosa, embora as técnicas de tunelamento de rochas moles possam ser aplicáveis e aceitáveis; Os volumes e taxas de circulação de fluidos através de áreas específicas de sedimentos ou rochas argilosas são difíceis de determinar.
	Argilas consolidadas: Folhelho, Marga		
	Argila plástica		
Rochas Salinas	Sal rochoso com camas	Impermeável a líquidos e gases, devido às suas propriedades plásticas e à ausência de porosidade intersticial, cuja plasticidade previne a ocorrência de fissuras e juntas nas pressões subterrâneas; são resistentes à água subterrânea circulante; possuem resistência à compressão semelhante à do concreto; possui alta condutividade térmica, de cerca de 12 X 10 ⁻³ cal / cm s C (4,8 W / m ° C) nas temperaturas da mina, sendo benéfico quando se considera a dissipação de calor de resíduos geradores de calor de alto nível; pode ser extraída facilmente, a um custo relativamente baixo.	Dissolução das águas subterrâneas em limites desprotegidos; ocorrência ocasional de correntes de salmoura; diapirismo contínuo; Presença de inclusões salpicadas; e a falta de propriedades de sorção que restrinjam a migração de radionuclídeos.
	Cúpulas de sal		
Rochas Vulcânicas	Tufos vulcânicos	Apresentam média resistência em relação à mecânica das rochas; acima do lençol freático; São densas e compactas; boa capacidade de sorção.	Fraturas e poros, insaturados; fluxo ocasional com percolação de água; possivelmente algum transporte com percolação de água.

Tabela 4 Principais formações geológicas consideradas no descarte de rejeitos radioativos.

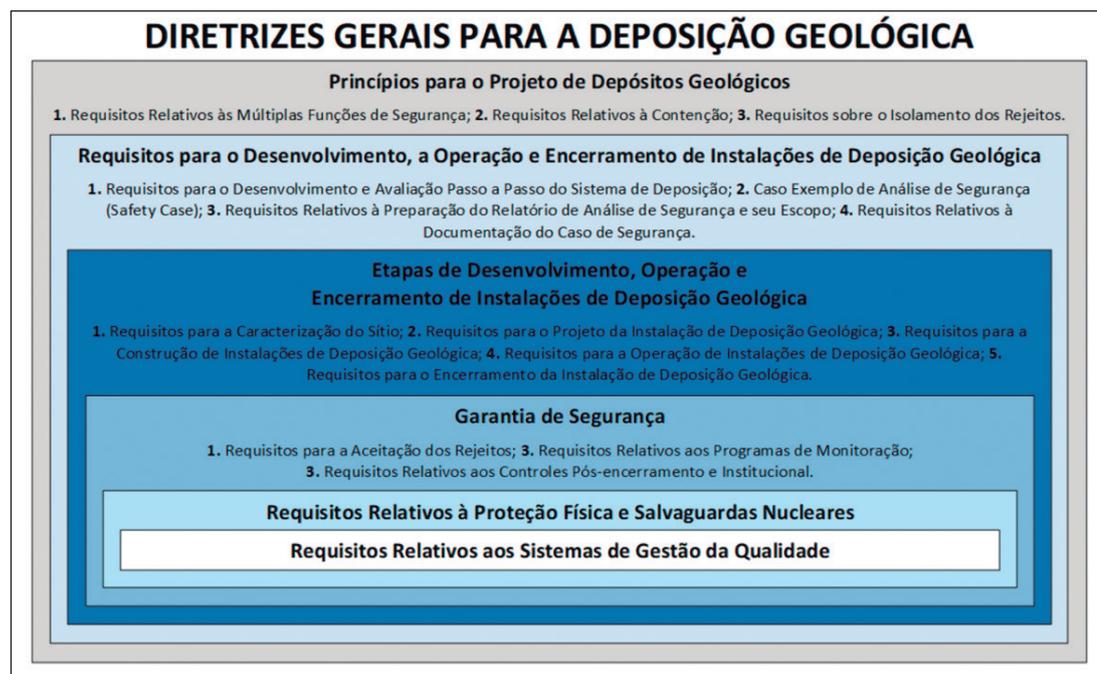


Figura 2
Painel com as diretrizes gerais relacionadas aos depósitos geológicos.

4.2.1 Princípios para o Projeto de Depósitos Geológicos

4.2.1.1 Requisitos Relativos às Múltiplas Funções de Segurança

As barreiras naturais e projetadas de depósitos geológicos devem ser selecionadas de modo a assegurar que a segurança pós-encerramento seja fornecida por meio de múltiplas barreiras (Heilbron Filho *et al.*, 2016).

O desempenho é alcançado por diversos processos físicos e químicos das barreiras naturais e artificiais que são utilizadas com o objetivo de armazenar com segurança por longos períodos de tempo os rejeitos de alto nível de radiação. O desempenho geral do sistema de deposição geológica não deve depender de uma única barreira.

Uma barreira significa uma entidade física, como a forma do rejeito, a embalagem, o material de preenchimento ou a formação geológica do hospedeiro. Uma função de segurança pode ser garantida por meio de uma propriedade ou processo físico ou químico, tais como: impermeabilidade aos fluidos, corrosão limitada, dissolução, taxa de lixiviação e solubilidade baixas; e retenção alta. A presença de múltiplas barreiras e funções de segurança reforça a segurança e a confiança na segurança, garantindo

que o desempenho geral do sistema de deposição geológica não seja dependente indevidamente de uma única barreira ou função de segurança.

A presença de múltiplas barreiras e funções de segurança garante que, mesmo que uma barreira ou recurso de segurança não funcione como esperado (por exemplo, devido a um processo inesperado ou um evento improvável), uma margem de segurança suficiente permanece.

As barreiras e suas funções são complementares e funcionam em combinação. O desempenho de um sistema de deposição geológica é, portanto, dependente de diferentes barreiras e funções de segurança, que atuam em diferentes períodos de tempo. O chamado “caso de segurança”, nada mais é do que um relatório elaborado pelo operador, que deve ser aprovado pela autoridade regulatória, o qual explica e justifica as funções previstas por cada barreira existente e identifica os períodos de tempo em que se espera que a mesma possa executar suas várias funções de segurança, bem como as alternativas de segurança que atuariam caso uma barreira não funcionasse completamente como desejado.

A segurança da deposição de rejeitos radioativos, conforme recomendação internacional, deve ser

garantida através do uso, como citamos anteriormente, de um sistema conhecido como múltiplas barreiras de segurança: A) A primeira barreira é a forma do rejeito e sua respectiva embalagem, razão pela qual são estabelecidos critérios de segurança internacionais para a aceitação do produto final e para o projeto da embalagem. A forma do rejeito deve ser projetada de maneira a ser resistente à lixiviação pela água, principal mecanismo de transporte para a biosfera; B) A segunda barreira é o material de enchimento (do inglês “*backfill*”), que deve ser colocado em volta dos embalados e selecionado com base em suas propriedades químicas de retenção; C) A terceira e nem sempre existente barreira (dispensada somente nos casos dos rejeitos radioativos de baixíssimo nível de radiação) é, geralmente, feita de concreto, cujas funções principais são a de dar estabilidade ao depósito, bem como dificultar o acesso, a longo prazo, aos rejeitos nos depósitos próximos à superfície, quando o risco de intrusão é maior, uma vez findo o período de controle institucional (geralmente aplicável aos rejeitos de baixo nível de radiação e não aos rejeitos de alto nível); D) A última barreira é o meio geológico natural, que também deve ter algumas características básicas, como situar-se longe de regiões sísmicas, zonas fraturadas, lençóis freáticos, etc.

Assim sendo, existem critérios gerais que devem ser respeitados tanto para a escolha de um local para a construção de um repositório quanto para a forma do rejeito (escolha do tipo de tratamento adequado), contrariando a ultrapassada máxima, muito utilizada nos anos 80, de banalizar um problema complexo, na tentativa errônea de convencer a opinião pública, de que “se poderia depositar qualquer tipo de rejeito em qualquer lugar, em segurança, contando apenas com a construção de barreiras de engenharia”.

4.2.1.2 Requisitos Relativos à Contenção

As barreiras de engenharia, incluindo a forma do rejeito e a embalagem, devem ser projetadas, e a formação geológica hospedeira deve ser selecionada, de maneira a fornecer a contenção dos rejeitos durante o período em que energia térmica seja produzida em quantidades que possam afetar negativamente a contenção e enquanto o decaimento

radioativo não reduzir significativamente o perigo representado pela atividade, em Bq., do rejeito.

A contenção de rejeitos implica que o projeto garanta a mínima liberação de radionuclídeos possível, como a liberação de radionuclídeos gasosos e de pequenas frações de outras espécies altamente móveis, quando for inevitável. Tais liberações, entretanto, devem ser demonstradas como aceitáveis pela análise de segurança.

A contenção pode ser garantida tanto pelas características da forma dos rejeitos e suas embalagens quanto pelas características das barreiras projetadas, e pela formação geológica da rocha hospedeira que, por exemplo, pode impedir o acesso aos aquíferos.

A escolha certa da forma dos rejeitos e do projeto da embalagem pode garantir a contenção dos radionuclídeos por um período inicial de várias centenas de anos, permitindo, assim, que a maioria dos radionuclídeos de meia-vida curta decaia *in situ*. Ela também assegura que qualquer migração de radionuclídeos ocorra apenas quando o calor produzido pelos rejeitos radioativos tenha diminuído substancialmente, levando a um produto físico e químico mais estável.

A contenção é mais importante para os rejeitos radioativos mais concentrados, como no caso do combustível nuclear usado e rejeitos vitrificados oriundos do reprocessamento de combustível usado. Também deve ser dada atenção à durabilidade da forma dos rejeitos e a colocação de rejeitos mais concentrados em recipientes/embalagens que são projetadas para permanecerem intactas durante um período de tempo suficientemente longo. Assim, a maioria dos radionuclídeos de curta duração decairá e a geração de calor associada diminuirá substancialmente. Essa contenção pode não ser necessária para menores quantidades de rejeitos radioativos.

Esta capacidade de contenção da embalagem dos rejeitos deve ser demonstrada por meio de uma análise de segurança apropriada para o sistema geral de deposição geológica.

4.2.1.3 Requisitos sobre o Isolamento dos Rejeitos

A instalação de deposição geológica deve estar localizada em uma formação geológica, numa

profundidade que forneça isolamento dos rejeitos da biosfera e de seres humanos, durante pelo menos várias dezenas a centenas de milhares de anos, levando em conta tanto a possível evolução natural do sistema de deposição geológica quanto de eventos que possam perturbar a instalação (IAEA, 1981; IAEA, 1989; IAEA, 2006; Heilbron Filho *et al.*, 2016).

A etapa de isolamento significa reter os rejeitos e seus riscos associados, proporcionando uma mobilidade muito lenta para a maioria dos radionuclídeos de meia-vida longa. O isolamento é uma característica inerente da deposição geológica.

O local em uma formação geológica estável fornece proteção quanto aos efeitos de processos geomorfológicos, como erosão e glaciação. A localização longe de áreas conhecidas de recursos minerais é desejável para reduzir a probabilidade de intrusão inadvertida.

Ao longo de períodos de milhares de anos ou mais, a migração de uma fração dos radionuclídeos de maior concentração e com maior mobilidade pode não ser evitável.

Cuidados precisam ser tomados na utilização dos critérios a longo prazo, já que as incertezas se tornam maiores e esses critérios podem não servir mais como base razoável para uma tomada de decisão.

Por longo período de tempos após o encerramento, outros indicadores de segurança que não a dose ou risco individual podem ser apropriados, e seu uso deve ser considerado, como por exemplo limites derivados para concentração de radionuclídeos na água, no solo, etc.

4.2.2 Requisitos para o Desenvolvimento, a Operação e Encerramento de Instalações de Deposição Geológica

Esta seção estabelece os requisitos que são necessários para garantir a segurança da instalação de deposição geológica e para ajudar a despertar a confiança de que instalações de deposição geológica são realmente seguras (IAEA, 2006).

Os requisitos são definidos em quatro itens: (1) estrutura para deposição geológica (como mostrado anteriormente); (2) análise de segurança passo a passo incluindo caso exemplo, requisitos para elaboração do relatório análise de segurança e documentação; (3) etapas relacionadas ao desenvolvimento, operação e encerramento de depósitos geológicos e, (4) garantia de proteção física e salvaguardas, como descritos a seguir.

Por integrar todas as atividades, a garantia da qualidade será tratada em um item diferenciado.

4.2.2.1 Requisitos para o Desenvolvimento e Avaliação Passo a Passo do Sistema de Deposição

As instalações de deposição geológica devem ser desenvolvidas em uma série de etapas, cada uma embasada, conforme necessário, por avaliações iterativas dos sítios existentes, das opções de projeto e gestão, e do desempenho do sistema de deposição.

Uma abordagem passo a passo para o desenvolvimento de um sistema de deposição geológica refere-se, principalmente, às etapas que são impostas pela autoridade regulatória, bem como os processos de tomada de decisão política necessários. Esta abordagem garante a qualidade do programa técnico e a tomada de decisão associada. Para o operador, fornece uma estrutura em que há confiança suficiente na viabilidade técnica e na segurança da instalação.

Esta confiança é desenvolvida e refinada por meio de estudos iterativos e estudos de segurança, à medida que o projeto progride.

O processo prevê: a coleta, a análise e interpretação dos dados científicos e técnicos relevantes, o desenvolvimento de projetos e planos operacionais; e o desenvolvimento do arcabouço geral de segurança para a fase operacional e posterior ao encerramento.

O acesso à informação de base da análise de segurança deve ser fornecido a todas as partes que tenham algum interesse na instalação de deposição, de modo a facilitar os processos de tomada de decisão relevantes que permitam que o operador avance para a próxima etapa do desenvolvimento e da operação da instalação e, finalmente, ao seu encerramento.

A abordagem passo a passo também gera oportunidades para revisões técnicas, revisões regulatórias e envolvimento político e do público no processo. A natureza das revisões e envolvimento dependerá da experiência nacional nas avaliações técnicas por parte ou em nome do operador e da autoridade regulatória.

Os revisores técnicos podem se concentrar no processo de seleção do local, no projeto e na adequação das bases e análises científicas, e podem avaliar se os padrões e requisitos de segurança foram bem descritos pelo operador.

Opções alternativas para o gerenciamento dos rejeitos radioativos, para o processo de seleção do local e os aspectos de aceitabilidade pública, por exemplo, podem ser considerados em maiores detalhes durante a revisão técnica.

Deve-se sempre realizar revisões técnicas antes de selecionar uma opção de deposição, antes de selecionar um sítio, antes da construção e antes da operação.

Revisões periódicas também devem ser realizadas durante a operação da instalação e antes do seu encerramento.

4.2.2.2 Caso Exemplo de Análise de Segurança (Safety Case)

O desenvolvimento de um caso exemplo de segurança e o apoio às análises de segurança, bem como a avaliação pelo órgão regulador e revisão por outras partes interessadas são fundamentais para o desenvolvimento, construção, operação e encerramento de uma instalação de deposição geológica. O caso exemplo ajuda a comprovar a segurança e contribui para a confiança na segurança (Heilbron Filho, 2004).

O caso de segurança é um dado de entrada essencial para todas as decisões importantes relativas à instalação. Inclui os resultados da análise de segurança, juntamente com informações adicionais, incluindo provas que deem sustentação ao raciocínio (as hipóteses) sobre a robustez e confiabilidade da instalação, incluindo ainda seu projeto, a lógica

do projeto e a qualidade das análises de segurança e suposições adicionais que se fizerem necessárias.

O caso de segurança também pode incluir argumentos mais gerais relativos à necessidade de deposição dos rejeitos radioativos e informações para colocar em perspectiva os resultados das análises de segurança. Quaisquer questões não resolvidas em qualquer etapa do desenvolvimento, construção, operação e encerramento da instalação serão reconhecidas no caso de segurança, e uma orientação de como resolver os problemas encontrados deve ser fornecida.

Análise de segurança é o processo de análise sistemática dos perigos/riscos associados à instalação e a capacidade do sítio e do projeto da instalação em garantir as funções de segurança necessárias, bem como de atender aos requisitos técnicos pré-estabelecidos pela autoridade regulatória.

A análise da segurança inclui a quantificação do nível geral de desempenho, análise das incertezas associadas e comparação com os relevantes requisitos de projeto e padrões de segurança. As análises são relacionadas especificamente ao sítio, uma vez que os sistemas geológicos, em contraste com os sistemas de engenharia, não podem ser generalizados ou padronizados.

À medida que as investigações do sítio progredirem, as análises de segurança são cada vez mais refinadas, e no fim do estudo, dados suficientes estarão disponíveis para uma análise completa. Essas análises também identificam quaisquer deficiências significativas na compreensão científica dos dados ou análises que possam afetar os resultados apresentados. Dependendo do estágio de desenvolvimento, as análises de segurança podem ser usadas para auxiliar na necessidade de uma pesquisa mais focada sobre determinado parâmetro, e seus resultados podem ser usados para avaliar o cumprimento dos vários objetivos e padrões de segurança estabelecidos pela autoridade regulatória.

4.2.2.3 Requisitos Relativos à Preparação do Relatório de Análise de Segurança e seu Escopo

Um relatório de análise de segurança deve ser preparado e atualizado pelo operador, conforme

necessário, em cada etapa do desenvolvimento, da construção, da operação e do encerramento da instalação de deposição geológica.

O relatório de análise de segurança deve ser suficientemente detalhado e abrangente para fornecer uma contribuição técnica importante para o grau de segurança do projeto, de maneira a facilitar as decisões regulatórias e outras que se fizerem necessárias durante cada etapa.

Um caso de segurança específico do local deve ser preparado no início do desenvolvimento da instalação de deposição geológica para fornecer uma base sólida para decisões de licenciamento e para orientar as atividades de pesquisa e desenvolvimento relacionadas à localização do sítio e ao seu projeto.

O caso de segurança deve ser desenvolvido de forma progressiva e elaborado à medida que o projeto prossegue e deve ser apresentado em cada etapa-chave do desenvolvimento do sistema de deposição geológica.

O órgão regulador pode exigir uma atualização ou revisão do relatório antes de determinadas etapas, ou exigir tal atualização ou revisão de maneira a ganhar apoio político ou público, facilitando assim o próximo passo no desenvolvimento e operação da instalação de deposição geológica.

A formalidade, o nível técnico e os detalhes do caso de segurança dependem do estágio de desenvolvimento do projeto e do grau de envolvimento do público a qual se dirige.

Uma análise de segurança deve ser atualizada ao longo do desenvolvimento e operação da instalação de deposição geológica, quando dados mais refinados do sítio estão disponíveis.

A análise de segurança contribui para tomadas de decisão contínuas pelo operador, relacionadas com as pesquisas necessárias, com a alocação de recursos necessários quanto aos critérios de aceitação dos rejeitos a serem depositados. As análises de segurança também identificam processos-chave relevantes para segurança, contribuem para uma melhor compreensão do desempenho da instalação de deposição geológica e ajuda na escolha de opções

para o correto gerenciamento das alternativas existentes e também como um elemento de otimização da segurança e da proteção radiológica.

O operador deve decidir sobre o tempo e o nível de detalhe da análise de segurança, em consulta e sujeito à aprovação do órgão regulador.

O relatório de segurança para uma instalação de deposição geológica deve descrever todos os aspectos relevantes para a segurança do sítio, para o projeto da instalação e para os controles gerenciais e regulatórios. O caso de segurança e suas avaliações de apoio devem ilustrar o nível de proteção fornecido e garantir que os requisitos de segurança serão cumpridos.

O relatório de análise de segurança para uma instalação de deposição geológica deve abordar tanto a segurança da operação quanto a segurança pós-encerramento. Todos os aspectos relevantes da operação para a estimativa das doses de radiação devem ser avaliados, incluindo o trabalho de escavação subterrânea e o conseqüente manuseio dos rejeitos e até mesmo dos rejeitos radioativos gerados.

Deve ser levada em conta a exposição ocupacional e a exposição do público resultante da operação normal, antecipando inclusive as ocorrências operacionais que possam vir a ocorrer durante toda vida útil da instalação de deposição geológica. Acidentes de menor frequência, mas com conseqüências radiológicas significativas, ou seja, acidentes que poderiam dar origem a doses de radiação no curto prazo, superiores aos limites de dose anual estabelecidos, devem ser considerados quanto a sua probabilidade de ocorrência e quanto à magnitude das possíveis doses de radiação.

No que diz respeito à segurança pós-encerramento, a gama esperada de possíveis eventos que podem afetar o sistema de deposição geológica e a baixa probabilidade dos eventos que podem afetar seu desempenho devem ser considerados e incluídos no relatório de análise de segurança, apoiado principalmente por: (a) evidências dos eventos, fatos e processos relevantes (FEP's) que possam afetar a segurança do sistema de deposição e que devem ser suficientemente conhecidos e entendidos; (b) demons-

tração da viabilidade da implementação do projeto; (c) estimativas convincentes sobre o desempenho da área geológica, do sistema de deposição e um nível razoável de garantia de que todos os requisitos de segurança serão cumpridos e que a proteção contra radiações ionizantes foi otimizada; (d) identificação e apresentação de uma análise das incertezas associadas; (e) - apresentação de múltiplas linhas de raciocínio com base, por exemplo, em estudos de análogos naturais e paleo-hidrogeológicos, estudos de qualidade do sítio, as propriedades da rocha hospedeira, considerações de engenharia, procedimentos operacionais e garantias institucionais adequadas.

Deve ser incluído no relatório um programa de garantia da qualidade para todas as etapas do empreendimento. Este tópico será discutido em detalhes no próximo item.

O relatório de análise de segurança deve ser bem documentado e claro, e em nível de detalhe e qualidade suficientes para apoiar as decisões a serem tomadas em cada etapa e para permitir sua revisão independente.

O escopo e a estrutura necessária do relatório de análise de segurança a ser apresentado devem levar em consideração as diferentes partes interessadas. As considerações importantes são a justificação, a rastreabilidade e a clareza do documento.

A justificação deve explicar a base das escolhas que foram feitas, hipóteses, argumentos a favor e contra as decisões, especialmente aquelas decisões relativas aos principais argumentos de segurança.

Rastreabilidade refere-se à capacidade de uma pessoa qualificada, independente de acompanhar o que foi feito. Boa rastreabilidade é essencial para permitir a revisão técnica e regulatória.

A justificação e a rastreabilidade exigem um registro bem documentado das decisões tomadas e os pressupostos considerados no desenvolvimento e operação da instalação e dos modelos e dados utilizados para chegar a um determinado conjunto de resultados para a análise de segurança.

A clareza do documento também é importante e refere-se a uma boa estrutura e apresentação em

um nível apropriado de todos os detalhes importantes para facilitar a compreensão dos argumentos de segurança. Assim, exige-se que as informações sejam apresentadas nos documentos de tal forma que as partes interessadas possam obter uma boa compreensão dos argumentos de segurança e da base de segurança utilizada. Diferentes estilos e níveis de documentação podem ser necessários de maneira a fornecer material compreensível que seja útil para as diferentes partes envolvidas.

4.2.2.4 Requisitos Relativos à Documentação do Caso de Segurança

O caso de segurança e as análises de segurança de apoio devem ser documentadas com nível de detalhe e qualidade suficientes para apoiar as decisões a serem tomadas em cada etapa e para permitir sua revisão independente.

O caso de segurança e suas análises de segurança de apoio dependerão da etapa alcançada no projeto para a instalação da deposição geológica e dos requisitos estabelecidos pela autoridade reguladora. Isso inclui levar em consideração as necessidades das diferentes partes interessadas por cada tipo de informação. As considerações mais importantes de serem levadas em consideração, como apresentado anteriormente, são a justificação, a rastreabilidade e clareza da análise de segurança.

4.2.3 Etapas de Desenvolvimento, Operação e Encerramento de Instalações de Deposição Geológica

4.2.3.1 Requisitos para a Caracterização do Sítio

O local para uma instalação de deposição geológica deve ser caracterizado a um nível de detalhe suficiente para apoiar tanto uma compreensão geral das características do sítio, incluindo sua evolução passada e esperada (futura) durante o período de interesse e uma boa compreensão do impacto na segurança dos fatos, eventos e processos associados ao sítio, aos rejeitos radioativos e às instalações, bem como a questão dos recursos financeiros.

Uma compreensão geral do sítio e de sua geologia associada são necessárias para apresentar

uma descrição científica convincente do sistema de deposição geológica, bem como as descrições conceituais utilizadas em que foram embasadas as análises de segurança.

O foco deve estar nos fatos, eventos, processos e recursos financeiros relacionados ao sítio, os quais possam ter um impacto na segurança e que foram abordados no caso de segurança, bem como nas análises de segurança de suporte. Particularmente, isso inclui demonstrar uma estabilidade geológica suficiente, de maneira que os fatos, eventos e processos associados ao sistema de deposição não prejudiquem a segurança.

A caracterização dos aspectos geológicos inclui atividades que integram a investigação de: (1) estabilidade de longo prazo, falhas e a extensão da rocha hospedeira, nível de fraturas; (2) sismicidade; (3) vulcanismo; (4) confirmação do volume de rocha adequado para a construção de zonas de deposição dos rejeitos; (5) parâmetros geotécnicos relevantes para o projeto, regimes de fluxo de águas subterrâneas; (7) condições geoquímicas; (8) mineralogia; e (9) características térmicas das rochas.

A caracterização do sítio deve ser realizada de forma iterativa e é guiada pelo caso de segurança (safety case). Além disso, a investigação, por exemplo, da radiação natural de fundo e o conteúdo de radionuclídeos no solo, nas águas subterrâneas e outros meios podem contribuir para uma melhor compreensão das características do sítio de deposição geológica e pode auxiliar na avaliação de impactos radiológicos no meio ambiente, fornecendo uma referência para futuras comparações.

4.2.3.2 Requisitos para o Projeto da Instalação de Deposição Geológica

A instalação de deposição geológica e suas barreiras de engenharia devem ser projetadas para conter os rejeitos e minimizar os riscos, de maneira a ser fisicamente e quimicamente compatível com o ambiente geológico e para fornecer ao pós-encerramento as características de segurança do meio ambiente que complementem as oferecidas pelo hospedeiro geológico.

A instalação e as barreiras existentes devem ser projetadas para garantir a segurança durante o período operacional.

Os projetos das instalações de deposição geológica podem variar muito, dependendo dos tipos de rejeitos a serem depositados e do ambiente geológico. Em geral, o objetivo é fazer o melhor uso das características de segurança oferecidas pelo hospedeiro geológico, criando uma instalação de deposição geológica que não apresente distúrbios a longo prazo inaceitáveis para o sítio, que as barreiras de engenharia executem funções de segurança que complementem a barreira natural, isto é, com o objetivo de, por exemplo, garantir que os materiais fisséis permaneçam em uma configuração subcrítica.

Os materiais utilizados nas instalações devem ser resistentes à degradação (por exemplo, em termos de química e temperatura) e também serem selecionados para não interferir nas funções de segurança de qualquer elemento do sistema de deposição geológica.

Estudos das formas pelas quais materiais naturais análogos ou como artefatos antigos e construções humanas se comportam ao longo do tempo podem contribuir para aumentar a confiança da análise de segurança e do desempenho do sistema no longo prazo.

A demonstração da viabilidade das barreiras projetadas e do sistema de contenção dos rejeitos, utilizando-se, por exemplo, de laboratórios subterrâneos, são importantes para gerar confiança de que um nível adequado de desempenho pode ser alcançado.

4.2.3.3 Requisitos para a Construção de Instalações de Deposição Geológica

Uma instalação de deposição geológica deve ser construída de acordo com o projeto descrito no caso de segurança aprovado, de forma a preservar as funções de segurança da barreira geológica pós-encerramento que se mostraram importantes no caso de segurança. A construção deve garantir a segurança durante o período de funcionamento do depósito.

A construção de uma instalação de deposição geológica é um empreendimento complexo e está limitada pelas condições da rocha hospedeira, bem como das técnicas que estão disponíveis para escavações subterrâneas.

A construção não deve começar até que um nível adequado de caracterização do local tenha sido completado. As atividades de escavação e construção devem ser realizadas de tal forma a evitar perturbações desnecessárias no ambiente geológico.

A construção de uma instalação de deposição geológica pode continuar após o início da operação de parte da instalação e colocação de parte dos rejeitos radioativos. Tais construções, sobreposições e atividades operacionais adicionais devem ser planejadas e executadas de forma a garantir a segurança, inclusive no pós-encerramento.

4.2.3.4 Requisitos para a Operação de Instalações de Deposição Geológica

Uma instalação de deposição geológica deve ser operada de acordo com as condições estabelecidas na licença, conforme os requisitos regulamentares relevantes estabelecidos pela autoridade reguladora, de modo a manter a segurança durante todo o período operacional e preservar as funções de segurança assumidas para o pós-encerramento.

Todas as operações e atividades importantes para a segurança estão sujeitas aos critérios estabelecidos nos documentos de segurança, incluindo os relacionados ao controle estabelecido nos procedimentos operacionais, e documentados no plano de emergência.

O caso de segurança aborda e justifica tanto os arranjos de projeto quanto de gestão operacional que são utilizados para garantir que os objetivos e critérios de segurança estabelecidos pela autoridade regulatória sejam atendidos.

Outros critérios específicos relacionados com a instalação podem ser estabelecidos pelo órgão regulador ou pelo operador. O caso de segurança também inclui considerações quanto a reduzir os riscos para os trabalhadores e para os indivíduos do público

em condições normais e em situações operacionais anormais. O controle ativo da segurança deve ser mantido antes da selagem, e isso pode incluir um período de extensão após a colocação dos rejeitos e antes do encerramento final das operações.

O material fissil deve ser gerenciado e colocado na instalação de deposição geológica em uma configuração que permanecerá subcrítica. Isto pode ser conseguido por vários meios, incluindo a distribuição adequada de material fissil durante o acondicionamento dos mesmos e com base nos embalados existentes. Avaliações do risco da possível evolução de criticalidade nuclear, após a colocação de rejeitos, devem ser feitas inclusive no período pós-encerramento.

4.2.3.5 Requisitos para o Encerramento da Instalação de Deposição Geológica

Uma instalação de deposição geológica deve ser fechada de forma que permaneça segura pelo tempo que se fizer necessário.

As funções mostradas pelo caso de segurança são importantes para o período pós-encerramento.

A instalação deve possuir um plano de encerramento aprovado pela autoridade competente. A transição de ativos da instalação, por exemplo, deve ser bem definida e praticável, de modo que o encerramento possa ser realizado com segurança no momento apropriado, sem perda de informações importantes para a manutenção da segurança a longo prazo.

A segurança pós-encerramento de uma instalação de deposição geológica depende de inúmeras atividades, que podem incluir o preenchimento e selagem da instalação de deposição geológica.

O encerramento deve ser considerado no projeto inicial da instalação e os planos para tal, bem como os projetos de vedação devem ser atualizados de acordo com o desenvolvimento da execução do projeto da instalação.

É importante que, antes do início da construção, haja evidências suficientes de que o desempenho do preenchimento e a selagem sejam eficazes.

A instalação de deposição geológica será encerrada de acordo com as condições estabelecidas para o encerramento pelo órgão regulador da licença de instalação, com consideração particular dada a qualquer mudança de responsabilidade que possa ocorrer nesta fase. Consistente com isso, o preenchimento pode ser realizado em paralelo com as operações de deposição dos rejeitos. A colocação de selos pode ser adiada por um período após a conclusão da deposição dos rejeitos, por exemplo, para permitir monitoramento para avaliar aspectos relacionados à segurança pós-encerramento ou por razões relacionadas à aceitação pública.

Se os selos não forem colocados após um período de tempo da conclusão da deposição dos rejeitos, as implicações para a segurança operacional e pós-encerramento deve ser consideradas no relatório de análise de segurança.

O operador deve garantir que todos os recursos técnicos e financeiros necessários para se fazer o encerramento estejam disponíveis e garantidos. Esses arranjos financeiros e técnicos e quaisquer alterações relacionadas a eles estão sujeitos à aprovação do órgão regulador governamental.

4.2.4 Garantia de Segurança

4.2.4.1 Requisitos para a Aceitação dos Rejeitos

Pacotes de rejeitos e rejeitos não embalados aceitos para deposição geológica devem obedecer a critérios consistentes com o caso de segurança nos aspectos de segurança operacional e pós-encerramento da instalação de deposição geológica.

Os requisitos e critérios de aceitação de rejeitos são desenvolvidos pelo operador e aprovado pelo órgão regulador.

Esses requisitos devem garantir o manuseio seguro dos embalados de rejeitos e rejeitos não embalados em condições normais e em condições anormais.

As formas e as embalagens dos rejeitos devem possuir características de segurança de longo prazo.

Os critérios de aceitação de rejeitos especificam claramente as características necessárias dos

embalados dos rejeitos e dos rejeitos porventura não embalados a serem depositados, tais como o conteúdo de radionuclídeos ou limites de atividade, a produção de calor, bem como as propriedades da forma de rejeitos que são aceitas e das embalagens.

A modelagem e/ou o teste do comportamento da forma de rejeitos são realizados para assegurar a estabilidade física e química dos diferentes embalados de rejeitos e dos resíduos não embalados nas condições esperadas nas instalações de deposição geológica, e para garantir o seu desempenho adequado em caso de acidentes ou em condições anormais.

Os rejeitos destinados à deposição geológica devem ser caracterizados de maneira a fornecer informações suficientes para assegurar o cumprimento dos critérios de aceitação de rejeitos. Devem ser criados arranjos para verificar se as embalagens contendo os rejeitos, bem como aquelas utilizadas para os rejeitos recebidos para deposição estão em conformidade com os critérios pré-estabelecidos, e se não estiverem, para confirmar as medidas de correção pré-estabelecidas pelo operador para esses casos.

O controle de qualidade dos embalados de rejeitos é feito, principalmente, com base em registros, testes de pré-acondicionamento (por exemplo, de recipientes) e controle do processo de acondicionamento. Testes pós-acondicionamento e a consequente necessidade de correção, porventura existente, devem ser limitados ao máximo possível.

4.2.4.2 Requisitos Relativos aos Programas de Monitoração

Um programa de monitoração deve ser definido e realizado antes e durante a construção e operação de uma instalação de deposição geológica. Este programa deve ser projetado para coletar, atualizar e confirmar as informações necessárias para a segurança dos trabalhadores e dos indivíduos do público e a proteção do meio ambiente durante a operação da instalação, e para confirmar a ausência de quaisquer condições que possam reduzir o nível de segurança pós-encerramento da instalação.

A monitoração é realizada durante cada etapa do desenvolvimento e operação da instalação de de-

posição geológica. Seus objetivos incluem a elaboração de um programa de monitoração, de maneira a fornecer informações básicas para uma posterior análise de segurança operacional, bem como da operacionalidade da instalação, além de confirmar que as condições existentes são consistentes com os critérios de segurança pós-encerramento.

Os programas de monitoração são elaborados e implementados de maneira a não reduzir o nível geral de segurança pós-encerramento da instalação.

Uma discussão sobre a monitoração, relacionada à segurança pós-encerramento de instalações de deposição geológica é apresentada pela IAEA (2001).

Com o objetivo de garantir a segurança pós-encerramento, o plano de monitoração deve ser elaborado antes da construção da instalação de deposição geológica para indicar as estratégias necessárias, mas deve ser flexível, já que pode ser necessária uma revisão e atualização durante o desenvolvimento e operação da instalação.

4.2.4.3 Requisitos Relativos aos Controles Pós-encerramento e Institucional

Planos devem ser preparados para o período pós-encerramento e para abordar a questão do controle institucional e os arranjos feitos para manter a disponibilidade das informações sobre a instalação de deposição geológica no futuro. Esses planos devem ser consistentes com a segurança passiva e devem fazer parte do caso de segurança com base no qual a autorização para encerramento da instalação é concedida.

As instalações de deposição geológica não podem depender do controle institucional a longo prazo, sendo controle institucional uma função de segurança passiva. Mesmo assim, os controles institucionais podem contribuir para a segurança, prevenindo ou reduzindo a probabilidade de ações humanas que possam inadvertidamente interferir com os rejeitos, ou degradar as características de segurança do sistema de deposição geológica.

Os controles institucionais também podem contribuir para aumentar a aceitabilidade social da deposição geológica.

As instalações de deposição geológica não são susceptíveis de serem fechadas por várias dezenas de anos após o início das operações. Assim, planos elaborados para identificar os controles possíveis de acesso e o período durante o qual eles seriam aplicados devem permanecer flexíveis conceitualmente, permitindo ajustes se necessário.

Deve ser levado em consideração no controle institucional: (A) controle do uso local da terra; (B) estabelecimento de restrições de determinados locais ou vigilância e monitoração dos mesmos quando necessários; (C) manutenção de registros locais, nacional e até mesmo internacionais sobre o sistema de deposição geológica; e (D) utilização de marcadores duráveis na superfície, identificando os locais importantes para a segurança.

Devem ser feitos arranjos para poder transmitir informações sobre a instalação de deposição geológica para as gerações futuras, para que possam tomar quaisquer decisões sobre a instalação de deposição geológica e sua segurança.

4.2.5 Requisitos Relativos à Proteção Física e Salvaguardas Nucleares

Os requisitos de salvaguardas nucleares devem ser considerados na concepção e na operação de uma instalação de deposição geológica e devem ser implementados de forma a não comprometer a segurança dessa instalação.

As salvaguardas nucleares foram desenvolvidas principalmente para o estabelecimento de controles, no sentido de detectar o desvio de material nuclear para fins não autorizados ou fins desconhecidos no curto e médio prazo, bem como para responsabilização de indivíduos por quaisquer desses desvios.

Como organizado atualmente, as salvaguardas nucleares compreendem vigilância e controles ativos. Durante a operação de uma instalação de deposição geológica, a vigilância das salvaguardas visa garantir a continuidade do conhecimento sobre onde estão todos os materiais nucleares presentes na instalação.

Para alguns rejeitos radioativos, como o combustível nuclear usado, certos requisitos de salvaguardas devem continuar mesmo após os rejeitos terem sido selados em uma instalação de deposição geológica.

Para uma instalação de deposição geológica fechada, as salvaguardas nucleares podem, na prática, serem alcançadas por meios remotos (por exemplo, monitoramento por satélite, câmaras), e arranjos administrativos.

Intrusões (propositais e inadvertidas) que podem comprometer a segurança pós-encerramento do sistema de deposição geológica devem ser evitadas. Uma vez que as salvaguardas nucleares são, em alguns casos, internacionalmente supervisionadas, sua continuidade pode aumentar a confiança na longevidade dos controles administrativos, o que também evitaria intrusões inadvertidas na instalação da deposição geológica. A continuidade das salvaguardas e a monitoração após o encerramento podem, portanto, ser benéfica para melhorar a confiança no pós-encerramento. Uma discussão sobre questões de interface entre salvaguardas nucleares e a gestão de rejeitos radioativos pode ser vista em IAEA (1988).

4.2.6 Requisitos Relativos aos Sistemas de Gestão da Qualidade

Os sistemas de gestão para fornecerem garantia da qualidade (QA) devem ser aplicados a todas as atividades de segurança, sistemas e componentes relacionados em todas as etapas do desenvolvimento e operação de uma instalação de deposição geológica. O nível de garantia da qualidade para cada aspecto deve ser proporcional a sua importância para a segurança. (IOS 1996; 2000).

Um sistema de gestão adequado, incluindo um programa de QA, contribui para a confiança de que os requisitos e critérios relevantes para a caracterização, construção, operação, encerramento e pós-encerramento do sítio estão sendo feitos em segurança.

As atividades, sistemas e componentes relevantes são identificados com base nos resultados das análises sistemáticas de segurança. O nível de atenção atribuído para cada aspecto deve ser proporcional a sua importância para a segurança.

A gerência do sistema de qualidade da instalação (do sistema de deposição) deve cumprir com os padrões da IAEA, estabelecidos para sistemas de gestão e com outros códigos, regulamentos e normas reconhecidas, conforme IAEA (1996; 2000) e ASME (1997).

O sistema de gestão define a estrutura organizacional para implementação das atividades de controle da qualidade. Também define as responsabilidades e autoridades dos vários funcionários e organizações envolvidas na concepção da instalação, implementando e auditando as atividades de controle de qualidade.

Devido à natureza das instalações de deposição geológica, a gestão do sistema de qualidade para este tipo de instalação deve ter um programa integrado de QA, concebido, levando em conta o tipo de formação geológica da rocha hospedeira enquanto um elemento importante para a segurança, já que não pode ser projetado ou fabricado, mas apenas caracterizado, e isso também apenas em uma extensão limitada. Além disso, a deposição geológica envolve várias etapas sequenciais do projeto, caracterização e avaliação, com um grau crescente de precisão e detalhe. Um grau de incerteza sempre pode permanecer e pode não ser possível eliminá-lo pelo uso de qualquer medida de QA. O significado desta incerteza é avaliado no relatório de análise de segurança.

O sistema de gestão e o programa de QA de apoio para a instalação de deposição geológica devem: (1) prever a produção e retenção de evidências documentais para ilustrar que a qualidade de dados necessária para a análise de segurança foi alcançada; (2) garantir que os componentes tenham sido fornecidos e usados de acordo com as especificações técnicas relevantes; e (3) garantir que as embalagens de rejeitos e os rejeitos não embalados cumprem com os requisitos e critérios pré-estabelecidos pela autoridade regulatória e que foram devidamente colocados na instalação de deposição geológica.

O sistema de qualidade também deve garantir que todas as informações registradas durante todas as etapas importantes para a segurança do desenvolvimento, construção e operação da instalação e a reavaliação das mesmas no futuro, foram coletadas e preservadas.

5 Conclusões

No Brasil, embora existam:

- O regulamento CNEN-NE-6:06 (CNEN, 1990), que aborda alguns critérios quanto à seleção de locais para depósitos próximos à superfície referentes aos rejeitos radioativos de baixo nível de radiação;
- A Lei brasileira sobre Rejeitos (Lei 10.308, de 2001), que versa sobre a instalação e operação de depósitos iniciais, depósitos intermediários e depósitos finais como tipos de locais de rejeitos radioativos;
- A Resolução nº 8, de 2002, que estabelece as condições para a retomada do empreendimento de Angra III, onde deverão ser iniciados, de imediato, os trabalhos de seleção do local para a construção do depósito definitivo para os rejeitos radioativos provenientes das três usinas nucleares de Angra dos Reis;
- A Licença Prévia (LP) da Usina de Angra III (2008), cuja condicionante nº 2.18 estabelece a necessidade de *“Apresentar proposta e iniciar a execução do projeto aprovado pelo órgão ambiental para disposição final dos rejeitos radioativos de alta atividade antes do início da operação da Unidade 3”*;
- A Licença de Instalação da Usina de Angra 3 (2009), cuja condicionante nº 2.20 determina *“Apresentar em 180 dias cronograma técnico-financeiro e de execução conforme estrutura analítica de Projeto RAN - Depósito Rejeitos de Longo Prazo dos combustíveis usados, homologado pela CNEN”*;
- O Acórdão 2587/2014, no qual o Tribunal de Contas da União (TCU) avaliou a construção, o licenciamento e a entrada em operação do Repositório Nacional de Rejeitos Radioativos de Baixo e Médio Níveis de Radiação (RBMN) realizados pela CNEN. O TCU havia identificado que a capacidade de armazenamento dos depósitos de rejeitos radioativos da Eletronuclear estaria esgotada em 2020. A solução definida foi a cons-

trução desse RBMN, com investimentos de R\$ 260 milhões, para onde o material atualmente armazenado na Eletronuclear deverá ser transferido, a fim de abrir espaço para a guarda de novos rejeitos a serem gerados pelas usinas de Angra 1 e Angra 2. Segundo o tribunal, se o esgotamento da capacidade da Eletronuclear ocorrer antes da entrada em operação do RBMN, poderá haver a interrupção da operação das usinas Angra 1 e Angra 2, o que acarretaria elevados prejuízos financeiros e significativos impactos para o suprimento de energia elétrica no Sistema Interligado Nacional (SIN).

Ainda assim, vale ressaltar que, até o momento, a CNEN não possui uma norma padrão relacionada à seleção de locais para depósitos geológicos, particularmente visando a deposição de rejeitos radioativos de alto nível de radiação. Torna-se igualmente importante também considerar que trabalhos visando a seleção de sítios e o seu licenciamento, construção e operação podem levar entre 30 a 40 anos aproximadamente, situação que evidencia, no caso brasileiro, a total defasagem em comparação aos outros países em relação a este tema e suas preocupações, sobretudo se levarmos em conta que a vida útil das usinas nucleares de Angra I e II deve ter o mesmo número de anos necessários para a seleção do local e instalação de repositórios definitivos.

O presente estudo permitiu fazer a análise desses aspectos importantes relacionados à construção de depósitos geológicos, os quais deverão ser levados em consideração pela CNEN, com o fortalecimento de sua área de rejeitos radioativos, bem como a elaboração de normas indispensáveis para a seleção do local, construção, operação, encerramento e licenciamento de depósitos geológicos, visando a correta deposição dos rejeitos de alto nível de radiação produzidos pelas usinas nucleares brasileiras, de acordo com as recomendações internacionais.

A deposição em repositórios geológicos é a solução geralmente aceita para o gerenciamento de rejeitos radioativos de alto nível em praticamente todos os países que enfrentam o problema, representando a opção mais prática, talvez a única, estando

alinhada com os princípios gerais definidos nos Princípios de Segurança da IAEA e com o princípio da sustentabilidade.

A deposição em formações geológicas tem sido, em particular, defendida como uma solução de gestão a longo prazo para rejeitos de alto e intermediário níveis de radiação. Estudos de viabilidade, de casos de segurança específicos do local e de experiência operacional geralmente reforçaram a confiança na segurança da deposição geológica. A decisão de adotar essa opção em um estado, em particular, é uma questão para os tomadores de decisão nacionais, levando em conta fatores econômicos, sociais, políticos, bem como necessidades e requisitos de gerenciamento dos rejeitos radioativos gerados no país.

De uma maneira genérica, pode-se afirmar com segurança que a deposição geológica profunda é tecnicamente viável e não apresenta problema algum de engenharia de rochas particularmente novo, mas é bastante custoso. A existência de numerosos locais de repositórios potencialmente adequados numa variedade de rochas hospedeiras também está bem estabelecida (IAEA, 2003).

A experiência em muitos países nos últimos 20 ou 30 anos demonstrou que condições aceitáveis podem ser encontradas em tipos de rochas tão diversos como granitos, rochas metamórficas (granitóides, granulitos, gnaisses e migmatitos; exceto quartzitos e mármore [Martins, 2009]), argilas plásticas, argilas mais endurecidas, evaporitos com leito, cúpulas salinas e tufos vulcânicos porosos, tufos vulcânicos altamente compactados e várias formações sedimentares ou vulcânicas bem litificadas (IAEA, 1997), sendo o granito considerado o mais amplamente possível para fins de disposição de rejeitos radioativos (IAEA, 1977).

Para o caso brasileiro, os maciços pouco fraturados de rochas cristalinas (preferencialmente alcalinas, graníticas e básicas) constituem os ambientes com grande potencial para a localização de repositórios geológicos. Dada as condições atuais dos rejeitos radioativos produzidos pelo Complexo Nuclear de Angra dos Reis estarem temporariamente armazenados dentro de seu parque industrial, reque-

rendo a deposição em local definitivo, o estudo das formações geológicas, sobretudo no estado do Rio de Janeiro, torna-se extremamente importante, motivando a elaboração de trabalhos posteriores sobre o tema.

6 Agradecimentos

Agradecemos aos revisores e editores pelas contribuições e enriquecimentos visando a melhoria do artigo. À FAPERJ, CAPES, CNPq e CNEN, pelo fomento ao conjunto de pesquisas desenvolvidas pelos autores, bem como à Faculdade de Geologia da Universidade do Estado do Rio de Janeiro, que nos permitiu o desenvolvimento de pesquisas associadas.

7 Referências

- Apted, M.J. & Ahn, J. (Eds.). 2010. *Geological Repository Systems for Safe Disposal of Spent Nuclear Fuels and Radioactive Waste*. 1st Edition. Woodhead Publishing, 792p.
- Apted, M.J. & Ahn, J. (Eds.). 2017. *Geological Repository Systems for Safe Disposal of Spent Nuclear Fuels and Radioactive Waste*. 2nd Edition. Woodhead Publishing, 802p.
- ASME. 1997. American Society of Mechanical Engineers. *Quality Assurance Program for Nuclear Facilities*. Report ASME NQA-1-1997.
- Bredehoeft, J.D.; England, A.W.; Stewart, D.B.; Trask, N.J. & Winograd, I.J. 1978. Geologic Disposal of High-Level Radioactive Wastes - Earth-Science Perspectives. *U.S. Geological Survey Circular*, 779: 1-15.
- Chapman, N. 2006. Geological disposal of radioactive wastes - concept, status and trends. *Journal of Iberian Geology*, 32(1): 7-14.
- CNEN. 1990. Comissão Nacional de Energia Nuclear. *Norma CNEN NE 6.06. Seleção e Escolha de Locais para Depósitos de Rejeitos Radioativos*. Resolução CNEN 014/89.
- CNEN. 2014. Comissão Nacional de Energia Nuclear. *Norma CNEN NN 8.02. Licenciamento de Depósitos de Rejeitos Radioativos de Baixo e Médio Níveis de Radiação*. Resolução CNEN 168/14.
- CNSC. 2018. Canadian Nuclear Safety Commission. *Deep Geological Repositories*. Available in: <http://www.nuclearsafety.gc.ca/eng/waste/deep-geological-repositories>. cfm. Acesso: 18/09/2018.
- CoRWM. 2006. Committee on Radioactive Waste Management Recommendations to Government. *Managing our Radioactive Waste Safely*. CoRWN Doc 700, 195p.
- DECC. 2014. Department of Energy & Climate Change of the United Kingdom. *Implementing Geological Disposal*, 55p.
- Enokihara, C.T. 1983. *Armazenamento de rejeitos radioativos no Brasil com ênfase especial em rochas*. IPEN/USP,

Deposição Geológica de Rejeitos Radioativos: Formações Geológicas e Diretrizes no Contexto do Programa Nuclear Brasileiro

Paulo Fernando Lavalle Heilbron Filho; Corbiniano Silva; Rex Nazaré Alves;

Jesus Salvador Pérez Guerrero; Ana Maria Xavier; Monica da Costa Pereira Lavalle Heilbron & Claudio de Morisson Valeriano

- Dissertação de Mestrado, 196p.
- ENSI. 2018. Swiss Federal Nuclear Safety Inspectorate. *Waste Management*. Available in: <https://www.ensi.ch/en/topic/waste-management/>. Acesso: 18/09/2018.
- EPRI. 2010. Electric Power Research Institute. *EPRI Review of Geologic Disposal for Used Fuel and High Level Radioactive Waste: Volume I - The U.S. Site Selection Process Prior to the Nuclear Waste Policy Amendments Act*. 88p.
- Ewing, R.C. & von Hippel, F.N. 2009. Nuclear waste management in the United States - starting over. *Science*, 325(5937): 151-152.
- Ewing, R.C.; Whittleston, R.A. & Yardley, B.W.D. 2016. Geological disposal of nuclear waste: A primer. *Elements*, 12(4): 233-237.
- Heilbron Filho, P.F.L. 2004. *Safety Assessment Methodologies for Near surface Disposal Facilities*. IAEA, 1ª ed., 743p.
- Heilbron Filho, P.F.L., Perez Guerrero, J.S., Heilbron, M.C.P.L.; Valeriano, C.M. & Silva, C. 2016. Radioactive Waste Management in Brazil Including Spent Fuel. In: FAY-BISHENKO, B., BIRKHOLZER, J., SASSANI, D., & SWIFT, P. (Eds.). *International Approaches for Nuclear Waste Disposal in Geological Formations: Geological Challenges in Radioactive Waste Isolation - Fifth Worldwide Review*. Berkeley, CA, Lawrence Berkeley National Laboratory, Report LBNL-1006984, p. 35-60.
- Heilbron Filho, P.F.L.; Silva, C.; Alves, R.N.; Xavier, A.M.; Heilbron, M.C.P.L. & Valeriano, C.M. 2018. Disposição geológica de rejeitos radioativos no Brasil: diretrizes no contexto da proteção radiológica, requisitos e avaliação de segurança. *Terrae Didactica*, 14(3): 196-206.
- IAEA. 1977. International Atomic Energy Agency. *Site selection factors for repositories of solid high level and alpha bearing wastes in geological formations*. IAEA Technical Reports Series N° 177, 76p.
- IAEA. 1980. International Atomic Energy Agency. *Site Investigations for Repositories for Solid Radioactive Wastes in Deep Continental Geological Formations*. IAEA Technical Reports Series N° 215, 127p.
- IAEA. 1981. International Atomic Energy Agency. *Underground Disposal of Radioactive Waste: Basic Guidance*. IAEA Safety Series N° 54, 68p.
- IAEA. 1982. International Atomic Energy Agency. *Site Investigations for Repositories for Solid Radioactive Wastes in Deep Continental Geological Formations*. IAEA Technical Reports Series N° 215, 127p.
- IAEA. 1983. International Atomic Energy Agency. *Criteria for Underground Disposal of Solid Radioactive Wastes*. IAEA Safety Series N° 60, 60p.
- IAEA. 1985. International Atomic Energy Agency. *Acceptance Criteria for Disposal of Radioactive Wastes in Shallow Ground and Rock Cavities*. IAEA Safety Series N° 71, 52p.
- IAEA. 1987. International Atomic Energy Agency. *In Situ Experiments for Disposal of Radioactive Wastes in Deep Geological Formations*. IAEA TECDOC N° 446, 116p.
- IAEA. 1988. International Atomic Energy Agency. *Safeguards Related to Final Disposal of Nuclear Material in Waste and Spent Fuel (AGM-660) (Proc. Advisory Group Meeting Vienna, 1988)*. Report STR-243.
- IAEA. 1989. International Atomic Energy Agency. *Safety Principles and Technical Criteria for the Underground Disposal of High Level Radioactive Wastes*. IAEA Safety Series N° 99, 40p.
- IAEA. 1990. International Atomic Energy Agency. *Qualitative acceptance criteria for radioactive wastes to be disposed of in deep geological formations*. IAEA TECDOC N° 560, 44p.
- IAEA. International Atomic Energy Agency. 1994. *Siting of Geological Disposal Facilities: a safety guide*. IAEA Safety Series N° 111-G-4.1, 48p.
- IAEA. 1995. International Atomic Energy Agency. *Principles of Radioactive Waste Management: Safety Fundamentals*. IAEA Safety Series N° 111-S-F, 24p.
- IAEA. 1996. International Atomic Energy Agency. *Issues in Radioactive Waste Disposal: Second Report of the Working Group on Principles and Criteria for Radioactive Waste Disposal*. IAEA-TECDOC N° 909, 42p.
- IAEA. 1997. International Atomic Energy Agency. *Experience in Selection and Characterization of Sites for Geological Disposal of Radioactive Waste*. IAEA-TECDOC N° 991, 124p.
- IAEA. 2000. International Atomic Energy Agency. *Monitoring of geological repositories for high-level radioactive waste*. IAEA-TECDOC N° 1208, 32p.
- IAEA. 2001. International Atomic Energy Agency. *The Use of Scientific and Technical Results from Underground Research Laboratory Investigations for the Geological Disposal of Radioactive Waste*. IAEA-TECDOC N° 1243, 74p.
- IAEA. 2003. International Atomic Energy Agency. *Scientific and technical basis for geological disposal of radioactive wastes*. IAEA-Technical reports series N° 413, 90p.
- IAEA. 2006. International Atomic Energy Agency. *Geological Disposal of Radioactive Waste: Safety Requirements*. IAEA Safety Standards Series N° WS-R-4, 49p.
- IAEA. 2009. International Atomic Energy Agency. *Classification of Radioactive Waste - General Safety Guide*. Vienna, IAEA Safety Standards Series N° GSG-1, 48p.
- IAEA. 2011a. International Atomic Energy Agency. *Disposal of Radioactive Waste. Specific Safety Requirements*. IAEA Safety Standards Series N° SSR-5, 83p.
- IAEA. 2011b. International Atomic Energy Agency. *Geological Disposal Facilities for Radioactive Waste. Specific Safety Guide*. IAEA Safety Standards Series N° SSG-14, 124p.
- IOS. 1996. International Organization for Standardization. *Environmental Management Systems - Specification with Guidance for Use: ISO 14001*. 1st Edition. Technical Committee: ISO/TC 207/SC 1 Environmental management systems.
- IOS. 2000. International Organization for Standardization. *ISO 9001:2000: Quality management systems - Requirements*. 3rd Edition. Technical Committee: ISO/TC 176/SC 2 Quality systems.
- Krauskopf, K.B. 1988. Geology of high-level nuclear waste disposal. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 16(1): 173-200.
- Martins, V.B. 2009. *Metodologia Baseada em Sistemas de Informação Geográfica e Análise Multicritério para a Seleção de Áreas para a Construção de um Repositório para o Combustível Nuclear Usado*. Programa de Engenharia Nuclear, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Tese de Doutorado, 137p.
- Metlay, D.S. 2016. Selecting a site for a radioactive waste repos-

Deposição Geológica de Rejeitos Radioativos: Formações Geológicas e Diretrizes no Contexto do Programa Nuclear Brasileiro

Paulo Fernando Lavalle Heilbron Filho; Corbiniano Silva; Rex Nazaré Alves;

Jesus Salvador Pérez Guerrero; Ana Maria Xavier; Monica da Costa Pereira Lavalle Heilbron & Claudio de Morisson Valeriano

- ity: a historical analysis. *Elements*, 12: 269-274.
- NAS–NRC. 1957. National Academy of Sciences - National Research Council. *Disposal of Radioactive Waste on Land*. National Academies Press, Washington, DC, 142 p.
- NAS–NRC. 1978. *Geological Criteria for Repositories of High-Level Radioactive Waste*. National Academy of Sciences - National Research Council. National Academies Press, Washington, DC, 19p.
- NAS–NRC. 1983. National Academy of Sciences–National Research Council report. *A Study of the Isolation System for Geologic Disposal of Radioactive Wastes*. National Academies Press, Washington, DC, 345p.
- NDA. 2017. Nuclear Decommissioning Authority. *Geological Disposal - Overview of international siting processes 2017*. Radioactive Waste Management. Report n° NDA/RWM/157, 90p.
- NEA. 1991. *Can Long-Term Safety Be Evaluated?* Paris: NEA.
- NRC. 1990. *Rethinking High-Level Radioactive Waste Disposal: A Position Statement of the Board on Radioactive Waste Management*. Washington, D.C.: National Academy Press.
- NRC. 1999. National Research Council. *Disposition of High-Level Radioactive Waste Through Geological Isolation: Development, Current Status, and Technical and Policy Challenges*. Washington, DC: The National Academies Press. <https://doi.org/10.17226/9674>, 44 p.
- NUMO. 2015. Nuclear Waste Management Organization of Japan. *Radioactive waste for geological disposal*. Available in: https://www.numo.or.jp/en/jigyuu/new_eng_tab04.html. Acesso: 18/09/2018.
- Nuclear Waste Technical Review Board. 2015. *Designing a Process for Selecting a Site for a Deep-Mined, Geologic Repository for High-Level Radioactive Waste and Spent Nuclear Fuel: Overview and Summary*. US Nuclear Waste Technical Review Board, 275 p.
- NWMO. 2016. Nuclear Waste Management Organization. *Deep Geological Repository Conceptual Design Report Crystalline / Sedimentary Rock Environment*. APM-REP-00440-0015 R001, 191p.
- OECD-NEA. 2000a. Organization for Economic Cooperation and Development - Nuclear Energy Agency. *Features, Events and Processes (FEPs) for Geologic Disposal of Radioactive Waste - An International Database*. NEA No. 2549, 90p.
- OECD-NEA. 2000b. Organization for Economic Cooperation and Development - Nuclear Energy Agency. *Geologic Disposal of Radioactive Waste in Perspective*. NEA No. 2458, 62p.
- OECD-NEA. 2016. Organization for Economic Cooperation and Development - Nuclear Energy Agency. *National Inventories and Management Strategies for Spent Nuclear Fuel and Radioactive Waste - Methodology for Common Presentation of Data*. NEA No. 7323, 67p.
- Roxburgh, I.S. 1987. *Geology of High-Level Nuclear Waste Disposal*. Springer Science & Business Media, 229p.
- Silva, C., Heilbron, M.C.P.L. & Heilbron Filho, P.F.L. 2015. Site Selection of a Geological Repository for the Safe Disposal of High-Level Waste in the State of Rio de Janeiro. *Revista Internacional de Ciências*, 5(1): 83-105.
- Šostarić, S.B. & Neubauer, F. 2012. Principle Rock Types for Radioactive Waste Repositories. *Rudarsko-geološko-naftni Zbornik*, 24(1): 11-18.
- Yardley, B. 2014. Geological Disposal of Radioactive Waste. *Science in Parliament*, 71(4): 8-9.
- Witherspoon, P.A. & Bodvarsson, G.S. 2001. *Geological challenges in radioactive waste isolation: Third worldwide review*. Berkeley, CA: Lawrence Berkeley National Laboratory. Report Number: LBNL-49767, 347p.
- Witherspoon, P.A. & Bodvarsson, G.S. 2006. *Geological Challenges in Radioactive Waste Isolation: Fourth Worldwide Review*. Berkeley, CA, Lawrence Berkeley National Laboratory. Report Number: LBNL-59808, 295p.